



**INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS PENEDO
CURSO TÉCNICO INTEGRADO EM AÇÚCAR E ÁLCOOL**

CARLOS GABRIEL INÁCIO GUEDES SANTOS

**APROVEITAMENTO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO
DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**

**PENEDO, AL
2022**

CARLOS GABRIEL INÁCIO GUEDES SANTOS

**APROVEITAMENTO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO
DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Técnico de Nível Médio Integrado em Açúcar e Álcool do Instituto Federal de Alagoas, *campus* Penedo, como requisito parcial para a obtenção do grau de Técnico em Açúcar e Álcool.

Orientador (a): Ana Laura Oliveira de Sá Leitão.

PENEDO, AL
2022



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
Campus Penedo
Biblioteca

S237a

Santos, Carlos Gabriel Inácio Guedes.

Aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração / Carlos Gabriel Inácio Guedes Santos. – 2022.
29f. ; il.

Orientação: Prof.^a Ana Laura Oliveira de Sá Leitão.

Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico de Nível Médio Integrado em Açúcar e Álcool) – Instituto Federal de Alagoas, Campus Penedo, Penedo, 2022.

Trabalho em formato digital.

1. Etanol 2G. 2. Biocombustível. 3. Cana-de-açúcar. I. Leitão, Ana Laura Oliveira de Sá. II. Título.

CDD: 662

Maria Luzia Alexandre de Oliveira
Bibliotecária/Documentalista
CRB-4/2159

CARLOS GABRIEL INÁCIO GUEDES SANTOS

APROVEITAMENTO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO DE
ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso Técnico de Nível Médio Integrado em Açúcar e Alcool do Instituto Federal de Alagoas, campus Penedo, como requisito parcial para a obtenção do grau de Técnico em Açúcar e Alcool.

APROVADO EM: 05/04/2022.

BANCA EXAMINADORA

Ana Laura Oliveira de Sá Leitão

Prof^ª. Ana Laura Oliveira de Sá Leitão (orientadora)
Instituto Federal de Alagoas - IFAL

MSRS

Prof^ª. Martha Suzana Rodrigues dos Santos Rocha
Instituto Federal de Alagoas - IFAL

Taciana do Nascimento Santos

Prof^ª. Taciana do Nascimento Santos
Instituto Federal de Alagoas – IFAL

AGRADECIMENTO

Agradecer primeiramente a Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas e aprendizado e por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

Aos professores, por todos os conselhos, pela ajuda com a qual guiaram o meu aprendizado.

A minha orientadora, que conduziu o trabalho com paciência e dedicação, sempre disponível a compartilhar todo o seu conhecimento.

RESUMO

A indústria sucroalcooleira tem um lugar de destaque na economia do Brasil, por outro lado é responsável por gerar um grande volume de resíduos. Devido a grande quantidade de produção, tanto de açúcar como de etanol, é gerado uma elevada quantidade de bagaço, cerca de 5 a 12 milhões de toneladas por ano. Logo, é perceptível o grande interesse pela busca de alternativas para o aproveitamento desse resíduo. Nesse contexto, o etanol de segunda geração (2G) vem se mostrando uma alternativa atraente, uma vez que apresenta vantagens ambientais, por ser produzido a partir de resíduos lignocelulósicos. Desta forma, o intuito deste trabalho é apresentar, através de uma revisão bibliográfica, o potencial do bagaço da cana-de-açúcar para a obtenção do etanol 2G, descrevendo todas as etapas do processo produtivo. Para isso, foi feita uma pesquisa em sites, artigos científicos encontrados no Google Acadêmico, além de monografias, dissertações e teses.

Palavras-chave: Resíduo; Bagaço; Materiais lignocelulósicos; Bioetanol; Cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The sugar and ethanol industry has a prominent place in the Brazilian economy, because of that, Brazil is responsible for generating a large volume of waste. About 5 to 12 million tons per year of bagasse are produced due to the production of sugar and ethanol. All this may become an environmental pollutant if residues are improperly disposed of. Therefore, it is valid the effort for new alternatives of use for these residues. In this context, second-generation ethanol (2G) has proved to be an attractive alternative, since it has environmental advantages, as it is produced from lignocellulosic residues. Thus, the aim of this work is to present, through a literature review, the potential of bagasse of sugarcane to obtain 2G ethanol, describing all stages of the production process. For this, a search was made on websites, scientific articles found on Google Scholar, as well as monographs, dissertations and theses.

Keywords: Residue; biomass; lignocellulosic material; bioethanol; sugarcane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da cana-de-açúcar.....	11
Figura 2 – Estrutura da parede celular vegetal.....	13
Figura 3 - Representação esquemática da molécula de celulose.	15
Figura 4 - Estrutura da celulose.	15
Figura 5 - Ligações glicosídicas.	16
Figura 6 - Representação da estrutura da lignina.	17
Figura 7 - Fluxograma da produção do etanol de segunda geração a partir do bagaço de cana.	20
Figura 8 - Pré-tratamento de material lignocelulósico.	21

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 CANA-DE-AÇÚCAR.....	11
2.2 MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS.....	12
2.2.1 Celulose	14
2.2.2 Hemicelulose	15
2.2.3 Lignina	16
2.2.4 Bagaço de cana-de-açúcar	18
2.3 PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO (2G).....	19
2.3.1 Pré-tratamento	20
2.3.2 Hidrólise	22
2.3.3 Fermentação	23
2.3.4 Destilação	24
2.3.5 O etanol de segunda geração no Brasil	24
3 CONCLUSÃO	26
REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

Diante da escassez das reservas de combustíveis fósseis e das mudanças climáticas, uma alternativa que vem despertando grande interesse ao futuro do planeta são as fontes de energias renováveis. Dentre essas fontes de energia, pode-se destacar os biocombustíveis que surge com objetivo de substituir os combustíveis fósseis, gerando menor dependência de recursos não renováveis e contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Cerca de 82% das emissões dos gases causadores do efeito estufa são provenientes da queima de combustíveis fósseis, por isso o bioetanol vem sendo muito visado como solução para este problema global (AGUIAR, 2017; SANTOS *et al.*, 2012).

O setor sucroalcooleiro possui um expressivo número de agroindústria em todas as regiões do país possuindo uma grande relevância na economia brasileira, sendo responsável por gerar milhares de empregos e contribuir de forma significativa no Produto interno Bruto (PIB) Brasileiro (SILVA *et al.*, 2021).

Segundo Jaime Finguerut, diretor do Instituto de Tecnologia Canavieira (ITC) na abertura do workshop *Sugar & Ethanol Brazil* em 2019, afirmou que sozinho o setor sucroenergético representa 2% do PIB brasileiro, equivalente a 10% do valor bruto total do agronegócio, que por sua vez representa 20% do PIB da Brasil (JORNAL CANA, 2019).

Sendo assim, não se pode tratar o bagaço da cana como mais um resíduo, mas sim como o principal tipo de biomassa energética no Brasil. No processo de produção do etanol brasileiro, apenas o caldo da cana é utilizado, o que corresponde a um terço da biomassa. O bagaço, juntamente com a palha seca da cana, corresponde a dois terços da biomassa, e são usados na maioria das vezes, como fonte de energia térmica para processos de geração de vapor (CHEMMÉS *et al.*, 2013).

Para cada tonelada de cana-de-açúcar são gerados em torno 250 kg de bagaço. Com o bagaço e a palha da cana-de-açúcar é estipulado que eleve a produção do álcool em até 30% a 40%, para uma mesma área plantada, não sendo necessário que se expanda as áreas de produção para o desenvolvimento do produto, além de atender à demanda ambiental (MARTINS *et al.*, 2014).

Vários trabalhos encontrados na literatura visam o reaproveitamento de resíduos agroindustriais para produção de etanol segunda geração (2G), também

conhecido como bioetanol, através da bioconversão de materiais lignocelulósicos em açúcares fermentescíveis (SANTOS *et al.*, 2012; NOGUEIRA, 2017).

O etanol de segunda geração é produzido a partir de substâncias químicas ou enzimáticas, transformando a celulose em um material o qual as bactérias consigam fermentar, gerando assim o álcool a partir da celulose. Tendo como suas principais etapas: pré-tratamento, hidrólise enzimática, fermentação e destilação (PROPEQ, 2020).

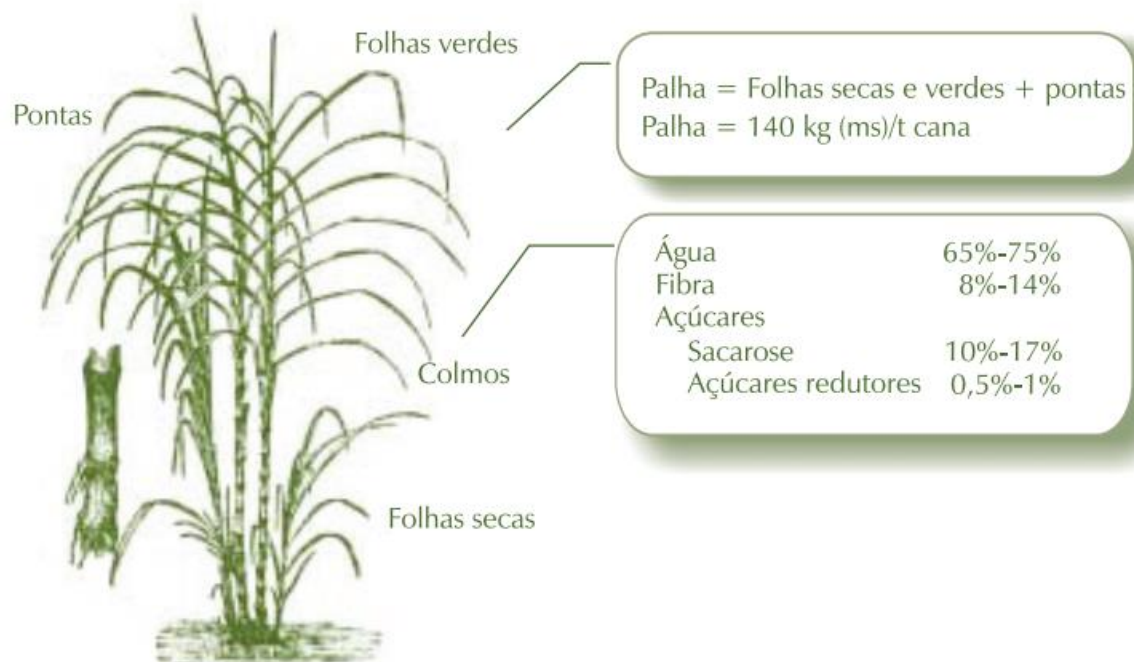
Portanto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre o aproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar para a produção de bioetanol.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar, muito cultivada no Brasil, tem sua origem no sudeste asiático e foi implantada no Brasil pelos colonizadores portugueses no século XIV. É uma planta semi-perene da família das gramíneas. A sacarose se concentra nos colmos, que é um caule aéreo da planta, enquanto a palha da cana está em suas pontas e folhas, como mostra a Figura 1 (OGATA, 2013).

Figura 1 - Estrutura da cana-de-açúcar.



Fonte: Manochio (2015).

O clima propício para o cultivo da cana é aquele que apresenta duas estações distintas: uma quente e úmida, que ajuda na germinação, o perfilhamento (formação de brotos) e o desenvolvimento vegetativo, seguida de outra fria e seca, para promover a maturação e o acúmulo de sacarose nos colmos (RODRIGUES & ROSS, 2020).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, correspondendo a 40% do cultivo em todo o mundo (YARA BRASIL, 2020). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a produção de cana-de-açúcar no ano de 2020 foi estimada em, aproximadamente, 678 milhões de toneladas (NOVA CANA, 2021A).

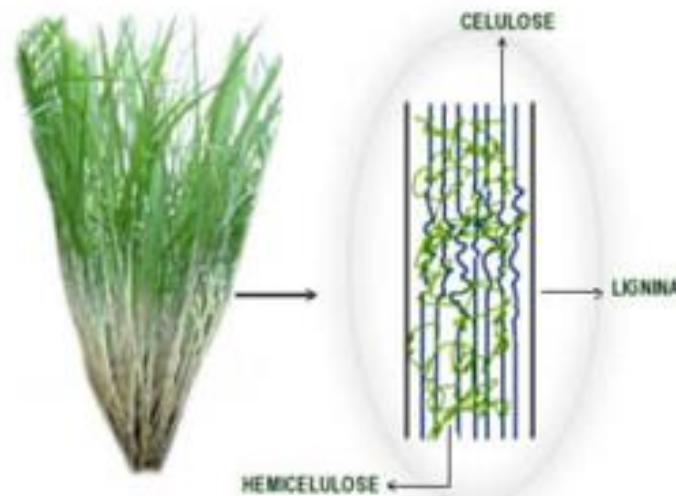
O Brasil sendo o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo tem colaborado para novas tecnologias e aumento de usinas em todo o país. Essa planta trouxe benefícios para o Brasil, como empregos, rendas para a população e para empresas sucroalcooleiras (ARAÚJO, 2018).

A cana possui inúmeras aplicações dentre elas forragem, alimentação animal e matéria-prima para a produção de melaço, aguardente, açúcar e etanol (MONTES, 2017). Há alguns anos, a atenção está sendo voltada para uso da cana-de-açúcar para a produção de energia. Ao ser processada, a cana é separada em caldo e bagaço, o caldo é utilizado para a produção de açúcar e etanol, enquanto o bagaço pode ser utilizado tanto para geração de eletricidade para autossuficiência da usina quanto para a produção de etanol de segunda geração (OGATA, 2013). Esse etanol 2G tem uma grande importância ambiental, pois além de ser produzido a partir de uma matéria-prima renovável, esse biocombustível também reduz a emissão de gases para a atmosfera, o que é uma preocupação mundial atualmente (SEBRAE, 2019).

2.2 MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS

Os materiais lignocelulósicos ou biomassa lignocelulósica caracterizam-se por serem recursos naturais renováveis abundantes e são definidos como materiais complexos constituídos fundamentalmente por celulose, hemicelulose e lignina (NOGUERIA, 2017). São obtidos através de resíduos vegetais, florestais, resíduos industriais e urbanos e devido à grande quantidade que são gerados, tem-se avaliado a utilização desses materiais como fonte energética para a produção de etanol de segunda geração (ALVES & MACRI, 2013). A Figura 2 apresenta a organização de uma parede celular vegetal de biomassas lignocelulósicas.

Figura 2 – Estrutura da parede celular vegetal.



Fonte: adaptado de Santos *et al.* (2012).

Resíduos agrícolas que são classificados como materiais lignocelulósicos são a palha e o bagaço de cana-de-açúcar, cascas e gramíneas. Estes muitas vezes são descartados de forma inadequada ou ainda são queimados, porém possuem características bastante desejáveis e por isso deveriam ser aproveitados de forma sustentável (AGUIAR, 2017). Nesse contexto, grande parte das matérias-primas lignocelulósicas aplicadas nas indústrias são resíduos provenientes de outras atividades, dessa forma o aproveitamento é uma solução para o problema de acúmulo de resíduos e para o impacto ambiental, evitando que rios e solos sejam contaminados (NUNES *et al.*, 2013).

A biomassa lignocelulósica é composta geralmente por 35-50% de celulose, 20-35% de hemicelulose e 10-25% de lignina e uma pequena quantidade de cinzas e extrativos. Esta composição química pode variar em função do tipo de biomassa, sendo o bagaço da cana constituído por 32-48% de celulose, 19-24% de hemicelulose e 23-32% de lignina, conforme mostra a Tabela 2 (SANTOS *et al.*, 2012).

Tabela 2. Composição química de biomassas lignocelulósicas com potencial para produção de etanol de segunda geração.

Biomassa Lignocelulósica	% Celulose	% Hemicelulose	% Lignina
Palha da cana	40-44	30-32	22-25
Bagaço da 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

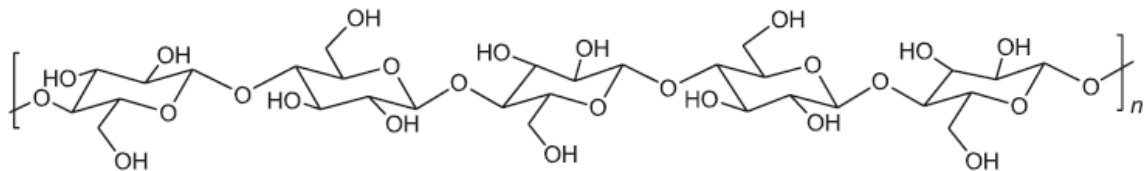
Fonte: SANTOS *et al.* (2012).

2.2.1 Celulose

A celulose, composto de fórmula química $(C_6H_{10}O_5)_n$, é o constituinte principal da parede celular dos vegetais, representando cerca de 50% da biomassa, sendo assim a matéria orgânica mais abundante da terra. Esse composto é um polímero de cadeia longa que é composta de apenas um monômero, a glicose, e por isso é denominado de homopolissacarídeo (SANTOS, 2012). A celulose sendo um composto polimérico possui como unidade básica de repetição a celobiose, que trata-se de um dímero de glicose, cujas moléculas encontram-se interligadas por ligações glicosídicas do tipo β -1,4. Formada por muitas camadas unidas por forças de Van der Waals

(forças de atração que atuam entre moléculas, átomos ou íons), a função da celulose é, portanto, dar forma e oferecer suporte e proteção às células vegetais (ANDRADE, 2014).

Figura 3 - Representação esquemática da molécula de celulose.

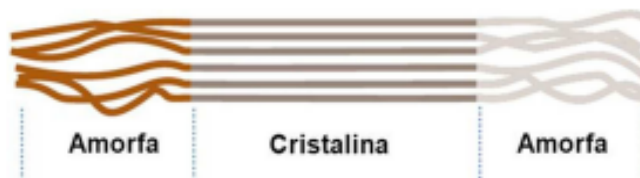


Fonte: SANTOS *et al.* (2012).

Ainda de acordo com ANDRADE (2014), as cadeias de celulose, também conhecido como fibrilas elementares, possuem estrutura rigorosamente ordenada, possuindo duas regiões, a cristalina e a amorfa. A região cristalina apresenta as moléculas dispostas de forma ordenada, enquanto a região amorfa possui uma orientação menor entre as moléculas e, dessa forma, é hidrolisada mais facilmente.

A celulose possui também ligações de hidrogênio inter e intramoleculares que estabilizam suas regiões cristalinas (ordenadas) e amorfas (orientação aleatória), formando longas cadeias que dão origem às microfibrilas insolúveis, como mostra na Figura 4 (REIS, 2017). Essas ligações atuam mantendo as redes cristalinas e fazendo com que a celulose seja resistente a tratamentos químicos e biológicos (ALVES, 2011).

Figura 4 - Estrutura da celulose.



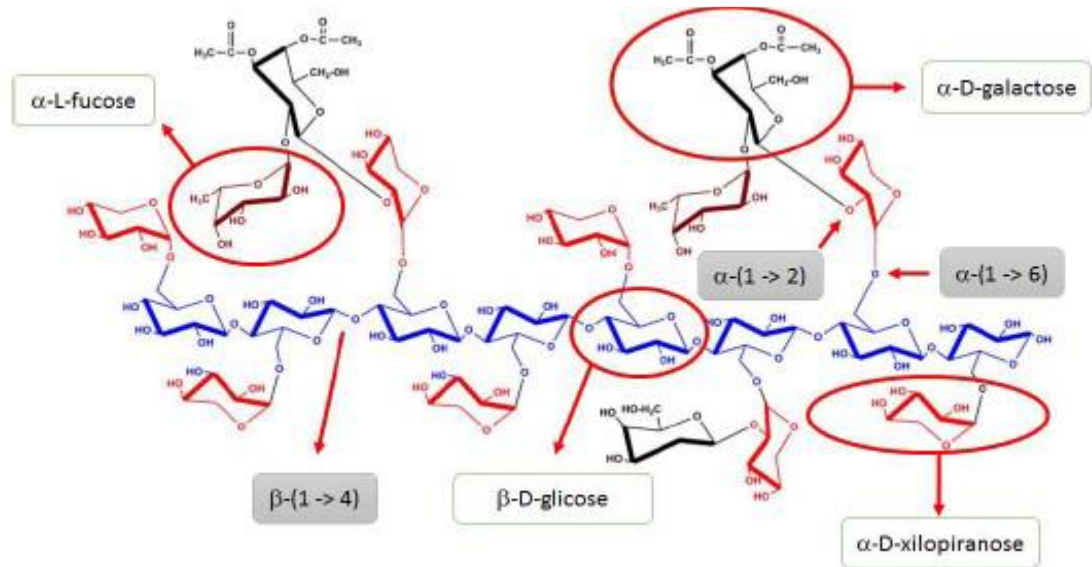
Fonte: ALVES (2011).

2.2.2 Hemicelulose

A hemicelulose é um heteropolissacarídeo de cadeia linear e ramificada, amorfa e possui um peso molecular baixo. É composta, especialmente, de D-xilose, D-galactose, L-arabinose, D-ácido glicurônico e D-manose, sendo a xilose seu

principal constituinte, uma vez que se encontra em maior quantidade. Esses açúcares são interligados por meio de ligações glicosídicas β -1,4 dispostas em uma estrutura central de onde saem ramificações de outros compostos, como mostra na Figura 5 (ALVES, 2011; MONTES, 2017).

Figura 5 - Ligações glicosídicas.



Fonte: REIS (2017).

A função da hemicelulose é a fazer as ligações entre a lignina e as fibras de celulose dando a rigidez e promovendo a integração da rede celulose, hemicelulose e lignina (CHEMMÉS *et al.*, 2013).

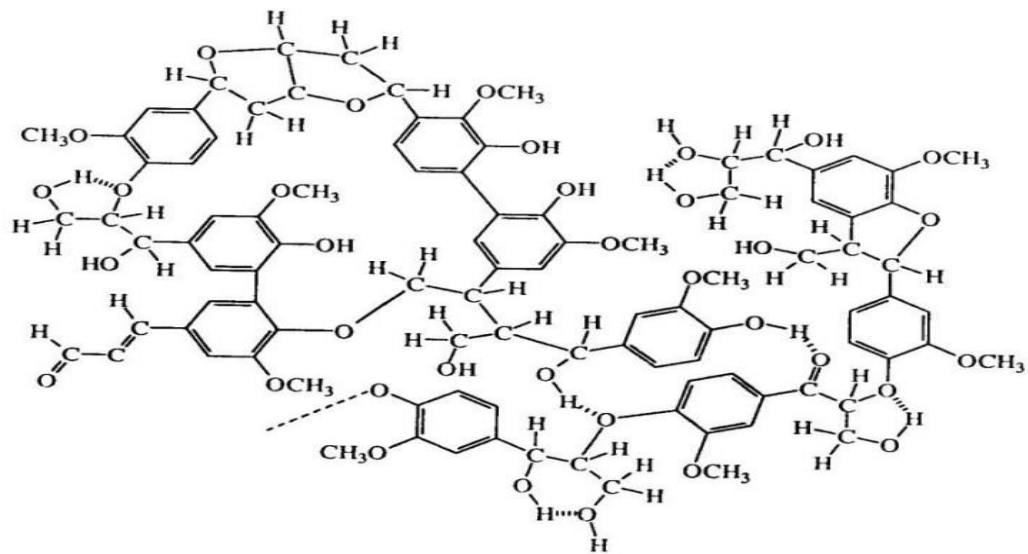
A hemicelulose é arranjada de forma intercalada nas microfibrilas de celulose, o que certifica a flexibilidade e elasticidade a esse agregado e não permite que elas se toquem (MONTES, 2017). Se organiza em um arranjo fibroso amorfo, sendo relativamente fácil de despolimerizar e solubilizar no pré-tratamento ácido da biomassa, com ou sem a ação enzimática. Além de que, é ligada através de ligações de hidrogênio com a celulose e através de ligações covalentes à lignina, o que faz essa última ligação ser mais forte e consistente (REIS, 2017).

2.2.3 Lignina

Tendo uma estrutura bastante heterogênea, a lignina possui uma rede de anéis aromáticos unidos, principalmente por ligações alquil-aryl-éter, que forma um arranjo amorfo com grandes quantidades de ligações cruzadas entre os anéis aromáticos (SANTOS, 2012).

A lignina possui uma função muito importante na estrutura de uma planta, pois é ela que oferece toda rigidez, ajuda no transporte interno da água, nutrientes e metabólitos e ainda atua como agente de ligação permanente entre as células, gerando uma estrutura resistente (CARVALHO, 2018). A sua estrutura é bem mais complexa do que a da celulose e da hemicelulose devido à presença de diversas unidades precursoras e ao grande número de combinações possíveis entre as mesmas, conforme mostra a Figura 6 (OGATA, 2013).

Figura 6 - Representação da estrutura da lignina.



Fonte: Aguiar (2017).

A lignina é agrupada como último elemento na parede celular e atua enrijecendo e fortalecendo a parede, fornecendo resistência mecânica e protegendo a planta, uma vez que aumenta a dificuldade de acesso dos microrganismos. No entanto, isto dificulta a produção do etanol 2G, pois para a sua produção faz-se necessário romper essas ligações e essa barreira feita pela lignina para ter o acesso da sua estrutura interna (MONTES, 2017).

Diferentemente da hemicelulose e celulose, a estrutura bioquímica da lignina não apresenta moléculas de açúcares, logo não é empregada na produção de etanol de segunda geração. Por outro lado, por ser uma estrutura rica em compostos aromáticos, a lignina pode ser fonte de insumos valiosos para a indústria química, como por exemplo na obtenção de óleos, fenol e ácido acético, metanol, etc. (RODRIGUES *et al.*, 2017).

2.2.4 Bagaço de cana-de-açúcar

Como visto anteriormente, o bagaço de cana consiste em um dos subprodutos da indústria sucroalcooleira e é um resíduo lignocelulósico. Com a expansão dessa indústria no país é evidente o aumento significativo na geração desse resíduo (SANTOS, 2012).

Estima-se que, a cada ano, são gerados de 5 a 12 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar, que equivale a aproximadamente 30% da cana moída. Se tornando, o bagaço, um dos resíduos mais abundantes da agroindústria brasileira (VENCESLAU, 2018). Esse resíduo compõe aproximadamente 28% do peso da cana-de-açúcar e é composto de 44,6% de carbono, 44,5% de oxigênio, 5,8% de hidrogênio, 0,1% de enxofre e 4,4% de outros elementos, além de sua composição química como mostrado na Tabela 1 (SANTOS, 2012).

Tabela 1 – Composição química do bagaço da cana.

Composição Química	(%)
Glicose	19,50
Xilose	10,50
Arabinose	1,50
Galactose	0,55
Lignina	9,91
Organossolúveis	2,70
Outros AR*	1,85
Cinzas	1,60

Umidade	50,00
Hexoses Totais	20,04
Pentoses Totais	12,00
*AR: açúcares redutores	

Fonte: Santos (2012).

O bagaço é um dos materiais lignocelulósicos com maior potencial energético e com uma grande concentração de produtos de alto interesse comercial. Para cada tonelada de cana-de-açúcar podem ser gerados 280 kg de bagaço, sendo uma matéria prima renovável, de baixo custo e que apresenta diversas aplicações como, insumo de ração animal, na fabricação de papel, fabricação de elementos estruturais e na cogeração de energia. Além disso, é um dos resíduos lignocelulósicos mais promissores para serem empregados em bioprocessos para geração de etanol de segunda geração (SANTOS, 2012; OGATA, 2013).

Muito se fala do etanol 2G por ser uma opção sustentável, porém ainda existe um baixo volume de produção. No Brasil são gerados em torno de 100 milhões de litros, sendo poucas as empresas que de fato realizam essa produção em escala industrial. Esse etanol 2G comparado à gasolina comum pode emitir até 15 vezes menos carbono na atmosfera e ainda permite uma redução de 80% na emissão de CO₂ (PROPEQ, 2020).

Devido a grande quantidade de produção, tanto de açúcar como de etanol, é gerado uma elevada quantidade de bagaço, este pode tornar-se um poluente ambiental quando descartado de modo inadequado, na terra ou próximo aos rios. Logo, é de grande interesse a busca de alternativas para o aproveitamento desse resíduo. Nesse contexto, estudos encontrados na literatura vêm destacando aproveitar esse bagaço para produzir bioetanol (PELÁ, 2014).

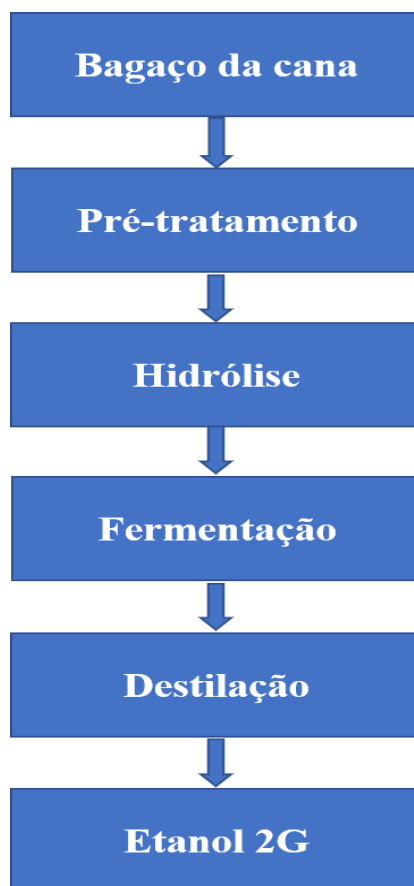
2.3 PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO (2G)

O etanol de segunda geração ou etanol 2G é um combustível extraído dos açúcares da celulose dos vegetais e pode ser obtido a partir de diversos compostos,

já citados anteriormente, sendo a cana-de-açúcar o principal insumo usado no Brasil para a obtenção desse biocombustível (LORENZI & ANDRADE, 2019).

Para a produção do etanol 2G, o bagaço proveniente da cana-de-açúcar precisa ser submetido a alguns processos, sendo eles: pré-tratamento, hidrólise, fermentação e destilação, como descritos na Figura 7 (MARTINS *et al.*, 2014).

Figura 7 - Fluxograma da produção do etanol de segunda geração a partir do bagaço de cana.



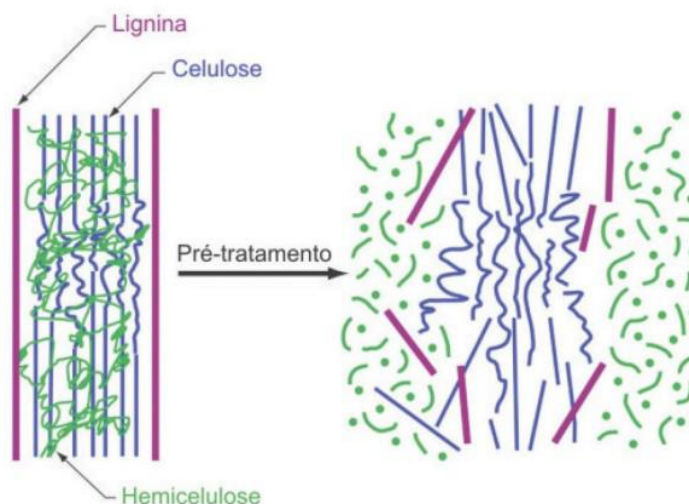
Fonte: Autoria própria (2021).

2.3.1 Pré-tratamento

A etapa de pré-tratamento tem por objetivo quebrar a estrutura da biomassa lignocelulósica, permitindo que a proteção de lignina seja desestruturada, removendo a hemicelulose e a lignina, como mostra a Figura 8 (NOGUEIRA, 2017). Além disso, reduzir a cristalinidade da celulose e aumentar a porosidade da matéria, como

também evitar a degradação ou perda de carboidratos e a formação de bioprodutos que possam inibir os microrganismos fermentadores (MARTINS *et al.*, 2014).

Figura 8 - Pré-tratamento de material lignocelulósico.



Fonte: Santos *et al.*, 2012.

Para que o pré-tratamento ocorra corretamente é necessário que o bagaço que vai ser utilizado não possua nenhuma partícula sólida como terra, areia ou partículas magnéticas, e também se deve separar o bagaço por frações de tamanho, contendo assim uma maior superfície de contato, para que se tenha uma maior eficiência na próxima etapa que é a hidrólise (MURAKAMI; BOMBANA; AFFONSA, 2016).

Ainda de acordo com MURAKAMI, BOMBANA & AFFONSA (2016), a biomassa do bagaço pode ser encontrada e separada em dois estados, sólido e líquido, a parte líquida sendo o licor de pré-tratamento composto de hemicelulose e lignina e a parte sólida do bagaço composta por celulose e lignina. Nessa etapa de pré-tratamento é essencial que se separe o máximo de lignina possível da celulose e hemicelulose.

Em geral, os métodos de pré-tratamento se enquadram em quatro categorias: físicos, químicos, físico-químicos e biológicos, sendo eles explosão de vapor, termo hidrólise, hidrólise ácida, organosolv, afex (ammonia fiber explosion), explosão de CO₂, enzimático (MARTIS, 2018). A Tabela 3 apresenta alguns desses métodos, descrevendo de forma resumida cada processo.

Tabela 3: Processos físicos, químicos e físico-químicos de pré-tratamento da biomassa.

Processo	Descrição
FÍSICOS:	
Explosão de vapor	A biomassa triturada com vapor (saturado, 160°C-260°C) seguindo de uma rápida descompressão.
Termo-hidrólise	Utiliza água quente a alta pressão (pressões acima do ponto de saturação) para hidrolisar a hemicelulose.
QUÍMICOS:	
Hidrólise ácida	Por meio do uso de ácidos sulfúrico, clorídrico ou nítrico, concentrados ou diluídos.
Organosolv	Uma mistura de um solvente orgânico (metanol, bioetanol e acetona, por exemplo) com um catalisador ácido (H ₂ SO ₄ , HCl) é usada para quebrar as ligações internas da lignina e da hemicelulose.
COMBINADOS OU FÍSICO-QUÍMICOS:	
Afex (ammonia fiber explosion)	Exposição à amônia líquida a alta temperatura e pressão por certo período de tempo, seguida de uma rápida descompressão.
Explosão de CO₂	Similar à explosão de vapor.
BIOLÓGICOS:	
Enzimático	Despolimerização da biomassa lignocelulósica por enzimas produzidas por microrganismos, especialmente fungos, tornando os açúcares acessíveis para as etapas de hidrólise e fermentação etanólica.

Fonte: Montes, 2017; Hartmann, 2017.

2.3.2 Hidrólise

Após o pré-tratamento, tem-se a etapa da hidrólise, que tem como objetivo de forma resumida, decompor as fibras do material lignocelulósico através do uso de alguns meios, como por exemplo, ácidos ou enzimas específicas, transformando o material sólido em um caldo (LORENZI & ANDRADE, 2019).

Geralmente para a obtenção de açúcares fermentescíveis derivados de biomassa lignocelulósica são aplicados dois tipos de hidrólise: hidrólise ácida ou hidrólise enzimática. A hidrólise ácida pode ser de duas formas, sendo uma com ácido concentrado onde são usadas soluções aquosas de ácidos minerais fortes como ácido clorídrico, sulfúrico ou fosfórico, quebrando assim a hemicelulose e celulose presentes na

biomassa. E a hidrólise com ácido diluído, onde parte da hemicelulose e da celulose é hidrolisada separadamente, dessa forma a hidrólise enzimática podendo ser mais eficaz que a hidrólise ácida (RABELO, 2010; MARTINS *et al.*, 2014).

A hidrólise enzimática, por sua vez, tem como objetivo quebrar as macromoléculas de celulose e de hemicelulose, transformando em moléculas menores através da adição de enzimas específicas. As enzimas que hidrolisam a celulose são chamadas de celulasas, sendo compostas por *endoglucanases*, *exoglucanases* e *B-glucosidases* (MARTINS *et al.*, 2014).

O processo de hidrólise começa com a atuação das endo-1,4- β -D-glucanases, que promovem a clivagem da celulose em suas regiões amorfas, produzindo oligossacarídeos de menor peso molecular, o que diminui seu grau de polimerização e cria novas extremidades de cadeia, com terminais redutores e não redutores. Em seguida, as exo-1,4- β -D-glucanases (celobiohidrolases e glucanohidrolases) agem na parte cristalina da celulose, por meio das novas extremidades geradas, liberando celobiose ou glicose. Por fim, as 1,4- β -D-glucosidases hidrolisam a celobiose e as celodextrinas presentes no meio, originando glicose (AGUIAR, 2017).

Dois tipos de açúcares são originados durante o processo de hidrólise, que são eles as pentoses e as hexoses. As pentoses são resultantes da hidrólise da fração hemicelulose, e as hexoses resultam da quebra de parte das hemiceluloses e celulose. Após a hidrólise da celulose é obtido o xarope que é usado para a fermentação etanólica, utilizando-se a levedura *Saccharomyces cerevisiae* (*S.cerevisiae*) que converte hexoses em etanol, enquanto as pentoses não são usados na fermentação pois ainda não foi encontrado uma levedura que possa fermentar devidamente as pentoses (ANDRADE, 2014).

2.3.3 Fermentação

Na etapa de fermentação é onde finalmente os açúcares proveniente da hidrólise é convertido em álcool etílico (etanol), isso acontece devido à presença de microorganismos específicos (AGUIAR, 2017).

Os organismos usados na etapa de fermentação das glicoses são chamados de leveduras *S. cerevisiae* e são elas que fazem a fermentação do açúcar produzindo assim o álcool etílico e gás carbônico, sendo esse processo chamado de fermentação

alcoólica. Na fermentação alcoólica, duas moléculas de ácido pirúvico são transformadas em etanol, com a liberação de duas moléculas de CO₂ e a formação de duas moléculas de ATP (MARTINS *et al.*, 2014).

A quantidade de etanol produzida durante a fermentação vai depender diretamente da quantidade de açúcares presentes no meio. A sacarose será metabolizada pela levedura, o processo se inicia por meio da atuação da exoenzima invertase, que por meio da hidrólise, transforma a sacarose na cana em glicose e frutose. Esses monossacarídeos são levados para o interior da célula da levedura, que em condições de anaerobiose realiza a fermentação (ANDRADE, 2014).

2.3.4 Destilação

Ao final do processo de fermentação tem-se o vinho fermentado, uma mistura que já possui etanol em sua composição, porém ainda precisa ser separado dos açúcares não fermentados. O processo usado para fazer a separação do etanol é a destilação. Na destilação, o líquido é introduzido em colunas de destilação, onde será aquecido até evaporar. Por fim esse vapor vai passar por uma etapa de condensação onde ele vai passar de volta para o estado líquido obtendo-se o álcool hidratado, usado como etanol combustível, com um grau alcoólico em média de 96% e ainda se tem álcool anidro, também chamado de etanol puro contendo cerca de 99,6 teor alcoólico (MURAKAMI; BOMBANA; AFFONSA, 2016).

2.3.5 O etanol de segunda geração no Brasil

O etanol de primeira e de segunda geração possui a mesma composição físico-química, a diferença está no processo de produção e na matéria-prima (PROPEQ, 2020).

Apesar do etanol de segunda geração ainda não ser economicamente viável comparado ao de primeira geração ele vem se destacando por ser eficiente quanto à redução na emissão dos gases de efeito estufa, aumentar a fabricação de etanol em até 50% sem ampliar a área de cultivo, possibilita a utilização de insumos já disponíveis nas unidades produtoras de álcool e açúcar, apresentando uma vantagem logística e ainda obtém um máximo aproveitamento dos subprodutos da cana-de-açúcar. (FAPESP, 2017; AGRISHOW, 2018; PEIXOTO *et al.*, 2017).

No Brasil são produzidos em torno de 100 milhões de litros de etanol de segunda geração, sendo ainda poucas as empresas que de fato realizam essa produção em escala industrial. Dentre as várias dificuldades enfrentadas pelas empresas, pode-se citar a ausência de um sistema capaz de fazer uso tanto do bagaço quanto da palha que acaba sendo comprometida pela prática de remoção pelo fogo, a ausência de equipamentos adequados para esse tipo de produção, sem contar ainda as dificuldades tecnológicas na separação da lignina do material celulósico e a quebra da hemicelulose por leveduras em um tempo adequado (PROPEQ, 2020).

A partir de 2023 a empresa Raízen líder global do mercado de biocombustíveis, possuindo 26 parques de bioenergia concentrados, em sua maioria, na região Sudeste do Brasil, deverá inaugurar mais uma unidade produtora de etanol de segunda geração em Guariba (SP), onde a Raízen já possui uma unidade de produção de biogás. Como divulgado pela empresa a futura unidade terá capacidade para produzir 82 milhões de litros por ano, que juntando com a primeira unidade que já produz 41 milhões de litros por ano, com as duas unidades a Raízen terá capacidade de produção de 120 milhões de litros de etanol 2G, representando um forte avanço para o setor sucroenergético brasileiro (NOVA CANA, 2021B; INFOMONEY,2021).

3 CONCLUSÃO

Pela observação dos aspectos analisados verifica-se que o Brasil possui uma elevada produção de cana-de-açúcar, gerando assim uma grande quantidade de resíduos que são usados em sua maioria para produção de energia, com intuito de proporcionar a autossuficiência das usinas. Atualmente o país está investindo em novas tecnologias, para que o etanol 2G possa ter um preço mais competitivo quando comparado a outros combustíveis.

O etanol 2G, produzido a partir do bagaço da cana-de-açúcar vem se destacando como uma alternativa promissora para o desenvolvimento econômico, social e ambiental do país, pois esse etanol além de ser produzido a partir de uma matéria-prima renovável, esse biocombustível também reduz a emissão de gases para a atmosfera.

A expectativa é que com o avanço das pesquisas seja possível produzir uma maior quantidade de bioetanol com a mesma quantidade de matéria-prima, para que o produto obtido seja mais atrativo para o bolso dos consumidores.

REFERÊNCIAS

- AGRISHOW. **Mais barato e eficiente: conheça o etanol de segunda geração!**. Disponível em: <https://digital.agrishow.com.br/negociosopportunidades/mais-barato-e-eficiente-conheca-o-etanol-de-segunda-geracao>. Acesso em 12 de novembro de 2021.
- AGUIAR, H. R. R. **Produção de etanol de segunda geração**. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- ALVES, R. E. **Caracterização de fibras lignocelulósicas pré-tratadas por meio de técnicas espectroscópicas e microscópicas ópticas de alta resolução**. 115f Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- ALVES, J. M. B.; MACRI, R. C. V. **Etanol de segunda geração: estudo de matérias lignocelulósicos e aplicações da lignina**. Ciência e Tecnologia, v. 5, n. 1, 2013.
- ANDRADE, L. F. **Produção de etanol de segunda geração**. Monografia (Pós-graduação em Microbiologia). Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
- ARAÚJO, L. G. **Gesso Agrícola na cana-de-açúcar: produtividade, desenvolvimento radicular e estoque de carbono no solo**. 126f. Tese de doutorado (Doutorado em Agronomia). Universidade de Brasília, 2018.
- CARVALHO, J. A. **Estudo e caracterização de lignina de bagaço de cana-de-açúcar**. 75f. Tese (Pós-Graduação em Agroquímica). Universidade Federal de Lavras, 2018.
- CHEMMÉS, C. S.; SILVA, F. C.; SOUZA, L. S.; AZEVEDO JUNIOR, R. A.; CAMPOS, L. M. A. **Estudo de métodos físico-químicos no pré-tratamento de resíduos lignocelulósicos para produção de etanol de segunda geração**. Universidade Particular de Salvador, 2013.
- FAPESP. **Etanol de segunda geração poderá ser economicamente viável a partir de 2025**. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/etanol-de-segunda-geracao-podera-ser-economicamente-viavel-a-partir-de-2025/26272/>. Acesso em 12 de novembro de 2021.
- HARTMANN, C. **Pré-tratamento de biomassa lignocelulósica por macrofungos regionais para posterior produção de etanol de segunda geração**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias). Universidade de Caxias do Sul, 2017.

INFOMONEY. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/cotacoes/raizen-raiz4/>. Acesso em 17 de novembro de 2021.

JORNAL CANA. Disponível em: <https://jornalcana.com.br/setor-sucroenergetico-representa-2-do-pib-brasileiro-afirma-diretor-do-itc/>. Acesso em 28 de dezembro de 2020.

LORENZI, B. R.; ANDRADE, T. H. N. O etanol de segunda geração no Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, São Carlos, v. 34, n. 100, p. 1 – 19, 2019.

MANOCHIO, C. **Integração energética da produção de biogás em biorrefinarias de cana-de-açúcar integradas de 1ª e 2ª geração**. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas – Campus Poços Caldas, 2015.

MARTINS, F. A.; MARTIM, T.; CORRÊA, A. M.; OLIVEIRA, F. F. A produção do etanol de segunda geração a partir do bagaço da cana-de-açúcar. **Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção**, Universidade Estadual do Paraná, v. 2, n. 3, 2014.

MARTINS, C. Z. **Avaliação da produção de etanol de segunda geração**. Monografia (Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2018.

MONTES, A. C. R. **Avaliação do processo de obtenção de etanol de 2ª geração utilizando bagaço de cana**. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

MURAKAMI, L. S. N. A.; BOMBANA, G. A.; AFFONSO, G. S. **Processo produtivo do etanol de segunda geração usando bagaço de cana-de-açúcar**. Universidade Estadual do Paraná Campus de Paranaíba, 2016.

NOGUEIRA, C. C. **Avaliação do uso de tensoativos nos pré-tratamentos ácido e alcalino diluídos da casca do coco verde e quantificação de água no pós-lavagem**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.

NOVACANA. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/raizen-investir-nova-planta-etanol-segunda-geracao-250621>. Acesso em 17 de novembro de 2021B.

NOVACANA. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/producao-cana-acucar-brasil-2020-revisada-677-9-mi-t-ibqe-130121>. Acesso em 21 de outubro de 2021A.

NUNES, R. M.; GUARDA, E. A.; SERRA, J. C. V.; MARTINS, A. A. Resíduos agroindustriais: potencial de produção do etanol de segunda geração no Brasil. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 14, n. 22, p. 113-238, 2013.

OGATA, B. H. **Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorrefinarias**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo, 2013.

PEIXOTO, M. P.; VERDUGO, P. P.; SA, R. E.; ALVES, M. E. C. Etanol de 2 geração: atual produção e perspectivas. **Bioenergia em revista**, Tocantins, v. 7, n. 1, p. 45-57, 2017.

PELÁ, A. L. B. **Etanol de segunda geração a partir do bagaço de cana-de-açúcar: análise do ciclo de vida com relação às emissões de CO₂**. Universidade de São Paulo, 2014.

PROPEQ. Disponível em: <https://propeq.com/etanol-de-segunda-geracao/>. Acesso em 15 de novembro de 2020.

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

REIS, C. V. **Produção heteróloga, caracterização biofísica e estrutural de xilose isômeros visando potenciais aplicações na fermentação pentoses**. 135f. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

RODRIGUES, C.; WOICIECHOWSKI, A. L.; LETTI, L. A. J.; KARP, S. G.; GOELZER, F. D.; SOBRAL, K. C. A.; CORAL, J. D.; CAMPIONI, T. S.; MACENO, M. A. C.; SOCCOL, C. R. Materiais lignocelulósicos como matéria-prima para a obtenção de biomoléculas de valor comercial. **Biotecnologia Aplicada a Agro&Indústria**, São Paulo, v. 4, p. 283 – 314, 2017.

RODRIGUES, G. S. S. C.; ROSS, J. L. S. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil**. Uberlândia: Edufu, 2020.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓS, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. **Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol**. Universidade Federal de Viçosa, 2012.

SANTOS, D. S. **Produção de etanol de segunda geração por *Zymomonas mobilis* naturalmente ocorrente e recombinante, empregando biomassa lignocelulósica**. 243f. Tese de doutorado (Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2012.

SEBRAE. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-que-e-etanol,ac3d438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD>. Acesso em 01 de novembro de 2021.

SILVA, D. L. G.; BATISTI, D. L. S.; FERREIRA, M. J. G.; FERNANDA, B. M.; CAMARGO, R. B.; BARROS, B. C. B. **Cana-de-açúcar: aspectos econômicos, sócias, ambientais, subprodutos e sustentabilidade**. Universidade Estadual de Maringá, 2021.

VENCESLAU, H. M. B. B. **Diversificação das aplicações de bagaço de cana de açúcar**. Universidade da Paraíba, 2018.

YARABRASIL. Disponível em: <https://www.yarabrasil.com.br/conteudo-agronomico/blog/producao-mundial-de-cana-de-acucar/#:~:text=O%20maior%20produtor%20%C3%A9%20o,15%20milh%C3%B5es%20de%20ha%20cultivados>. Acesso em 21 de outubro de 2021.