

Universidade de São Paulo  
Escola Politécnica - Engenharia Química



## **Estudo do Mercado do Etanol de 2<sup>a</sup> Geração no Brasil**

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC

Luis Gustavo de Lima Machado 9344511

Jefferson Carvalho Costa 9834031

Abril de 2020

Luis Gustavo de Lima Machado 9344511

Jefferson Carvalho Costa 9834031

# Estudo do Mercado do Etanol de 2<sup>a</sup> Geração no Brasil

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado  
à Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de bacharelado  
de Engenharia Química

**Área de Concentração:** Engenharia  
Química

**Orientador:** Prof. Doutor José Luis Pires  
Camacho

Abril  
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

#### Catálogo-na-publicação

Costa, Jefferson Carvalho; Machado, Luis Gustavo de  
ESTUDO DO MERCADO DE ETANOL DE ETANOL DE SEGUNDA  
GERAÇÃO NO BRASIL /J. C. Costa; L. G. L. Machado - São Paulo, 2020.  
33p.

Trabalho de Conclusão de Curso - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1. Etanol celulósico. 2. Mercado sucroalcooleiro. 3 Biocombustíveis.  
I. Camacho, José Luis Pires, orient. II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química.

## **Agradecimentos**

Gostaríamos de agradecer primeiramente aos nossos pais e irmãos por sempre estarem ao nosso lado independente das circunstâncias ao longo destes anos de faculdade.

Ao professor José Luis Pires Camacho pelo apoio e dedicação com nosso projeto.

Aos nossos amigos da Engenharia Química que nos acompanharam durante toda a graduação e compartilharam dores e alegrias conosco, em especial àqueles que se tornaram nossos irmãos.

Aos funcionários e professores do departamento pela ajuda e conselhos durante a graduação.

## Resumo

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo fazer uma análise do mercado atual de Etanol Celulósico no Brasil e também entender quais são as previsões futuras para este biocombustível. É intenção também compará-lo com uma das maiores potências mundiais no que se refere ao desenvolvimento de tecnologias de produção de segunda geração, os EUA.

Os Biocombustíveis ganharam espaço principalmente durante a crise do petróleo que ocorreu em 1970, esta fez com que alguns países como EUA e Brasil procurassem desenvolver tecnologias para produzir biocombustíveis em território nacional visando obter a independência de sua matriz energética. O Etanol já estava presente na gasolina de ambos os Países desde meados de 1930, facilitando o processo de transição, tendo o Brasil desenvolvido a tecnologia com a cana de açúcar e os EUA com o milho.

A produção de Etanol de Primeira Geração (feito com a biomassa) gera um excesso de materiais lignocelulósicos como o bagaço e as folhas da cana. Estes resíduos em sua maioria são utilizados como matéria prima para queima, que gera vapor e eletricidade para a planta. No entanto, tecnologias foram desenvolvidas a fim de hidrolizar e tratar este material de forma a utilizá-lo como biomassa para produção de etanol novamente, o Etanol de Segunda geração.

Os EUA e o Brasil são países avançados na tecnologia do etanol celulósico, por incentivos do Governo como o "RFS" nos EUA, que se trata de um estatuto que regulariza uma demanda mínima anual de biocombustíveis e faz projeções da capacidade requerida para o País nos próximos anos. Atualmente o E2G produzido no Brasil não é relevante para a matriz energética, devido ao volume muito pequeno em relação ao E1G. Pesquisas desenvolvidas em anos anteriores, no entanto, estagnaram por conta de prejuízos ao longo dos anos. Assim, o Brasil conta com 3 plantas de etanol celulósico e elas operam a menos de 40% da sua capacidade total.

Há estudos que indicam fatores positivos e negativos para a produção deste combustível no Brasil, no entanto, a conclusão é de que atualmente esta tecnologia não é de grande utilidade no país e só será despontada futuramente se ocorrerem injeções de capital por empresas ou investidores para superar os funis do processo e desenvolver tecnologias próprias que façam o Brasil alcançar uma independência no processo.

**Palavras-chave:** Etanol lignocelulósico. Mercado sucroalcooleiro. Biocombustíveis.

## Abstract

The goal of this work is to analyse the current status of lignocellulosic ethanol market in Brazil and its future. Also, to understand how is this market performing against one of the biggest technological industries in regard of second generation lignocellulosic ethanol, the USA.

Biofuel has gained a lot of magnitude since the first oil crisis in 1970, which led countries like Brazil and United States to search and develop new technologies in order to fulfill the countries need for energy. Present in both countries fuel mix for gasoline since 1930, the transition happened smoothly, with Brazil basing its technology in sugarcane and the US in corn.

The production of first generation ethanol generates a lot of biomass, such as the bagasse from the sugarcane. This biomass is, mostly, used as fuel for electricity generators in the site. However, with existing technologies, this biomass can be hydrolysed and used as raw material for more ethanol production, known as second generation ethanol.

United States and Brazil are the most developed countries regarding this technology, by incentive of state agencies, such as the RFS in USA, responsible for projections of the country fuel consumption for the next years. Currently, the amount of second generation ethanol produced in Brazil, if compared to first generation ethanol, is irrelevant for the country powergrid. Ongoing research and development was interrupted due to financial losses in the years. Now, Brazil has 3 active plants of lignocellulosic ethanol, all operating below 40% capacity.

Studies show positive and negative influences regarding the production of this biofuel in Brazil. However, it can be concluded that, currently, the state of developed technologies is not sufficient to sustain the production. Future growth of the market is extremely dependant of capital investment in order to overcome the major technology bottlenecks of the process and assure Brazil a comfortable position in second generation ethanol production.

**Keywords:** Lignocellulosic ethanol. Sugar-alcohol market. Biofuels.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Objetivo</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>2</b>
3.1	Etanol 1G e 2G no Brasil . . . . .	2
3.2	Estrutura Geral da Cadeia Produtiva . . . . .	3
3.2.1	Processo de Produção do Etanol 1G . . . . .	3
3.2.2	Processo de Produção do Etanol 2G . . . . .	4
3.2.3	Processo integrado 1 e 2G . . . . .	5
3.3	Processo Produtivo . . . . .	5
3.3.1	Composição da Biomassa . . . . .	5
3.3.2	Pré-Tratamento . . . . .	7
3.3.3	Hidrólise . . . . .	10
3.3.4	Fermentação . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Panorama Mundial do Etanol Celulósico</b>	<b>10</b>
4.1	Estados Unidos . . . . .	11
4.2	Brasil . . . . .	14
4.2.1	Eficiência produtiva . . . . .	14
4.2.2	Principais participantes do mercado . . . . .	16
4.2.3	Pontos Favoráveis à produção de Etanol-2G no Brasil . . . . .	18
4.2.4	Pontos Desfavoráveis à produção de Etanol-2G no Brasil . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>20</b>

## Lista de Figuras

1	Processamento Etanol 1G (adaptado). [1]	4
2	Processamento Etanol 2G [1]	4
3	Processamento Integrado do Etanol 1 e 2G (adaptado) [1]	5
4	Arranjo da Parede celular vegetal [2]	6
5	Estrutura da celulose [2]	6
6	Estrutura da hemicelulose. A: arabinose, FeA: ácido ferúlico, G: galactose, Glc: ácido glicorônico, X: xilose [3]	6
7	Estrutura da Lignina [4]	7
8	Esquema representando o objetivo do pré-tratamento (adaptado) [5]	8
9	Esquema das etapas do pré-tratamento (adaptado) [5]	8
10	Distribuição das plantas nos EUA [6]	12
11	Histórico e Expectativa da produção de biocombustíveis no mundo [6]	13
12	Histórico e Expectativa da produção de etanol celulósico nos EUA [6]	14



## Lista de Tabelas

1	Capacidade mundial de produção de etanol celulósico em 2015 [6] . .	11
2	Situação atual do Etanol 2G no Brasil: Plantas e Capacidade utilizada [7] . . . . .	15
3	Situação atual do Etanol 2G no Brasil: Plantas e Capacidade utilizada [7] . . . . .	15
4	Situação atual do Etanol 2G no Brasil: Utilização de Produtos para a produção de Etanol [7] . . . . .	16

# 1 Introdução

A contínua procura por fontes alternativas de energias renováveis durante a parte mais recente da história da humanidade tem auxiliado em uma gama de problemas relacionados ao desenvolvimento econômico descontrolado do mundo. Neste âmbito, biocombustíveis como o etanol ganharam espaço por se destacarem como opções favoráveis e viáveis de fontes de energia. Estas alternativas se apoiaram em estudos que comprovaram uma significativa redução da emissão dos gases de efeito estufa por substituírem os combustíveis fósseis.

No Brasil, em específico, houve uma movimentação em resposta à rápida elevação dos preços do petróleo em decorrência da crise de abastecimento que ocorreu depois dos embargos criados em 1970 pela Organização dos Países Árabes Exportadores de Petróleo (OAPEC), esta reação culminou na oficialização do etanol como uma alternativa na escolha do combustível de veículos leves. A determinação foi impulsionada e facilitada pois o Brasil queria promover sua independência energética e desde 1931 o etanol já estava presente como uma mistura na gasolina vendida [8].

A produção de etanol combustível no Brasil em escala industrial ocorre há mais de 4 décadas, por meio da fermentação da sacarose da cana, formando o etanol de 1ª Geração. Este processo gera uma alta quantidade de materiais lignocelulósicos como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar. Estes materiais são utilizados como combustíveis de caldeiras, no entanto a maior parte ainda é queimada ou deixada no campo para propósitos de agricultura [9].

No decorrer do tempo, pesquisas foram feitas de forma a conseguir obter o melhor caminho para esses resíduos gerados do processamento do Etanol G1 (primeira geração), até que se chegou a produção de um biocombustível a partir da hidrólise enzimática destes dejetos, o etanol de segunda geração. Este biocombustível produzido de materiais lignocelulósicos tem sido visto como a matriz energética com maior capacidade de substituir combustíveis fósseis, com menor impacto ambiental que o 1G [9]. Além de ser barata e abundante, a produção de materiais lignocelulósicos para combustíveis não é um risco para a produção de comida mundial, fortalecendo seus pontos favoráveis [10].

Dentre as vantagens da produção do etanol G2 a partir dos resíduos, se destaca o fato de que eles estão disponíveis na planta, ou próximo dela, portanto parte da produção pode compartilhar da estrutura onde o etanol G1 é produzido (fermentação, destilação e armazenamento). Outro fator importante é de que os inibidores gerados no pré-tratamento do material lignocelulósico podem ter um efeito reduzido no processo de fermentação, dado que o xarope hidrolisado deve ser fermentado misturado ao suco da cana-de-açúcar, diluindo os inibidores. No entanto, apesar de todos os pontos positivos, a produção do etanol G2 requer equipamentos mais sofisticados e investimentos altos [10].

## 2 Objetivo

O foco deste Trabalho de Conclusão de Curso é estudar o impacto da produção do etanol de 2ª geração no mercado de biocombustíveis, desde o início do processo ao fim da cadeia logística, analisando o impacto econômico que a via produtiva

poderá ter na matriz energética nacional. Em paralelo, analisar as plantas atuais de produção no Brasil, bem como o futuro da produção de etanol de 2<sup>a</sup> geração e seu impacto na produção nacional do futuro, em questões de volume produzido e eficiência de processo.

## 3 Desenvolvimento

### 3.1 Etanol 1G e 2G no Brasil

Impulsionado pela crise do petróleo, em 1975, o Brasil lança o programa "Pro-alcool" tentando reduzir a dependência do país em importações [11]. Inicialmente, o programa passou a adicionar etanol à gasolina e, após a segunda crise, o primeiro carro totalmente movido por etanol entrou no mercado brasileiro.

Apesar de em 1980 o Brasil ter conseguido reduzir sua dependência de derivados de petróleo, a ocorrência de fatores como redução no preço do petróleo, redução de subsídios a produtores e aumento do preço do açúcar resultou numa diminuição de demanda por carros movidos a etanol.

Partindo para o século atual, os dois motivadores principais para a produção de etanol giram em torno da alta de preços de petróleo no mercado internacional e pelo desenvolvimento de carros com a tecnologia flex. Com essa tecnologia, carros podem funcionar com qualquer proporção de etanol. Além disso, o uso de álcool como aditivo na gasolina substituiu outros produtos mais tóxicos e, com isso, conseguiu também melhorar a qualidade do ar em centros urbanos, reduzindo as emissões de monóxido de carbono de 50g/km para 5,8g/km dirigido.

O uso de etanol como biocombustível no Brasil é considerado o programa mais bem sucedido em substituir combustíveis fósseis. Em números, a indústria de açúcar e etanol representa 2,3% do PIB, bem como um mercado anual de 80 bilhões de dólares [12].

O Brasil, com a produção de etanol de primeira geração, se tornou referência mundial, com sua produção substituindo cerca de 1% da gasolina mundial. Percebe-se, dessa forma, um enorme potencial reprimido e a importância de novas tecnologias, como a possibilidade de escalar a produção de etanol de segunda geração, aumentando o balanço energético, o rendimento de etanol por hectare e reduzir os custos de produção[13].

A produção de etanol produz uma grande quantidade de biomassa lignocelulósica, resultante do processamento da cana-de-açúcar. Com isso, há uma movimentação do mercado para o desenvolvimento do etanol de segunda geração (2G), baseado na biomassa do bagaço e palha resultantes da cana-de-açúcar. A parede celular desses rejeitos é composta de celulose e hemicelulose, conversíveis em etanol. Contudo, pela via fermentativa, não é possível sua conversão direta, sendo necessário tratamento por meio de enzimas e solventes, capaz de liberar glicoses e xiloses [14].

Apesar de promissor, desde 2011 os investimentos em biocombustível de nova geração vem decrescendo mundialmente, e diversas plantas de produção de etanol 2G fechadas. Motivados, também, pelas oscilações do preço do petróleo, os obstáculos

encontrados demonstram que ainda há grandes percalços na extração dos 2/3 da energia da planta que ficam retidos nessa biomassa. Dificuldades no trato das enzimas responsáveis pela quebra das estruturas mencionadas, bem como seu alto custo, tem tornado a viabilidade econômica uma realidade ainda distante. Contudo, duas unidades no Brasil, da Raízen e Granbio, são, hoje, as mais próximas da viabilidade econômica, reportando não só os obstáculos enzimáticos, mas também problemas de ordem operacional, com uma alta corrosividade de materiais e necessidade de etapas de limpeza, que afetam diretamente a escalabilidade [15].

## 3.2 Estrutura Geral da Cadeia Produtiva

Em geral, há três tecnologias principais de conversão de etanol: o processo de primeira geração, o processo de segunda geração e um processo integrado dos processos 1G e 2G.

### 3.2.1 Processo de Produção do Etanol 1G

O processo do etanol de primeira geração é a conversão de cana de açúcar ou outra fonte rica em biomassa em etanol. No processo de obtenção de primeira geração a partir da cana de açúcar, esta é triturada e moída para extrair o suco rico em açúcar. Este por sua vez, é tratado e concentrado (a concentração de sacarose é muito baixa, 13,7% em massa, para atingir a concentração de etanol necessária no estágio de fermentação, uma unidade de evaporação é usada para aumentar a concentração para 19% em massa [16]) por um processo de evaporação antes de entrar no passo da fermentação [1].

Durante a fermentação (processo exotérmico) a sacarose é convertida para glicose e frutose, que por sua vez são convertidos a Etanol,  $CO_2$ , e outros produtos (álcoois, ácidos orgânicos, etc.) [17]. O caldo fermentado é alimentado para uma centrífuga para permitir a separação e recuperação de leveduras. Os gases gerados na fermentação são alimentados a um absorvedor para recuperação de etanol [1, 18].

Tanto o etanol recuperado da centrífuga, quanto do absorvedor são enviados a uma coluna de destilação, onde o produto gerado é alimentado na zona de retificação que produz etanol hidratado. Depois disso, anidrido de etanol desidratado é produzido [1].

Para a tecnologia do Etanol 1G, o bagaço da cana e os outros resíduos (folhas secas que geralmente são deixadas nas plantações) são alimentados a outro processo unitário para produzir vapor de processo e eletricidade. A Figura 1 ilustra o processamento do Etanol 1G [1].

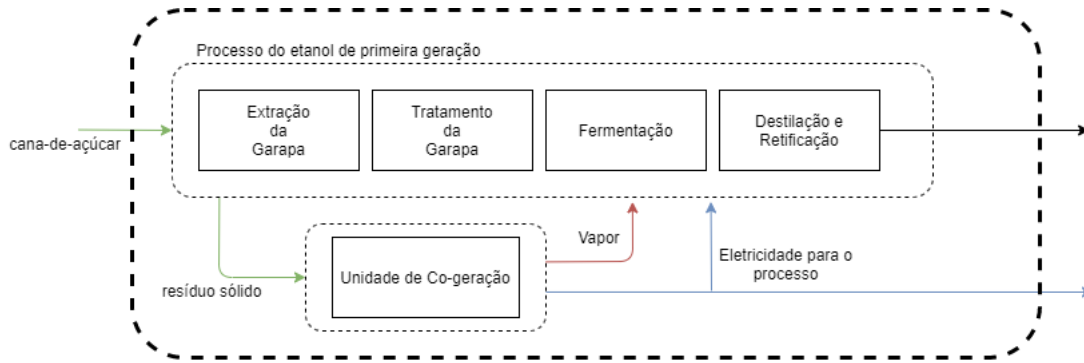


Figura 1: Processamento Etanol 1G (adaptado). [1]

### 3.2.2 Processo de Produção do Etanol 2G

O processamento industrial do etanol 2G consiste na conversão da biomassa de lignocelulose em etanol como pode ser visto na Figura 2. Devido à complexa estrutura da lignocelulose, a biomassa precisa ser tratada antes que os açúcares incorporados estejam disponíveis para a fermentação em etanol. Em um processo industrial de segunda geração, a lignocelulose (biomassa) é pré-tratada, a hemicelulose em conjunto com uma pequena porção de celulose são hidrolisadas, seguidas de fermentação e separação do etanol [1, 19, 20].

A hidrólise combinada com a fermentação é mais complexa que a fermentação de açúcares simples [21]. Muitas técnicas diferentes para pré-tratar e hidrolisar a biomassa de lignocelulose foram pesquisadas para melhorar o rendimento de etanol e reduzir os custos de sua produção [16]. Atualmente, o pré-tratamento a vapor seguido da hidrólise enzimática é considerado uma das opções mais viáveis para a produção de etanol lignocelulósico [1, 16].

Os resíduos de processamento industrial do processo de segunda geração (que consistem principalmente de lignina e celulose que não reagiu na hidrólise) são alimentados a instalações de geração de energia [1].

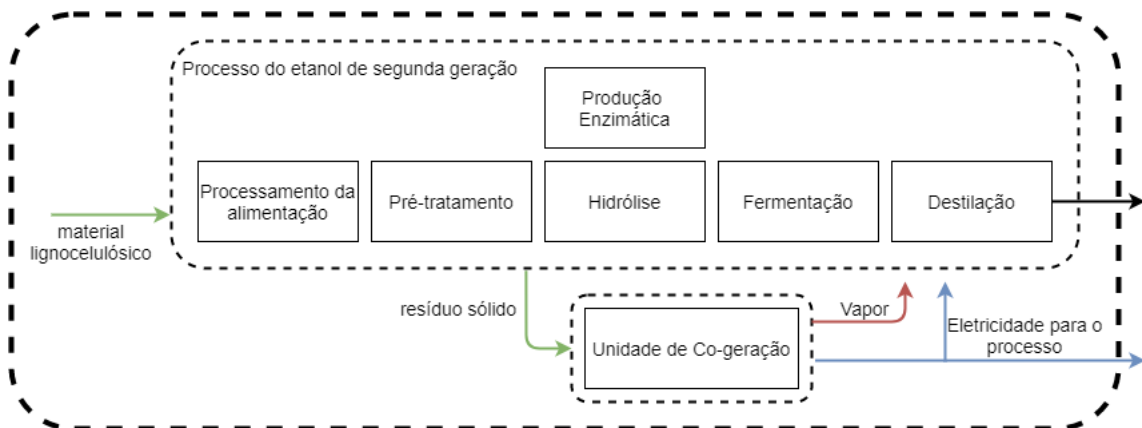


Figura 2: Processamento Etanol 2G [1]

### 3.2.3 Processo integrado 1 e 2G

Outra possibilidade é integrar os processos de primeira e segunda geração: os resíduos lignocelulósicos do processo de primeira geração (bagaço e folhas secas) são alimentados no processo de segunda geração, como apresentado na Figura 3. A unidade de cogeração, alimentada com resíduos do etanol de segunda geração produz o vapor e a eletricidade para ambos os processos [1].

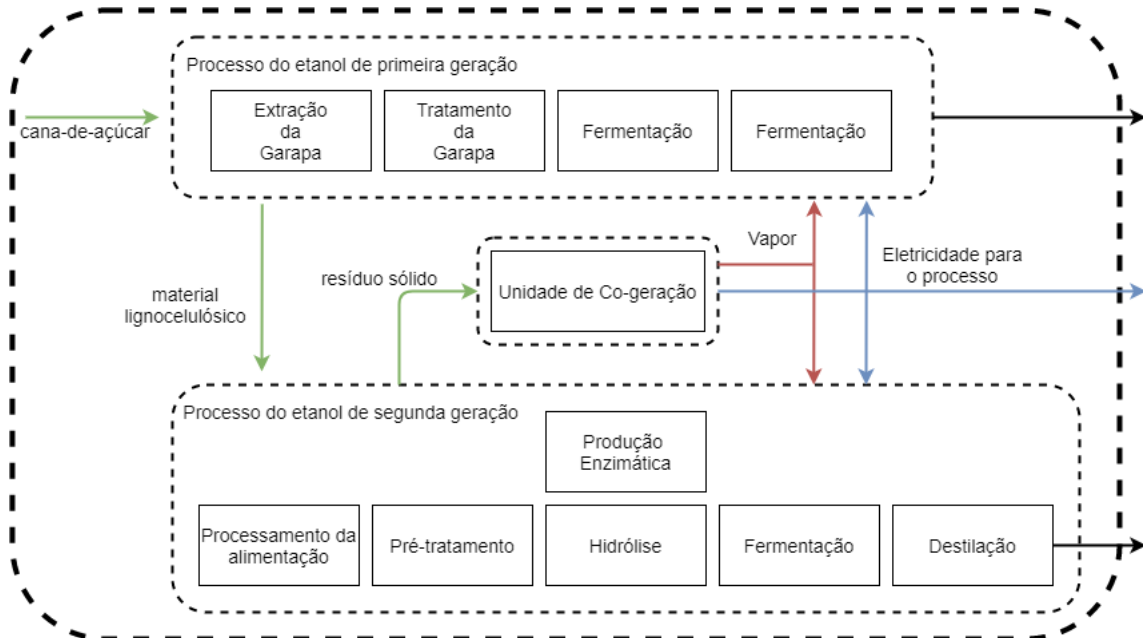


Figura 3: Processamento Integrado do Etanol 1 e 2G (adaptado) [1]

## 3.3 Processo Produtivo

### 3.3.1 Composição da Biomassa

A estrutura do material celulósico é um fator importante na produção do etanol 2G, uma vez que tais estruturas precisam estar expostas no processo de hidrólise e fermentação. Grande parte do esforço de PD está na melhor compreensão dessas estruturas a fim de aumentar o rendimento do processo. A celulose e a hemicelulose são os polissacarídeos fundamentais da biomassa, que podem ser transformados em açúcares e fermentados, produzindo etanol. A lignina, polímero complexo, mantém as células unidas e também pode ser processada quimicamente, podendo ser transformada em aditivos para combustível, fenóis, vanilinas e outros compostos. A figura 4 representa uma estrutura típica da biomassa [22].

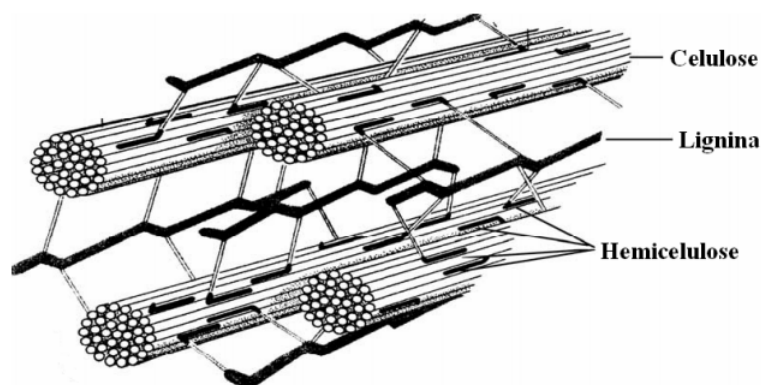


Figura 4: Arranjo da Parede celular vegetal [2]

A celulose é um polímero linear, rígido e difícil de ser quebrado, representado pela figura 5. Quando hidrolisado, o resultado é glicose, a qual possui um processo fermentativo bem definido e conhecido. A hemicelulose, representada pela figura 6, por sua vez, pode ser hidrolisada mais facilmente, porém, a fermentação do açúcar de 5 carbonos resultante não possui rota bem desenvolvida. Por último, a lignina, presente na figura 7, possui estrutura complexa que não está relacionada a moléculas simples de açúcar e, portanto, à produção de etanol.

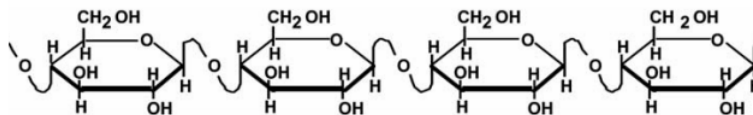


Figura 5: Estrutura da celulose [2]

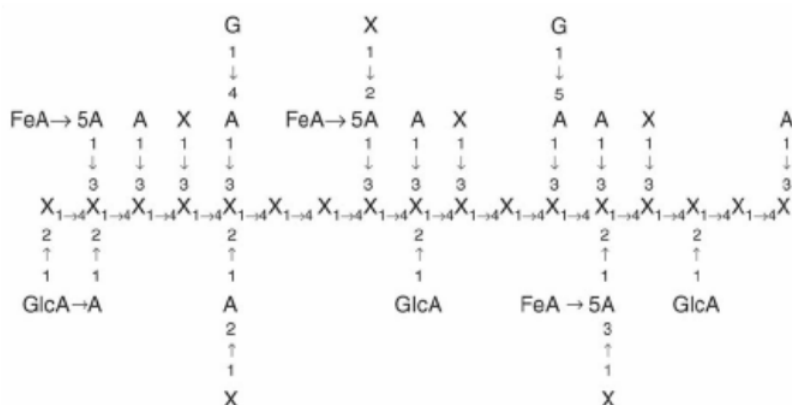


Figura 6: Estrutura da hemicelulose. A: arabinose, FeA: ácido ferúlico, G: galactose, Glc: ácido glicorônico, X: xilose [3]

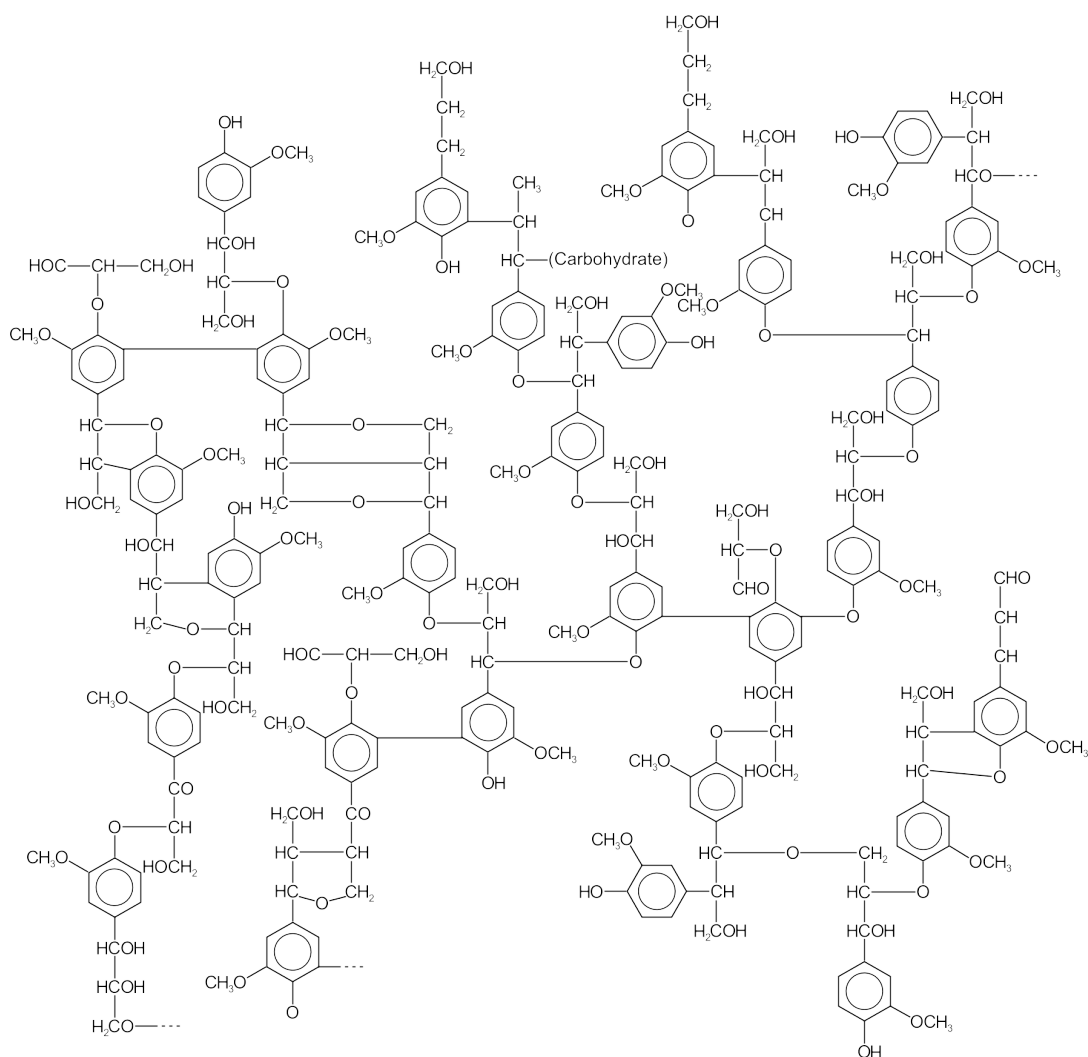


Figura 7: Estrutura da Lignina [4]

### 3.3.2 Pré-Tratamento

A principal função do pré-tratamento é romper a estrutura cristalina da celulose e quebrar a proteção de lignina, a fim de expor os polissacarídeos desejados, como exemplificado pela figura 8. Esta etapa tem se mostrado a mais custosa do processo de conversão da biomassa a etanol [5, 22].



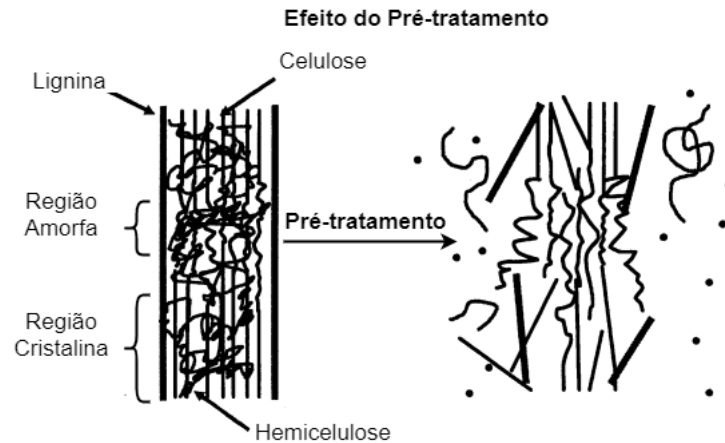


Figura 8: Esquema representando o objetivo do pré-tratamento (adaptado) [5]

Inicialmente é necessário um tratamento mecânico para adequar o tamanho de partículas, que pode ser acompanhado de um tratamento químico ou biológico. Para cana, em específico, essa etapa é representada pela moagem da cana que, contudo, pode ser substituída pelo tratamento com vapor da biomassa picada, submetida posteriormente a ácido diluído, o que poderia servir para diminuir a demanda energética do processo [23, 22].

Em seguida, a biomassa é solubiizada, a fim de hidrolisar os polímeros. Dentre os açúcares produzidos, uma pequena porção da celulose é convertida em glicose. O resultante desse processo é então filtrado e prensado, com os sólidos seguindo para hidrólise adicional e os líquidos para a fermentação, como esquematizado pela figura 9.

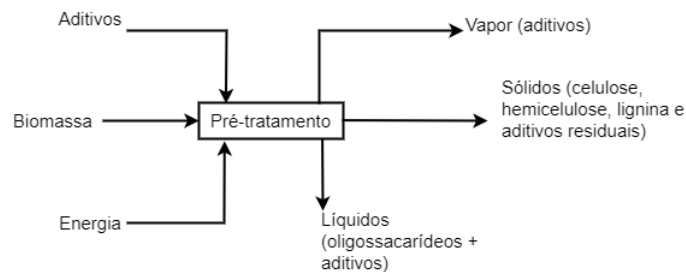


Figura 9: Esquema das etapas do pré-tratamento (adaptado) [5]

Um pré-tratamento é considerado eficaz por atender a diversos critérios: evita a necessidade de redução do tamanho das partículas, preserva a fração de pentoses, limita a fração de produtos inibidores na fase de fermentação e minimiza a demanda de energia. Somando-se isso a baixo custos de catalisadores e reciclo, bem como a geração de co-produtos de lignina de alto valor, formam uma base de comparação para as opções de pré-tratamento. Dentre as mais importantes:

#### Processos Físicos:

- **Explosão a vapor:** processo caracterizado pelo tratamento da biomassa triturada com vapor saturado, seguido de rápida descompressão. Os fatores que

afetam o pré-tratamento são o tempo de residência, a temperatura, o tamanho da partícula e a umidade. Temperaturas mais baixas e tempos de residência maiores parecem favorecer a solubilização da hemicelulose, segundo estudos [22]. As condições ideais de processamento dependem da composição da biomassa, sendo que uma recuperação de xilose de 48% em massa foi obtida com o bagaço num pré-tratamento a 220°C, 2 minutos e pH 4,2 [24, 22].

- **Termo-hidrólise:** utiliza água quente a alta pressão (acima do ponto de saturação) para hidrolisar a hemicelulose. Demonstra alta recuperação de xilose e não há necessidade de adição de ácido ou catalisadores químicos [25]. Estudos no tratamento do bagaço com esta técnica demonstraram boa recuperação de xilose em massa (91%), com condições de 220°C, 2 minutos, 1% de sólidos e pH 3,8.

### Processos Químicos:

- **Hidrólise Ácida:** utiliza-se principalmente ácido sulfúrico, clorídrico ou nítrico. Extremamente corrosivos quando concentrados e, portanto, exigindo reatores resistentes, são bons hidrolisadores da celulose. Pensando na viabilidade econômica, devem ser recuperados ao fim do processo [26]. A hidrólise com ácido sulfúrico diluído (0,5% a 1,5% em concentração, temperaturas acima de 160°C) é historicamente mais utilizado industrialmente, mostrando alto rendimento para a hemicelulose. No entanto, a quantidade de resíduos que precisam ser neutralizados antes da fermentação é expressiva [5]. Para o tratamento do bagaço, resultados com ácido sulfúrico permitiram hidrólise de cerca de 90% da hemicelulose, a condições de 122°C, 2% em concentração de ácido, 24 minutos [27]. Para o ácido fosfórico, foi possível obter 55% dos sólidos dissolvidos como açúcares em condições de 122°C, 4% em concentração de ácido e 300 minutos [28]. Para o ácido nítrico utilizado com o bagaço, encontrou-se uma condição ótima de 18,6g/L de xilose e 2,87g/L de glicose para condições de 122 °C, 6% em concentração de ácido e 9,3 minutos [29]. Para o bagaço de cana, o ácido nítrico se mostrou mais eficiente como catalisador [27, 28, 29].
- **Organosolv:** Neste processo ocorre a mistura de um solvente orgânico com um catalisador ácido, quebrando as ligações internas da lignina e hemicelulose. Acima de 185°C a adição de catalisadores mostrou-se desnecessária para o processo de delignificação, mas um alto rendimento de xilose é obtido pela adição de ácido. Os solventes devem ser retirados do sistema, contudo, para não agirem como inibidores nas etapas posteriores, e reciclados para diminuição dos custos [30].

No Brasil, o processo mais amplamente empregado é o DHR Dedini, que combina o pré-tratamento com solvente orgânico (etanol) e hidrólise com ácido diluído. Mesmo envolvendo recuperação de solvente, o processo possui baixa produção de inibidores e razoável índice de sacarificação [31].

O pré-tratamento com ácido diluído tem se mostrado o mais desenvolvido e interessante economicamente a curto prazo [25]. Porém, os custos associados ao consumo de ácido, disposição de resíduos e corrosão de equipamentos tendem para outra alternativa. A explosão de vapor, apesar de menor eficiência, é mais simples e ambientalmente interessante, e possui espaço para pesquisa e desenvolvimento. A longo prazo, a termo-hidrólise é esperada comercialmente com rendimentos altos e,

não levando em consideração os custos, este deverá ser o processo preferido [25, 22]

### 3.3.3 Hidrólise

Etapa em que há a conversão de celulose a glicose, reação catalisada por ácido diluído, ácido concentrado ou enzimas.

A hidrólise com ácido diluído é o processo mais antigo empregado na conversão de biomassa a etanol [32]. No processo há duas reações principais: inicialmente a celulose é convertida em açúcares mas, se a reação continua, os açúcares convertem-se em outros químicos, como o furfural, que não só reduzem o rendimento mas agem como inibidores na fermentação [33]. Assim, costuma-se empregar condições brandas para recuperar os açúcares de 5 carbonos, enquanto uma segunda etapa com condições mais severas para os açúcares de 6 carbonos. O processo em geral apresenta rendimento em relação à celulose de 89% para manose, 82% para galactose e 50% para glicose [32, 25].

A hidrólise com ácido concentrado, pós pré-tratamento, envolve o aquecimento da biomassa embebida em ácido para a solução liberar os açúcares, produzindo um gel que então é separado dos resíduos sólidos [34]. Utilizando entre 30% e 70% de concentração de ácido sulfúrico, baixas temperaturas e tempos reacionais entre 2 e 6 horas, consegue-se altos rendimento de açúcares em relação à celulose (90%) e baixo nível de degradação [25].

No processo enzimático a hidrólise é catalisada por complexos enzimáticos compostos por endoglucanases, exoglucanases e  $\beta$ -glucosidases, grupos que são genericamente denominados celulases. Conduzido em condições amenas (pH 4,8 e temperatura 45-50°C), o custo de utilidades é relativamente baixo [30] e, não só permite maiores rendimentos, como possibilita a fermentação simultânea à sacarificação e não há problemas com corrosão, diminuindo custos de manutenção [21]. Por conta desses fatores, acredita-se que, a longo prazo, a hidrólise enzimática se mostre chave para a produção de etanol em patamares competitivos, em relação ao custo [22].

### 3.3.4 Fermentação

O processo de fermentação de açúcares de 6 carbonos utilizando *S. cerevisiae* é utilizada comercialmente há anos. Contudo, os açúcares derivados de biomassa possuem composições mais complexas, envolvendo pentoses que não são metabolizadas por linhagens selvagens desse microrganismo [3]. Assim, a maioria dos processos hoje descarta essa fração, ou fermenta em etapas distintas hexoses e pentoses, comprometendo a escalabilidade do processo. Dessa forma, a engenharia genética tem se mostrado uma rota de escape para a procura de microrganismos capazes de conter ambas as rotas metabólicas, bem como melhorar seu rendimento [3, 22].

## 4 Panorama Mundial do Etanol Celulósico

O etanol de segunda geração tem evoluído de forma independente em relação a outras gerações de biocombustíveis, representando uma nova dinâmica do mercado voltada para uma bioeconomia. Em 2014, estudos indicavam um crescimento de 50%

entre 2014-2020, com valor de mercado estimado para US\$ 23,9 bilhões em 2020 [35] e um aumento na demanda por biocombustíveis, projetando um crescimento para o setor de transporte rodoviário de 122,6 bilhões de litro por ano em 2013 para 193,41 bilhões de litros por ano em 2022 [36]. Contudo, mesmo apresentando todo esse potencial, entende-se a importância das diversas dificuldades relacionadas ao acesso a plantações, estrutura logística e, principalmente, paridade de preços com a indústria do petróleo.

O principal gargalo para a escalabilidade reside na ausência de capital. Em 2016, nos Estados Unidos, o custo de construção de uma planta de etanol celulósico com capacidade anual de 30 milhões de galões é em torno de US\$ 225 milhões, enquanto uma planta de produção de etanol de milho com capacidade anual de 40 milhões de galões é cerca de US\$ 80 milhões [37]. Somado a isso, a necessidade de constante subsídio e a recente baixa no preço de combustíveis fósseis tem tornado o mercado ainda mais temeroso. Devido falta de financiamento, algumas plantas de etanol celulósico fecharam recentemente [38].

Tabela 1: Capacidade mundial de produção de etanol celulósico em 2015 [6]

Região	Capacidade instalada de etanol 2G (milhões de litros)	% do Total
<b>Estados Unidos</b>	490,37	34%
<b>China</b>	340,19	24%
<b>Canadá</b>	303,45	21%
<b>Brasil</b>	177,34*	12%*
<b>União Europeia</b>	130,83	9%

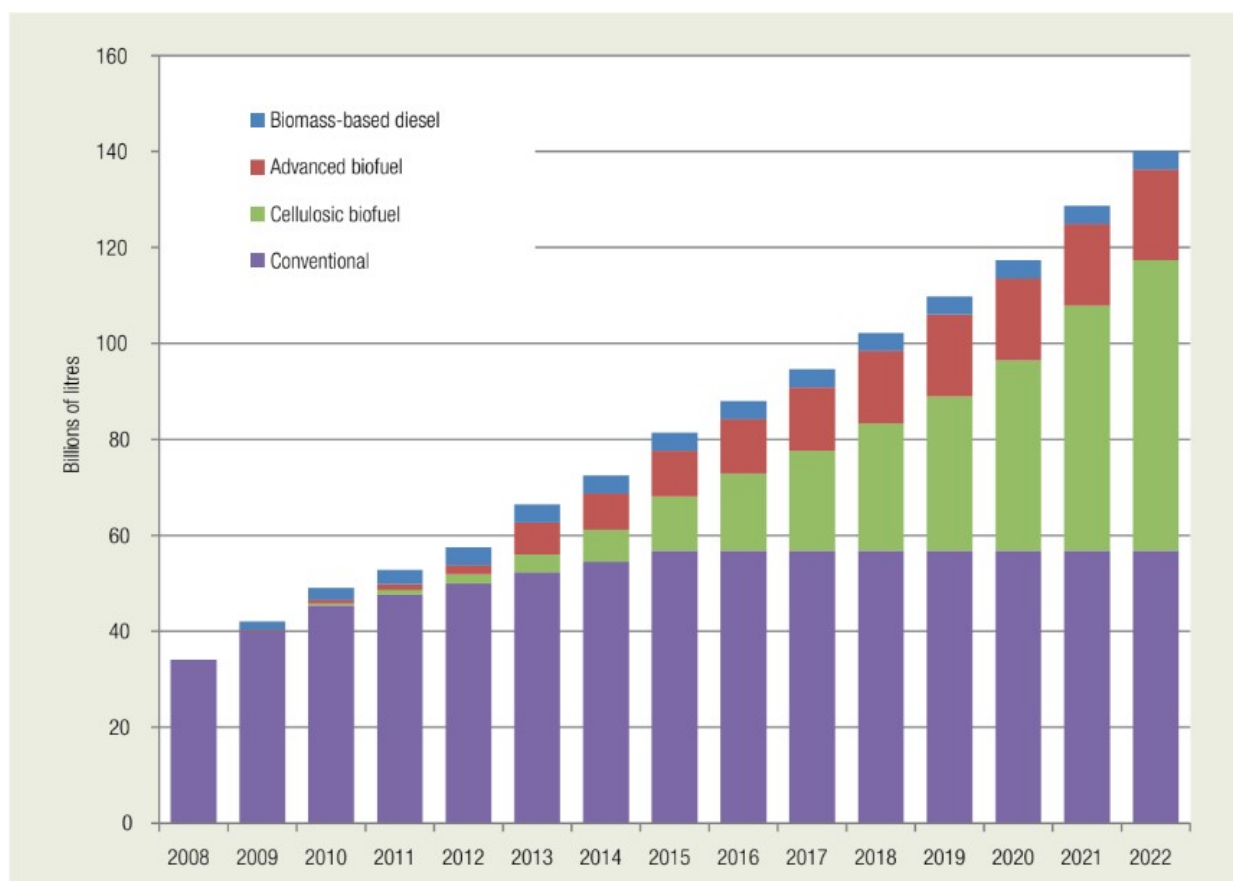
(\*) Os valores encontrados para o Brasil nesta referência distoam das demais, portanto para as discussões subsequentes serão utilizados os valores apresentados na Tabela 2, por serem mais conservadores.

## 4.1 Estados Unidos

Baseado num compilado de bancos de dados [39, 40, 41, 42, 43], 115 instalações foram identificadas (das quais 39 são baseadas em etanol celulósico (Figura 10), representando uma capacidade de produção de aproximadamente 1,37 bilhões de litros) nos EUA em meados de 2015 - incluindo aquelas que estavam sendo construídas ou que estavam em fase de projeto. Como o setor está passando por mudanças contínuas, cada conjunto de dados examinado continha um número diferente de instalações de produção de biocombustíveis de segunda geração. Environmental Entrepreneurs (2014), por exemplo, identificaram 167 instalações comerciais que trabalham com biocombustíveis avançados. Esta comparação não implica necessariamente uma redução em instalações operacionais. Em vez disso, fornece um vislumbre da variabilidade na pesquisa atual sobre biocombustíveis de segunda geração, e os dados fornecidos buscam transmitir rapidamente o instantâneo mais atual dessa indústria em mudança [6].



avancados, (3) biocombustíveis celulósicos e (4) biodiesel à base de biomassa. O total de combustíveis renováveis representa a quantidade dos biocombustíveis de todas as matérias-primas, colocando um limite na quantidade de fontes convencionais que podem ser usadas para atender normas após 2015, como mostra a Figura 11. Esse mecanismo induz o mercado para gerar prêmios para os biocombustíveis avançados de baixo carbono, como os tipos avançados e celulósicos. Para se qualificar como biocombustível avançado, o RFS não considera o tipo de matéria-prima utilizada, mas, em vez disso, a emissão de GEE (Gases do Efeito Estufa) do biocombustível, que deve reduzir as emissões de GEE do ciclo de vida em 50% quando comparado aos combustíveis fósseis [6].



Source: Projections from the Alternative Fuels Data Center, 2012.

Figura 11: Histórico e Expectativa da produção de biocombustíveis no mundo [6]

Vários estados intervieram para implementar seus próprios incentivos para estimular o desenvolvimento de biocombustíveis de segunda geração além das iniciativas federais. O número de incentivos e leis varia de estado para estado, com o número máximo de incentivos para etanol sendo 14% por estado na Califórnia, Indiana, Illinois, Washington e Minnesota [6].

As políticas impactam não apenas o mercado interno de biocombustíveis, mas também o mercado internacional. O comércio de biocombustíveis entre os EUA e o mercado global sofreu uma mudança em 2010, quando os EUA se tornaram exportadores líquidos de biocombustíveis, em parte como resultado da RFS. Como

o RFS limita a quantidade de biocombustíveis derivado de fontes convencionais que podem ser usadas para atender aos requisitos, esse limite poderia levar ao aumento das exportações, a fim de fazer uso da infraestrutura. No longo prazo, no entanto, essa política poderia levar a uma redução no etanol dos EUA derivado de fontes convencionais, limitando o suprimento disponível para exportar. Além disso, se o mercado avançado de biocombustíveis não crescer nos EUA e a produção parar na capacidade atual, exigências de demanda de volume de biocombustíveis avançados precisarão ser atendidos pelas importações [46], como mostra a Figura 12. Políticas como a RFS continuarão impactando o futuro comércio global de biocombustíveis [6].



Source: Annual energy outlook 2015 - US Energy Information Administration.

Figura 12: Histórico e Expectativa da produção de etanol celulósico nos EUA [6]

## 4.2 Brasil

### 4.2.1 Eficiência produtiva

Para que seja possível entender o panorama atual do etanol celulósico do Brasil, é necessária uma análise da série histórica que trouxe o país ao cenário atual, de uma das promessas mundiais como produtor.

Em 2011, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) lançaram um projeto de apoio à inovação nos setores sucroenergético e sucroquímico. Algumas empresas (GranBio, Raízen e Odebrecht Agroindustrial) e Centros de Pesquisa (Centro de Tecnologia Canavieira) anunciaram programas de expansão em pesquisa na área para alcançar produção em escala de produção desse tipo de Biocombustível. A previsão que estas empresas colocaram era de que até 2025 o etanol celulósico se tornaria uma parte representativa da matriz energética brasileira e de que haveriam mais de 10 usinas

de segunda geração operando neste ano. [47]

O que ocorre é que 8 anos depois o panorama em que o país encontra é distante da expectativa. Problemas ocorreram, especialmente na parte do pré tratamento do bagaço e da palha da cana de açúcar, além de apenas 2 das companhias terem construído suas plantas (GranBio e Raízen) e um centro de pesquisa (CTC) estar em funcionamento. Acerca do objetivo almejado da quantidade de usinas em operação, a Tabela 2 demonstra a situação atual do país e como os projetos estão estagnados desde o ano em que foram implantados, além de demonstrar a subutilização dos sites.[47]

Tabela 2: Situação atual do Etanol 2G no Brasil: Plantas e Capacidade utilizada [7]

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>Número de refinarias produzindo etanol 1G</b>	399	382	382	383	384	369	370
<b>Número de refinarias produzindo etanol 2G</b>	0	1	3	3	3	3	3
<b>Capacidade de produção de etanol 2G do Brasil (MI de litros)</b>	0	82	125	125	125	125	125
<b>Taxa de ocupação das plantas de etanol 2G</b>	0%	0%	2%	5%	13%	20%	36%

No que se refere à porcentagem da matriz energética brasileira que é representada pelo etanol celulósico, fica claro que este ainda é insignificante quando comparado ao etanol 1G e como seu avanço é nulo frente ao de outras tecnologias como o etanol de milho no Brasil através da Tabela 3

Tabela 3: Situação atual do Etanol 2G no Brasil: Plantas e Capacidade utilizada [7]

<i>[milhões de litros]</i>	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>Produção brasileira de etanol 1G</b>	27.642	28.553	30.385	28.439	28.254	33.149	34.445
<b>Etanol para uso como combustível</b>	24.377	25.585	27.268	25.580	25.282	30.334	31.387
<b>Produção de etanol 2G</b>	0	0	2	6	17	25	45

Por fim, vale ressaltar sobre como o objetivo principal do Etanol 2G ainda está distante, visto que o ponto principal da sua produção é a reutilização da biomassa restante do processo de obtenção do Etanol 1G e é possível observar através da Tabela 4 que a quantidade que é destinada a isso é irrisória.



Tabela 4: Situação atual do Etanol 2G no Brasil: Utilização de Produtos para a produção de Etanol [7]

<i>[’000 MT]</i>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
<b>Cana de Açúcar etanol 1G</b>	345.525	356.913	378.025	352.475	346.400	404.163	412.500
<b>Milho Etanol 1G</b>	0	0	338	564	1.259	1.897	3.357
<b>Uso do Bagaço etanol 2G</b>	0	0	0,0111	0,0333	0,0944	0,1389	0,25
<b>Produção de Bagaço</b>	115.175	118.971	126.008	117.492	115.467	134.721	137.500

Em conclusão, apesar do Etanol 2G ter tido um acréscimo de produção nos últimos anos no Brasil, os objetivos desenhados em 2011 estão longe de serem alcançados e a produção não é significativa para a matriz energética brasileira, fazendo com que o panorama atual não seja muito diferente do que era em 2011 no que se refere à números, apenas às tecnologias desenvolvidas.[47]

#### 4.2.2 Principais participantes do mercado

##### GranBio

A GranBio é uma empresa de biotecnologia industrial com sede em São Paulo (SP). Fundada em 2010, a empresa conta com cerca de 264 funcionários e é 100% nacional, controlada majoritariamente pela GranInvestimentos SA. Em setembro de 2014, a GranBio anunciou que começaria a produzir etanol de segunda geração em nível comercial em sua usina – a BioFlex1 – localizada em São Miguel dos Campos (AL). Dados mais específicos sobre a planta de Etanol 2G da GranBio e as tecnologias usadas no processo podem ser encontradas abaixo. [47][48][49]

- Capacidade da planta: 82 milhões de litros/ano
- Tipo: Comercial
- Local: São Miguel dos Campos (AL)
- CAPEX: R\$ 350 milhões
- Financiamento (BNDES): R\$ 1,225 bilhão (R\$ 600 milhões via participação acionária)
- Tecnologia processo: Proesa (Beta Renewables, - italiana)
- Hidrólise (enzimas): Novozymes (dinamarquesa)
- Fermentação (leveduras): Pentoses e Hexoses (DSM, holandesa)
- Pré Tratamento: Hidrotérmico (Proesa, API)
- Matéria prima: Bagaço e palha

##### Raízen

A Raízen é fruto de uma Joint-Venture entre as empresas Cosan e Shell, sendo de capital fechado e foi fundada em 2011. É um dos maiores *players* na produção de etanol a partir da cana de açúcar no Brasil, contando com uma produção de mais de 2 bilhões de litros por ano. A distribuição e venda dos combustíveis fica a cargo da Shell, que faz com que a companhia tenha uma hierarquia vertical que vai desde a matéria prima até a venda do combustível como produto final. Um mês após a inauguração da Planta 2G da GranBio, a empresa inaugurou uma planta integrada em Piracicaba que utiliza parte do bagaço residual do processamento do Etanol 1G para produzir o 2G, sendo capaz de produzir cerca de 40 milhões de litros por ano deste segundo composto. As informações sobre a planta e as tecnologias utilizadas podem ser encontradas abaixo. [47][48][49]

- Capacidade da planta: 40 milhões de litros/ano
- Tipo: Comercial
- Local: Piracicaba (SP)
- CAPEX: R\$ 231 milhões
- Financiamento (BNDES): R\$ 207 milhões
- Tecnologia processo: Iogen (Iogen Corporation, canadense)
- Hidrólise (enzimas): Novozymes (dinamarquesa)
- Fermentação (leveduras): Pentoses e Hexoses (Iogen Corporation, canadense)
- Pré Tratamento: Explosão a vapor (Iogen)
- Matéria prima: Bagaço

## CTC

O CTC é um centro de pesquisa que foca em toda a cadeia produtiva da cana de açúcar nos mais diversos temas, sendo a principal base utilizada pelas usinas paulistas. Antes de 2011 o CTC era uma organização da sociedade civil e sem fins lucrativos, no entanto, depois de uma reestruturação jurídica passou a ser uma sociedade anônima com fins lucrativos, contando com acionistas como a própria Raízen. [47]

Sua fonte de renda e lucros consiste na venda das tecnologias produzidas lá através de investimentos pagos pelas empresas pelo licenciamento de suas propriedades de patentes. Hoje em dia conta com doze polos regionais, sendo que o de São Manuel (SP) é o que produz resultados acerca do Etanol 2G. É a única empresa no Brasil que possui um processo próprio para a produção de etanol de segunda geração já instalado e com potencial de comercialização. O principal objetivo da planta segundo a direção de Etanol 2G do CTC é provar o potencial e a viabilidade do produto gerado na planta. Dados acerca do processo podem ser encontrados abaixo.[47][48][49]

- Capacidade da planta: 3 milhões de litros/ano
- Tipo: Piloto
- Local: São Manoel (SP)

- CAPEX: R\$ 80 milhões
- Financiamento (BNDES): R\$ 380 milhões (R\$ 300 milhões via participação acionária)
- Tecnologia processo: Própria (CTC)
- Hidrólise (enzimas): Novozymes (dinamarquesa) e Própria
- Hexoses (Própria)
- Pré Tratamento: Vapor e catalisadores (própria)
- Matéria prima: Bagaço e Palha

Em suma, é possível observar que as empresas brasileiras investem pouco em pesquisa e no desenvolvimento de enzimas, visto que preferem licenciar estas de empresas estrangeiras. O único *player* que investe nesse tipo de desenvolvimento é o CTC, que além de focar em enzimas tras um "know-how" de um processamento próprio.

A Odebrecht e a Petrobrás já foram *players* em anos anteriores, no entanto a primeira interrompeu os projetos frente à crise de 2015 e a segunda decidiu focar em combustíveis fósseis depois de encarar os prejuízos recentes. Tal fato faz com que este mercado seja dominado por estas 3 companhias.[47]

#### 4.2.3 Pontos Favoráveis à produção de Etanol-2G no Brasil

O Brasil tem como matéria prima principal da produção de etanol a cana-de-açúcar e esta também é a matéria prima mais produtiva para o Etanol 2G. O rendimento desta pode se elevar ainda mais a partir de pesquisas e desenvolvimento de variedades de cana-energia. Esta variedade tem produtividade por hectare maior que os tipos tradicionais de cana, além de utilizar menos água no seu crescimento e produzir uma quantidade maior de bagaço (fibras lignocelulósicas), fazendo com que esta seja perfeita para a produção do etanol celulósico. Esta oportunidade de pesquisa não se aplica apenas às usinas brasileiras, mas também às empresas de pesquisa brasileiras e centros de tecnologia como o CTC.[47]

Outro ponto que desponta o Brasil como ambiente favorável à produção de E2G são os incentivos públicos e fiscais que aportam essa nova tecnologia. Alguns exemplos que simbolizam este apoio são:[47]

- PAISS: Iniciativa conjunta do BNDES e da Finep de seleção de planos de negócio e fomento a projetos que contemplem o desenvolvimento, a produção e a comercialização de novas tecnologias industriais destinadas ao processamento da biomassa oriunda da cana-de-açúcar, com a finalidade de organizar a entrada de pedidos de apoio financeiro no âmbito das duas instituições e permitir uma maior coordenação das ações de fomento e melhor integração dos instrumentos de apoio financeiro disponíveis.
- RenovaBio: Programa do Governo Federal, lançado pelo Ministério de Minas e Energia, em dezembro de 2016, cujo objetivo é expandir a produção de biocombustíveis no Brasil, baseada na previsibilidade, na sustentabilidade ambiental, econômica e social, e compatível com o crescimento do mercado.

O programa PAISS contribuiu com mais de R\$ 4 bilhões em investimentos no setor, o que foi fator chave na construção das usinas de Etanol 2G comerciais (GranBio e Raízen). Quanto ao programa RenovaBio, este visa garantir um grande aporte de recursos e estabilidade de mercado ao setor sucroenergético nos próximos anos, o que deve colaborar com a produção de etanol celulósico por valorizar combustíveis renováveis avançados. [47]

#### 4.2.4 Pontos Desfavoráveis à produção de Etanol-2G no Brasil

Apesar de fatores positivos, o Brasil ainda está estagnado no que se refere à produção de Etanol 2G. Há apenas 3 plantas funcionando no país hoje com ociosidade de mais de 60%, apenas uma das plantas efetivamente desenvolve pesquisas sobre o tema e essa possui baixo nível de patenteamento, o que demonstra que apesar de ter uma evolução em relação às outras plantas, ainda são resultados pouco expressivos em comparação com o resto todo mundo.[50][49][51] Também é válido apontar que há uma extrema dependência de empresas de fora para as plantas da Raízen e da GranBio por conta do fornecimento de material e tecnologia para os processos utilizados, além dos problemas acerca do pré-tratamento, etapa que desencadeou a estagnação das plantas e vem adiando, ano após ano, as expectativas das empresas e investidores. Outro problema grande que vem por conta do pré-tratamento é que dado que este é uma etapa inicial, ele pode estar camuflando grandes problemas que virão na sequência do processo, principalmente nas etapas de hidrólise e fermentação.[47]

Outro ponto que dificulta a produção do E2G no Brasil é a crise atual que foi instaurada em 2011, ano em que entrou em vigor a política de contenção de preços da gasolina para tentar controlar a inflação, que só se encerrou no final de 2014 e culminou na redução da competitividade do etanol frente à gasolina, causando um grande prejuízo e dívidas no setor. Este fato foi crucial na estagnação da produtividade sucroenergética, que provavelmente se estenderá até 2030 segundo análises[52][53]. Esse cenário atingiu de forma intensiva o maior investidor de etanol celulósico do país, o BNDES, que no início de 2017 informou um prejuízo de quase R\$ 600 milhões com o setor.[47][54]

Por último, vale ressaltar que existe uma questão controversa que envolve o E2G e a cogeração de bioeletricidade sucroenergética. Em geral, os processos do E1G são autosuficientes energeticamente por produzirem sua própria força motriz a partir da queima do bagaço e palha da cana, biomassa resultante do processo de produção do E1G e matéria prima do E2G. A energia que pode ser gerada a partir dessa queima pode além de ser usada no processo, ser exportada para o sistema elétrico da planta, trazendo uma autosuficiência maior ainda. Em 2015, a energia gerada para o sistema obtida através da queima da biomassa de cana de açúcar foi quase duas vezes o total oferecido através dos parques eólicos no mesmo ano, totalizando quase 4% da energia elétrica total produzida no país. O cenário fica ainda mais interessante quando se observa que o período de colheita e processamento da cana de açúcar se dá no período de estiagem, que gera esgotamento dos reservatórios brasileiros. A oferta vinda desta bioeletricidade para o sistema elétrico em 2015 representou cerca de 14% de economia das águas nos reservatórios do submercado elétrico no Sudeste/Centro-Oeste.[55][56][47][57]

## 5 Conclusão

O etanol celulósico surgiu, portanto, como uma alternativa interessante em aspectos socioeconômicos, logísticos e ambientais. Diversos países como o Brasil estudam maneiras de tornar esta tecnologia financeiramente viável e que o produto seja escalável tornando-se relevante para suas matrizes energéticas. O que ocorre é que diversos problemas como custos e o pré-tratamento estão barrando a viabilização deste feito, fazendo com que hoje em dia o E2G seja uma parte insignificante da produção de Etanol brasileira, e as plantas que produzem este não cheguem à 40% de utilização.

Quanto à cadeia produtiva, percebe-se que existe uma extensa sinergia entre a produção de etanol de primeira geração e segunda geração. Este último, contudo, precisa passar por etapas de pré tratamento e hidrólise, etapas as quais tem se mostrado o maior desafio tecnológico para a escalabilidade do etanol de segunda geração. No mundo, as indústrias mais avançadas no processo encontraram rotas interessantes e, atualmente, passam por desafios operacionais. Tendo superado esses desafios, o etanol de segunda geração é tão competitivo quanto o de primeira, uma vez que, em ambos os casos, os maiores custos residiriam na matéria prima em si.

Se comparados às fontes de combustível fóssil, o etanol de primeira geração, atualmente, apresenta a vantagem de já não depender de pesquisas intensivas para ser viável economicamente, etapa que, historicamente, foi fundamental para chegar a esse estado. Já o etanol de segunda geração, precisa de altos aportes de pesquisas para que possa se tornar viável, e atualmente o Brasil não demonstra interesse em tal investimento, visto que apenas 1 das 3 plantas de etanol celulósico apresenta pesquisas e patentes registradas.

O cenário econômico atual brasileiro também não é favorável para o desenvolvimento deste produto, visto que medidas para controlar o preço da gasolina instauradas em 2011 ainda refletem no prejuízo que instituições como o BNDES tiveram no setor sucroenergético. Outro ponto importante é a análise da dualidade entre o uso do bagaço de cana para produção de E2G e para geração de energia para plantas e subsistemas elétricos. Esta análise mostra que a energia gerada pela combustão desta biomassa seria relevante para a matriz energética brasileira, além dela ocorrer em um período de estiagem, quando os reservatórios do Sudeste e Centro-Oeste estão prejudicados.

Dados todos estes fatores, e apesar de o Brasil apresentar pontos positivos para a produção de E2G, é possível concluir que o futuro desse processo depende muito da disposição de investidores e empresas em injetarem capital em pesquisas para enfrentar os atuais funis da produção de etanol celulósico. No atual cenário, este funciona apenas como uma iniciativa estagnada que consome capital, gera pouco retorno para as companhias e não traz o benefício de sustentabilidade que era desejado, visto que a quantidade de bagaço e palha utilizadas neste processo são ínfimas, comparadas às usadas como força motriz das plantas.

## Referências

- [1] J.G.G. Jonker, F. van der Hilst, H.M. Junginger, O. Cavalett, M.F. Chagas, and A.P.C. Faaij. Outlook for ethanol production costs in brazil up to 2030, for different biomass crops and industrial technologies. 2014.
- [2] J.D. Murphy and K. Mccarthy. Ethanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in ireland. 2005.
- [3] K.A Gray, L. Zhao, and M. Emptage. Bioethanol. current opinion in chemical biology, v. 10. 2006.
- [4] A. W. Glazer and H. Nikaido. Biotechnology: fundamentals of applied microbiology. 1995.
- [5] N. Mosier, C. Wyman, B. Dale, R. Elander, M. Lee, Y. Y. Holtzapple, and M. Ladisch. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. 2005.
- [6] United Nations Conference on Trade and Development. Second generation biofuel markets: state of play, trade and developing country perspectives. 2016.
- [7] Sergio Barros and Oliver Flake. Brazil: Biofuels annual. 2019.
- [8] Redação Pensamento Verde. A origem do etanol e seu importante papel no brasil, 2014. <https://www.pensamentoverde.com.br/economia-verde/origem-etanol-e-seu-importante-papel-brasil/>.
- [9] Marina O.S. Dias, Tassia L. Junqueira, Otávio Cavalett, Marcelo P. Cunha, Charles D.F. Jesus, Carlos E.V. Rossell, Maciel Filho Filho, and Antonio Bonomi. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. 2012.
- [10] Poonam Singh Nigam and Anoop Singh. Production of liquid biofuels from renewable resources. 2010.
- [11] H. V. Amorim and ML Lopes. *Ethanol production in a petroleum dependent world*. Sugar J, 2005. pg 67:11-14.
- [12] L. C. Basso, T.O. Basso, and S.N. Rocha. Ethanol production in brazil: The industrial process and its impact on yeast fermentation. 2011.
- [13] B. E. Della-Bianca, T.O. Basso, B.U. Stambuk, L.C. Basso, and A.K. Gombert. What do we know about yeast stains from the brazilian fuel ethanol industry? 2013.
- [14] A. K. Chandel and O. V. Singh. Weedy lignocellulosic feedstock and microbial metabolic engineering: advancing the generation of 'biofuel'. 2011.
- [15] Revista Fapesp. Bioenergia: obstáculos no caminho, 2018. <https://revistapesquisa.fapesp.br/2018/06/18/obstaculos-no-caminho/>.
- [16] Zacchi G. Macrelli S, Mogensen J. Techno-economic evaluation of 2nd generation bioethanol production from sugar cane bagasse and leaves integrated with the sugar-based ethanol process.
- [17] Maciel Filho R Bonomi A Jesus CDF Rossell CEV. Dias MOS, da Cunha MP. Simulation of integrated first and second generation bioethanol production from sugarcane: comparison between different biomass pretreatment methods.

- [18] Ensinas AV Nebra Sa Filho RM Rossell CEV. Dias MOS, Modesto M. Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems.
- [19] Karp S Vandenberghe LPS Thomaz-soccol V Woiciechowski A et al. Soccol CR, Faraco V. Lignocellulosic bioethanol: current status and future perspectives.
- [20] Van der Bruggen B. Chovau S, Degrauwe D. Critical analysis of techno-economic estimates for the production cost of lignocellulosic bio-ethanol.
- [21] Faaij AP. Hamelinck CN, Hooijdonk GVan. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term.
- [22] J. E. A. Seabra. Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no brasil. 2008.
- [23] R. Wooley, M. Ruth, J. Sheehan, K. Ibsen, H. Majdeski, and A. Galvez. Lignocellulosic biomass to ethanol - process prehydrolysis and enzymatic hydrolysis - current and futuristic scenarios. 1999.
- [24] M. Laser, D. Schulman, S. G. Allen, J. Lichwa, M. J. Antal Jr, and L. R. Lynd. A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol. 2002.
- [25] C. N. Hamelinck, G. Van Hooijdonk, and A. P. C. Faaij. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short, middle and long-term. 2005.
- [26] M. Von Sivers and G. Zacchi. A techno-economical comparison of three processes for the production of ethanol from pine. 1995.
- [27] R. Aguilar, Ramírez J. A., G. Garrote, and M. Vázquez. Kinetic study of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse. 2002.
- [28] S. Gámez, J. J. González-Cabriales, J. A. Ramírez, G. Garrote, and M. Vázquez. Study of the hydrolysis of sugar cane bagasse using phosphoric acid. 2006.
- [29] A. Rodriguez-Chong, J. A. Ramírez, G. Garrote, and M. Vázquez. Hydrolysis of sugar cane bagasse using nitric acid: a kinetic assessment. 2004.
- [30] Y. Sun and J. Cheng. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. 2002.
- [31] J. L. Olivério, A. G. Hilst, C. E. V. Rossell, and P. A. Soares. Hidrólise rápida: produção de álcool a partir do bagaço. 2007.
- [32] Energy efficiency and renewable energy (usdoe), 2020. [www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov).
- [33] A. Graf and T. Koehler. Oregon cellulose-ethanol study: An evaluation of the potential for ethanol production in oregon using cellulose-based feedstocks. 2000.
- [34] J. Dipardo. Outlook for ethanol production and demand.
- [35] Allied Market Research. World second generation biofuels (advanced biofuels) market - opportunities and forecasts, 2013-2020. 2014.
- [36] Navigant Research. Biofuels demand for road transportation will surpass 51 billion gallons annually by 2022, 2014. <https://www.navigantresearch.com/newsroom/biofuels-demand-for-road-transportation-will-surpass-51-billion-gallons-annually-by-2022>.

- [37] B. Flach, S. Lieberz, M. Rondon, B. Williams, and C. Teiken. Eu-28 biofuels annual2015. usda foreign agricultural service, global agricultural information network, 2015. [http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Biofuels%20Annual\\_The%20Hague\\_EU-28\\_7-15-2015.pdf](http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Biofuels%20Annual_The%20Hague_EU-28_7-15-2015.pdf).
- [38] Q. Nguyen, J. Bowyer, J. Howe, S. Bratkovich, H. Groot, E. Pepke, and K. Fernholz. Global production of second generation biofuels: Trends and influences. 2017.
- [39] Biofuels Digest (2013). <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2013/06/24/1000-project-bioeconomy-database-launches-from-biofuels-digest-superdata/>.
- [40] Biofuels Digest (2012). <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2012/07/27/advanced-biofuels-chemicals-capacity-to-reach-5-89b-gallons-by-2017>.
- [41] Ethanol Producer Magazine (2015). Us ethanol plants. <http://www.ethanolproducer.com/plants/listplants/US/Existing/Cellulosic/page:1/sort:capacity/direction:desc>.
- [42] United States Department of Agriculture (USDA) (2014). <http://www.usda.gov/documents/usda-2014-farm-bill-highlights.pdf>.
- [43] Renewable Fuels Association (RFA)(2015). <http://www.ethanolrfa.org/bio-refinery-locations/>.
- [44] J (2015). Lane. <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2015/02/17/ineos-bio-biofuels-digests-2015-5-minute-guide/>.
- [45] Environmental Protection Agency (EPA) (2014). <http://www3.epa.gov/otaq/fuels/renewablefuels/>.
- [46] J (2015) Beckman. Biofuel use in international markets: The importance of trade. u.s. department of agriculture, economic research service.
- [47] Bruno Rossi Lorenzi and Thales Haddad Novaes de Andrade. O etanol de segunda geração no brasil : Políticas e redes sociotécnicas. 2019.
- [48] G. A. SOARES. O avanço das tecnologias de segunda geração e seus impactos na indústria do etanol. 2016.
- [49] Camila Bastos CORRÊA. Parcerias estratégicas tecnológicas em projetos de etanol celulósico: oportunidades e desafios para as firmas nacionais. 2014.
- [50] C. V. FELIPE, M. A. ROSSEL. Bioetanol de cana-de-açúcar: Pd para produtividade e sustentabilidade. 2010.
- [51] T. G. L MURAKAMI. Trajetórias tecnológicas na etapa de hidrólise enzimática para a produção de bioetanol de 2ª geração. 2015.
- [52] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano decenal de expansão de energia 2026. 2017.
- [53] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Análise de conjuntura dos biocombustíveis ano 2015, 2016. 2017.
- [54] Revista NovaCana. Etanol celulósico na encruzilhada: gargalos continuam e usinas atingem, em média, apenas 7% da capacidade. 2017.
- [55] UNICA – União da Indústria de Cana-de Açúcar. A bioeletricidade em números: agosto de 2016. 2016.



- [56] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. “análise de conjuntura dos biocombustíveis ano 2015. 2016.
- [57] R. DANTAS C. ECASTRO, N.; BRANDÃO. ‘a bioeletricidade sucroenergética na matriz elétrica’ in e. sousa e i. macedo (orgs.). 2010.