

## ANÁLISE DAS ROTAS DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO A PARTIR DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

Carolina Mello Coutinho Fonseca<sup>1</sup>

**RESUMO:** Atualmente discute-se muito sobre sustentabilidade e a urgência da preservação do meio ambiente para as gerações futuras, buscando-se alternativas que gerem um consumo consciente e limpo a nível mundial. No setor de combustíveis, essa busca não é diferente. O aumento do preço de combustíveis fósseis, a alta emissão de gases de efeito estufa gerada pela queima desses combustíveis e seu possível esgotamento, estão impulsionando pesquisas pela busca de novas tecnologias e fontes renováveis para a produção de biocombustíveis como o etanol, que já é produzido, mas com o aumento de sua demanda, estudos buscam novas alternativas para sua geração. Nesse contexto, o objetivo desse artigo foi avaliar o potencial da biomassa lignocelulósica como matéria-prima para produção de etanol de segunda geração, fazendo um estudo das etapas necessárias e rotas disponíveis para a sua fragmentação e posterior fermentação.

**Palavras-Chave:** Biomassa lignocelulósica. Etanol. Segunda geração. Biocombustível. Bioetanol.

### 1. INTRODUÇÃO

1

A demanda global por eletricidade vem crescendo ao longo do tempo. Segundo a Energy Information Administration (EIA, 2020), até 2050 haverá um crescimento dessa demanda em 3,1% proveniente de indústrias de diversos setores. Muito por conta desse aumento, vem pensando-se cada vez mais no tema sustentabilidade, pois a preocupação com o meio ambiente tem aumentado e a sociedade como um todo vem desenvolvendo iniciativas cada vez mais concretas para mitigar os impactos ambientais.

Estudos em torno de processos que facilitem o uso de matérias-primas ambientalmente amigáveis vêm aumentando gradativamente, principalmente em relação a descobertas de fontes renováveis variadas.

Levando em conta que a matriz energética global é composta, prioritariamente, por fontes não renováveis como derivados do petróleo, carvão mineral e gás natural, essa busca por novas fontes de energia limpa é de extrema importância, pois entre os vários aspectos que

---

<sup>1</sup> Graduada em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/RJ.

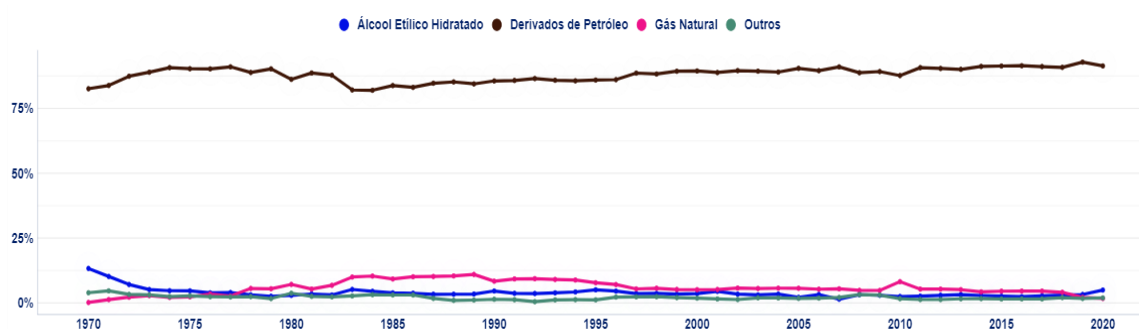
prejudicam o meio ambiente estão as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, resultante da queima desses combustíveis fósseis.

Foi a partir dessa busca, juntamente com o aumento da demanda e das variações econômicas em relação ao petróleo, que se intensificaram os estudos e pesquisas relacionadas a biomassas, fazendo com que os biocombustíveis ganhassem espaço mundialmente, uma vez que é uma fonte energética renovável e sustentável.

De acordo com a EIA (2020), até 2050, 38% das fontes de energia podem se tornar renováveis, mesmo que ainda hoje dados desse estudo indiquem que mais de 80% da matriz energética de consumo global seja composta por fontes não renováveis, como mostra a Figura 1.1.

I.1.

**Figura 1.1:** Consumo global final por fonte



**Fonte:** BEN Interativo (2020)

Como pode-se observar no gráfico, durante o ano de 2019, houve um crescente consumo de álcool etílico hidratado. De acordo com a União Nacional da Bioenergia (UDOP, 2020), segundo dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), nesse período, obteve-se um recorde no consumo de etanol no Brasil, na ordem de 32,8 bilhões de litros, isto é, 10,5% de crescimento em relação a 2018, sendo desse total, 22,5 bilhões de litros de álcool etílico hidratado.

Visto toda essa ascensão da utilização de biocombustíveis, principalmente do etanol proveniente da cana-de-açúcar, de acordo com (MANOCHIO, 2014), começou-se a pensar em outras biomassas vegetais com grande potencial para a produção de etanol, tais como: sacaríneas (cana-de-açúcar, beterraba e sorgo sacarino), amiláceas (milho, trigo, cevada e mandioca) e lignocelulósicas (serragem, bagaço de cana, palha de cana, entre outros).

A escolha entre essas biomassas depende muito de fatores relacionados à região onde será cultivada, entre eles, o clima, a qualidade do solo, as tecnologias disponíveis, o mercado de insumos, a disponibilidade de terras, etc.

Quanto às rotas de produção, elas são divididas em duas categorias: de primeira (1G) e segunda geração (2G). De acordo com (SANTANA,2013), as de primeira geração são produzidas diretamente de culturas ricas em sacarose e amido, plantadas propriamente para a produção de etanol; já as de segunda geração empregam biomassas residuais de composição lignocelulósica que, para serem utilizadas, passam por diversas etapas de tratamento que visam a disponibilização dos monossacarídeos fermentáveis.

Atualmente, a principal matéria-prima usada no Brasil na produção de etanol de primeira geração é a cana-de-açúcar, porém, com o aumento da demanda por biocombustíveis, biorrefinarias vêm realizando esforços para desenvolver e aplicar tecnologias voltadas para a produção de combustíveis de segunda geração, utilizando como matéria-prima a biomassa lignocelulósica.

Como citado anteriormente, várias biomassas apresentam composição lignocelulósica (formada por hemicelulose, lignina e celulose), destacando-se entre elas: madeira, resíduos agrícolas de cereais, bagaço de cana-de-açúcar e de sorgo sacarino, resíduos da indústria de papel e celulose, resíduos municipais, biomassas de plantas aquáticas, entre outras. A composição química de diferentes matérias-primas com elevado potencial para produção de etanol de segunda geração é apresentada na tabela 1.

**Tabela 1:** Composição química por material lignocelulósico

Material Lignocelulósico	Componente (%)			
	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:** Souza (2024)

Segundo Santana (2013, p. 41),

Tendo em vista a natureza desses materiais e o recente desenvolvimento de atividades de pesquisa na área de biocombustíveis de segunda geração, as estatísticas sobre a sua disponibilidade é escassa. Entretanto, existem algumas informações disponíveis que proporcionam uma primeira quantificação, embora distante do que se percebe existir. Por exemplo, Dos Santos et al. (2011) estimam que “no Brasil a quantidade de resíduos lignocelulósicos gerada anualmente é de aproximadamente 350 milhões de toneladas”.

Nesse contexto, foi desenvolvido o presente artigo que visa avaliar as rotas para a síntese de etanol de segunda geração. Tendo em vista então a extensão do mercado de etanol e as inúmeras variedades de biomassa, a produção de etanol de segunda geração se torna uma crescente aposta para o futuro.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. O etanol como fonte energética

O etanol (ou álcool etílico) é produzido através da fermentação de açúcares ou, por via sintética, a partir de hidrocarbonetos não saturados, podendo ter como resultado o álcool hidratado ou anidro. Ambos são muito utilizados como reagentes e solventes na produção de produtos farmacêuticos, defensivos agrícolas e, principalmente, como combustível, sendo inclusive obrigatória sua adição de, no mínimo, 30% v/v na gasolina. (TEIXEIRA, 2019)

Utilizando a cana-de-açúcar, o Brasil se tornou o pioneiro na produção de etanol, já apresentando vantagens em tecnologias de produção. Porém, para garantir o abastecimento energético com o crescente aumento de sua demanda, se tornam necessárias áreas de plantio cada vez maiores, assim como uma otimização do processo de produção e aperfeiçoamento genético de micro-organismos fermentadores. Frente a isso, estudos se aprofundam cada vez mais para analisar o potencial da reutilização de resíduos agrícolas, plantas e subprodutos agroindustriais para a obtenção de etanol de segunda geração, permitindo uma possível liderança do Brasil na agricultura de energia e no mercado de combustíveis sem a necessidade de ampliação de área desmatada e/ou de área reservada para cultivo de alimentos (TEIXEIRA, 2019).

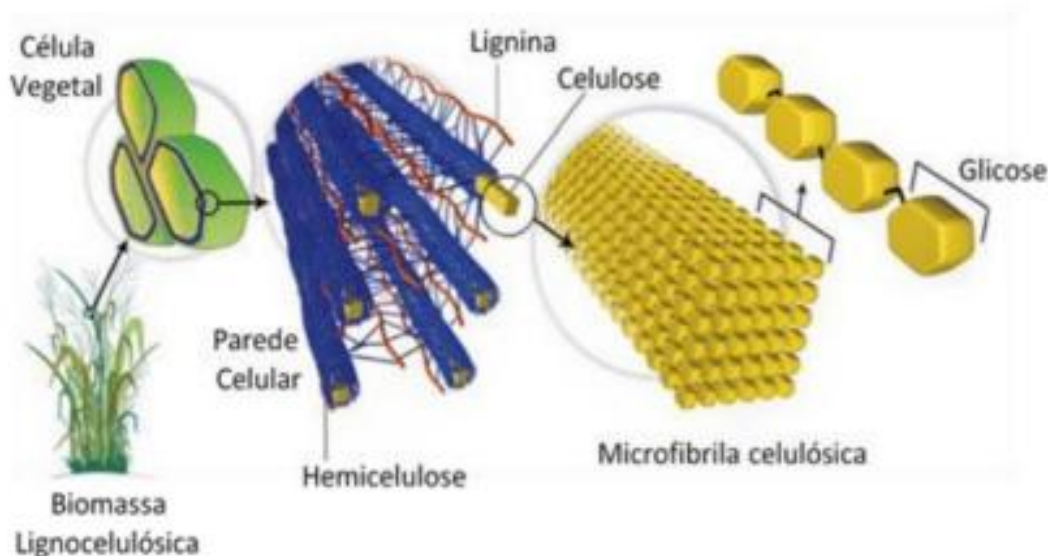
Esses estudos são muito recentes, mas vem contribuindo com resultados positivos a nível laboratorial para a produção de etanol a partir do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, da madeira e de outras biomassas lignocelulósicas.

De acordo com (TEIXEIRA, 2019), estima-se que, com as devidas etapas de pré-tratamento, hidrólise e fermentação, um bilhão de toneladas de biomassa lignocelulósica seca, contendo de 35-45% de celulose e 20-30% de hemicelulose, pode gerar 100 bilhões de litros de etanol 2G.

## 2.2. A Biomassa lignocelulósica e sua composição estrutural

O complexo lignocelulósico é composto por três estruturas fibrosas e rígidas: a celulose, a hemicelulose e a lignina, como pode-se observar na (Figura 2.1). Essas estruturas são em forma de cadeias de celulose envolvidas por lignina e hemicelulose, sendo a hemicelulose (mistura de polissacarídeos constituída por pentoses e hexoses) e a celulose (unidade repetitiva de glicose). Praticamente, 70% da massa seca desse complexo lignocelulósico pode ser transformada em etanol por meio da fermentação. Já a lignina é composta por álcoois aromáticos.

**Figura 2.1:** Estrutura celular do material lignocelulósico



**Fonte:** Adaptado de Mota et al. (2015)

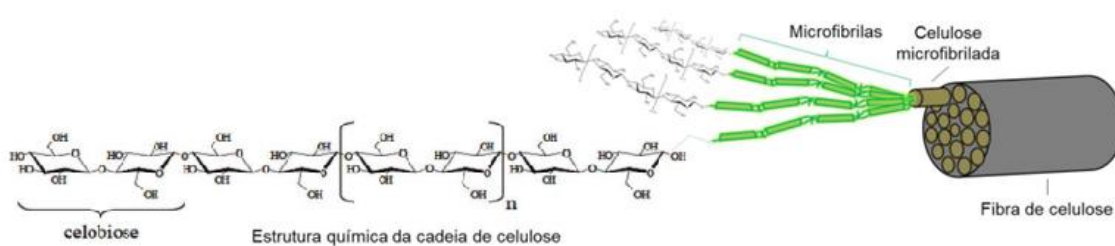
Segundo Santos (2018, p.15),

O tamanho e a forma da parede celular dos materiais lignocelulósicos variam de espécie para espécie, apresentando composição química de acordo com a biomassa analisada. Seus três componentes principais são distribuídos em quantidades diferentes. Em geral, a celulose se encontra em proporções maiores, cerca de 35-50%, seguida da hemicelulose, em torno de 20-35% e a lignina com 10- 25%.

### 2.2.1. Celulose

A celulose  $(C_6H_{10}O_5)_n$  (Figura 2.2) é um polímero linear de celobiose (dímero glicose-glicose que dá às células vegetais proteção, forma e suporte), cristalino, de alta massa molar e difícil de ser quebrado. Esse polissacarídeo orgânico é o mais abundante do planeta e é formado por uma longa cadeia de até 15.000 unidades de D-glicose através de ligações glicosídicas  $\beta$ -1,4 que, sob condições ácidas e altas temperaturas, se tornam fracas e podem se decompor, gerando a glicose. (SANTOS, 2018; BNDES e CGEE, 2008).

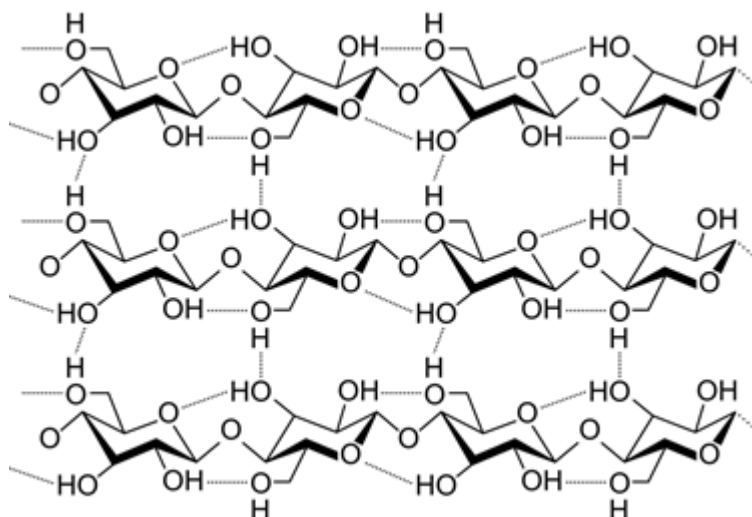
**Figura 2.2:** Estrutura da celulose



**Fonte:** Souza (2019, com adaptações)

A constante repetição de unidades de D-celobiose vão compondo cadeias lineares e formando uma estrutura com ligações de hidrogênio (Figura 2.3), as quais deixam a parede celular mais resistente e impedem sua ruptura por solvente ou tratamentos físicos.

**Figura 2.3:** Cadeias lineares de polissacarídeos em microfibrilas de celulose

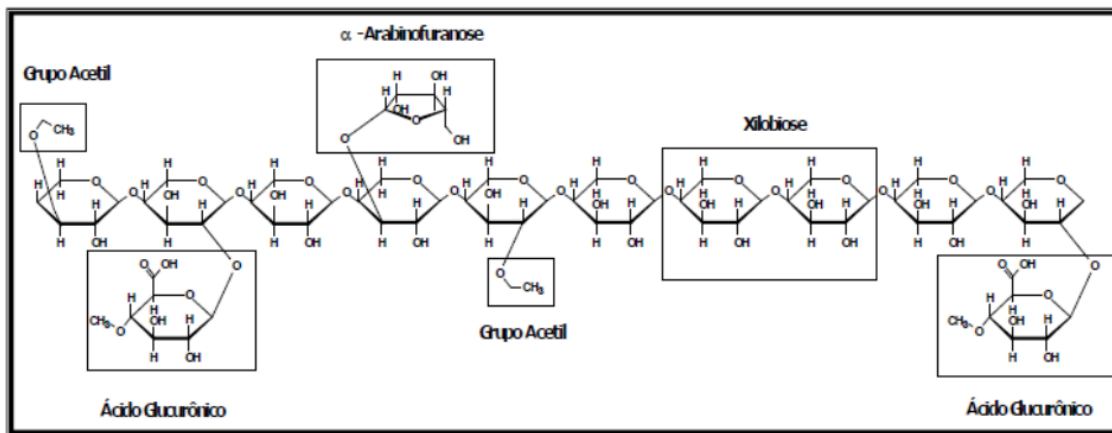


**Fonte:** Silva (2019).

### 2.2.2. Hemicelulose

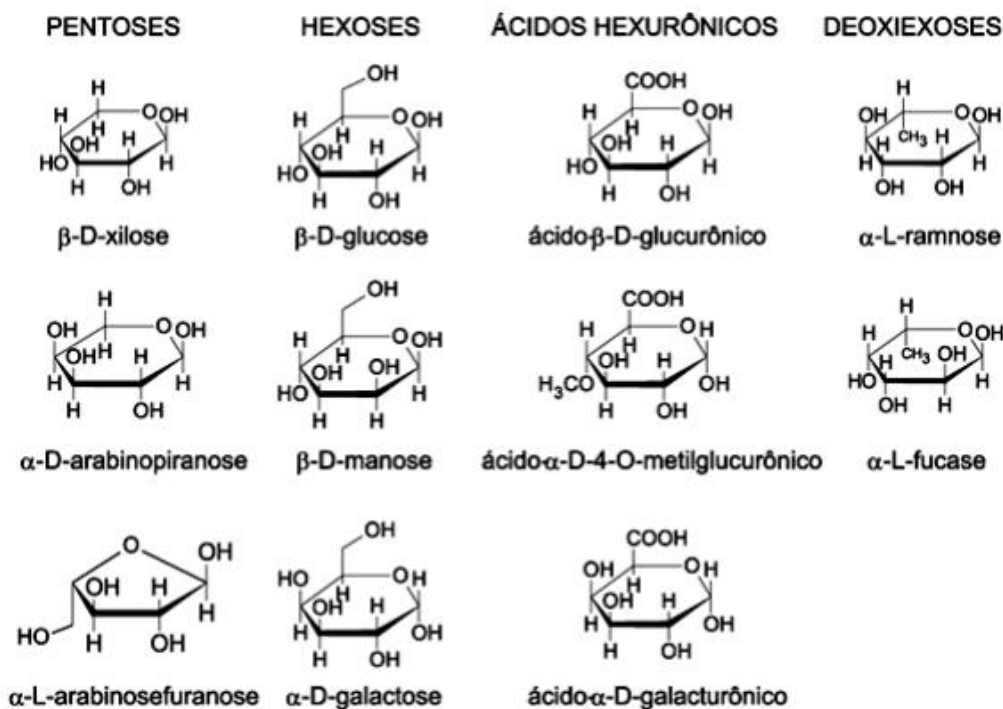
A fração hemicelulósica (Figura 2.4) é uma macromolécula constituída por uma mistura de polissacarídeos de baixa massa molar que forma uma cadeia principal de xilose (com ligações  $\beta$ -1,4) e cadeias ramificadas de açúcares, podendo ser eles os monômeros:  $\beta$ -D-xilose,  $\beta$ -D-glicose,  $\beta$ -D-manose,  $\alpha$ -D-arabinopiranosse,  $\alpha$ -D-galactose, ácido  $\beta$ -D-glucurônico, ácido  $\alpha$ -D-galacturônico, ácido  $\alpha$ -D-4-O-metilglucurônico,  $\alpha$ -L-fucase, entre outros. A (Figura 2.5) ilustra a estrutura de cada um desses monossacarídeos (BNDES e CGEE, 2008).

Figura 2.4: Estrutura típica da hemicelulose.



Fonte: MUSSATO (2002)

Figura 2.5: Monômeros que constituem a hemicelulose e suas respectivas estruturas químicas



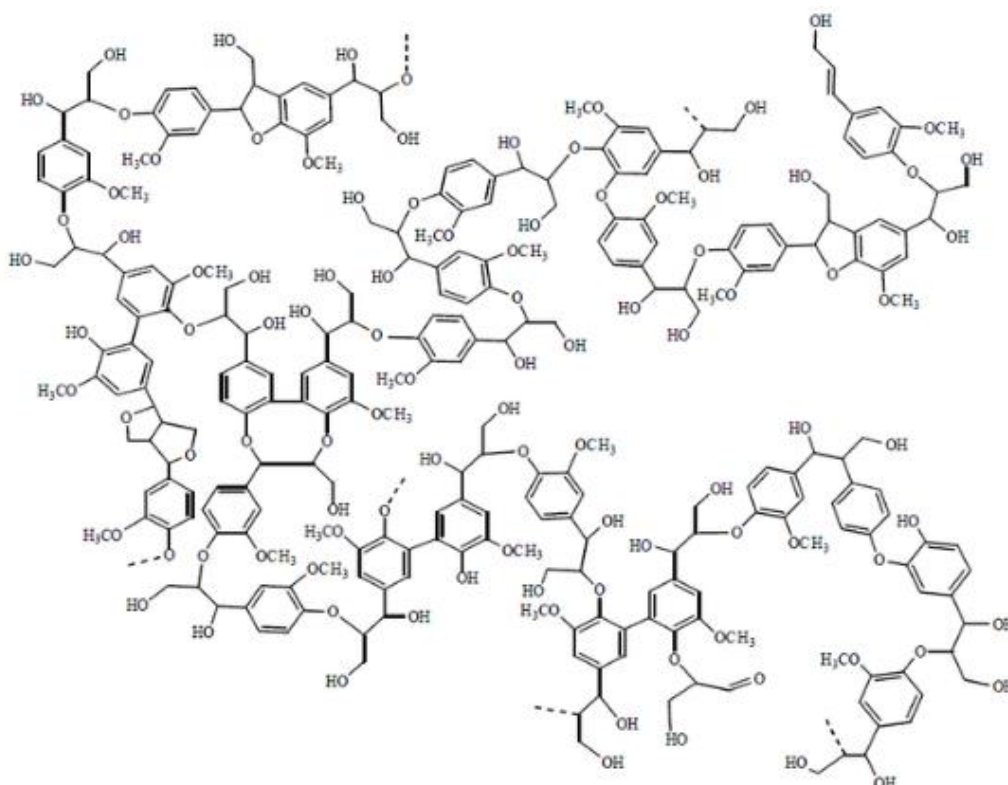
Fonte: Huebra (2016)

De acordo com (BNDES e CGEE, 2008), a hemicelulose é muito mais suscetível à hidrólise química quando comparada à celulose, isso porque sua estrutura não contém regiões cristalinas, logo as fibras têm menor resistência à solvatação. Porém, mesmo tendo esse ponto como “facilitador”, o processo de fermentação das pentoses (cinco carbonos) não é tão simples e desenvolvido quanto a fermentação da glicose.

### 2.2.3. Lignina

A lignina é uma substância que provém da polimerização do álcool cumárico, álcool coniferílico e álcool sinapílico (Figura 2.6). Ela não está relacionada a moléculas simples de açúcar, sua importância vem por ela ser responsável em atribuir rigidez à parede celular dos vegetais, gerando mais resistência ao impacto (SANTOS, 2018; BNDES e CGEE, 2008).

Figura 2.6: Estrutura da lignina



Fonte: Souto (2015)

A fração de lignina se entrelaça com a hemicelulose por ligações entre o fenilpropano e frações de resíduos de arabinopiranosose e ácido glucurônico. Apesar da lignina ter potencial para produzir diversos produtos, atualmente os estudos são mais focados na sua utilização como fonte de energia para processos, gerando para eles uma autossuficiência energética (VIANA, 2017; BNDES e CGEE, 2008).

### 2.3. Processo de obtenção de etanol de segunda geração

O complexo lignocelulósico é composto por cadeias de celulose envolvidas por hemicelulose e lignina. Sendo a celulose (unidade repetitiva de glicose) e a hemicelulose (mistura de polissacarídeos constituída por pentoses e hexoses) transformadas em etanol por meio da fermentação. Para isso, é necessário o fracionamento desse complexo e a desestruturação do polissacarídeo em açúcares mais simples, para que a levedura consiga metabolizar o açúcar, sendo esse convertido em etanol.

A rota química para a síntese de bioetanol de segunda geração pode ser dividida nas 5 seguintes etapas: o pré-tratamento da matéria-prima lignocelulósica, que separa primeiro a lignina e a celulose (celulignina) da hemicelulose; uma hidrólise para a separação da celulose da lignina; a hidrólise da celulose; a fermentação e a destilação do fermentado.

Temos então as seguintes etapas do processo com suas respectivas opções de rotas:

#### 2.3.1. Pré-tratamento da biomassa lignocelulósica

A primeira etapa de síntese é o fracionamento da biomassa lignocelulósica através do seu pré-tratamento. Nessa etapa, o objetivo é realizar a despolimerização e dissolução da fração hemicelulósica para a corrente líquida, tendo então a hemicelulose fermentável separada da celulignina em forma sólida.

De acordo com (SANTOS *et al.*, 2012) existem dois tipos de pré-tratamento para essa desestruturação do complexo lignocelulósico, removendo a hemicelulose: o químico e o combinado.

O pré-tratamento químico consiste em uma pré-hidrólise ácida, utilizando-se ácido diluído como catalisador no processo de solubilização, dentre eles pode-se citar os ácidos sulfúrico, clorídrico, fosfórico, fluorídrico e nítrico. Já o pré-tratamento combinado consiste no contato direto da biomassa, em um ambiente fechado, com o vapor saturado à alta pressão

durante um determinado tempo, funcionando como um reator, seguido de uma descompressão rápida, gerando a explosão a vapor. (TEIXEIRA, 2019).

Deseja-se que um bom pré-tratamento gere altos rendimentos e altas taxas de hidrólise, sem acarretar na geração de inibidores da fermentação. Espera-se que o processo tenha um baixo custo e um baixo consumo de energia, não apresentando perda de carboidratos ou degradação da biomassa e que seja possível a recuperação da lignina.

### **2.3.2. Deslignificação**

Esta etapa é realizada no intuito de remover a fração de lignina presente na torta residual da hidrólise da hemicelulose, proveniente pelo pré-tratamento, permitindo uma maior acessibilidade às fibras de celulose para que haja o aumento da conversão deste polissacarídeo em glicose.

A partir da celulignina, a celulose pode ser separada por meio da deslignificação, que consiste na dissolução da lignina com álcalis (hidrólise básica) ou solventes orgânicos. Entretanto, a utilização de solventes orgânicos no processo de deslignificação necessita-se ainda adicionar uma etapa de desintoxicação do açúcar. A lignina também pode ser separada através da hidrólise da celulose com ácidos minerais fortes a altas temperaturas. Porém, esse fracionamento não é recomendado ser feito por hidrólise ácida, pois gera substâncias de alta toxicidade. (VIANA, 2017)

10

### **2.3.3. Processamento da celulose**

Com o fracionamento da biomassa, temos então a celulose livre para o ataque de enzimas ou produtos químicos a fim de gerar a glicose para a fermentação.

Esse processo de formação de açúcares pode ser realizado a partir de uma sacarificação enzimática ou por hidrólise ácida.

A sacarificação enzimática se utiliza de um complexo de celulasas para atacar a celulose: as endoglucanases (EnG), para clivar ligações internas da fibra celulósica; as exoglucanases (ExG), para atuar na região externa da celulose; e as  $\beta$ -glicosidases (BG), para hidrolisar oligossacarídeos solúveis em glicose (KUMAR et al., 2016).

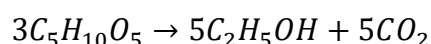
Já no processo de hidrólise ácida, a quebra das moléculas de celulose se dá de forma semelhante à citada no item 2.3.1, sendo o catalisador ácido utilizado nesse tipo de hidrólise

menos diluído para proporcionar um inchamento adequado da região cristalina da celulose e também sob maior pressão e temperatura.

### 2.3.4. Fermentação do hidrolisado

#### 2.3.4.1. Fermentação do hidrolisado hemicelulósico

Admitindo que o hidrolisado hemicelulósico é constituído apenas pela pentose xilose (carboidrato com 5 átomos de carbono), a sua fermentação pode ser representada pela seguinte reação, onde a levedura metaboliza o açúcar produzindo etanol e dióxido de carbono.



A conversão de xilose em etanol se dá na proporção de 3 moles de xilose produzindo 5 moles de etanol. Com a massa molar de cada espécie tem-se que a conversão máxima teórica do processo de fermentação hemicelulósica é de 0,51 g de etanol e 0,49 g de dióxido de carbono por cada 1,00 g de xilose, conforme equações abaixo. Porém essa conversão não é totalmente atingida, alcançando na fermentação um rendimento por volta de 50%.

$$\frac{\text{Massa de etanol}}{1g \text{ de xilose}} = \frac{5 * \text{Massa molar de etanol}}{3 * \text{Massa molar de xilose}}$$

$$\frac{\text{Massa de etanol}}{1g \text{ de xilose}} = \frac{5 * 46,07}{3 * 150,13} = 0,511g$$

$$\frac{\text{Massa de } CO_2}{1g \text{ de xilose}} = \frac{5 * \text{Massa molar de } CO_2}{3 * \text{Massa molar de xilose}}$$

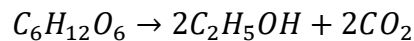
$$\frac{\text{Massa de } CO_2}{1g \text{ de xilose}} = \frac{5 * 44,01}{3 * 150,13} = 0,489g$$

A fermentação da hemicelulose pode ser feita pela levedura *Scheffersomyces stipitis* a 30°C, uma levedura mais eficiente para essa fermentação por conseguir consumir a pentose presente na estrutura.

#### 2.3.4.2. Fermentação do hidrolisado celulósico

A glicose, vinda da hidrólise da celulose, é uma hexose (carboidrato com seis átomos de carbono), açúcar mais comum metabolizado por microrganismos como combustível para a produção de etanol (TEIXEIRA, 2019).

Na fermentação do hidrolisado celulósico tem-se a glicose sendo consumida pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*, produzindo etanol e gás carbônico, a temperatura de 37°C. A reação é representada a seguir.



Nesse processo, cada mol de glicose produz dois moles de etanol. Teoricamente, a conversão é de 0,51 g de etanol e 0,49 g de gás carbônico para cada grama de glicose metabolizada.

$$\frac{\text{Massa de etanol}}{1g \text{ de glicose}} = \frac{2 * \text{Massa molar de etanol}}{\text{Massa molar de glicose}}$$

$$\frac{\text{Massa de etanol}}{1g \text{ de glicose}} = \frac{2 * 46,07}{180,156} = 0,511g$$

$$\frac{\text{Massa de } CO_2}{1g \text{ de glicose}} = \frac{2 * \text{Massa molar de } CO_2}{\text{Massa molar de glicose}}$$

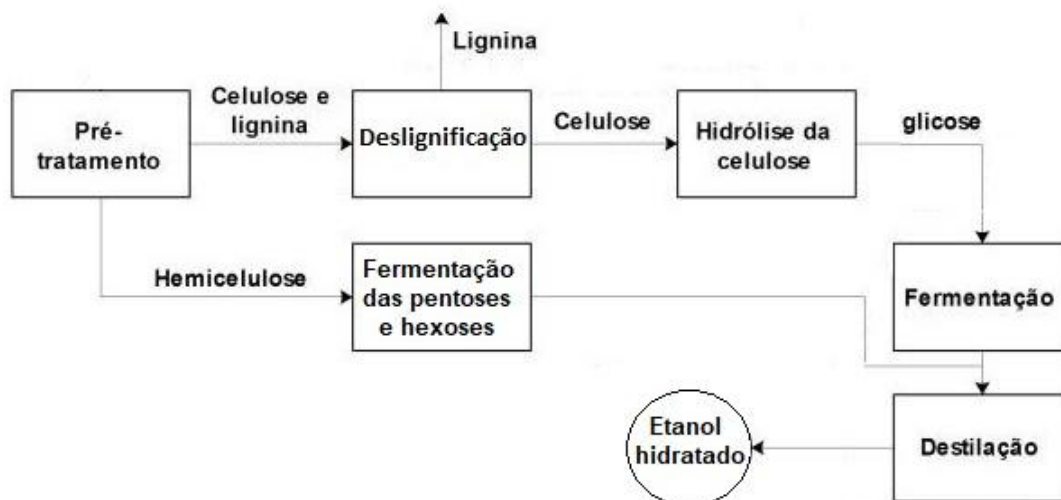
$$\frac{\text{Massa de } CO_2}{1g \text{ de glicose}} = \frac{2 * 44,01}{180,156} = 0,489g$$

### 2.3.5. Purificação do etanol

A última etapa é a recuperação do álcool hidratado por meio da destilação simples do fermentado das pentoses e das hexoses. A fim de se obter o álcool anidro, com grau de pureza a partir de 99,2%, é ainda necessário desidratar o álcool hidratado, seja por meio de destilação extrativa, operando com ciclo-hexano, seja por peneiras moleculares. Dessa forma, tem-se um álcool com concentração final de 99,7°GL.

Sendo assim, após a revisão bibliográfica realizada, todas as etapas são representadas no diagrama a seguir:

Figura 2.9: Diagrama da rota química de obtenção do bioetanol 2G a partir de biomassa lignocelulósica



Fonte: Adaptado de Carpio (2018)

### 3. CONCLUSÕES

A necessidade atual de desenvolver novas tecnologias para a produção de biocombustíveis, devido às adversidades provenientes do uso de combustíveis fósseis, faz com que a busca por novas fontes para a produção de bioetanol se torne uma das melhores alternativas em todo o mundo, visto que é uma fonte renovável de energia e reduz as emissões de dióxido de carbono.

Para um melhor rendimento no processo de fermentação, a etapa de pré-tratamento é crucial para a definição da composição da biomassa que será levada para as próximas etapas.

Diversas matérias-primas apresentam grande potencial para a geração de etanol de segunda geração, porém as condições testadas interferem nos resultados obtidos pela extração não foram tão eficientes, fazendo-se necessária uma otimização no processo, principalmente nas etapas de pré-tratamento e hidrólise. Um planejamento experimental pode ser estabelecido para avaliar os efeitos da temperatura no rendimento e na pureza dos hidrolisados formados. Assim como, a concentração do agente químico usado nas hidrólises.

Também é importante concluir que, considerando o alto volume de biomassa produzido anualmente em inúmeros meios produtivos, a biomassa apresenta grande potencial e ter esse aproveitamento, faz com que ela se torne uma alternativa favorável para minimizar os problemas ambientais e econômicos causados pelo seu excesso no ambiente.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 BEN Interativo. Painel de dados e micro e minigeração distribuída. Rio de Janeiro, [2020].
- 2 BNDES e CGEE. Bioetanol de Cana-de-açúcar. Energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro, 2008.
- 3 CARPIO, R.R., et al. Modelagem, simulação e otimização de uma biorrefinaria integrada para a produção de etanol de primeira e segunda geração. p 2, 2018.
- 4 CRUZ, Montezuma. Planta da Amazônia é arma poderosa contra poluição. 2009.
- 5 EIA. Annual energy outlook 2020 with projections to 2050. US Energy Information Administration. 2020.
- 6 HUEBRA, Lorena da Silva. Avaliação da utilização da casca de café para a produção de um derivado celulósico. São Mateus, 2016.
- 7 KUMAR, M., SINGH, P., SUKLA, L.B. Addition of expansin to cellulase enhanced bioethanol production. Process Biochemistry 51 2097–2103.2016.

- 8 MANOCHIO, Carolina. Produção de bioetanol de cana-de-açúcar, milho e beterraba: uma comparação dos indicadores tecnológicos, ambientais e econômicos. Poços de Caldas, 2014.
- 9 MOTA, F. A. S. *et.al.* Pirólise da biomassa lignocelulósica: uma revisão. Revista GEINTEC. Vol. 5/n. 4/ p.2511-2525. São Cristóvão – SE, 2015.
- 10 MUSSATO, I.S. & ROBERTO, I.C, 2002. Produção biotecnológica de xilitol a partir da palha de arroz. Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento. v. 28, p. 24-39. 2002.
- 11 SANTANA, Carlos. *et al.* Biomassa para Química Verde. Embrapa Agroenergia Brasília, 2013.
- 12 SANTOS, Adriana Maria dos. Caracterização química da biomassa: Potencial da palha da cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração. Rio Largo, 2018.
- 13 SANTOS, Fernando. A et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. Química nova, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.
- 14 SILVA, André Gonçalves da. Celulose. 2019.
- 15 SOUTO, Felipe. *et al.* Fibras de carbono a partir de lignina: uma revisão da literatura. Rio de Janeiro, 2015.
- 16 SOUZA, João Pedro Bessa de. Produção e caracterização de celulose bacteriana em cultivo estático e agitado. Fortaleza, 2019.
- 17 SOUZA, Juliana. Revisão do processo de obtenção da celulose kraft e sus tecnologias. Revista ft, n 28, 2024.
- 18 TEIXEIRA, D. A. *et al.* Produção de Etanol de Segunda Geração a Partir de Aguapé: Uma Revisão. Revista Virtual de Química: 2019.
- 19 TEIXEIRA, Daniel de Azevedo. Produção de etanol de segunda geração a partir de aguapé (*Eichhornia crassipes*). Teófilo Otoni, 2019.
- 20 UDOP. São Paulo [2020].
- 21 VIANA, Leticia dos Santos. Avaliação do Potencial dos Resíduos Lignocelulósicos da Indústria de Celulose para a Produção de Etanol de Segunda Geração via Rotas Químicas. Rio de Janeiro, 2017.