



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
ALAGOAS**

***CAMPUS PENEDO***

**CURSO TÉCNICO DE NÍVEL MÉDIO INTEGRADO EM AÇÚCAR E ALCÓOL**

**EMILLY CRISTHINY SILVINO TELES**

**PROCESSO PRODUTIVO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**

**PENEDO, AL**

**2022**

EMILLY CRISTHINY SILVINO TELES

PROCESSO PRODUTIVO DO ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

Artigo científico apresentado 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.

Orientadora: Martha Suzana Rodrigues dos Santos Rocha

PENEDO, AL

2022



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

---

T269p

Teles, Emilly Cristhiny Silvino.

Processo produtivo de etanol de segunda geração / Emilly  
Cristhiny Silvino Teles. – 2022.  
22f. : il.

Orientação: Prof.<sup>a</sup> Martha Suzana Rodrigues dos Santos  
Rocha.

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. Etanol - Produção. 2. Etanol 2G. 3. Biocombustível. I.  
Rocha, Martha Suzana Rodrigues dos Santos. II. Título.

---

CDD: 662

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

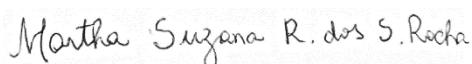
EMILLY CRISTHINY SILVINO TELES

PROCESSO PRODUTIVO DO ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

Artigo científico 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: 26/04/2022.

**BANCA EXAMINADORA**



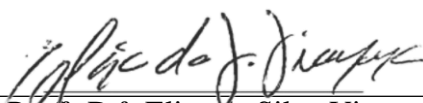
---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Martha Suzana Rodrigues dos Santos Rocha (orientadora)  
Instituto Federal de Alagoas - IFAL



---

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



---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eliza da Silva Vianna  
Instituto Federal de Alagoas - IFAL

# PROCESSO PRODUTIVO DO ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

## PRODUCTION PROCESS OF SECOND-GENERATION ETHANOL

Emilly Cristhiny Silvino Teles<sup>1</sup>

### RESUMO

Por conta do avanço de danos ambientais, acumulados nas últimas décadas pelos combustíveis fósseis, os biocombustíveis vêm crescendo cada vez mais. Dessa forma, o bioetanol vem ganhando espaço e importância. O etanol de segunda geração (E2G), que tem como matéria-prima a biomassa lignocelulósica, vem chamando a atenção da indústria, com previsão de maior crescimento até 2026. O E2G traz muitas vantagens, como o baixo custo de matéria-prima, menor emissão de gases poluentes, etc. Este trabalho apresenta, portanto, a produção do etanol a partir da biomassa lignocelulósica, exibindo a estrutura dessa biomassa e o passo a passo da produção. O trabalho foi desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica, baseado em artigos, sites, teses, etc. O processo é diferente do etanol convencional, de primeira geração, por conter as etapas adicionais de pré-tratamento e hidrólise, seguidas pela fermentação e destilação, que são essenciais para um bom rendimento em etanol ao final do processo. Verifica-se, portanto, que existem algumas desvantagens e desafios a serem vencidos, pois na produção de E2G, diferenças importantes são apontadas, quando comparamos ao etanol de primeira geração, por conta das características da biomassa, por isso é necessário utilizar enzimas altamente específicas que, atualmente, têm um alto custo, que ainda dificulta a viabilidade do processo, entre outros problemas, como inibidores que podem aparecer nas etapas de hidrólise e fermentação. Espera-se que com o passar dos anos o bioetanol cresça cada vez mais e o Brasil se destaque no uso dessa técnica, ampliando seu processamento na indústria.

**Palavras-chave:** Biocombustíveis; etanol; E2G; Processo produtivo.

### ABSTRACT

Due to the advance of environmental damage, accumulated in recent decades by fossil fuels, biofuels have been growing more and more. In this way, bioethanol has been gaining space and importance. Second-generation ethanol (E2G), whose raw material is lignocellulosic biomass, has been drawing the industry's attention, with a forecast of higher growth until 2026. E2G brings many advantages, such as the low cost of raw materials, lower emission of polluting gases, etc. This work presents, the production of ethanol from lignocellulosic biomass, showing the structure of this biomass and the production step by step. The work was developed through a bibliographic review, based on articles, websites, theses, etc. The process is different from conventional ethanol, first-generation, as it contains the additional steps of pre-treatment and hydrolysis, followed by fermentation and distillation. Such steps are essential for a good ethanol yield at the end of the process. It is verified that there are some disadvantages and challenges to be overcome. In the production of E2G, important differences are pointed out, compared to the first generation, due to the characteristics of the biomass, being necessary to use highly specific enzymes. which currently have a high cost, which still makes the feasibility of the process difficult, among other problems, such as inhibitors that may appear in the hydrolysis and fermentation stages. It is expected that over the years bioethanol will grow more and more and Brazil will stand out in the use of this technique, expanding its processing in the industry.

**Keywords:** Biofuels; ethanol; E2G; Production Process.

---

<sup>1</sup>Emilly Cristhiny Silvino Teles, estudante do Curso de Técnico de Nível Médio Integrado em Açúcar e Alcool do Instituto Federal de Alagoas, campus Penedo, ecst1@aluno.ifal.edu.br.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>8</b>
2.1 A ESTRUTURA DA BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA -----	8
2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO -----	11
<b>2.2.1 Pré-Tratamento -----</b>	<b>12</b>
2.2.1.1 Pré-tratamentos Físicos.....	13
2.2.1.2 Pré-tratamentos Físico-Químicos.....	13
2.2.1.3 Pré-tratamentos Químicos.....	13
2.2.1.4 Pré-tratamentos Biológicos.....	15
<b>2.2.2 Hidrólise -----</b>	<b>16</b>
<b>2.2.3 Fermentação-----</b>	<b>17</b>
<b>2.2.4 Destilação -----</b>	<b>18</b>
<b>3 E2G: DESAFIOS ENFRENTADOS PARA A PRODUÇÃO EM LARGA ESCALA .</b>	<b>19</b>
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>19</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>21</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os biocombustíveis são definidos como combustíveis produzidos a partir de biomassa (matéria orgânica), de origem vegetal ou animal, e que são biodegradáveis. As principais fontes de produção são: cana-de-açúcar, milho, soja, semente de girassol, madeira e celulose (BRASIL, 2007).

Os biocombustíveis têm tido uma grande demanda e crescimento durante os últimos anos, uma vez que sua utilização contribui para fatores como a redução e emissão de gases ligados ao efeito estufa e, assim, diminui os efeitos do aquecimento global, sendo uma ótima opção para a independência de combustíveis fósseis, como o petróleo (ROSA; GARCIA, 2009).

O processo de produção do etanol de primeira geração (E1G) derivado do caldo da cana compreende, basicamente: preparo e moagem, tratamento do caldo, fabricação do açúcar e destilaria de álcool (BASTOS, 2007).

Os biocombustíveis chamados de segunda geração, por sua vez, são aqueles obtidos de matérias-primas alternativas, como biomassa e resíduos lignocelulósicos. O etanol de segunda geração (E2G) é formado por biomassas lignocelulósicas como o sisal, casca do coco, palha do milho, espiga de milho e bagaço da cana-de-açúcar, que vem se destacando por ter uma alta disponibilidade e baixo custo de matéria-prima (LEMÕES, 2017). O processo é diferente do etanol de primeira geração por conter as etapas adicionais de pré-tratamento e hidrólise, seguidas pela fermentação e destilação, já aplicadas no caso do E1G. Tais etapas são essenciais para um bom rendimento em etanol ao final do processo.

A produção de biocombustíveis de segunda geração tem sido incentivada em diferentes países, com o objetivo de reduzir problemas ambientais, que cresceram nas últimas décadas, aumentando a produção e oferta dos biocombustíveis. O etanol de segunda geração apresenta diversas vantagens em relação ao de primeira geração como, por exemplo, baixo custo de matéria-prima, ausência de competição com a indústria alimentícia e contribuição para redução da emissão de gases de efeito estufa.

Entretanto, também existem algumas desvantagens e desafios a serem vencidos, pois na produção de etanol de segunda geração, existem diferenças importantes, quando comparada ao de primeira geração, por conta das características da biomassa, como maiores custos na produção comparado ao E1G sendo necessário o uso de enzimas altamente específicas na hidrólise que, atualmente, têm um alto custo, que ainda dificulta a viabilidade do processo, entre outros problemas, como inibidores que podem aparecer nas etapas de hidrólise e fermentação.

O etanol de segunda geração já é produzido em escala comercial em diferentes regiões do mundo. No Brasil, estão instaladas usinas em escala comercial, como a GranBio, em São Miguel dos Campos/AL. Apesar de ser comercializado, o E2G tem sido produtivo somente em baixa capacidade nominal, tendo previsão de crescimento previsto em 2026 (LEMÕES, 2017).

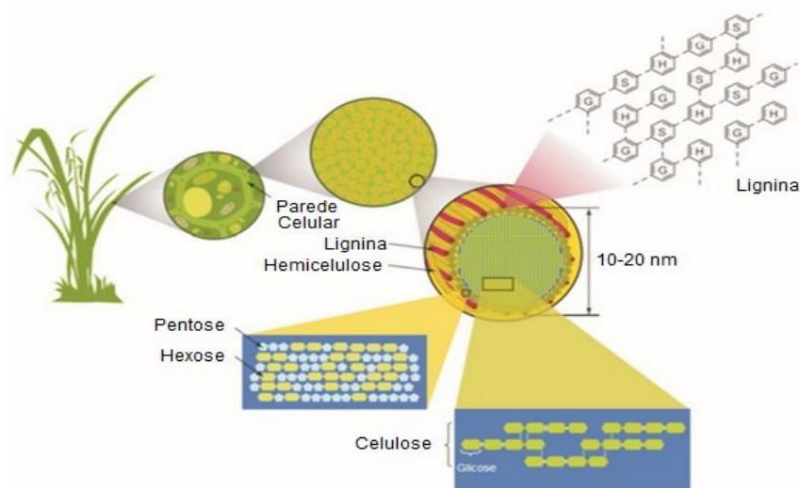
Dessa forma, este trabalho traz uma revisão bibliográfica sobre a produção do etanol de segunda geração, procurando destacar sua matéria-prima e o processo de produção.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A ESTRUTURA DA BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

Ao estudar sobre etanol de segunda geração, é imprescindível entender a estrutura da biomassa lignocelulósica, para poder compreender sua tecnologia de produção. De forma objetiva, a biomassa é estruturada por três componentes principais, que são: a celulose, a hemicelulose e a lignina, como pode ser visto na Figura 1 a seguir.

**Figura 1:** Estrutura do bagaço de cana-de-açúcar (biomassa lignocelulósica).



**Fonte:** GROSSI, 2015.

De acordo com Buoro (2021), o bagaço da cana-de-açúcar é composto por cerca de 45% de celulose, 35% hemicelulose, 15% lignina (este por sua vez contém o poder calorífico dessa biomassa) e 5% de cinzas inorgânicas. Na Tabela 1 a seguir é possível observar outras biomassas lignocelulósicas e suas respectivas composições.



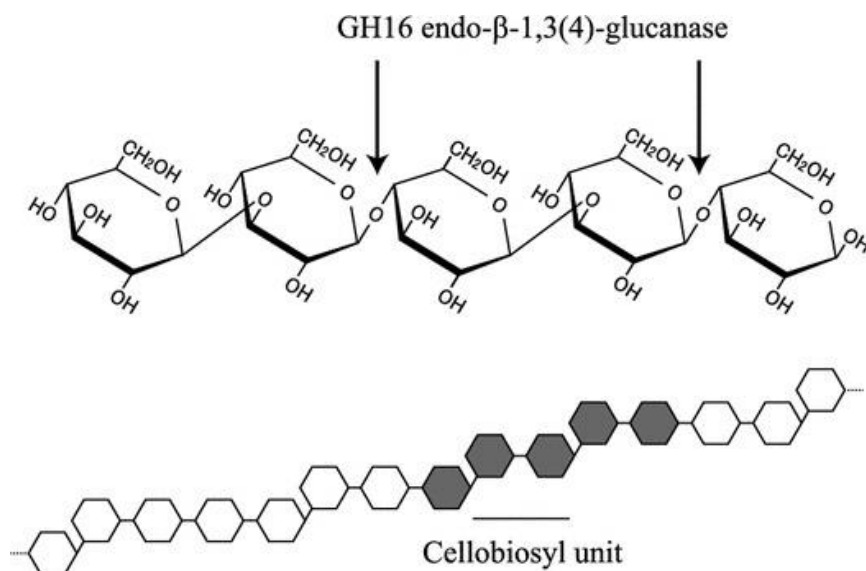
**Tabela 1.** Composição química de biomassas lignocelulósicas.

<b>Biomassas Lignocelulósicas</b>	<b>% Celulose</b>	<b>% Hemicelulose</b>	<b>% Lignina</b>
<b>Sisal</b>	73,1	14,2	11
<b>Palha do arroz</b>	43,3	26,4	16,3
<b>Espiga de milho</b>	45	35	15
<b>Fibra de coco</b>	36-43	0,15-0,25	41-45
<b>Palha de cevada</b>	31-45	27-38	14-19

Fonte: Adaptado de Santos & Queiróz *et. al.* (2012).

Cada biomassa acima vai ter sua composição de celulose, hemicelulo e lignina diferentes, como é possível se observar. O sisal por exemplo tem uma alta quantidade de celulose, porém não tem muita disponibilidade por isso não é muito utilizado na indústria, já a espiga de milho é algo bem mais acessível e tem um bom equilíbrio de celulose, hemicelulose e lignina cada componente desse tem sua importância para a biomassa.

A celulose é um carboidrato presente na biomassa celulósica, polissacarídeo formado por cadeias de celobiose, que por sua vez é formada por dímeros de glicose através de ligações glicosídicas, unidas entre si por ligações de hidrogênio, que resulta em um polímero linear, como visto na Figura 2, a seguir (BUORO, 2021).

**Figura 2:** Estrutura Celulósica.

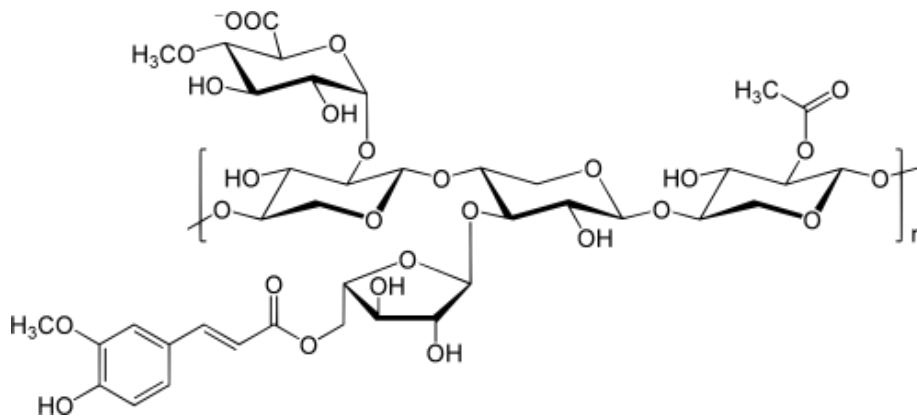
Fonte: EUROPE, 2015.

As cadeias lineares são responsáveis pela rigidez e as ligações intermoleculares, que é quando as moléculas de celulose se alinham, formam as fibras do vegetal. As unidades do tamanho das moléculas variam, dependendo da fonte de celulose, tendo uma média geralmente

de 8000 a 14000 unidades de glicose (VÁSQUEZ, 2007). Toda essa estrutura é muito importante para obtenção do etanol de segunda geração, pois é uma fonte de açúcar que é essencial para a fermentação alcoólica, operação unitária onde o etanol é propriamente obtido.

A hemicelulose é um polímero ramificado, formado por diferentes carboidratos, os de cinco carbonos que são: xilose e arabinose, e os de seis carbonos que são: glicose, galactose e manose, conforme mostra a Figura 3.

**Figura 3:** Estrutura da molecular de hemicelulose.



**Fonte:** LEMÕES, 2017.

Além dos carboidratos, a hemicelulose pode ser estruturada por diferentes ácidos hexaurânicos e deoxihexoses. A composição química pode variar com o decorrer do crescimento da planta, tendo como principais, xilanas, xiloglicanas, glicanas e mananas (LEMÕES, 2017). Os resíduos agroindustriais no Brasil representam uma grande fonte de material lignocelulósico, como nas indústrias sucroalcooleiras. O bagaço da cana-de-açúcar tem um alto teor de xilana, que vai representar cerca de 20 a 35% da massa seca, produzindo uma significativa fonte de biomassa renovável (VÁSQUEZ, 2007).

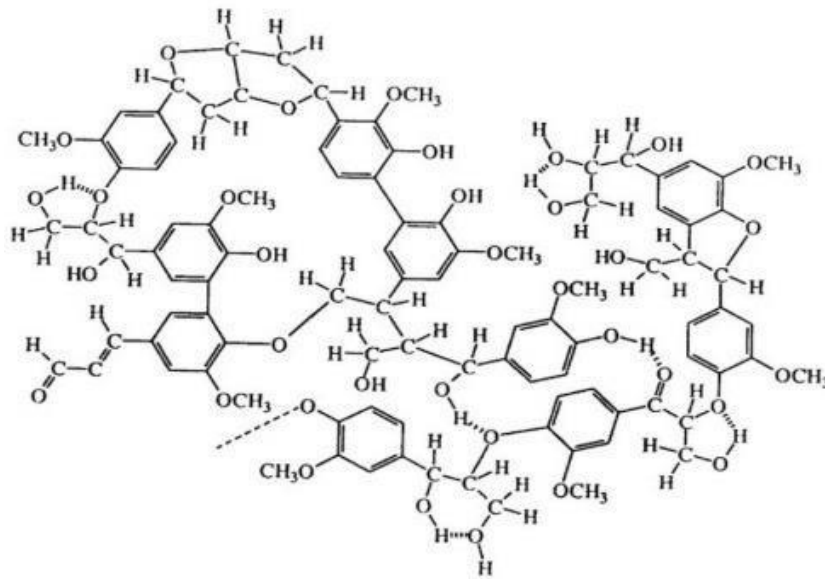
A lignina é um material com uma estrutura tridimensional ramificada, pode ser agrupada com um polifenol, em um arranjo irregular de várias unidades de fenilpropano. Sua estrutura é bem mais complexa do que a da celulose e hemicelulose. Tal estrutura atua como um cimento para a biomassa, atuando entre as fibras da celulose.

[...] A lignina é formada pela polimerização desidrogenativa (iniciada por enzimas) do álcool trans-coniferílico, álcool trans-p-cumarílico e álcool trans-sinapílico, os quais produzem uma molécula heterogênea opticamente inativa e com muitas ligações cruzadas. A macromolécula de lignina não pode ser descrita como uma combinação simples de algumas unidades monoméricas ligadas por alguns tipos de ligações, como

no caso da celulose e a hemicelulose. Esta dificuldade reside no fato de que a polimerização dos constituintes da lignina apresenta uma alta variedade de ligações (aproximadamente 10 tipos de ligações). A mais importante é  $\beta$ -O-4, que representa 50% das ligações, vista entre as unidades 1-2, 2-4, 4-5, 6-7, 7-8 e 13-14 da molécula (VÁSQUEZ, 2007).

Durante seu processo de crescimento é biossintetizada a partir de três monômeros: álcool coniferílico, sinapil e p- coumaril, como na Figura 4 a seguir.

**Figura 4:** Estrutura da lignina.

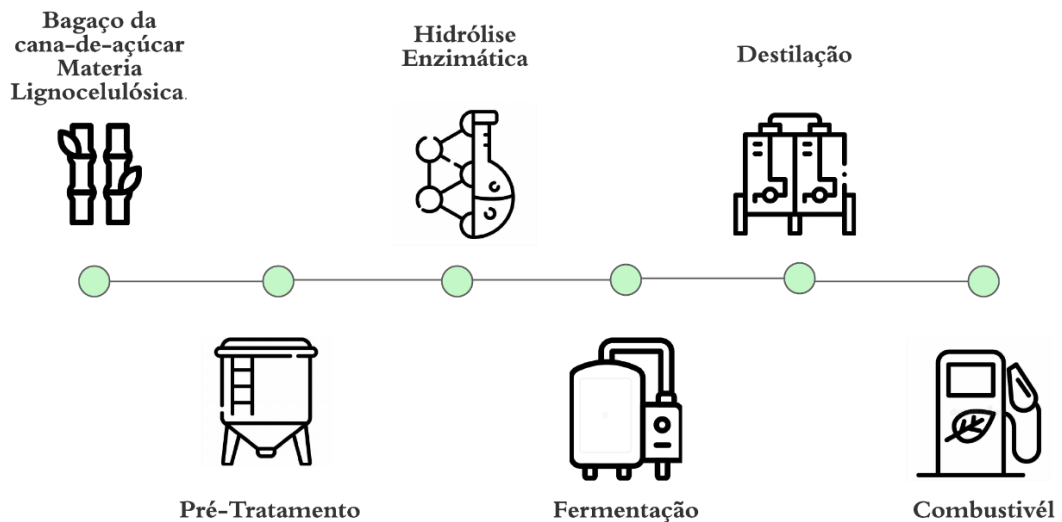


Fonte: GROSSI, 2015.

## 2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

De forma geral, o etanol ( $C_2H_5OH$ ) é um líquido incolor e volátil, de odor ardente e facilmente inflamável, medida em pureza por graus Gay-Lussac (VÁSQUEZ, 2007). Para a obtenção do etanol de segunda geração é preciso que a biomassa passe por um tratamento adequado durante os processos, que na Figura 5, é possível observar de acordo com o fluxograma.

**Figura 5:** Fluxograma das etapas produtivas do etanol de segunda geração (E2G).



Fonte: AUTOR, 2022.

### 2.2.1 Pré-Tratamento

O pré-tratamento tem como objetivo aumentar a área da superfície da biomassa, elevar a sua porosidade e reduzir a cristalinidade, com o intuito de melhorar o rendimento na hidrólise e na fermentação (AGUIAR, 2017). Para considerar um pré-tratamento eficiente, existem vários fatores a serem considerados, tais como: produzir a menor quantidade possível de inibidores que possam prejudicar a fermentação, utilizar menos energia e evitar a redução das partículas da biomassa (OGATA, 2013).

A fase de pré-tratamento é uma das etapas mais relevantes e influencia diretamente nos custos, na preparação da matéria-prima e nas etapas posteriores (hidrólise, fermentação e destilação). Essa etapa deve ter um grande retorno pelos custos que serão empregados como, rendimento, seletividade, simplicidade operacional, dentre outros (AGUIAR, 2017).

O processo de produção do E2G pode ser feito sem a etapa de pré-tratamento da matéria-prima, no entanto as próximas etapas não serão eficientes no contexto geral do processo. Existem diversos tipos de pré-tratamento, com distintos rendimentos e efeitos sobre a biomassa. Os métodos de pré-tratamento são divididos em quatro grupos: físicos, químicos, biológicos e combinados (físico-químicos), detalhados a seguir (GROSSI, 2015).

### 2.2.1.1 Pré-tratamentos Físicos

Os pré-tratamentos físicos podem ocorrer por redução mecânica, que consiste na redução das partículas da biomassa através da moagem, que vai aumentar o desempenho das enzimas na etapa posterior de hidrólise, por conta do aumento da área superficial (MELO, 2020).

### 2.2.1.2 Pré-tratamentos Físico-Químicos

Outra classe de pré-tratamento, que normalmente é realizado após o processo de pré-tratamento físico, é o pré-tratamento por explosão a vapor, que atua tanto física como quimicamente, chamado de tratamento físico-químico (MELO, 2020). Esse método consiste em submeter a biomassa, devidamente triturada, a vapores com altas pressões e temperaturas, por média de 20 min, em cerca de 160 a 240 °C de temperatura (DRABER, 2013). Logo após esse tempo, a pressão vai ser retirada rapidamente, o que vai fazer com que o material tenha uma mudança repentina de temperatura, fazendo com que ocorra a separação entre a lignina, a hemicelulose e a celulose (MELO, 2020).

[...] Ao longo deste processo, as ligações que asseguram a coesão da biomassa são fragilizadas e em parte quebradas, de forma que, no momento da descompressão, o material é desfibrado com facilidade e assim reduzido a partículas menores, aumentando a superfície de contato e diminuindo a resistência da parede celular à sacarificação [...] (MELO, 2020).

Outro método físico-químico que pode ser usado é a termohidrólise, com o mesmo objetivo da explosão de vapor, porém com a diferença de que a despressurização não ocorre de forma rápida e repentina, e sim lentamente. A termohidrólise trabalha com água pressurizada em temperaturas elevadas, fazendo com que as estruturas da biomassa se separem (DRABER, 2013).

### 2.2.1.3 Pré-tratamentos Químicos

O pré-tratamento químico, responsável pelas modificações estruturais e químicas da parede celular da biomassa, irá resultar em um acesso fácil da enzima e um melhor rendimento posteriormente, podendo usar ácidos, bases ou solventes orgânicos. Também chamada de pré-

hidrólise por alguns autores, o pré-tratamento ácido tem por objetivo desestruturar a matéria lignocelulósica, rompendo a estrutura celular por meio da solubilização da hemicelulose no meio ácido (MELO, 2020).

Esse método pode ser feito de duas maneiras, primeiro com o ácido concentrado, em baixa temperatura, ou em concentração baixa, com alta temperatura. Na maioria das vezes os ácidos mais utilizados são os ácidos sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), clorídrico (HCl) e fosfórico ( $H_3PO_4$ ), com um destaque para o ácido sulfúrico.

[...]Após o tratamento obtém-se um hidrolisado contendo açúcares simples (xilose, glicose, arabinose e galactose) e um resíduo sólido constituído de celulose e lignina. A lignina é removida por extração alcalina para que a celulose possa ser hidrolisada. Esse pré-tratamento aumenta a reatividade da celulose na hidrólise enzimática [...] (GOSSI, 2015).

Os ácidos fortes apresentam uma melhor eficiência nesse processo de quebra do complexo lignocelulósico do que os ácidos fracos, porém apresenta uma recuperação mais difícil (AGUIAR, 2017).

Outro método que pode ser usado na produção do etanol de segunda geração, na categoria dos pré-tratamentos químicos, é o tratamento alcalino, também chamado de hidrólise alcalina, que é empregada com o principal intuito de remover a lignina. Esse método reduz o grau de polimerização e cristalinidade, sendo conduzido em baixas temperaturas e pressões. Em contraponto, mesmo tendo uma alta eficiência na retirada da lignina, há uma grande perda de sais irrecuperáveis no processo (GROSSI, 2015). Existe outro tipo de tratamento alcalino chamado de expansão de fibra de amônia (AFEX), que consiste em criar uma alteração na estrutura lignocelulósica. Esse método vai fazer com que a amônia entre na biomassa, formando hidróxido de amônia, fazendo com que os íons tenham diversas reações termoquímicas, não sendo tão viável como o pré-tratamento alcalino por ter um custo mais alto (MELO, 2020).

Mais um pré-tratamento química utilizado é o organosolv, esse pré-tratamento consiste em uma mistura aquosa de um solvente orgânico com um catalisador ácido, essa mistura visa quebrar a estrutura da lignina e hemicelulose (DRABER, 2013). Dessa forma vai facilitar o acesso a celulose, para isso esse procedimento tem que acontecer com um controle eficiente por conta da volatilidade dos solventes (MELO, 2020).

#### 2.2.1.4 Pré-tratamentos Biológicos

O pré-tratamento biológico utiliza microrganismos, principalmente fungos. Essa técnica, assim como as outras, tem o objetivo principal de deixar a celulose acessível, retirando a lignina (MELO, 2020). Os principais promotores deste processo são os fungos de composição branca, que geram a enzima lignina-peroxidase, manganês-peroxidase e a lacase, porém a grande desvantagem desse método é a baixa velocidade de ação dos microrganismos (AGUIAR, 2017).

Cada processo deste tem suas vantagens e desvantagens, a Tabela 2 a seguir detalha melhor essas características.

**Tabela 2:** Vantagens e desvantagens de pré-tratamentos (PT's).

<b>Tipos de Pré- Tratamentos</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Explosão a Vapor</b>	Provoca degradação da hemicelulose e a desestruturação da lignina uma boa exposição da celulose e um custo- benefício comparado ao tratamento químico	Geração de inibidores e micro-organismo e destruição de uma parte do xilano
<b>Termohidrólise</b>	Melhor solubilização, menor risco de precipitação da lignina e sem resíduos tóxicos	Grande consumo de água, processo caro
<b>AFEX</b>	Amônia pode ser reutilizada, pode conseguir melhores conversões em baixas temperaturas	Não é eficiente para biomassas com alto teor de lignina, custo elevado, pode prejudicar o meio ambiente
<b>Pré-Tratamento ácido</b>	Hidrolisa a hemicelulose e aumenta a porosidade	Custo elevado no processo, gastos em equipamentos anticorrosivos, formação de substâncias tóxicas
<b>Pré-tratamento alcalino</b>	Aumenta a área superficial da biomassa, retira a hemicelulose e a lignina	Degradação nas cadeias glicosídicas e perda de sais
<b>Organosolv</b>	Facilita a recuperação dos solventes, possibilita o isolamento da lignina como sólido, hidrolisa a hemicelulose e a lignina	Alto custo, processo demorado, os solventes precisam ser drenados, evaporados, condicionados e reciclados
<b>Biológico</b>	Não precisa de muita energia, degrada a lignina e a hemicelulose	Tem taxa de hidrólise baixa e pequena velocidade

Fonte: Autor (2022).

### 2.2.2 Hidrólise

Após o pré-tratamento, a etapa da hidrólise se inicia, sendo essencial para o processo de obtenção do etanol de segunda geração, podendo ocorrer de forma ácida ou enzimática, com o objetivo de converter os polissacarídeos em açúcares permitindo a fermentação (ROCHA, 2017).

A hidrólise ácida é um método relativamente antigo, sendo uma tecnologia mais avançada. Utiliza o ácido como catalisador sendo ele concentrado ou diluído, que tem como intuito aumentar a velocidade da reação onde a celulose se transforma em glicose. Esse processo consiste na aplicação do ácido, fazendo com que ele ataque as ligações que há entre os monossacarídeos e polissacarídeos podendo ser usados ácido sulfúrico, clorídrico ou trifluoroacético, que vão atuar de formas diferentes na matéria lignocelulósica (AGUIAR, 2017).

[...] A diferença entre estes três deve-se à forma como atuam, pois os ácidos sulfúrico e clorídrico atacam a celulose e a hemicelulose de forma similar, mas o ácido trifluoroacético hidrolisa preferencialmente as ligações mais fracas existentes entre os monossacarídeos, ou seja, as ligações do tipo  $\alpha$ , que caracterizam as ramificações das hemiceluloses [...] (AGUIAR, 2017; pág 39).

A hidrólise com ácido concentrado vai suceder na quebra da hemicelulose e celulose presentes na biomassa lignocelulósica. Essa técnica é feita em baixas temperaturas tendo que ser menores que 100° C, usando soluções aquosas de ácidos fortes. Sendo dividida em duas etapas, a primeira é realizada priorizando a hidrólise da hemicelulose. A segunda, priorizando a conversão da celulose em glicose (MELO, 2020).

Na hidrólise com ácido diluído, o ácido sulfúrico é diluído e se une a matéria lignocelulósica, hidrolisando a hemicelulose em xilose e outros açúcares. O ácido se mistura com a biomassa e uma pasta é formada, mantida em uma temperatura média de 120 °C a 220 °C isso por pouco tempo, o intuito é fazer com que a fração hemicelulósica da parede celular da planta seja polimerizada, trazendo um aumento no rompimento da celulose nos resíduos sólidos (MELO, 2020).

Mesmo tendo um bom rendimento no rompimento da celulose, o processo de hidrólise ácida tanto diluído quando concentrado demanda custos altos, como em equipamentos com anticorrosivos, na recuperação e neutralização de ácidos. Além disso há o risco de formação de inibidores e degradação de açúcares (GROSSI, 2015).



A hidrólise enzimática é um dos meios também usados para se obter o E2G, com o intuito de aumentar a eficácia do pré-tratamento. As enzimas denominadas como celulases, são altamente específicas, substanciadas com fungos e bactérias, que vão trabalhar juntas para a degradação da celulose e a transformação na glicose (FERREIRA, 2015). As celulases não são organismos vivos, são cadeias proteicas, feitas a partir de organismos vivos e feitas para ter a mesma função original que um organismo vivo (BOURO, 2021). As celulases são formadas por um complexo enzimático de endoglicanases, exoglicanases e  $\beta$ glicosidases (ROCHA, 2017).

As endoglicanases iniciam a reação, promovendo a hidrólise de forma aleatória das regiões internas da estrutura amorfa da celulose, liberando oligossacarídeos e produzindo terminais redutores e não-redutores. As exoglicanases são subdivididas em celobiohidrolases e glicanohidrolases. Enquanto as celobiohidrolases promovem a liberação de celobiose a partir dos terminais redutores e não-redutores da celulose cristalina, as glicanohidrolases liberam moléculas de glicose diretamente do polímero. O último grupo das celulases, as  $\beta$ glicosidases, são enzimas que completam a hidrólise, pois têm a capacidade de hidrolisar celobiose e oligossacarídeos solúveis em glicose (ROCHA, 2017 pág. 40).

As celulases vão ser aplicadas na estrutura da biomassa, com o pH em 4,8 e a temperatura entre 45 e 50 °C, com isso uma menor quantidade de subprodutos são liberados, derivando em uma alta eficácia de açúcares fermentescíveis (DRABER, 2013).

O método mais utilizado nessa prática é a batelada alimentada, que vem crescendo e se destacando como uma das estratégias mais favoráveis para o uso da técnica de hidrólise enzimática. Essa técnica possibilita obter uma mistura reacional proporcional durante toda a operação, mesmo aplicando uma grande quantidade de biomassa seca até o final da reação (ROCHA, 2017).

### 2.2.3 Fermentação

A fermentação pode ocorrer depois da hidrólise ou simultaneamente, nesse processo são utilizados microrganismos. Ao longo dos anos a levedura *Saccharomyces cerevisiae* tem sido uma das mais empregadas na produção do etanol por fermentação alcoólica, por apresentar uma alta taxa de conversão de glicose em etanol e uma alta tolerância ao álcool (BOURO, 2015). Além da glicose, outros açúcares são liberados na hidrólise, como por exemplo, a xilose, proveniente das pentoses, que pode ser utilizada com outras leveduras como a *Kluyveromyces marxianus* e a *Pichia stipitis*, porém a fermentação desses açúcares de cinco carbonos (pentoses) ainda é um grande desafio, pois apresenta baixas taxas de conversão em etanol (ROCHA, 2017).

A fermentação alcoólica ocorre sob condições anaeróbias (ausência de oxigênio), transformando o mosto (líquido açucarado que pode ser fermentado), em álcool etílico ( $C_2H_6O$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (GÓES, 2018). Alguns parâmetros físicos e químicos devem ser seguidos nessa etapa, como o pH, que deve estar entre 4,5-5, a adição de antissépticos para controlar contaminantes, e aquecimento do mosto a 105 °C com o intuito de remover impurezas que serão retiradas pela decantação. O caldo é resfriado, chegando a 30-35 °C, onde as leveduras têm um melhor desempenho (AGEITEC, 2005). As leveduras são misturadas com o mosto nas dornas de alimentação, em forma contínua e descontínua, chamada batelada, que pode ser simples ou alimentada, onde a alimentada é mais viável e utilizada na produção do etanol (GÓES, 2018).

De acordo com a AGEITEC (2005), a fermentação por batelada alimentada tem uma eficácia superior a simples, o mosto e o fermentado (levedura) serão misturados conforme a dorna for abastecida, sendo um método mais produtivo e diminuindo os riscos de tornar a levedura inativa. Com o processo simples, por se misturar mosto e fermentado simultaneamente e em grandes quantidades, aumenta-se a ineficácia das leveduras. Dessa forma o vinho produzido vai seguir para a próxima etapa, a destilação.

#### **2.2.4 Destilação**

A destilação é a última etapa do processo de produção, com o objetivo de purificar e concentrar o etanol. É uma operação unitária em que a separação de componentes ocorre devido a diferença dos seus pontos de ebulição e se destina a separar componentes em mistura líquidas (CHIEPPE JÚNIOR, 2010). Essa operação consiste na retirada de etanol do vinho fermentado. A mistura é inserida nas colunas de destilação, onde será submetida a evaporação e, posteriormente, a condensação (transformando o vapor em líquido), sendo o etanol recuperado de forma hidratada, com um grau alcoólico com cerca de 96% INPM (m/m), pronto para o uso como combustível (NUNES, 2017).

Com o álcool hidratado já destilado, pode ocorrer a retirada do restante de água presente no etanol por evaporação, onde é fabricado o etanol anidro, com grau alcoólico de 99,5 % INPM (m/m). Após essa etapa, o etanol tanto anidro quanto hidratado, são armazenados em tanques e em seguida distribuídos (NUNES, 2017).

### **3 E2G: DESAFIOS ENFRENTADOS PARA A PRODUÇÃO EM LARGA ESCALA**

Ainda existem desafios a serem sanados para o E2G se tornar competitivo e com baixo custo de produção no mercado, desafios esses que ainda afastam as indústrias como a GranBio de uma alta produção. Um dos fatores que precisam ser superados são, por exemplo, o alto custo das enzimas, proteínas altamente específicas e essenciais para a produção do E2G. Seu alto custo encarece o processo de produção de forma geral, apesar de promover um melhor rendimento da hidrólise enzimática (BASTOS, 2007).

Há também um grande desafio a ser vencido na fermentação, principalmente nas transformações dos açúcares, o que impede que o rendimento seja melhor.

[...] Fermentação dos açúcares C5 (pentoses) e C6 (hexoses) com as leveduras, pois a fermentação para obtenção do etanol de segunda geração é mais complexa do que o de primeira geração, pois os microrganismos tradicionais não aceitam (para alimentação) os açúcares C6 (hexoses - celulose) e o C5 (pentoses - hemicelulósico), necessitando desenvolver microrganismos que aceitam esse tipo de biomassa lignocelulósica e que sejam economicamente viáveis [...] (RUIZ, 2020).

É importante destacar que esses e outros desafios que surgem na produção podem ser vencidos a partir de mais investimento e maiores estudos na área, fazendo assim possível uma maior produção de etanol de segunda geração.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O bioetanol vem progredindo e o Brasil vem se destacando cada vez mais nessa técnica e avançando seu processo na indústria. Apresenta inúmeras vantagens como: ganhos ambientais, menor poluição, preservação do meio ambiente, sustentabilidade e uma excelente alternativa de combustível renovável.

Diversos avanços foram feitos nessa tecnologia, trazendo muitas vantagens, o E2G ainda apresenta desafios para sua produção. Entretanto, o etanol de segunda geração tem se mostrado uma excelente alternativa de combustível, fechando quase completamente o ciclo de carbono da cana-de-açúcar, sendo uma realidade muito viável para independência de combustíveis fósseis. Se mostrando muito importante para o mercado mundial, essa tecnologia deve avançar e ter um alto investimento para poder conseguir uma alta eficiência do seu processo e progredir ainda mais em um futuro próximo.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Héricles Resende Ricardo de. **Produção de etanol de segunda geração**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, UNIVERSIDADE FEDERAL DE, UBERLÂNDIA, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20295/3/Produ%C3%A7%C3%A3oEtanolSegunda.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2022.
- AGEITEC. **AGEITEC- Agência Embrapa de informação tecnológica**. Fermentação. São Paulo: EMBRAPA, 2005. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_105\\_22122006154841.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_105_22122006154841.html). Acesso em: 29 mar. 2022.
- BASTOS, Valéria Delgado. Etanol, alcoolquímica e biorefinarias. **REVISTA BNDS**, Rio de Janeiro. ed. 1, ano 2007, p. 1-38. Disponível em: [file:///C:/Users/marta/Downloads/BS%2025%20Etanol,%20Alcoolqu%C3%ADmica%20e%20Biorrefinarias%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/marta/Downloads/BS%2025%20Etanol,%20Alcoolqu%C3%ADmica%20e%20Biorrefinarias%20(1).pdf). Acesso em: 28 jan. 2022.
- BUORO, Rafael. **Processo Produtivo de Etanol de Segunda Geração e seus Aspectos**. TCC (Graduação) - Curso de Química, UFSCar – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/15613/Monografia%20em%20Qu%C3%ADmica%20Rafael%20Vers%C3%A3o%20final.pdf?sequence=1&isAllowed>. Acesso em: 25 jan. 2022.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Petróleo brasileiro S.A. (PETROBRAS). Biocombustíveis: 50 perguntas e respostas sobre este novo mercado. 2007. 44 p. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/matprima1\\_000g7pccetcc02wx5ok0wtedt32e6jis7.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/matprima1_000g7pccetcc02wx5ok0wtedt32e6jis7.pdf). Acesso em: 06/04/2022
- CHIEPPE JÚNIOR, João Baptista. **Tecnologia de fabricação do álcool**. Inhumas: Ministério da educação, 2010. 74 p. Disponível em: [http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo\\_prd\\_industr/tec\\_acucar\\_alcool/161012\\_tec\\_fabric\\_alc.pdf](http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_prd_industr/tec_acucar_alcool/161012_tec_fabric_alc.pdf). Acesso em: 2 abr. 2022.
- DRABER, Katia Maria Madu. **Etanol de segunda geração já é realidade**. 2013. Graduação - Curso de Engenharia Bioquímica, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2013/MBI13004.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2022.
- FERREIRA, Juliana. Etanol de segunda geração: definições e perspectivas. **Conexão Eletrônica**, Campus São José do Rio Preto, ano 2015, Mensal. Disponível em: [http://www.aems.edu.br/conexao/edicaoanterior/Sumario/2015/downloads/2.%20Ci%C3%Ancias%20Exatas%20e%20da%20Terra,%20Engenharias%20e%20Ci%C3%Ancias%20Agr%C3%A1rias/010%20\(Eng\\_Alimentos\)%20ETANOL%20DE%20SEGUNDA%20GERA](http://www.aems.edu.br/conexao/edicaoanterior/Sumario/2015/downloads/2.%20Ci%C3%Ancias%20Exatas%20e%20da%20Terra,%20Engenharias%20e%20Ci%C3%Ancias%20Agr%C3%A1rias/010%20(Eng_Alimentos)%20ETANOL%20DE%20SEGUNDA%20GERA)

C3%87%C3%83O%20-%20defini%C3%A7%C3%A3o%20e%20perspectivas.pdf. Acesso em: 22 mar. 2022.

GÓES-FAVONI, S. P.; MONTEIRO, A. C. C.; DORTA, C.; CRIPPA, M. G.; SHIGEMATSU, E. Fermentação alcoólica na produção de etanol e os fatores determinantes do rendimento. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.9, n.4, p.285-296, 2018.

GROSSI, ELTON CARLOS. **Produção de etanol de segunda geração a partir de um derivado de celulose**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, Brasília, 2015. Disponível em: [https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/18579/3/2015\\_EltonCarlosGrossi.pdf](https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/18579/3/2015_EltonCarlosGrossi.pdf). Acesso em: 25 jan. 2022.

LEMÕES, JULIANA SILVA. **Produção de etanol de segunda geração a partir de Arundo donax L**. Tese (Doutorado) - Curso de Química UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/179650/001069632.pdf?sequence=1>. Acesso em: 25 jan. 2022.

MARIOTTI RUIZ, Stéphanie Cetímia. Etanol de segunda geração: Inovação no setor sucroalcooleiro. **Congresso Internacional de Administração (ADM)**, Ponta Grossa, p. 2-13, 21 out. 2020. Disponível em: [https://admpg.com.br/2020/anais/arquivos/06122020\\_100646\\_5ee3803e7271e.pdf](https://admpg.com.br/2020/anais/arquivos/06122020_100646_5ee3803e7271e.pdf). Acesso em: 28 mar. 2022

MELO, NICHOLAS ROCHA. **Etanol 2G: processo produtivo e contexto atual no brasil**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, Uberlândia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/31885/1/Etanol2GProcesso.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2022.

MURAKAMI, Luana Saemi N. A.; BOMBANA, Gustavo A.; AFFONSO, Graziela S. Processo produtivo do etanol de segunda geração usando bagaço de cana-de-açúcar. **X EEPA**, Mourão, 2016, Disponível em: [http://www.fecilcam.br/anais/x\\_eeпа/data/uploads/13-alimentos/13-02.pdf](http://www.fecilcam.br/anais/x_eeпа/data/uploads/13-alimentos/13-02.pdf). Acesso em: 28 mar. 2022.

NUNES, Eli Fernando. **Cana-de-açúcar: A produção de etanol e seus benefícios**. TCC - Curso de Agronegócio, Instituto Federal campus Barretos - São Paulo, Barretos, 2017. Disponível em: <https://brt.ifsp.edu.br/phocadownload/userupload/213354/IFMAN170005%20CANA%20DE%20ACAR%20A%20PRODUO%20DE%20ETANOL%20E%20SEUS%20BENEFICIOS.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2022.

OGATA, Bruna Harumi. **Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorefinarias**. Tese (Doutorado) - Curso de Bioquímica, Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11141/tde-13112013->

[143039/publico/Bruna\\_Harumi\\_Ogata.pdf](#). Acesso em: 25 jan. 2022.

PACHECO, Thályta Fraga. Produção de Etanol: Primeira ou Segunda Geração? A Importância da Produção de Etanol. **Circular Técnica**, Brasília, ed. 1, ano 2011, p. 1-6. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/32985/1/CITE-04.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2022.

ROSA, Sergio Eduardo Silveira da; GARCIA, Jorge Luiz Faria. O etanol de segunda geração: limites e oportunidades. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, 2009, p. 117-156. Disponível em: [https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev3204.pdf](https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev3204.pdf). Acesso em: 25 jan. 2022.

ROCHA, Martha Suzana Rodrigues dos Santos. **Estudo integrado das etapas de pré-tratamento e hidrólise enzimática da palha da cana-de-açúcar**. 2017. Pós- Graduação - Curso de Engenharia Química, Universidade federal de São Carlos, São Carlos, 2017. Disponível em: [https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/9545/SANTOS\\_Martha\\_2018.pdf?sequencia=4&isAllowed=y](https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/9545/SANTOS_Martha_2018.pdf?sequencia=4&isAllowed=y). Acesso em: 22 mar. 2022.

SANTOS, Fernando A. QUEIRÓZ, José H. *et al.* Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Revisão**, Viçosa, ed. 35, p. 1104-1010, 13 jan. 2012.

VÁSQUEZ, Mariana Peñuela. **Desenvolvimento de processo de hidrólise enzimática e fermentação simultâneas para a produção de etanol a partir de bagaço de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007. Disponível em: <http://tpqb.eq.ufrj.br/download/hidrolise-enzimatica-e-fermentacao-simultaneas-para-producao-de-etanol.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2022.