



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

**EVYLLIN SABRINA CIRIACO MARQUES**

**A REUTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA  
PRODUÇÃO DO ETANOL DE 2ª GERAÇÃO**

**PENEDO, AL  
2022**

**EVYLLIN SABRINA CIRIACO MARQUES**

**A REUTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO  
DO ETANOL DE 2ª GERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso à coordenação do Curso Técnico Integrado em Açúcar e Alcool como requisito parcial para conclusão do curso Técnico Integrado em Açúcar e Alcool do Instituto Federal de Alagoas (IFAL) - Campus Penedo.

Orientador (a): Prof.<sup>a</sup> M.<sup>a</sup> Simonise Figueiredo Amarante Cunha

PENEDO, AL  
2022



---

M357r

Marques, Eyllin Sabrina Ciriaco.

A reutilização dos resíduos da cana-de-açúcar para produção do etanol de 2ª geração / Eyllin Sabrina Ciriaco Marques. – 2022.  
29f. : il.

Orientação: Prof.<sup>a</sup> Simonise Figueiredo Amarante Cunha.

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

Trabalho acadêmico em versão digital.

1. Produção de etanol - Resíduos. 2. Etanol 2G.  
3. Biocombustível. I. Cunha, Simonise Figueiredo Amarante. II. Título.

---

CDD: 662

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

EVYLLIN SABRINA CIRIACO MARQUES

A REUTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO DO ETANOL  
DE 2ª 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.

APROVADA EM: 27/04/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

*Simonise Figueiredo Amarante Cunha*

---

Prof. M<sup>a</sup>. Simonise Figueiredo Amarante Cunha  
Instituto Federal de Alagoas - IFAL

*Ana Laura Oliveira de Sá Leitão*

---

Prof. M<sup>a</sup>. Ana Laura Oliveira de Sá Leitão  
Instituto Federal de Alagoas - IFAL

*Bruna Maria Ferrari Machado Dória*

---

Prof. M<sup>a</sup>. Bruna Maria Ferrari Machado Dória  
Instituto Federal de Alagoas – IFAL

## ***DEDICATÓRIA***

*A meus pais, Eliane e Raimundo, ao meu irmão Rick Farley, ao meu filho Henry  
Gabriel e ao meu amor, Igor.  
Dedico este trabalho a vocês, que são tudo em minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, ao Deus onisciente, onipotente e onipresente e a virgem Maria por me permitirem trilhar caminhos inimagináveis e conquistar meus objetivos. Autoridades divinas aos quais deposito a minha fé e dedico toda a minha vida.

Aos meus pais, Eliane e Raimundo, que são minha maior referência, fortaleza e meus maiores exemplos, que sempre estiveram presentes, me incentivando a acreditar nos meus sonhos e que fizeram e fazem de tudo para me beneficiar. Sem o amor, o apoio e os cuidados de vocês, eu não seria nada. Obrigada por terem sido incansáveis comigo.

Ao meu amor e meu grande parceiro, Igor, por ter acreditado em mim perante os obstáculos postos pela vida. Por ter permanecido e me ajudado nos momentos em que perei. Pelo nosso maior presente, nosso filho, o qual me motiva a desejar a realização dos meus sonhos incansavelmente.

A minha família como um todo, amigos, e todos os que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado me motivando.

À minha tia Simone por todo auxílio e contribuição no desenvolvimento deste trabalho, sem sua ajuda eu não teria conseguido, ser humano tão importante em minha vida.

Aos meus colegas de turma, em especial, meus amigos e irmãos, Deisiely e Paulo Henrique, pelo forte laço construído ao longo desses anos, à qual foi o meu conforto indescritível me fazendo sentir segura durante todo o curso.

A minha querida orientadora Simonise, por ter aceitado o convite de me guiar no desenvolvimento deste trabalho, por toda paciência e dedicação. Obrigada por todo capricho, seus ensinamentos foram significativos e enriquecedores demasiadamente na minha passagem no Ifal.

Aos meus professores, pelo profissionalismo e por toda contribuição, em especial a professora Ana Laura, a qual chegou recentemente, mas que já despertou um carinho imenso.

A minha querida professora e grande amiga Bruna por me encorajar incansavelmente, sua amizade com certeza é daquelas que perduram para toda vida.

Por fim, ao Instituto Federal de Alagoas Campus Penedo, pela oportunidade de ter uma formação acadêmica de qualidade. O meu muito obrigada por tudo!

*Com entendimento, grandes planos podem ser traçados e objetivos alcançados. Com a bússola da vida apontando o caminho e o mapa da persistência, chegamos aos lugares inimagináveis que Deus tem preparado para nós!*

*Nivia Rodrigues*

## RESUMO

Atualmente, o mundo se encontra em um cenário com um expressivo aumento na demanda por etanol. Concomitantemente, o Brasil é destaque como um dos países com maior evolução tecnológica no que se refere à fabricação do etanol de segunda geração (E2G), biocombustível que restringe as consequências negativas sobre o meio ambiente. Seguindo esse viés, a presente pesquisa, concretiza-se devido à necessidade do uso de combustíveis pela atual sociedade e tem como objetivo discorrer, através de levantamento bibliográfico, acerca da produção de E2G através dos resíduos da cana de açúcar, enfatizando assim, a importância do bagaço e da palha da cana durante esse processo, subprodutos que se destacam por serem os mais utilizados neste processo no Brasil. Referente a metodologia utilizada, este trabalho de conclusão de curso foi construído através de levantamento bibliográfico sobre o tema, utilizando-se de fontes de pesquisas, como artigos científicos, dissertações e teses. Ademais, as etapas de fabricação do etanol de segunda geração são descritas: pré-tratamento, hidrólise enzimática, fermentação e destilação. Por fim, com um propósito sustentável, ao final do levantamento bibliográfico e descrição das etapas de fabricação, a produção do etanol 2G é concretizada.

**Palavras-chave:** bagaço; etanol 2g; cana de açúcar.

## ABSTRACT

Currently, the world is in a scenario with a significant increase in the demand for ethanol. At the same time, Brazil stands out as one of the countries with the greatest technological evolution regarding the manufacture of second-generation ethanol (E2G), a biofuel that limits the negative consequences on the environment. Following this bias, the present research is carried out due to the need for the use of fuels by the current society and aims to discuss, through a bibliographic survey, about the production of E2G through sugarcane residues, thus emphasizing the importance of bagasse and sugarcane straw during this process, by-products that stand out for being the most used in this process in Brazil. In addition, the steps of manufacturing second-generation ethanol are described: pre-treatment, enzymatic hydrolysis, fermentation and distillation. Finally, with a sustainable purpose, at the end of the bibliographic survey and description of the manufacturing steps, the production of 2G ethanol is carried out.

**Keywords:** bagasse; 2g ethanol; sugar cane.

## LISTA DE FIGURAS

|                  |  |    |
|------------------|--|----|
| <b>Figura 1-</b> | Armazenamento do bagaço na usina sucroalcooleira   | 15 |
| <b>Figura 2-</b> | Principais componentes da biomassa lignocelulósica   | 17 |
| <b>Figura 3-</b> | Representação da cadeia linear da celulose, formada de várias unidades consecutivas de celobiose | 18 |
| <b>Figura 4-</b> | Monossacarídeos constituintes das hemiceluloses  | 18 |
| <b>Figura 5-</b> | Representação estrutural da lignina.   | 19 |
| <b>Figura 6-</b> | Fluxograma da produção do etanol 2G  | 20 |
| <b>Figura 7-</b> | Efeitos do pré-tratamento em resíduos lignocelulósicos   | 22 |
| <b>Figura 8-</b> | Coluna de retificação ou fracionamento   | 24 |

# SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1.INTRODUÇÃO</b>   | 12 |
| <b>2.ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO</b>                                    | 13 |
| <b>2.1. Uso dos Resíduos da Cana-de-açúcar para a Produção do E2G</b> | 13 |
| <i>2.1.1. Bagaço da cana-de-açúcar</i>                                | 13 |
| <i>2.1.2. Palha da cana-de-açúcar</i>                                 | 15 |
| <i>2.1.3. Composição</i>  | 16 |
| <b>2.2. Etapas de Produção do Etanol 2G</b>                           | 19 |
| <i>2.2.1. Pré-tratamento</i>  | 20 |
| <i>2.2.2. Hidrólise enzimática</i>                                    | 22 |
| <i>2.2.3. Fermentação</i>   | 23 |
| <i>2.2.4. Destilação</i>  | 23 |
| <b>3. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>  | 25 |
| <b>REFERÊNCIAS</b>  | 26 |

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil, a partir da cana-de-açúcar, e os Estados Unidos (EUA), utilizando o milho como matéria-prima, foram os protagonistas globais na produção em larga escala do etanol de primeira geração, utilizado singularmente ou adicionado na gasolina em diferentes percentuais, ao longo do tempo como combustível para automóveis. No Brasil, primeiramente, estudou-se a viabilidade do uso de mandioca, batata-doce e madeira como matérias-primas, porém nada se mostrou competitivo com a cana-de-açúcar (DALL'AGNOL, 2021).

Em 2020, a produção brasileira de etanol foi de 32,6 bilhões de litros, um decréscimo de 9,5% em relação a 2019. A produção de açúcar apresentou um aumento de 39%, alcançando 41,5 milhões de toneladas e suas exportações cresceram 13,9 milhões de toneladas (acréscimo de 71,7%), dois recordes históricos. O setor sucroenergético processou 663 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, 1,3% superior ao ano anterior (MAPA, 2021). De acordo com Dall'agnol (2021):

A tecnologia de produção e uso do etanol de primeira geração já estão consolidados e agora o mundo já sonha com o etanol de segunda geração, também denominado etanol 2G ou, simplesmente, E2G, biocombustível produzido a partir dos resíduos do processo produtivo do etanol de primeira geração (palha e bagaço da cana-de-açúcar, por exemplo). A hidrólise da celulose, hemicelulose e lignina contidas nesses resíduos fornece os carboidratos que, posteriormente, são convertidos em etanol pela ação de microrganismos fermentadores, resultando numa alternativa de energia menos poluente que os combustíveis fósseis petróleo, carvão e gás. A produção do etanol de segunda geração, a partir dos resíduos da cana, possibilitaria aumentar a fabricação total do biocombustível no Brasil em até 50%, sem ampliar a área semeada com a cultura (DALL'AGNOL, 2021)

Dessa forma, alega-se que o bagaço e a palha, são destaques como os resíduos mais utilizados na produção do E2G no Brasil, no entanto, existem outros que também são eficazes para esta produção, tal como a beterraba, o milho e o trigo. Esse tipo de combustível atua de modo importantíssimo no âmbito da sustentabilidade industrial, pois permite aumentar os ciclos produtivos de culturas agrícolas como a cana-de-açúcar ao utilizar como matéria-prima resíduos do plantio e de outros processos produtivos.

Assim sendo, a produção de etanol 2G amplia em até 250% a capacidade produtiva por hectare, se comparada à produção do etanol de primeira geração. Apesar de todo esse apelo sustentável, o volume de produção do etanol de segunda geração ainda é muito baixo. No Brasil, esse valor gira em torno de 100 milhões de litros, sendo poucas as empresas que, de fato, realizam essa produção em escala industrial. A razão para isso perpassa barreiras agrícolas, industriais e tecnológicas associadas à produção do etanol de segunda geração, as quais a

tornam desaconselhável economicamente (PROPEQ,2020).

A produção se dá, primeiramente, pelas etapas de pré-tratamento e hidrólise que são demoradas, se comparadas à produção do etanol de primeira geração, pois, é especificamente na etapa de hidrólise que se demanda maior tarifa, já que as enzimas são insumos de alto custo. Outra problemática, é que ainda não se pode utilizar todos os açúcares que estão presentes na biomassa lignocelulósica para a fabricação de etanol 2G, pois a levedura utilizada para este processo, a *Saccharomyces cerevisiae*, só consegue fermentar as hexoses, açúcares de seis carbonos (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>).

Diante do exposto, o presente trabalho busca, através de uma breve revisão da literatura, analisar a reutilização dos resíduos da cana-de-açúcar, especificamente, para a fabricação do etanol de segunda geração .

## 2. ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

Cada vez mais novas tecnologias têm sido estudadas com a finalidade de incrementar a produção atual de etanol e suprir a constante necessidade do uso de combustíveis pela sociedade moderna. De acordo com Bezerra (2007), buscando evitar o aumento da área plantada de cana-de-açúcar, uma possível competição entre o uso da terra para fins alimentícios e para a produção do biocombustível e, por consequência, o desmatamento, pesquisas têm sido feitas e preveem um futuro promissor no Brasil no que diz respeito à obtenção do bioetanol. Daí surgiu o conceito de etanol de segunda geração, também conhecido como E2G, bioetanol ou etanol celulósico. Todavia para Pacheco:

“Essa nova geração representa uma alternativa para o uso energético da biomassa, apresentando vantagens ambientais e econômicas, por ser o etanol produzido a partir de lignocelulose, presente em resíduos de origem vegetal” (PACHECO, 2011 p. 3).

Seguindo este viés, o etanol celulósico é o álcool extraído das fibras de um vegetal. No caso da cana-de-açúcar, principal insumo utilizado no Brasil para a produção de etanol, o E2G é obtido através do processamento do bagaço, seguida da extração do caldo ou mesmo da palha. Por meio de um processo chamado de hidrólise que liquefaz as fibras de um vegetal utilizando-se de ácidos ou enzimas específicas. O bagaço e a palha tornam-se aproveitáveis, produzindo-se mais etanol (até 50% mais) a partir desse caldo hidrolisado. Como cerca de metade dos açúcares e da energia da cana-de-açúcar estão presentes nas suas fibras lignocelulósicas (bagaço e palha), seria possível produzir muito mais etanol e energia com a mesma quantidade de

material e área plantada. Isso coloca o E2G como uma possível resposta a diversos desafios contemporâneos, como a busca por alternativas energéticas renováveis que não contribuem com o aquecimento global, alternativa aos derivados do petróleo e a dependência externa que vários países têm dele, assim como a demanda crescente no mundo todo por etanol e o uso eficiente de terras (BNDES/CGEE, 2008).

## **2.1. Uso dos Resíduos da Cana-de-açúcar para a Produção do E2G**

Tanto para a produção de etanol de primeira geração, a partir da cana-de-açúcar, quanto de segunda geração, a partir da biomassa lignocelulósica (palha e bagaço), a via fermentativa é a mais importante para a obtenção destas fontes de energia. Um dos fatores que torna a produção de etanol por fermentação a forma mais econômica para sua obtenção, é o grande número de matérias-primas naturais e residuais existentes em todo país (PEREIRA JR. *et al.*, 2008).

Dentre os subprodutos resultantes destas matérias-primas, o bagaço e a palha da cana-de-açúcar são primordiais, pelo fato de serem utilizados como resíduos da cana-de-açúcar para a produção do E2G.

### *2.1.1. Bagaço da cana-de-açúcar*

O bagaço da cana-de-açúcar pode ser considerado hoje como um dos maiores resíduos da agroindústria brasileira. As próprias usinas utilizam de 60% a 90% deste bagaço como fonte energética, similarmente substitui o óleo combustível no processo de aquecimento das caldeiras, para o processo de combustão ou gaseificação. Por conseguinte, merecem destaque seu emprego como matéria-prima na indústria de papel e papelão, na fabricação de aglomerados, na indústria química, como material alternativo na construção civil, como ração animal e na produção de biomassa microbiana. (MARTINS, 2009).

É constituído fisicamente de hemicelulose e lignina e assim que extraído o caldo da cana-de-açúcar, possui quatro frações: material fibroso (45%), água (51% a 49%), sólidos não solúveis (2 a 3%), sólidos solúveis e extrativos (2 a 3%) (TRIANA *et al.*, 1990).

A celulose é o principal componente da parede celular e representa 41 a 44% do bagaço, a lignina representa de 20 a 22%, as hemiceluloses representam 25 a 27% e o restante, cerca de 10%, são componentes minoritários de baixo peso molecular, extrativos e substâncias minerais (ICIDCA, 1990). A composição química do bagaço está diretamente ligada a fatores que influenciam nas suas características. Esses fatores são muito importantes, no que diz respeito a

qualidade do resíduo gerado pela cana de açúcar, que são divididos em: tipo de solo utilizado no plantio, categoria da cana a ser plantada, bem como, as técnicas que serão aplicadas para realizar a colheita (RODRIGUES e CAMARGO, 2008)

Além disso, muito se tem investido em tecnologias, no que diz respeito a utilização deste resíduo, que fica armazenado nas usinas para a produção de biocombustíveis (GÁMES *et.al.*2006)

Na Figura 1, é possível observar um estoque de bagaço de cana, que poderá ser utilizado para a produção de etanol 2G.

**Figura 1:** Armazenamento do bagaço na usina sucroalcooleira.



Fonte: Autor, 2021.

### 2.1.2. Palha da cana-de-açúcar

A palha refere-se às partes superiores foliares e as ponteiros da cana, na qual na maioria das vezes, é coletada juntamente com os colmos, porém, deixados no próprio lugar de plantio para compensar o solo, distribuindo nutrientes minerais imobilizados durante o crescimento (ALMEIDA,2008). Os processos convencionais de colheita manual, com queima prévia ou mecânica, visam exclusivamente ao aproveitamento do colmo da cana. Em ambos os casos, o aproveitamento da palha não faz parte do processo de colheita (RIPOLI *et al.*, 2010).

No entanto, ciente dos danos ao meio ambiente causados pelas queimadas dos canaviais, essa realidade vem sendo modificada, seja com a intervenção de órgãos públicos ou por meio de representantes do setor sucroenergético (MAGALHÃES, *et al.*, 2010).

O Decreto Estadual n. 2.661/98 estabeleceu o fim gradativo da queima da cana-de açúcar até 2017, porém, essa lei não teve validade. Existe uma previsão de que até 2030 cesse totalmente esse tipo de colheita, sendo assim substituída pela mecanizada. Desse modo, a palha posteriormente será utilizada como nova fonte de biomassa para produção de etanol celulósico

(GOMEZ, *et al.*, 2010; RIPOLI, *et al.*, 2010).

Segundo EPE (2017):

A palha da cana é fonte de uma energia limpa, renovável e sustentável. Todavia, representa um terço do conteúdo energético da cana-de-açúcar. Assim como o bagaço, a palha contém celulose, hemicelulose e lignina que podem ser reutilizados de forma integral em biorrefinarias na produção de diferentes tipos de produtos (CGEE, 2010).

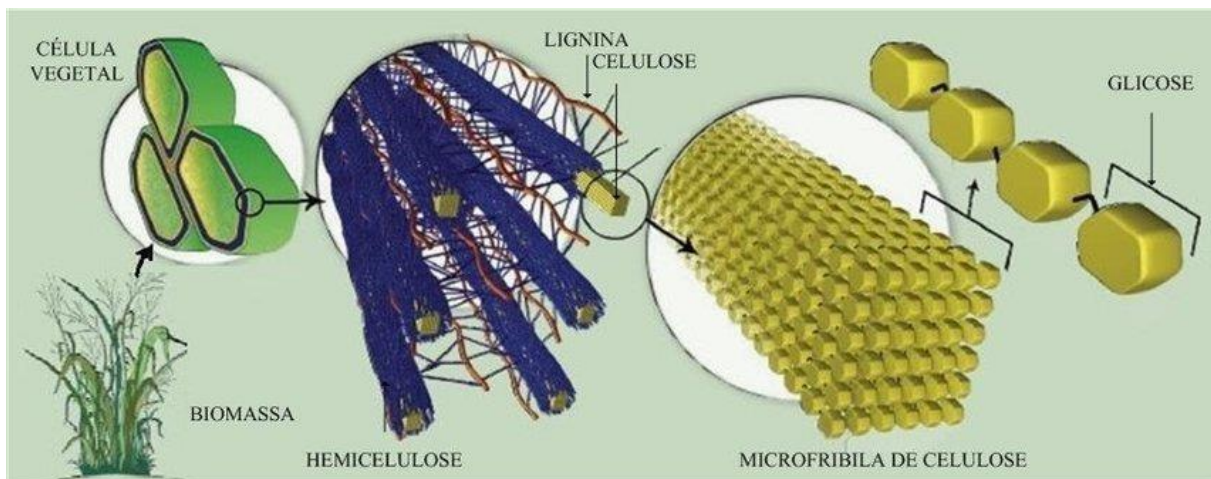
Levando em consideração as plantações de cana-de-açúcar no país, a quantidade de palha gerada chega a 97 milhões de toneladas, um número significativo no que condiz à produtividade agroindustrial. A palha da cana-de-açúcar representa 15% do peso dos colmos quando a cana madura, e 12% quando seca. (RIPOLI, *et al.*, 2000; ABRAMO, *et al.*, 1993)

Vale ressaltar que o tecido vegetal da palha contém os mesmos componentes químicos que o bagaço e a madeira. Este material lignocelulósico é constituído de celulose, hemicelulose e lignina, na proporção aproximada de 40, 30 e 25%, respectivamente. Nesse contexto, se não houver a queima, previamente à colheita, a única finalidade da palha é proteger o solo. Segundo ROSSETTO *et al.* (2010), diversos estudos mostram os benefícios da manutenção da palhada nos canaviais, de forma a minimizar a degradação do solo. Os autores afirmam que a degradação pode ser física, química e biológica e que, de acordo com este cenário, a manutenção do colchão de palha pode contribuir com cada um desses diferentes processos (ROSSETTO *et al.* (2010).

### 2.1.3. Composição

A estrutura lignocelulósica da biomassa apresenta 3 componentes fundamentais: cellulose ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>x</sub>, hemicelulose ( $C_5H_8O_4$ )<sub>m</sub> e lignina ( $C_9H_{10}O_3(OCH_3)$ )<sub>n</sub>. Esses componentes representam cerca de 90% da massa do material seco, uma vez que, os extrativos e cinzas preenchem os 10% restantes (BALAT, 2011). A celulose, hemicelulose e lignina são polímeros de carboidratos que ficam interligados em uma estrutura amorfa e macromolecular complexa (BAYONA, 2012). A Figura 2 representa a composição estrutural da biomassa.

**Figura 2** – Principais componentes da biomassa lignocelulósica.



Fonte: Retirado de Yarris (2014).

### Celulose

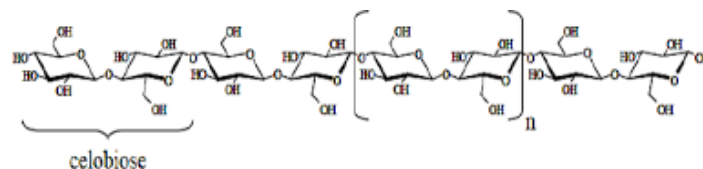
A celulose é um homopolissacarídeo com característica linear, representada pela fórmula ( $C_6H_{10}O_5$ ), constituída por unidades de glicose juntas por ligações glicosídicas, e por isso classificado como homopolissacarídeo. É a matéria orgânica mais abundante sobre a terra, consistindo aproximadamente em 50% de toda a biomassa, e uma produção anual de cerca de 100 bilhões de toneladas (YANG *et al.*, 2007).

De acordo com (GÓMEZ, 1985):

A cadeia linear da celulose é formada de várias unidades consecutivas de celobiose. As cadeias de celulose formam as fibrilas elementares, caracterizadas por duas regiões distintas, a cristalina, de configuração mais ordenada formada por cadeias de celulose unidas por ligações de hidrogênio e força de Van der Waal's, e a amorfa, menos ordenada e mais susceptível a hidrólise (GOMEZ, 1985)

Representação da cadeia linear da celulose através da Figura 3:

**Figura 3** –Representação da cadeia linear da celulose, formada de várias unidades consecutivas de celobiose.



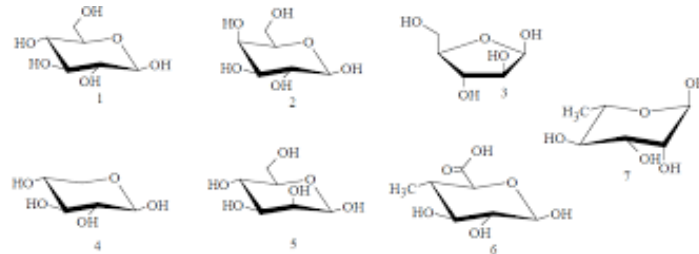
Fonte: TIMAR-BALÁZSY (1998)

### Hemicelulose

Tendo seu principal elemento a xilose, a hemicelulose é um heteropolissacarídeo formado por pentoses (xilose, ramnose e pentose), hexoses (glicose, manose e galactose) e ácidos urônicos (ácidos-4-O-metil-glucurônico e galacturônico)

Este componente é essencial na parede celular das plantas, já que se encontram intercaladas às microfibrilas de celulose, promovendo a elasticidade e impedindo que elas se toquem (RAMOS, 2003). Estas macromoléculas são solúveis em água e facilmente solubilizadas em soluções alcalinas. Apresentam-se divididas em xilanas, mananas, galactanas e galactomananas (Figura 4) e suas unidades monoméricas são unidas por ligações do tipo 1,3; 1,4 e 1,6 (SZENGYEL, 2000).

**Figura 4** – Monossacarídeos constituintes das hemiceluloses. D-glicose (1), D-galactose (2), Larabinose (3), D-xilose (4), D-manose (5), 4-O-metil-D-glucurônico (6), L-ramnose (7).



Fonte: MARTINS (2005).

Conforme com BALAT *et al.*, 2009:

A xilose constitui o maior componente da hemicelulose, fazendo parte de um complexo de carboidratos poliméricos incluindo xilana (principal componente da hemicelulose, cuja estrutura corresponde a um polímero de D-xilose unidas por ligações  $\beta$ -1,4),

### Lignina

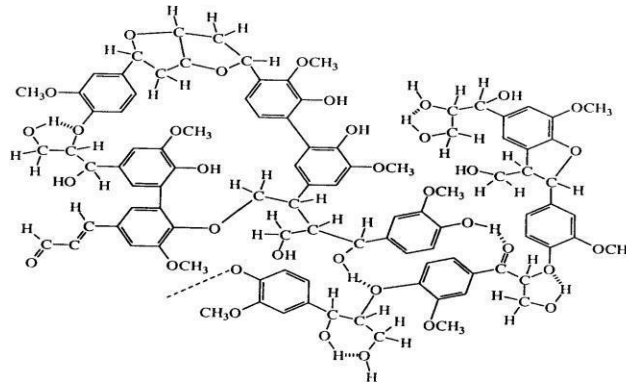
A lignina, um dos componentes principais da cana de açúcar, é um polímero não carboidrato da biomassa lignocelulósica, derivado de grupos fenilpropanóides, altamente condensado e muito resistente à deterioração, com processo de repetição incomum, que têm sua origem na polimerização, eliminando o hidrogênio do álcool coniferílico, que é um composto orgânico.

Este polímero tem como função realizar o transporte de água, metabólitos e nutrientes, além de ser a substância cimentante entre as células, proporcionando rigidez, resistência mecânica e ajuda no combate a ação de microorganismo (SALIBA *et al.*, 2001).

Outrossim, ela é colocada na rede de carboidratos da parede celular secundária das plantas, durante o seu crescimento e é composta a partir de três precursores básicos, que são os álcoois p-cumarílico, coniferílico e sinapílico (HENDRIKS e ZEEMAN, 2009).

Na Figura 5, nota-se a demonstração da estrutura molecular da lignina.

**Figura 5** – Representação estrutural da lignina



Fonte: ROSA e GARCIA (2009).

## 2.2.Etapas de Produção do Etanol 2G

O etanol 2G, bem como o etanol comum, possui algumas etapas semelhantes em seu processo produtivo, a fermentação e a destilação. A cana-de-açúcar apresenta uma potencialidade não só apenas em glicose, como também em celulose. Porém, este material não consegue ser metabolizado pelas leveduras que são responsáveis pela fermentação e fabricação do etanol de primeira geração, sendo necessárias, desta maneira, etapas adicionais ao processo de fabricação do etanol 2G (PROPEQ, 2020). Esse processo está sendo representado na Figura 6.

**Figura 6:** Fluxograma da produção do etanol 2G.



Fonte: PROPEQ,2020.

### 2.2.1. Pré-tratamento

De acordo com Cherubini (2010), uma biorrefinaria se caracteriza por utilizar um conjunto de tecnologias e processos através dos quais as matérias-primas renováveis e seus resíduos são transformados em biocombustíveis, energia e produtos químicos de alto valor agregado. Para a utilização da palha em diversos processos produtivos, é necessário que seus componentes sejam separados, transformando-os em matéria-prima. Nesta separação é imprescindível a etapa de pré-tratamento, que visa romper a estrutura lignocelulósica.

O processo de produção de etanol a partir do bagaço demanda a transformação da celulose em monômeros de glicose e posteriormente a conversão dos mesmos, por fermentação, em etanol. No entanto, a celulose nativa encontra-se muito protegida pela matriz lignina-carboidrato, de modo que a celulose se torna muito recalcitrante à ação hidrolítica, resultando em processos lentos de conversão. Dessa forma, alguns pesquisadores acreditam em um melhor rendimento deste resíduo, uma vez que este material é desagregado em seus componentes principais, os quais são distribuídos em celulose, hemicelulose e lignina. Para tanto, faz-se necessário submeter o bagaço a um pré tratamento, de modo a aumentar a exposição das fibras de celulose, tornando-a mais acessível aos agentes hidrolíticos enzimáticos ou ácidos (HSU, 1996).

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 e evitar minimizar a fermentação devido à formação de compostos inibitórios. Assim, o pré-tratamento desorganiza a estrutura da

biomassa celulósica, beneficiando o trabalho das enzimas e ácidos que atuam na conversão de carboidratos em açúcares. De modo geral, o pré-tratamento deve ser muito eficiente em termos de rendimento, seletividade, funcionalidade (garantindo acessibilidade da celulose aos agentes hidrolíticos), simplicidade operacional, segurança, higiene industrial e atributos ambientais, enquanto consiste em reduzido consumo de insumos químicos, energia e utilidades (BAUDEL, 2006).

De acordo com MOSIER *et al.* (2005) e SUN e CHENG( 2002).

Vários métodos de pré-tratamento de biomassa lignocelulósica têm sido sugeridos ao longo das últimas duas décadas. Em relação a sua natureza, estes podem se classificar basicamente em três grupos principais: físicos, químicos e biológicos, além de uma possível combinação entre eles (MOSIER *et al.*, 2005, SUN e CHENG, 2002).

Os pré-tratamentos físicos são realizados através de redução mecânica ou micro-ondas. Na redução mecânica ~~tem~~ é baseado na diminuição do tamanho da partícula que passa pelo processo de moagem, elevando o desempenho da enzima pelo aumento da área superficial e pela redução do grau de polimerização tal como, a cristalinidade da celulose (OGEDA *et. al*, 2010).

No caso da radiação de micro-ondas, é gerado um calor interno no bagaço de cana, resultante de vibrações entre o ambiente aquoso ao redor e as ligações polares na biomassa (SARKAR *et. al.*, 2012).

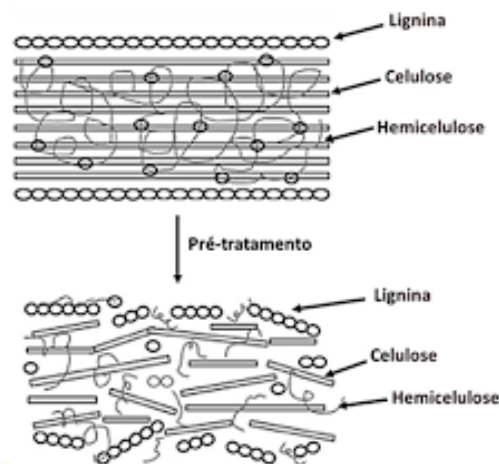
Os pré tratamentos químicos são distintos entre si, isto é, pela ação dos reagentes divididos em orgânicos e inorgânicos, assim como os mecanismos que são envolvidos nas alterações estruturais e químicas da parede celular. O pré tratamento alcalino é realizado com bases alcalinas, como a amônia, hidróxido de sódio, etc. Quando utilizados, esses reagentes alcalinos causam a degradação do éster e das cadeias glicosídicas, ocasionando uma mudança estrutural da lignina, bem como, parte da descristalização da celulose (CHENG *et al*,2010)

Em contrapartida, o pré tratamento ácido se utiliza de ácido concentrado ou diluído, como os ácidos sulfúrico e fosfórico, que possui o interesse em quebrar a rígida estrutura do material lignocelulósico, cuja função principal consiste em remover a hemicelulose, de forma a fracionar os componentes da biomassa facilitando a acessibilidade das enzimas à celulose (DIGMAN *et. al.*, 2010).

A metodologia do pré-tratamento ácido do bagaço consiste, inicialmente, na realização de ciclos de lavagem com água corrente, com a finalidade de remover os resíduos do caldo da cana-de-açúcar. Após isto, o bagaço é seco, em estufa, a uma temperatura de 100°C e pesado diversas vezes, até que se alcance uma estabilidade entre as massas iniciais e finais, de forma a garantir

uma redução significativa da umidade, ficando esta em torno de 10%. Em seguida, o bagaço é triturado até se alcançar uma granulometria em torno de 45 a 60 mesh, condição esta em que é submetido ao pré-tratamento. Nesta etapa, o bagaço lavado, seco e triturado é introduzido em um evaporador rotativo, onde se adiciona uma solução de  $H_2SO_4$  1,45%(v/v), durante 45 minutos, à temperatura de 120°C (SOUZA *et al.*, 2014). Na Figura 7, é possível visualizar o pré tratamento com resíduos lignocelulósicos.

**Figura 7:** Efeitos do pré-tratamento em resíduos lignocelulósicos.



Fonte: adaptado de GUNES *et al.* (2019)

### 2.2.2. Hidrólise enzimática

No processo enzimático, a biomassa lignocelulósica é primeiramente pré-tratada para aumentar a acessibilidade ao ataque enzimático, pois a celulose é protegida por outros materiais resistentes ao ataque químico, como a lignina e a hemicelulose. A quebra desses polímeros são as maiores dificuldades no processo da hidrólise (ROSA e GARCIA, 2009).

Além disso, é no processo de pré tratamento que a hemicelulose é hidrolisada com ácido diluído, análogo ao primeiro passo. Posteriormente, a ação das enzimas celulases são responsáveis pela quebra da celulose. Por ação de condições mais suaves aplicadas durante este processo com potencial hidrogeniônico 4,8 e temperatura entre 45 a 50 °C

tem-se uma menor quantidade de subproduto, que é liberada, resultando em um grande rendimento de açúcares fermentescíveis. No entanto, para que se atinja uma alta conversão da celulose, é imprescindível altas concentrações de enzimas, o que aumenta o custo de produção, já que enzimas são insumos de alto custo (EKLUND *et al.*, 1990).

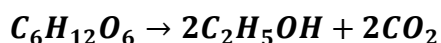
Segundo (HINMAN *et al.* 1989):

Outro desafio que se impõe à obtenção do etanol a partir da celulose é o da fermentação de pentoses. De fato, enquanto a fermentação das hexoses é processada rotineiramente, ainda não está dominada a tecnologia de fermentação das pentoses em escala industrial. As hemiceluloses são ricas em pentoses como xiloses e arabinoses. O *Saccharomyces cerevisiae*, microrganismo usualmente empregado na produção de álcool a partir da sacarose, é muito pouco eficiente na conversão de pentoses. A presença de pentoses de fato inibe a fermentação das hexoses. Uma perspectiva é a utilização de outras espécies de fungos, melhor adaptados às pentoses (HINMAN *et al.* 1989).

### 2.2.3. Fermentação

A fermentação da glicose é um processo muito bem estabelecido. O microrganismo mais apropriado para esta etapa é a levedura *Saccharomyces Cerevisiae*, que, através de seu emprego intensivo em fermentação industrial, já passou por um processo de seleção natural, apresentando os melhores desempenhos em conversão de glicose a etanol, produtividade e tolerância alcoólica. Desde que os impactos negativos inibidores sejam controlados, a fermentação acontece sem maiores problemas (ROSSELL, 2006).

Vale ressaltar, que esta levedura é um microrganismo unicelular que se reproduz por brotamento e atua de forma enzimática sobre glicídios (açúcares,  $C_6H_{12}O_6$ , por exemplo), produzindo etanol ( $C_2H_5OH$ ) e gás carbônico ( $CO_2$ ), conforme equação:



Uma enzima que é encontrada principalmente na levedura *Saccharomyces cerevisiae*, denominada invertase, executa uma etapa que antecede ao processo de formação de açúcar em álcool. Essa enzima é responsável pela dissociação das moléculas dos glicídios em moléculas mais simples denominadas monossacarídeos. Em decorrência disso, esses monossacarídeos são submetidos a outra enzima, a zymase, a qual produz o etanol (LIMA *et al.* 2001)

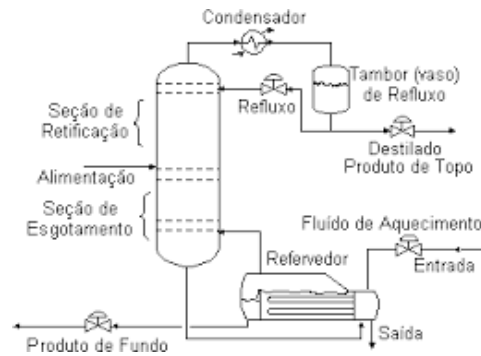
### 2.2.4. Destilação

Após a fermentação, obtém-se um vinho fermentado, que já possui etanol em sua composição, porém precisa ser separado do etanol. Essa separação acontece por meio da etapa denominada destilação. Nesse processo, o líquido é colocado em colunas de destilação, nas quais ele é aquecido até evaporar. Esse vapor passa por uma etapa de condensação, voltando ao estado líquido obtendo-se o etanol. Com isso, fica pronto o álcool hidratado, usado como etanol combustível, com teor alcoólico em cerca de 96% (MURAKAMI *et.al*, 2016).

A destilação é composta por 3 colunas, que são: coluna de destilação, de retificação e

coluna de desidratação. Na coluna de retificação ocorre a destilação fracionada, na qual utiliza-se um regime contínuo, ocorrendo vaporizações e condensações em um equipamento de menor custo. Vale salientar que esta coluna é utilizada para aumentar a concentração do etanol. A Figura 8, representa uma coluna de retificação:

**Figura 8** - Coluna de retificação ou fracionamento



(Fonte: <http://sites.poli.usp.br>, 2013)

Por fim, é na coluna de desidratação que é retirada a água que ainda estava presente no etanol, para que assim seja obtido o álcool anidro, a forma mais pura do etanol.

### **3. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Diante do exposto, é possível concluir que a biomassa lignocelulósica, rica em sua composição, do mesmo modo que atua na usina sucroalcooleira de forma eficaz e produtiva, através da cogeração de energia ou da produção do EG2, se destaca em outras esferas com diversificações em suas aplicações.

Outrossim, a referida biomassa, que antes era descartada, estando assim, ausente do processo de produção de etanol comum, tornou-se um forte aliada no que se diz respeito ao percurso que leva à produção do E2G, se tornando uma alternativa sustentável, ou seja, causando menos impacto ambiental, além de não competir com a indústria alimentícia e produzir mais por hectare.

## REFERÊNCIAS

ABRAMO, F.; Matsuoka, S.; Álcool e Açúcar 1993, 67, 23.

ANDRADE, Leandro Florentino. **Produção de etanol de segunda geração**. 2014. 8 f. Especialização (Pós-graduação em Microbiologia) - Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014

BALAT, M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion And Mangement*, Trabzon, p.858-875, 2011.  
BERTHOMIEU, Catherine; HIENERWADEL, Rainer. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Photosynthesis research*, v. 101, n. 2-3, p. 157-170, 2009.

BAYONA, Olga Lucia. Avaliação de pré-tratamentos para a hidrólise enzimática de palha de cana-de-açúcar considerando a produção de etanol. Universidade Estadual de Campinas p. 30-32. Campinas-SP, 2012.

BEZERRA, F. Bagaço da cana também produz álcool. Instituto Ciência Hoje, 2007.  
Disponível em:  
<[http://www.cienciahoje.org.br/noticia/v/ler/id/2379/n/bagaco\\_da\\_cana\\_tambem\\_produz\\_alcool](http://www.cienciahoje.org.br/noticia/v/ler/id/2379/n/bagaco_da_cana_tambem_produz_alcool)>. Acesso em: 15. Fev. 2022

BAUDEL, HENRIQUE MACEDO, Pré-tratamento e hidrólise. III Workshop Tecnológico sobre Hidrólise – Projeto Programa de Pesquisa em Políticas Públicas – Etanol. São Paulo, Dezembro, 2006.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social & CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. (2008), Bioetanol de cana de açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro, BNDES/CGEE.

BRAZ, Ana Caroline Silva. **Estudo da fermentação do bagaço de cana para a obtenção de etanol de segunda geração**. Universidade Federal da Paraíba, 2016.

BRIZZI, Priscila da Silva. Extração da lignina do bagaço de cana-de-açúcar e seu emprego na melhoria da resistência a compressão do cimento odontológico, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Licenciatura em Química). Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR - Londrina, Paraná.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Química verde no Brasil: 2010- 2030. Brasília, 2010

CHENG, Y. S., ZHENG, Y., Yu C. W., DOOLEY T. M., JENKINS B. M., and VANDERGHEYNST J. S., “**Evaluation of high solids alkaline pretreatment of rice straw,**” *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 162, no. 6, pp. 1768–1784, 2010.

CROSATTI, Beatriz Cristina Barbosa. **Produção de etanol de segunda geração a partir de embalagem cartonada longa vida**. 2017. 22 f. Trabalho de conclusão de curso (curso de bacharel em engenharia química) -Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa, 2017

DALL'AGNOL, Amélio. **Etanol de segunda geração**. 29 mares 2021. Disponível em:< <https://blogs.canalrural.com.br/embrapasoja/2021/03/29/etanol-de-segunda> > Acesso em: 15 fev. 2022.

DIGMAN M. F., SHINNERS, K. J. , M. D. Casler et al., “Optimizing on-farm pretreatment of perennial grasses for fuel ethanol production,” *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 14, pp. 5305–5314, 2010.

DRABER, Katia Maria Mandu. **Etanol de segunda geração já é uma realidade**. 2013.28f. (Graduação do Curso de Engenharia Bioquímica) -Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo,2013.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Balanco Energético Nacional 2017*. Ano base 2016. 13 p. Rio de Janeiro, 2017.

ESTEVES, Heloísa et al. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis**. 02 jul. 2021. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

N [abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-615/NT-EPE-DPG-SDB-2021-03\\_Analise\\_de\\_Conjuntura\\_dos\\_Biocombustiveis\\_ano\\_2020.pdf](#) > Acesso em: 15 fev. 2022.

EKLUND, R., GALBE, M., ZACCHI, G. Optimization of temperature and enzyme concentration in the enzymatic saccharification of steam-pretreated willow, *Enzyme Microbiol. Technol.*, 12:225-228, 1990.

FERREIRA, Juliana. **ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO: definição e perspectivas**. 2015. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) – Campus São José do Rio Preto – São Paulo

GÁMES, F., et al. Study of the hydrolysis of sugar cane bagasse using phosphoric acid. *Journal of Food Engineering*, v. 74, p. 78-88, 2006.

GOMEZ, C. H. R. J. Sacarificação da hemicelulose do bagaco de cana-de-açúcar e sua fermentação por *Pachysolen tannophilus*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1985.

HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, n. 100 p. 10-18, 2009.

HINMAN, N.D., WRIGHT, J.D. HOAGLAND, W., WYMAN, C.E. (1989). Xylose fermentation, an economic analysis. *Applied Biochemistry Biotechnology* 20/21: 391-401.

HSU, T. (1996). Pretreatment of biomass. In: *Handbook on bioethanol production and utilization*. Wyman, C. F. (Ed.), Taylor & Francis, Bristol, 179-195.

MARTINS, Quézia Valentim. **Caracterização espectroscópica e estudo do comportamento térmico dos resíduos provenientes da cana-de-açúcar**. 2009. 22 f. Especialização (Mestrado em química) -Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Araraquara, 2009

MOSIER, N. et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technol.*, v. 96, p. 673-686, 2005.

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

OGEDA, T. L., PETRI, D. F. S. Hidrólise Enzimática de Biomassa. *Química Nova*, São Paulo, v. 33, n. 7, p.1549-1558, 2010.

PACHECO, T. F. Produção de Etanol: Primeira ou Segunda Geração? *Circular Técnica (INFOTECA-E)*, Brasília, 20 abr. 2011. 6 p. Disponível em 63 . Acesso em: 15 fev. 2022

PROPEQ. **Etanol de segunda geração: o combustível do futuro?** 23 jul.2020. Disponível em: < <https://propeq.com/etanol-de-segunda-geracao/> > Acesso em: 15 fev. 2022

RAMOS, L. P. The chemistry involved in the pretreatment of lignocellulosic materials. *Química Nova*, v. 26, p. 863-871, 2003.

RIPOLI, T. C. C.; *Sci. Agric.* 2000, 57, 677.

RIPOLI, T. C. C. Ripoli, M. L. C. Em Cana-de-Açúcar: Bioenergia, Açúcar e Álcool – Tecnologias e Perspectivas; Santos, F.; Borém, A.; Caldas, C.; eds. Ed. da UFV: Viçosa, 2010, cap. 10.

RODRIGUES, C. P.; CAMARGO, J. A. Bagaço de cana-de-açúcar como potencial para cogeração de energia elétrica e etanol celulósico. São Joaquim da Barra: Colégio Iara Coimbra, 2008.

ROSA, S. S. da; GARCIA, J. L. F. O etanol de segunda geração: limites e oportunidades. Revista do BNDES, n. 32, p. 119-150, dez. 2009.

SANTOS, Adriana Maria. **Caracterização química da biomassa: potencial da palha da cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração.** 2018.24 f. (Mestrado em Energia da Biomassa) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2018.

SARKAR, N. et al. **Bioethanol production from agricultural wastes: An overview.** *Renewable Energy*. Índia. 2012, p.19-27

SOUZA, F.C. S et.al. **Análise da eficiência das técnicas de caracterização do bagaço de cana-de-açúcar, após pré-tratamento ácido, visando a produção de etanol de segunda geração (e2g).** P-7. UNIFACS,2014.

SUN, Y., CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for etanol production: a review. *Bioresource Technology*, 83: 1-11, 2002.

SZENGYEL, Z. Ethanol from wood: Cellulase enzyme production. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Química, Lund University, Suécia, 2000.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D., H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicelluloses, cellulose, and lignin pyrolysis. *Fuel*, v. 86, p. 1781-1788, 2007.

**APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO (ELEMENTO OPCIONAL CRIADO PELO AUTOR)**

**ANEXO A – MAPA (ELEMENTO OPCIONAL RETIRADO DE UMA FONTE)**