



Universidade Federal de Ouro Preto



Escola de Minas

Nasser Tanure Amantes

**Análise de viabilidade da utilização de resíduos da cana-de-açúcar
na produção brasileira de etanol de segunda geração (E2G)**

Ouro Preto

2022

NASSER TANURE AMANTES

**Análise de viabilidade da utilização de resíduos da cana-de-açúcar
na produção brasileira de etanol de segunda geração (E2G)**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação
em Engenharia de Produção da Universidade
Federal de Ouro Preto como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientadora: Bruna de Fátima Pedrosa Guedes
Flausino

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A484a Amantes, Nasser Tanure.

Análise de viabilidade da utilização de resíduos da cana-de-açúcar na produção brasileira de etanol de segunda geração (E2G). [manuscrito] / Nasser Tanure Amantes. - 2022.
38 f.: il.: color., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Álcool - Etanol de Segunda Geração (E2G). 2. Bagaço de cana. 3. Celulose. 4. Palha - Palhiço. I. Flausino, Bruna de Fátima Pedrosa Guedes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nasser Tanure Amantes

Análise de viabilidade da utilização de resíduos da cana-de-açúcar na produção brasileira de etanol de segunda geração (E2G)

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção

Aprovada em 16 de dezembro de 2022

Membros da banca

DSc. Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
DSc. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura - Universidade Federal de Ouro Preto
MSc. Fidellis Bitencourt Gonzaga Lousada e Estanislau - Universidade Federal de Ouro Preto

Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/12/22.



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2022, às 19:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fidellis Bitencourt Gonzaga Louzada e Estanislau, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2022, às 19:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruna de Fatima Pedrosa Guedes Flausino, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2022, às 19:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0446745** e o código CRC **CD3EFC0C**.

RESUMO

O atual cenário mundial, com grande enfoque na sustentabilidade, visa cada vez mais à utilização de energias renováveis, substituindo assim as fósseis. Dentro dessa linha, o presente trabalho de conclusão de curso procurou analisar a viabilidade da utilização dos resíduos da cana-de-açúcar, mais precisamente a matéria lignocelulósica, gerados pelo setor sucroalcooleiro, na produção do etanol de segunda geração — E2G. A metodologia aplicada baseou-se no estudo bibliográfico do desenvolvimento tecnológico para obtenção do biocombustível. Apesar de o bagaço de cana ser bastante empregado na produção do E2G, identifica-se que o palhiço, gerado pelo corte mecanizado, apresenta propriedades muito mais interessantes para a produção do E2G e até mesmo para a geração de energia elétrica pela cogeração. Algumas dificuldades, no entanto, impedem que o processo seja mais difundido. A principal dificuldade ainda se concentra no alto preço de importação das enzimas necessárias para tratar a matéria-prima e também na logística de levar esta mesma matéria-prima da fase agrícola para a fase industrial. Com economias de escala e novos avanços tecnológicos, a viabilidade aumenta cada vez mais, e a previsão é de que o custo de produção do E2G seja menor do que o E1G.

Palavras-chave: Etanol de Segunda Geração, Bagaço de Cana-de-Açúcar, Palhiço, Celulose.

ABSTRACT

The current world scenario, with a strong focus on sustainability, increasingly aims at the use of renewable energy, thus replacing fossil energy. Along this line, this course completion work sought to analyze the feasibility of using sugarcane residues, more precisely lignocellulosic matter, generated by the sugar and alcohol sector, in the production of second generation ethanol — E2G. The applied methodology was based on the bibliographical study of the technological development to obtain the biofuel. Although sugarcane bagasse is widely used in the production of E2G, it is identified that straw, generated by mechanized cutting, has much more interesting properties for the production of E2G and even for the generation of electric energy through cogeneration. Some difficulties, however, prevent the process from being more widespread. The main difficulty is still concentrated in the high import price of the enzymes needed to treat the raw material and also in the logistics of taking this same raw material from the agricultural stage to the industrial stage. With economies of scale and new technological advances, viability is increasing, and the forecast is that the production cost of E2G will be lower than E1G.

Keywords: Second Generation Ethanol, Sugarcane Bagasse, Straw, Cellulose.

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 9 |
| 1.1 | Objetivos do trabalho | 10 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 10 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 10 |
| 2 | METODOLOGIA | 11 |
| 3 | REFERENCIAL TEÓRICO | 12 |
| 3.1 | Matriz de energia elétrica brasileira | 12 |
| 3.1.1 | Capacidade de geração de energia elétrica | 12 |
| 3.2 | A indústria sucroalcooleira brasileira | 13 |
| 3.2.1 | Configuração da indústria sucroalcooleira no Brasil | 13 |
| 3.2.2 | Visão geral da produção nacional de etanol total e a crescente participação do milho na produção de etanol | 15 |
| 3.3 | Resíduos provenientes do setor sucroalcooleiro | 17 |
| 3.4 | A cogeração na indústria sucroalcooleira brasileira | 18 |
| 3.5 | Etanol de Segunda Geração (E2G) | 20 |
| 3.6 | Impactos da mecanização da colheita de cana-de-açúcar | 21 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 23 |
| 4.1 | Matéria lignocelulósica | 23 |
| 4.1.1 | Lignina | 23 |
| 4.1.2 | Hemicelulose | 25 |
| 4.1.3 | Celulose | 26 |
| 4.2 | Hidrólise enzimática | 28 |
| 4.3 | Consumo de bagaço para a geração de eletricidade | 29 |
| 4.4 | Custos associados à hidrólise enzimática no Brasil | 30 |
| 4.5 | Palhão oriundos da cana-de-açúcar | 31 |
| 4.5 | Tabelas comparativas dos resíduos da biomassa | 33 |
| | Tabela 6 - Potencial de produção de etanol a partir da hemicelulose | 34 |
| 5 | CONCLUSÕES | 35 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 36 |

1 INTRODUÇÃO

Tendo um setor sucroalcooleiro bem desenvolvido, com suas origens ligadas, ainda, à sua fase de colonização, o Brasil ocupa o cargo de maior produtor de açúcar do planeta e o segundo em produção de etanol, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. Na safra de 2020/21, o país foi responsável por uma produção de 654,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, que foram destinadas à produção de 41,2 milhões de toneladas de açúcar e 23,8 bilhões de toneladas de etanol. Embora nas duas últimas safras de cana, 2021/22 e 2022/2023 (estimativa), a produção não tenha ultrapassado os 580 milhões de toneladas, a produção de etanol total é estimada em 24,3 bilhões de toneladas até o final da atual safra (CONAB, 2022). Vale ressaltar que em 2022 o país já conta com etanol total produzido a partir de cana-de-açúcar, que continua sendo a principal matéria-prima, e o milho.

Durante muito tempo, o bagaço da cana, proveniente da fase industrial das produções de açúcar e etanol, era desprezado em termos energéticos e grande parte era enviada para indústrias de fertilizantes e até mesmo utilizado para alimentar o gado. Porém, nos anos 1980, uma grande oportunidade foi percebida pelo setor. O bagaço, então, começou a ser utilizado como matéria-prima na cogeração de energia elétrica pelas usinas do setor.

O etanol de segunda geração, ou E2G, começou a ser produzido no Brasil no ano de 2014, no estado de Alagoas, pela empresa Granbio. Logo em seguida, em 2015, o país contou com mais uma usina desse seguimento — a Raízen, no estado de São Paulo. Segundo o IEA, no ano de 2021 o país possuía uma capacidade de produção de E2G de aproximadamente 80.000 toneladas ao ano, algo próximo à capacidade dos Estados Unidos, com 83.100 toneladas ao ano, e superior ao da Europa, que apresentou 64.960 toneladas ao ano IEA (2021). Isso demonstra a posição de destaque que o Brasil ocupa em relação ao E2G, considerando sua incipiente produção, iniciada há menos de uma década. Uma ampliação de produção de E2G já foi sinalizada pelas empresas.

No Brasil, a produção de E2G concentra-se na aplicação do bagaço de cana como a principal fonte de matéria-prima, embora exista a possibilidade de utilizar diversas matérias orgânicas na sua produção, como é o caso do palhiço. Este possui uma capacidade de gerar energia (500 kWh/t) maior que o do bagaço (300 kWh/t), mas o grande problema seria a sua colheita e direcionamento para a indústria, uma vez que o bagaço é resquício da produção e já estará localizado na parte industrial da planta.

Além disso, o E2G é uma grande porta para aumentar a produtividade por hectare, além de resolver problemas como o descarte de resíduos e ajudar a diminuir custos de logística

proveniente destes materiais. Ademais de disponibilizar cada vez mais recursos para os produtores. A perspectiva de crescimento do setor inclui, ainda, a produção nacional de enzimas específicas para a realização da liberação dos açúcares contidos na celulose, pois, atualmente, esse recurso indispensável ao processo de hidrólise enzimática é adquirido de outros países, encarecendo o processo.

1.1 Objetivos do trabalho

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade da utilização dos resíduos da cana-de-açúcar gerados pelo setor sucroalcooleiro na produção do etanol de segunda geração — E2G.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar a configuração da indústria sucroalcooleira no Brasil;
- Demonstrar o cenário da cana-de-açúcar no Brasil;
- Definir e apresentar a cogeração na indústria sucroalcooleira brasileira;
- Introduzir o Etanol de Segunda Geração — E2G;
- Uma visão geral da produção de etanol total da produção nacional;
- Falar sobre o potencial dos resíduos provenientes do setor sucroalcooleiro — a matéria lignocelulósica.

2 METODOLOGIA

O trabalho apresenta um caráter descritivo a respeito da produção nacional de E2G. Assim, a metodologia empregada baseou-se no estudo da arte a respeito do tema, considerando uma revisão bibliográfica realizada a partir de fontes indicadas como artigos, teses, publicações diversas, dados e relatórios oficiais emitidos por órgãos governamentais, como o Ministério de Minas e Energia, a Empresa de Pesquisa Energética e a Agência Nacional de Energia Elétrica, de forma a garantir a confiabilidade das informações utilizadas na elaboração do trabalho.

Diante das pesquisas efetuadas, foi feita uma análise qualitativa do atual cenário elétrico brasileiro, a fim de situar a participação da energia proveniente do setor sucroalcooleiro, por meio da queima do bagaço de cana em instalações de cogeração e, investigar a possibilidade de utilização do mesmo e do palhico na produção de etanol. Esse ponto é importante para a compreensão da importância do caráter de autoprodutor de energia que o setor apresenta.

A partir do levantamento bibliográfico, procurou-se apresentar uma discussão crítica sobre o atual cenário, de forma a apresentar pontos relacionados à viabilidade de utilização dos resíduos do setor sucroalcooleiro na produção do etanol de segunda geração, atendendo aos objetivos propostos no trabalho.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Matriz de energia elétrica brasileira

O Brasil possui uma matriz diversificada com várias fontes de geração de energia elétrica, sendo a maior parte proveniente de energias renováveis, o que é um ótimo indicativo em uma era de mudanças climáticas. Dentre essas fontes, as gerações solares e eólicas vêm crescendo bastante nos últimos anos, mas ainda existe uma dependência muito forte da geração hidroelétrica. Pode-se analisar a distribuição da geração de energia elétrica no país por meio da Figura 1, a seguir.

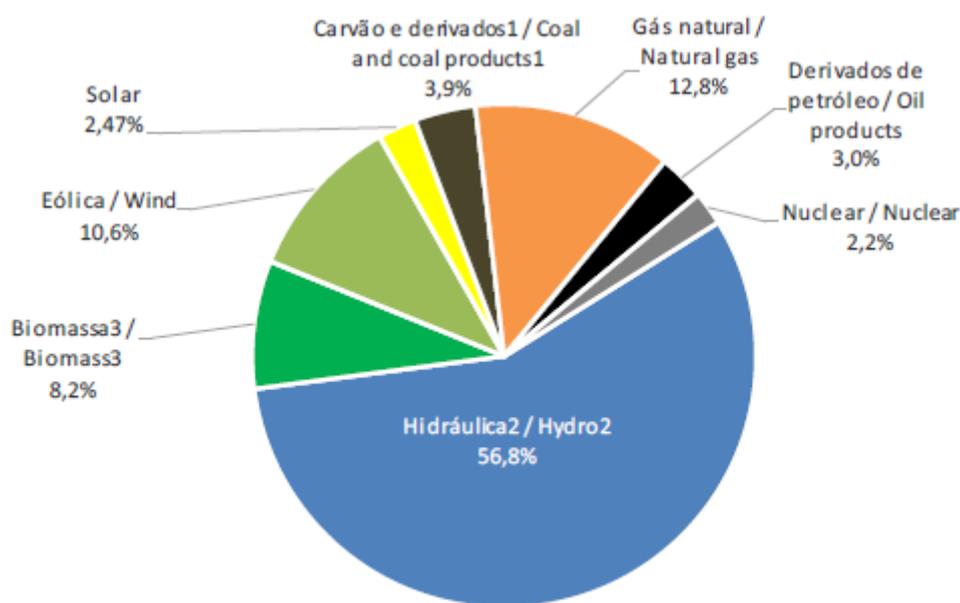


Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte
Fonte — BEN, 2022

3.1.1 Capacidade de geração de energia elétrica

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica — ANEEL, a potência outorgada total brasileira é de 284,18 GW, e sua potência fiscalizada é de 186,75 GW (ANEEL, 2022).. As três maiores fontes de produção de energia elétrica do país são: energia hídrica, gás natural e eólica. Na Figura 2, é possível visualizar o percentual de cada uma das fontes.

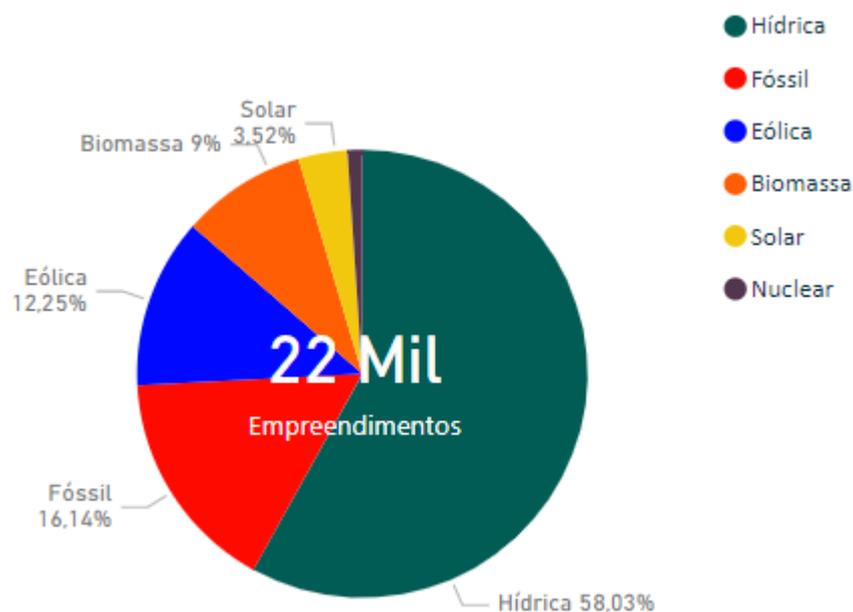


Figura 2 – Matriz de geração de energia elétrica brasileira por origem de combustível
Fonte — ANEEL, 2022

3.2 A indústria sucroalcooleira brasileira

O açúcar foi a primeira grande riqueza brasileira, chegando até a representar sua economia (ciclo da cana-de-açúcar) e, até hoje, exerce destaque na economia nacional. O Brasil lidera a produção mundial de açúcar e é o segundo na produção de etanol. Segundo o Instituto de Tecnologia Canaveieira — ITC, em 2019, o setor sucroenergético representou 2% do PIB brasileiro, cerca de R\$7,4 trilhões (JornalCana, 2019).

Já o etanol se apresenta como o principal biocombustível, primeiro substituto dos combustíveis de origem fóssil, segundo Skikida *et al.* (2010), e sua produção está em segundo lugar no mundo, com uma média de produção de 400 mil litros por dia. Os Estados Unidos lideram e, com o Brasil, são responsáveis por cerca de 70% da produção mundial, o que equivale a cerca de 28 bilhões de litros de etanol produzidos anualmente no Brasil, segundo a Embrapa (2022).

3.2.1 Configuração da indústria sucroalcooleira no Brasil

A indústria sucroalcooleira brasileira se fragmenta em duas grandes fases de processos, a agrícola e o industrial.

A fase agrícola pode ser independente ou da própria usina, de produção exclusiva ou para comércio com terceiros. Constitui-se de todos os processos envolvidos desde o plantio até a

colheita da cana-de-açúcar. Diversas espécies são plantadas e até mesmo desenvolvidas em laboratórios para extrair o máximo da planta ou para que a mesma tenha uma maior adaptação à região e ao solo ao qual será plantada. O plantio pode ser feito de forma manual, automatizada ou com mudas pré-brotadas. Ressalta-se a importância considerável destes materiais que, ao longo dos anos, passaram a ser gerados em grandes quantidades, superando, inclusive, a capacidade do solo em assimilá-los. A partir de então, visando conter a poluição causada pelos mesmos e o atendimento aos mecanismos legais de proteção ambiental, inserem-se formas de tratá-los (lagoas anaeróbicas, biodigestão, etc.).

O processo de colheita da produção também passou e passa por modificações com a introdução da mecanização. Em 2022, o estágio de mecanização da colheita de cana é de praticamente 100% em áreas mecanizáveis dos grandes estados produtores, como é o caso de São Paulo e de Minas Gerais. Porém, essa realidade ainda é distante para os estados do nordeste brasileiro, que apresentam cerca de 23% de mecanização, conforme dados de levantamento da safra de cana-de-açúcar realizados pelo CONAB (2022). Fato é que, o país possui, desde 1998, um decreto a respeito do encerramento da atividade de queima da palhada para a colheita de cana. Tão logo houve essa publicação, os estados foram elaborando suas leis e programas a fim de atender a essa mudança. Entretanto, essa questão envolve outros aspectos socioeconômicos, uma vez que a colheita manual, realizada pelos chamados “boias-frias” — comumente assim conhecidos os trabalhadores responsáveis pelo corte da cana - trouxe à tona o problema da dificuldade na realocação dessa mão-de-obra, em função de diversos fatores como o baixo nível de escolaridade.

Na colheita mecanizada existem diversos tipos de maquinários, mas a função principal continua a mesma: colher a matéria-prima e levá-la para as usinas.

Já na fase industrial, após a extração do caldo, ocorre a produção do etanol, do açúcar e da energia elétrica (na maior parte das usinas) — a chamada cogeração. Para exemplificar melhor, os processos do açúcar e etanol encontram-se descrito no Fluxograma 1.

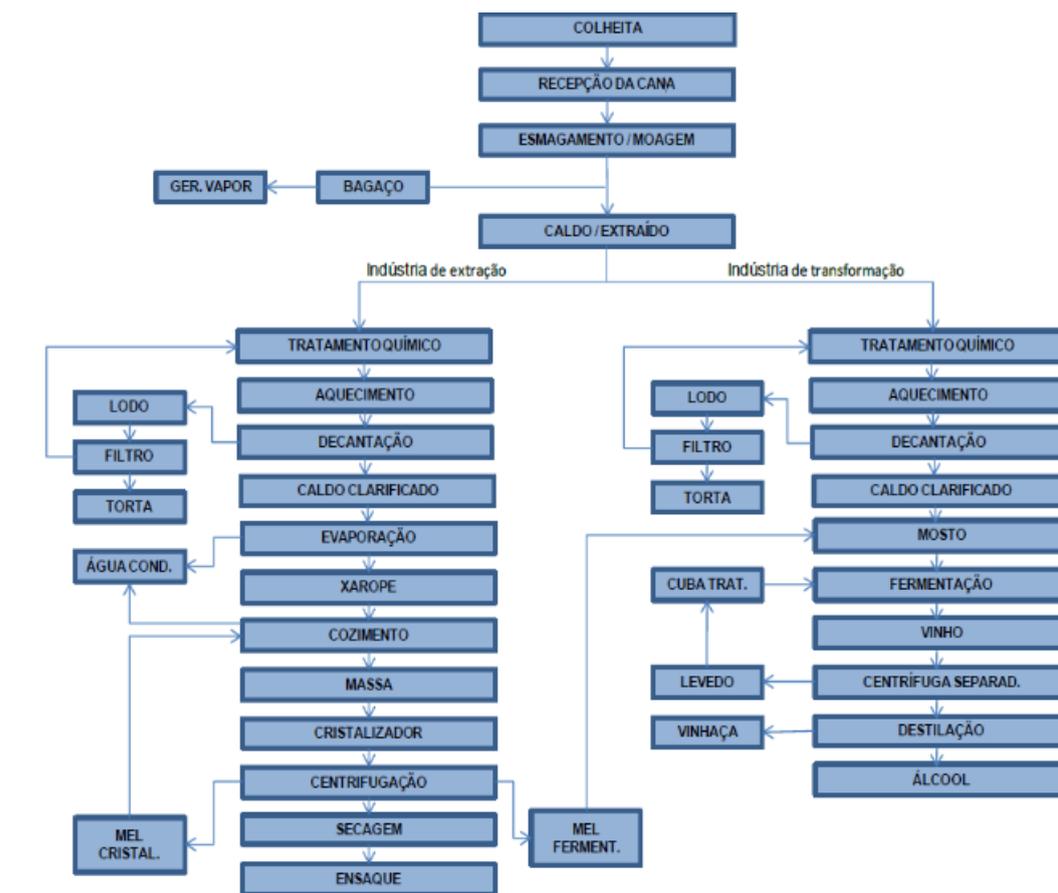


Figura 3 – Fluxograma geral do setor sucroalcooleiro
Fonte: FAPESP, 2016

3.2.2 Visão geral da produção nacional de etanol total e a crescente participação do milho na produção de etanol

Desde 2015, o setor sucroalcooleiro vem sofrendo alterações com a introdução do milho como matéria-prima na produção de etanol. Conforme a CONAB (2022), a previsão de produção de etanol total (anidro e hidratado), proveniente da cana-de-açúcar, para a safra 2022/23 é de 25,83 bilhões de litros. Já para o etanol proveniente do milho, a previsão é um aumento de mais de 30% da produção para esta safra, podendo chegar a 4,52 bilhões de litros.

Percebe-se o surgimento de uma nova configuração do setor em função dessa nova fonte de matéria-prima e o etanol de milho no país já é uma grande realidade. Segundo a União Nacional do Etanol de Milho, 15% de todo o volume de etanol consumido no país já é proveniente do milho, totalizando um montante em torno de 5 bilhões de litros, além de uma previsão de que esse total chegue à 10 bilhões de litros até 2030 (UNEM, 2022).

As usinas do setor que operam com o milho já totalizam 18 unidades e apresentam, atualmente, duas configurações distintas, a saber: usinas *flex full*, que produzem etanol de cana

e de milho e usinas *full*, que produzem etanol apenas a partir do milho. Existem mais nove usinas em construção nas regiões Norte e Nordeste (UNEM, 2022).

Nas Tabelas 1 e 2, estão apresentadas as estimativas de produção calculadas pela CONAB, em seu terceiro levantamento anual (CONAB, 2022). A Tabela 1 refere-se à previsão de produção nacional do etanol proveniente da cana-de-açúcar e a Tabela 2 do etanol proveniente do milho.

Tabela 1 – Estimativa da produção brasileira de etanol total (cana-de-açúcar)

| Região/UF | Cana-de-Açúcar Destinada ao etanol total (em mil t) | | Etanol total (em mil L) | |
|-----------------------|--|-------------------|-------------------------|----------------------|
| | Safra 2021/22 | Safra 2022/23 | Safra 2021/22 | Safra 2022/23 |
| NORTE | 3.181,30 | 3.242,80 | 262.835,00 | 268.577,00 |
| AM | 140,4 | 79,9 | 7.697,00 | 7.263,00 |
| PA | 731,5 | 707,1 | 55.152,00 | 57.253,00 |
| TO | 2.309,40 | 2.455,80 | 199.986,00 | 204.061,00 |
| NORDESTE | 26.116,60 | 21.231,90 | 1.877.191,00 | 2.073.078,00 |
| MA | 2.052,10 | 2.210,70 | 163.825,00 | 175.590,00 |
| PI | 682,8 | 208,7 | 44.139,00 | 42.235,00 |
| RN | 1.259,90 | 1.084,90 | 85.515,00 | 107.637,00 |
| PB | 5.016,60 | 5.609,90 | 354.605,00 | 421.327,00 |
| PE | 5.456,70 | 3.391,30 | 372.032,00 | 393.330,00 |
| AL | 6.518,80 | 3.171,50 | 445.912,00 | 451.553,70 |
| SE | 1.412,60 | 1.302,90 | 99.084,00 | 121.403,00 |
| BA | 3.717,10 | 4.252,00 | 312.079,00 | 360.002,30 |
| CENTRO-OESTE | 100.682,60 | 96.132,30 | 8.236.479,00 | 8.547.676,20 |
| MT | 11.904,50 | 10.769,20 | 1.120.474,00 | 1.067.276,00 |
| MS | 33.214,50 | 32.727,80 | 2.492.318,00 | 2.747.189,60 |
| GO | 55.563,60 | 52.635,20 | 4.623.687,00 | 4.733.210,70 |
| SUDESTE | 180.415,00 | 148.622,60 | 14.961.123,00 | 13.872.775,30 |
| MG | 34.338,70 | 28.473,20 | 2.830.866,00 | 2.822.135,90 |
| ES | 1.573,60 | 1.563,50 | 111.445,00 | 112.928,00 |
| RJ | 1.738,00 | 1.538,80 | 74.106,00 | 130.798,00 |
| SP | 142.764,80 | 117.047,00 | 11.944.706,00 | 10.806.913,40 |
| SUL | 14.329,20 | 13.266,30 | 1.064.599,00 | 1.065.733,80 |
| PR | 14.329,20 | 13.266,30 | 1.064.599,00 | 1.065.733,80 |
| NORTE/NORDESTE | 29.298,00 | 24.474,70 | 2.140.026,00 | 2.341.655,00 |
| CENTRO-SUL | 295.426,80 | 258.021,20 | 24.262.201,00 | 23.486.185,30 |
| BRASIL | 324.724,80 | 282.495,80 | 26.402.227,00 | 25.827.840,20 |

Fonte: Adaptado de CONAB, 2022.

Tabela 2 – Estimativa da produção brasileira de etanol de milho

| Região/UF | Etanol anidro (em mil L) | | Etanol hidratado (em mil L) | | Etanol total (em mil L) | |
|---|--------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| | Safra 2021/22 | Safra 2022/23 | Safra 2021/22 | Safra 2022/23 | Safra 2021/22 | Safra 2022/23 |
| CENTRO-OESTE | 894.600,00 | 1.206.963,00 | 2.465.845,00 | 3.205.129,00 | 3.360.445,00 | 4.412.092,00 |
| MT | 894.600,00 | 997.479,00 | 2.087.400,00 | 2.337.888,00 | 2.982.000,00 | 3.335.367,00 |
| MS | - | 209.484,00 | - | 488.796,00 | - | 698.280,00 |
| GO | - | - | 378.445,00 | 378.445,00 | 378.445,00 | 378.445,00 |
| SUL | 77.945,00 | 77.945,00 | 34.828,00 | 34.828,00 | 112.773,00 | 112.773,00 |
| PR | 77.945,00 | 77.945,00 | 34.828,00 | 34.828,00 | 112.773,00 | 112.773,00 |
| NORTE/ NORDESTE/ SUDESTE | - | - | - | - | - | - |
| CENTRO- SUL | 972.545,00 | 1.284.908,00 | 2.500.673,00 | 3.239.957,00 | 3.473.218,00 | 4.524.865,00 |
| BRASIL | 972.545,00 | 1.284.908,00 | 2.500.673,00 | 3.239.957,00 | 3.473.218,00 | 4.524.865,00 |

Fonte: Adaptado de CONAB, 2022.

3.3 Resíduos provenientes do setor sucroalcooleiro

Embora o etanol proveniente do milho já seja uma realidade na produção nacional, o presente trabalho irá tratar mais especificamente dos resíduos provenientes da utilização da cana-de-açúcar como matéria-prima na fabricação do etanol. Ressalta-se, também, que o milho já apresenta outras aplicações, principalmente para o setor alimentício. Alguns produtos provenientes do milho são: óleos, pipoca, farinha, ração (para animais), fubá, entre muitos outros, o que mostra que a produção do milho é concorrida, pois existem diversos setores e produtos que podem utilizá-lo como matéria-prima.

O setor está sempre em busca de solucionar o problema na geração de seus resíduos que, anteriormente, eram vistos como problemas. Mas, agora, eles agregam, e muito, aos seus processos, como é o caso do bagaço de cana.

Os resíduos do setor sucroalcooleiro são utilizados para a fertirrigação, que são: resíduos da lavagem da cana, da descarga de caldeiras, da lavagem das dornas e da vinhaça. Para adubação, podem ser citados a palha, as cinzas da queima do bagaço, o iodo proveniente da descarga das caldeiras, a torta de filtro e demais sólidos decantados (RODRIGUES, 2014).

Um dado importante Segundo Macedo *et al.* (2004), é que a cada tonelada de cana-de-açúcar são gerados, em média, 280 kg de bagaço e cerca de 200 kg de palha (SOUZA, 2012), ambos são utilizados na cogeração da energia elétrica.

3.4 A cogeração na indústria sucroalcooleira brasileira

A cogeração, segundo Lozano (1998), é a produção conjunta, em processo sequencial, de energia elétrica ou mecânica e de energia térmica, partindo de uma mesma fonte de energia primária.

Na indústria sucroalcooleira, a cogeração de energia elétrica não é nenhuma novidade. As usinas configuram-se como autoprodutoras de energia, pois aproveitam o bagaço de cana gerado tanto na produção de álcool ou de açúcar para atender sua demanda energética no período da safra. Algumas delas, devido à configuração de seus sistemas de cogeração e eficiência nos processos, geram além do que consomem, podendo vender o excedente de energia elétrica para as redes de distribuição local, de acordo com Souza e Azevedo (2006).

Os valores gerados tanto pela cana e pelo bagaço são bem expressivos, uma tonelada de bagaço pode gerar 300 kWh enquanto uma tonelada de palha gera algo por volta de 500 kWh (ANEEL, 2010).

De acordo com Baccarin e Castilho (2002), a cogeração da indústria sucroalcooleira é composta basicamente pela fornalha, onde é efetuada a queima do bagaço, e uma caldeira onde o vapor é produzido e utilizado para girar uma turbina integrada ao eixo de um gerador, entrando assim em movimento e gerando a energia elétrica. Ainda segundo os autores, existem quatro pontos de análise para implementação de um sistema de cogeração: técnico, mercado potencial, econômico e termodinâmico.

O potencial técnico tem como objetivo identificar qual a melhor tecnologia para elaborar o projeto. Já o mercado potencial é entender quem irá usufruir da energia produzida, a produção irá servir para cobrir a demanda da empresa ou se será gerado um montante extra e vendido à rede. O potencial econômico tem o viés de analisar os recursos necessários para calcular o *payback* do investimento, e o potencial termodinâmico é a representatividade da quantidade máxima de energia que pode ser gerada através dos fundamentos teóricos analisados.

De acordo com Lobo (2013), o principal processo de cogeração adotado pelas usinas sucroalcooleiras é através das turbinas a vapor que utilizam o ciclo de Rankine. Já Zanichelli (2015) fala de uma configuração de ciclos mistos, utilizando os ciclos de Rankine, Brayton e o ciclo combinado.

Para Zanichelli (2015) o ciclo Rankine (Figura 4) é composto por uma caldeira, turbina a vapor, condensador e bomba, com uma combustão da biomassa direta. Lobo (2013) afirma que o processo resume-se pela queima do bagaço que tem como objetivo aquecer a água da caldeira e assim gerar o vapor. A palha é utilizada juntamente com objetivo de aumentar o potencial de

geração devido ao seu maior poder calorífico. De acordo com Chiericato (2010), o rendimento máximo desse processo de geração térmica é de 30 a 35% devido à umidade do bagaço.

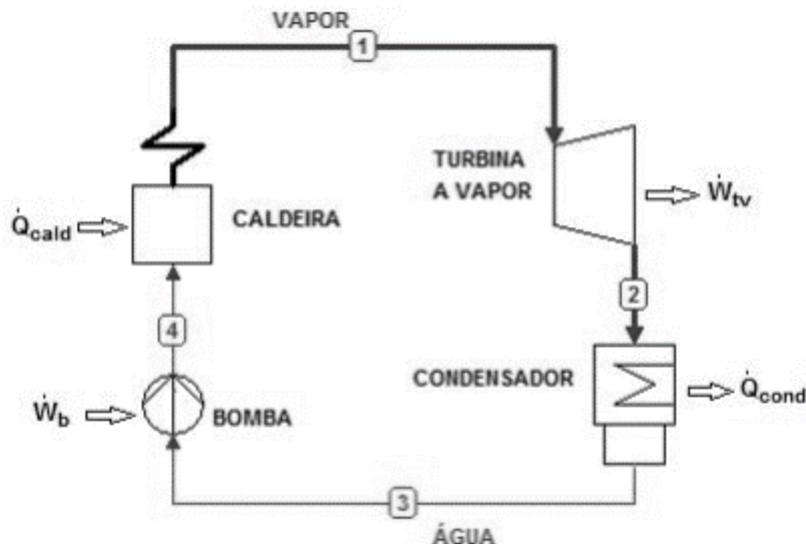


Figura 4– Ciclo Rankine
 Fonte: Adaptação de Zanichelli (2015)

Já o ciclo Brayton (Figura 5) apresenta maior eficiência térmica e menores impactos ambientais quando comparado ao ciclo anterior (LOBO, 2013). É um ciclo composto por turbina a gás, compressor e câmara de combustão, sua combustão interna permite a queima de combustíveis tanto gasosos como líquidos (ZANICHELLI, 2015).

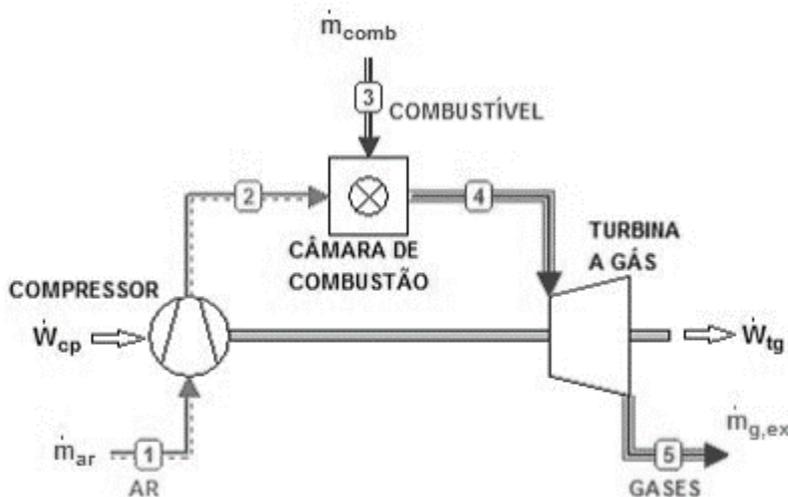


Figura 5 - Ciclo Brayton
 Fonte: Adaptação de Zanichelli (2015)

O ciclo combinado caracteriza-se pelo emprego de dois ou mais ciclos. De acordo com Zanichelli, a combinação mais comum é utilizar o ciclo Brayton como unidade superior e o ciclo de Rankine como unidade inferior, combinação demonstrada na Figura 6. Ainda segundo Barja (2006), essa combinação de ciclos ocasiona em um rendimento elétrico superior a 60%,

podendo chegar a uma eficiência total do ciclo de 85%.

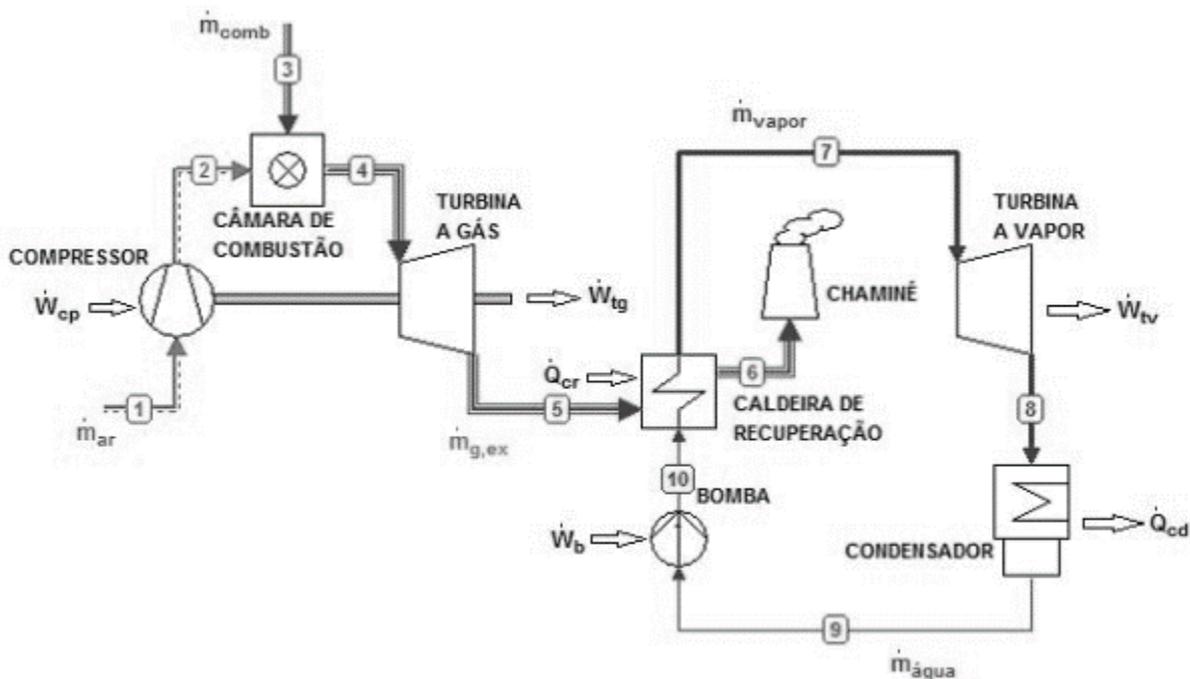


Figura 6 - Ciclo combinado com unidade a gás na parte superior do processo e unidade a vapor na inferior
Fonte: Adaptação de Zanichelli (2015)

3.5 Etanol de Segunda Geração (E2G)

A possibilidade de obtenção de etanol celulósico ou etanol de segunda geração nasceu na Alemanha, em 1898, quando foram utilizados 100 kg de cavacos de madeira com um processo de hidrólise ácida. O processo rendeu cerca de 7,5 litros de etanol (FAIRBANKS, 2009).

Por mais que alguns estudiosos afirmem que o processo sofreu poucas mudanças desde sua descoberta, segundo Mosier *et al.* 2005, a etapa de pré-tratamento da biomassa é de extrema importância para o processo da hidrólise.

O pré-tratamento pode ser feito de quatro formas, a saber: físicos, biológicos, químicos e combinados. Somente após o pré-tratamento, ocorre a etapa de hidrólise da biomassa, que pode ser feita por via ácida (hidrólise ácida) ou enzimática (hidrólise enzimática). Em seguida, o produto pode ser fermentado e gerar o E2G.

Apresentando apenas duas usinas, pode-se dizer que o mercado brasileiro de E2G ainda não está consolidado. Mas, com o avanço no desenvolvimento de novas tecnologias e processos, entre eles a criação de enzimas nacionais, trata-se de uma rota de obtenção de etanol com grande potencial, principalmente pelo fato de que, ao dominar tal tecnologia, seria possível produzir o E2G de qualquer recurso que possua celulose em sua composição.

Um ponto muito importante do E2G é o maior aproveitamento do potencial energético da biomassa, como é o caso do bagaço de cana e de outros resíduos agrícolas para a geração de mais biocombustível, de forma a tornar o processo mais rentável, além de contribuir na questão climática e na expansão de novas fronteiras agrícolas em detrimento da produção de alimentos.

Um fator relevante também é a variedade de espécies de cana-de-açúcar. A cana-energia, ou “supercana”, se destaca quando analisamos sua estrutura. Essa variedade produz menos sacarose que as espécies mais tradicionais (cerca de 40% a menos) e possui mais fibras, o que implica uma maior quantidade de celulose para produção de E2G e mais lignina para a queima nas caldeiras, além de que a espécie foi desenvolvida para crescer em regiões áridas com pouca água (LEAL, 2010).

A palha também não pode ser deixada de lado. Anteriormente deixada no campo para ajudar da recuperação e proteção do solo, agora é muito utilizada tanto na produção do E2G como na geração de energia elétrica, e nela está presente 1/3 de toda energia da cana, valor semelhante ao bagaço (LEAL, 2010; MAGALHÃES E BRAUNBECK, 2010).

3.6 Impactos da mecanização da colheita de cana-de-açúcar

Segundo a CONAB (2021), o índice nacional de colheita mecanizada é de, aproximadamente, 88,9% e, da coleta manual, é de 11,1%. A grande parte dos processos mecanizados se encontram na região Centro-Sul do país, com cerca de 97,3% de colheita mecanizada. Já as regiões Norte e Nordeste, que apresentam um relevo mais acidentado e uma maior quantidade de mão-de-obra, acabam elevando os níveis da colheita manual, com um nível de mecanização da colheita de 22,9%.

Na safra de 2010/11, o estado de São Paulo, responsável por 51% produção nacional de cana-de-açúcar, já apresentava um percentual de 62,7% de mecanização. Tudo em função de medidas estaduais adotadas e acordos envolvendo grande parte das usinas presentes no estado, como o Protocolo Agroambiental, criado em 2007, que passou a ser chamado Etanol Mais Verde a partir de 2015. Logo, houve acelerado processo de substituição da colheita manual pela mecanizada e para a atual safra de 2022/23, o índice de mecanização já representa 97,6% das colheitas. A mecanização, de fato, possibilita maior ganho ambiental, com a conservação do solo, menor emissão de poluentes, pois não se realiza a queima, maior eficiência e redução de custos de produção.

Um impacto significativo no início da mecanização da colheita foi a falta de regularidade dos terrenos e até mesmo da própria cana-de-açúcar. Com um relevo acidentado, as máquinas

não faziam o corte com o máximo de proximidade do solo e uma parte do colmo ficava ainda fixado na terra. Isso acarretou perda de produtividade no início do processo de mecanização. As variedades de cana que tinham um crescimento diagonalizado foram deixadas de ser utilizadas também, pois apesar deste formato não impactar na colheita manual, é significativo na produtividade da colheita mecanizada.

É importante ressaltar, ainda, que impactos negativos também estão presentes nessa mecanização, sobretudo os sociais. Com o avanço da tecnologia e substituição do homem pela máquina, muitos trabalhadores acabam perdendo seu sustento. Trabalhadores estes que não possuem relevante capacitação profissional. Muitos não são nem alfabetizados e tinham na colheita da cana-de-açúcar um sustento para a família. Sem emprego no corte de cana e sem capacitação, grande parte destas pessoas não conseguem uma recolocação no mercado de trabalho. Soma-se aos problemas a qualidade da saúde dos mesmos ao longo da vida, fazendo com que os boias-frias apresentem sérios problemas de coluna, por exemplo, em idade não avançada, pois o trabalho requer grande esforço físico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Matéria lignocelulósica

A matéria lignocelulósica é formada por três partes: a lignina, a hemicelulose e a celulose, conforme pode ser observado na Figura 7.

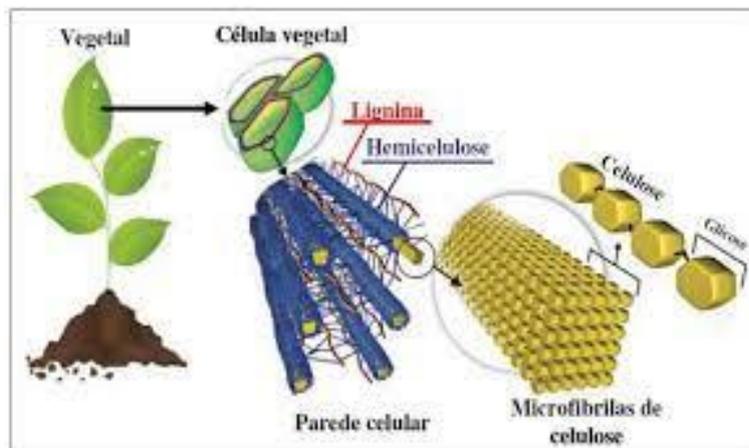


Figura 7 – Representação da matéria lignocelulósica
Fonte: Adaptado de RITTER, 2008; apud FACUNDES, 2014

Segundo Santo *et al.* (2012), a biomassa lignocelulósica é um material encontrado em extrema abundância no planeta e provém de uma fonte renovável de energia.

A lignina é a camada mais externa da estrutura como um todo, e ela compõe cerca de 10% a 25% do material seco. Ela não é utilizada na produção de etanol, pois sua estrutura não permite maior redução a moléculas simples de açúcar (RABELO, 2010; BNDES, 2008).

A camada intermediária é a hemicelulósica, que compõe de 20% - 40% do material seco, e é de fácil hidrólise. Por fim, a camada mais interna de todas é a celulose, de 40% até 60% do material seco. A hidrólise da celulose gera a glicose, que passa por processo de fermentação bem dominado pela indústria.

4.1.1 Lignina

O termo lignina tem origem no latim “*lignum*” que significa madeira. Sua função nas plantas é de fortificar as paredes celulares e garantir que toda a estrutura da matéria não seja afetada. Ela também tem um importante papel no transporte de água e nutrientes (FENGEL & WEGENER, 1984).

Ela é o segundo composto com maior abundância na natureza, sendo um heteropolímero

aromático, hidrofóbico e amorfo (ZHENG, ZHAO, *et al.*, 2014). É constituído de monômeros (moléculas orgânicas que formam polímeros sintéticos) de três diferentes álcoois fenilpropanos: p-coumarílico (H), coniferílico (G) e sinapílico (S), os quais sofrem variação de acordo com a espécie da planta, maturidade e localização celular (MONLAU, BARAKAT, *et al.*, 2013; BHOWMICK, SARMAH e SEN, 2017).

A lignina tem a função parecida com a de um concreto, preenchendo as lacunas entre as estruturas da hemicelulose, cobrindo as microfibrilas de celulose, sendo considerada o principal composto de difícil tratamento na conversão da biomassa (PAUDEL, BANJARA, *et al.*, 2017; KUMAR, BARRETT, *et al.*, 2009). Dessa forma, o principal propósito da lignina é gerar uma maior rigidez estrutural, impermeabilizando e oferecendo resistência contra-ataques microbiológicos e estresses oxidativos (MONLAU, BARAKAT, *et al.*, 2013; JØRGENSEN, KRISTENSEN e FELBY, 2007).

Devido a toda sua estrutura, é fundamental efetuar um pré-tratamento para se extrair o máximo possível da celulose da biomassa. Como a lignina não possui açúcar simples em sua forma, a mesma não é interessante na realização de fermentação, mas é muito visada para produção de energia (BNDES; CGEE, 2008), devido ao seu alto poder calorífico, além de poder ser transformada em produtos com valor agregado, como, fertilizantes, rações, pesticidas e até mesmo antioxidantes.

Após a extração são arrastados diversos outros compostos, recebendo assim o nome de licor negro. Esse licor tem a composição variante dependendo do local e espécie de material utilizado. A lignina de melhor qualidade pode ser dividida em três categorias principais: energia, matérias e produtos químicos (SAVAGE, 2009). Seu alto poder calorífico é um excelente combustível (KLOCK, 2005), podendo ser utilizado assim como uma fonte primária na cogeração, diminuindo assim a competição com o bagaço.

De acordo com Fioravanti (2011), 5,4 milhões de litros de etanol são extraídos de 30 mil toneladas de palha, compostas de celulose e hemicelulose, e 13 mil toneladas de pellets de lignina. Com diversas utilizações, seu potencial ainda é muito pouco explorado, o que se deve pelo processo demorado da remoção via enzimática para a escala industrial. Entretanto, com os avanços tecnológicos e diminuição de custos pela tecnologia em escala ela pode ganhar muito mercado e ganhar diversas utilizações que na atual data da elaboração deste trabalho se mostram inviáveis economicamente.

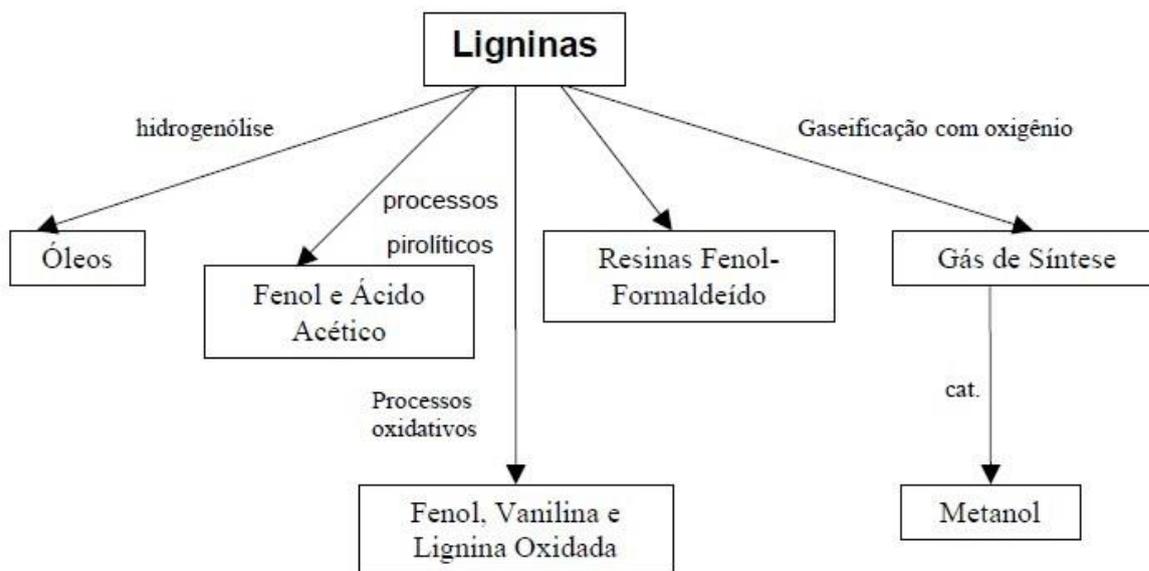


Figura 8 – Produtos originados da lignina
 Fonte: SCHUCHARDT *et al.* 2001

4.1.2 Hemicelulose

Hemicelulose é uma estrutura formada por heteropolímeros como hexoses (D-glicose, D-galactose e D-manose), pentoses (D-xilose e L-arabinose) e ácidos urônicos (D-glucurônico, D-galacturônico e metilgalacturônico) (McMILLAN, 1993; SAHA, 2003; *apud* LIMAYEMA; RICKE, 2012).

A hemicelulose é composta por uma estrutura de até 200 carboidratos propagado e alinhado com grupos funcionais. É resultado da polimerização de diferentes pentoses (como xilose e arabinose), hexoses (como glucose, galactose, manose) e ácidos urônicos (como ácido glucorônico e galacturônicos) (HENDRIKS e ZEEMAN, 2009). É ligada por ligações não covalentes às fibrilas de celulose, agindo como uma matriz amorfa que sustenta as mesmas (BHOWMICK, SARMAH e SEN, 2017).

Ela funciona como uma junção entre as fibras de celulose e a lignina conferindo mais rigor a rede celulose-hemicelulose-lignina (HENDRIKS e ZEEMAN, 2009). Ao contrário da celulose, a hemicelulose tem uma estrutura amorfa e ramificada, conferindo a ela pouca resistência à hidrólise, sendo assim mais facilmente hidrolisáveis a seus monômeros (TAHERZADEH e KARIMI, 2008).

Sua hidrólise é mais fácil de ser realizada do que da celulose, por exemplo, entretanto a fermentação de pentoses é menos difundida do que a de hexoses, provenientes da celulose (BNDES; CGEE, 2008).

Para que a fermentação desta pentose seja efetuada, podem-se adicionar microrganismos geneticamente modificados ou leveduras capazes de fermentar pentoses naturalmente, como a *Candida shehetae* e *Scheffersomyces stipitis* (ANTUNES *et al.* 2016., BIDEAUX *et al.*, 2016).

DIAS *et al.* (2013) analisou diferentes configurações para sistema de cogeração e uso de pentoses, mostrando uma melhora quando a geração de energia foi integrada com a produção de E2G. Os resultados de simulação mostraram que com a inclusão da fermentação gerou um aumento da produção de etanol de 40 – 50% quando comparado ao processo de apenas uma geração.

4.1. 3 Celulose

A celulose representa aproximadamente 40% de toda a reserva de carbono disponível na biosfera, ela é a maior fonte de carbono dos componentes orgânicos. Componente de todas as plantas, desde árvores até os organismos mais primitivos (RABELO, 2007).

É um homopolissacarídeo, composto por antidroglucopiranoose (β -D-glucopiranoose) ligadas por ligações glicosídicas do tipo β -(1 \rightarrow 4) formando uma cadeia linear. Duas unidades juntas formam uma ligação glicosídica através da eliminação de uma molécula de água, que envolve os gruposhidroxílicos dos carbonos 1 e 4. O resultado é uma celobiose de estrutura dissacarídea. Uma celobiose é uma unidade conformacional mínima de celulose, já a glicose é uma unidade fundamental das cadeias do homopolímero (PITARELO, 2007).

As ligações do tipo β -(1 \rightarrow 4) que compõem a molécula de celulose são de difícil hidrólise, apenas alguns organismos, como fungos e bactérias, são capazes de tal função. Além destas ligações, são encontradas forças de van der Waal's (ZHANG & LYND, 2004) e pontes de hidrogênio intra e intercadeia, gerando assim a combinação de cadeias de celulose para formar os cristalitos (SHULER, 1992).

O tamanho da cadeia de celulose é avaliado através de seu grau de polimerização, que representa o número de anidroglucose que formam a cadeia polimérica.

A celulose apresenta áreas grandemente ordenadas (regiões cristalinas), estabilizadas por várias pontes de hidrogênio intra e intermoleculares, e áreas menos ordenadas ou amorfas, em que as cadeias apresentam orientação aleatória (PITARELO, 2007).

Vários autores sugerem que a celulose amorfa, devido a sua área superficial mais vasta, é mais suscetível à hidrólise enzimática do que a forma ordenada ou cristalina (PITARELO, 2007). Segundo Coughlan (1985), citado por MARTINS (2005), estudos demonstraram que conglomerados de menor organização molecular, localizados no topo da estrutura cristalina, são

mais propícios ao ataque enzimático.

Segundo Ojumu (2003) e Lima (2007), com o resultado da junção dos tipos de polímeros que formam a matéria vegetal (celulose, hemicelulose e lignina), o grau de cristalinidade e o empacotamento causados pela estrutura complexa da lignina, obtém-se um material muito mais resistente ao ataque enzimático, de modo assim que deterioração da celulose na natureza seja de forma mais lentamente.

Entretanto, compostos enzimáticos gerados por diversos micro-organismos têm se mostrados capazes de impulsionar a hidrólise da celulose, tanto cristalina quanto amorfa, em açúcares de baixa massa molecular como a glicose e celobiose (MARTINS, 2005).

As enzimas celulasas também são muito importantes quando falamos da celulose. Sua definição é proveniente do conjunto de enzimas envolvidas na degradação da celulose. Estas enzimas podem ser utilizadas em diversos processos indústrias, tais como os de: óleos essenciais, indústria de polpa, de papel, tratamento de resíduos, aromatizantes e também na produção de bioetanol (KIELING, 2002; RUEGGER & TAUKTORNISIELO, 2004; ZHANG, 2006).

De acordo com Zhang (2006), o mercado de celulasas está se expandindo rapidamente, em prol das pesquisas envolvendo hidrólise enzimática de materiais celulósicos pré-tratados, que são fermentados para produzir commodities, como o etanol de segunda geração.

Um fator agravante é o preço das enzimas celulasas, que são relativamente caras e uma redução dos custos seria importante para que seu uso fosse escalado, deixando assim o E2G mais competitivo no mercado. Mas algumas providências já estão sendo tomadas para poder baratear tais processos (ZHANG, 2006; IDEANEWS, 2007), são elas:

- Produção de enzimas utilizando substratos/biomassa de baixo custo;
- Produção de enzimas com melhor estabilidade para processos específicos;
- Produção de enzimas eficientes e no local do uso;
- Utilização de pré-tratamentos dos substratos eficientes e de menor custo.

Serão apresentadas na Tabela 3 algumas diferenças entre a celulose e a hemicelulose também para facilitar o entendimento. Já a Tabela 4 irá apresentar alguns micro-organismos que são produtores de celulase e qual composto é utilizado para isso.

Tabela 3 – Principais diferenças entre celulose e hemicelulose

| Celulose | Hemicelulose |
|--|--|
| Consistem em unidades de glicose ligadas entre si (Natureza Homopolissacarídica) | Consistem em várias unidades de pentoses e hexoses ligadas entre si (Natureza Heteropolissacarídica) |
| Alto grau de polimerização (100 a 15.000) | Baixo grau de polimerização (50 a 300) |
| Forma arranjo fibroso | Não formam arranjo fibroso |
| Apresenta regiões cristalinas e amorfas | Apresentam somente regiões amorfas |
| É atacada lentamente por ácido inorgânico diluído a quente | São atacadas rapidamente por ácido inorgânico diluído a quente |
| É insolúvel em álcalis | São solúveis em álcalis |

Fontes: Zhang & Lynd, 2004; Pereira Jr., 2007.

Tabela 4 - Micro-organismos produtores de celulases e substratos utilizados

| Micro-organismo | Substrato |
|--|---|
| Aspergillus niger | Bagaço de cana-de-açúcar |
| Aspergillus ellipticus e Aspergillus fumigatus | Bagaço de cana-de-açúcar |
| Chaetomium globosum | Fibras de palma |
| Aspergillus fumigatus | Resíduos de grama |
| Cellulomonas biazotea | Fibras de grama |
| Trichoderma reesei | Bagaço de cana-de-açúcar e palha de arroz |
| Aspergillus flavus | Bagaço de cana-de-açúcar, serragem e sabugo de milho |
| Trichoderma reesei e Aspergillus niger | Sabugo de milho |
| Aspergillus niger | Bagaço de cana-de-açúcar |
| Aspergillus niger | Espiga de milho e serragem |
| Trichoderma reesei | Palha de trigo |
| Trichoderma reesei | Antigonum leptopus, folhas de bananeira e palha de cana-de-açúcar |
| Trichoderma lignorum | Resíduos de banana |
| Trichoderma reesei | Palha de trigo |
| Bacillus subtilis | Palha de arroz, palha de trigo e bagaço de cana-de-açúcar |

Fonte: AGUIAR, 2010

4.2 Hidrólise enzimática

A hidrólise enzimática ocorre devido à presença de enzimas que aumentam a velocidade das reações, trabalhando como catalizadores, de modo a diminuir a energia de ativação da

reação.

A hidrólise pode ser feita tanto por processo químico como também através do processo biológico. A escolha de realizar a hidrólise pelo amido quimicamente, utilizando de ácidos inorgânicos diluídos, ou biologicamente, através do emprego de enzimas, é feita de acordo com a análise das vantagens e desvantagens de cada tipo de processo (ALMEIDA, 2017). Para efetuar a fermentação alcoólica, o fermento mais comumente utilizado é o *Saccharomyces Cerevisiae*, que converte rapidamente açúcares em álcool, ácidos orgânicos e dióxido de carbono e é tolerante a altas concentrações de etanol (MOHD AZHAR *et al.*, 2017; MOREIRA *et al.*, 2019). Além disso, a adição de nutrientes no estágio de fermentação ajuda no crescimento de leveduras e aumenta a produção do etanol (ZABED *et al.*, 2017; MOREIRA *et al.*, 2019).

Além da hidrólise enzimática, temos também outros três tipos: a alcalina, ácida e a salina. A alcalina é feita na presença de uma base em solução aquosa, já a ácida é feita através de uma solução aquosa com um ácido mineral, e a salina é definida pela reação de uma molécula de um sal e água.

4.3 Consumo de bagaço para a geração de eletricidade

Segundo Corrêa Neto e Ramón (2002), o setor sucroenergético é autossuficiente em termos energéticos, ocupando cerca de 98% da demanda energética a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar. Entretanto, grande parte das empresas utilizam sistemas de baixa eficiência, com maquinários antigos e com perdas relevantes do processo. Uma maior quantidade de energia poderia ser gerada e vendida para a rede, entretanto esse não é o principal foco dos produtores. Com o E2G, a produtividade por hectare pode aumentar muito, conseguindo assim alavancar ainda mais os lucros das indústrias.

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2022 (EPE, 2022), o país produziu no ano de 2021 um total de 159.909 mil toneladas de bagaço de cana e, deste total, foram utilizados para a geração de energia elétrica 27.127 mil toneladas. Esta é a menor utilização desde 2014, quando foram utilizados 26.829 mil toneladas para a geração de energia.

A União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (UNICA, 2021) informou que as indústrias pertencentes à mesma representou 79,5% de toda a bioeletricidade do país em 2021, lembrando que este dado se refere às usinas do estado de São Paulo, e nem todas as usinas necessariamente estão englobadas neste dado. Este montante é equivalente a um envio para a rede de 20,2 mil GWh. Uma redução de 10,6% em relação ao ano de 2020.

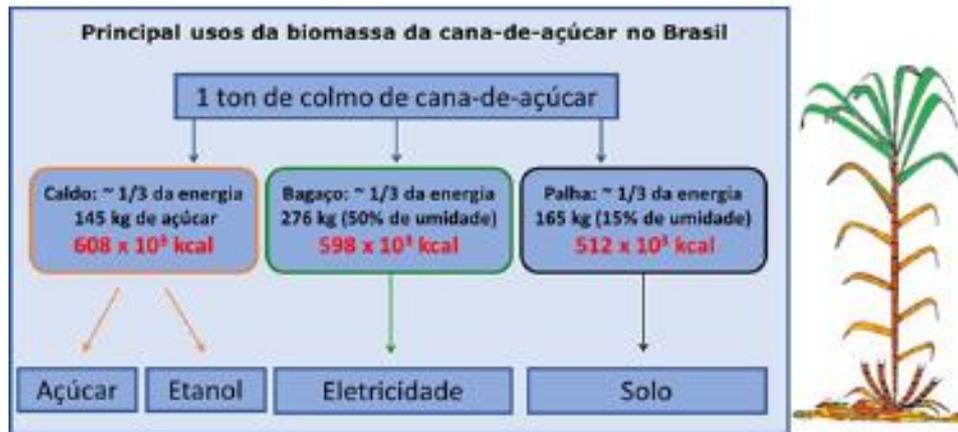


Figura 9– Composição e direcionamento dos insumos provenientes da cana-de-açúcar
Fonte: UNICA 2013

4.4 Custos associados à hidrólise enzimática no Brasil

De acordo com Mendes *et al.* (2018) o litro de etanol de segunda geração mundial variou entre US\$ 0,899 a US\$ 3,461. Essa variabilidade se dá pelas diferentes formas de efetuar o processo como os custos de enzimas, traslado de matéria-prima, eficiência do processo entre outras diversas variabilidades.

Já no mercado brasileiro, segundo Moraes *et al.* (2017), o custo do E2G no curto prazo é de R\$1,50/litro, enquanto o E1G está custando em torno R\$1,10/litro. A previsão, entretanto, é que entre 2021 e 2025 o custo de produção do etanol de segunda geração seja menor que o de primeira geração (MORAIS *et al.*, 2017).

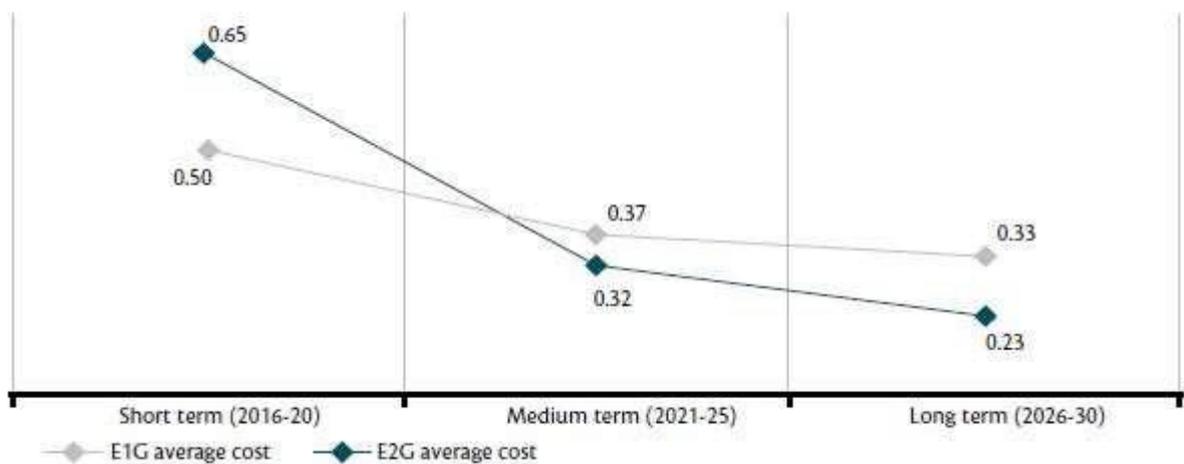


Figura 10 – Comparação de custos estimados de E1G e E2G ao decorrer dos anos (US\$/litro)
Fonte: CGEE (2017)

Pela Figura 10, podemos notar que o E2G não se mostrava tão viável no curto prazo, mas o cenário já tende a mudar quando se considera o médio e longo prazo. Com o avanço tecnológico e a disseminação dos conhecimentos da área estes custos tendem a cair cada vez mais, tornando o E2G algo muito mais viável ao médio e longo prazo. O aumento de produção com a mesma área de cultivo é extremamente relevante para os produtores, visto que sua área é limitada, mas o mercado ainda tem muito potencial de crescimento.

4.5 Palhão oriundos da cana-de-açúcar

O palhão é composto pelas folhas secas, folhas verdes e pelo ponteiro da cana-de-açúcar (RIPOLI, 1991). Estes resíduos também recebem o nome de palha ou palhada.

Nos modelos de produção anteriores, grande parte do palhão oriundos da fase agrícola da indústria sucroalcooleira eram queimados com a cana-de-açúcar, de modo assim que não podiam ser aproveitados em outros processos. Entretanto, devido ao Decreto Federal de número 2.661/98 foi estabelecido um fim gradativo da queima da cana na colheita, com o final do prazo para o ano de 2018. Gerando assim não só um aumento da palha e palhão gerados, como também uma preocupação para o direcionamento destes resíduos.

Segundo Trombeta (2015), após a operação de colheita, aproximadamente 75% do palhão fica presente no solo e não é levado juntamente com o bagaço para a fase industrial. Existem algumas máquinas modernas que efetuam a separação e enfardamento dos resíduos, mas ainda não estão presentes em todas as indústrias. O palhão é uma fonte energética muito importante, porém ainda não é tão bem utilizada, nem na produção do E2G e nem da produção de energia elétrica através da cogeração. Para se ter uma ideia, o equivalente energético do palhão é aproximadamente 1,2 barris de petróleo por tonelada de resíduo, e cada tonelada de palhão equivale a 1,8 tonelada de bagaço (KHATIWADA *et al.*, 2016). Ele é encontrado na ordem de 9 a 32t/ha-1 com base em peso úmido, ou seja, um hectare de equivalente à produção entre 11 e 33 barris de petróleo (SARTORI, 2001).

Com o sistema de colheita sem a queima prévia, um dos processos para o recolhimento do palhão restante no campo é o seu enleiramento e compactação por enfardadoras cilíndricas ou prismáticas. Esses fardos são postos em caminhões e levados até a fase industrial (INNOCENTE, 2011). Ainda de acordo com Magalhães e Braunbeck (2001), devido a sua baixa massa específica o palhão pode ser adensado em até 15 vezes o volume inicial para facilitar e diminuir os custos com o transporte. No Figura 11, a seguir, é descrito todo o processo do recolhimento do palhão até seu direcionamento para a fornalha, que neste caso

representa um processo de geração de energia elétrica através da cogeração. Posteriormente, tem-se a Figura 12, onde são demonstradas as etapas de processo de uma usina E2G.

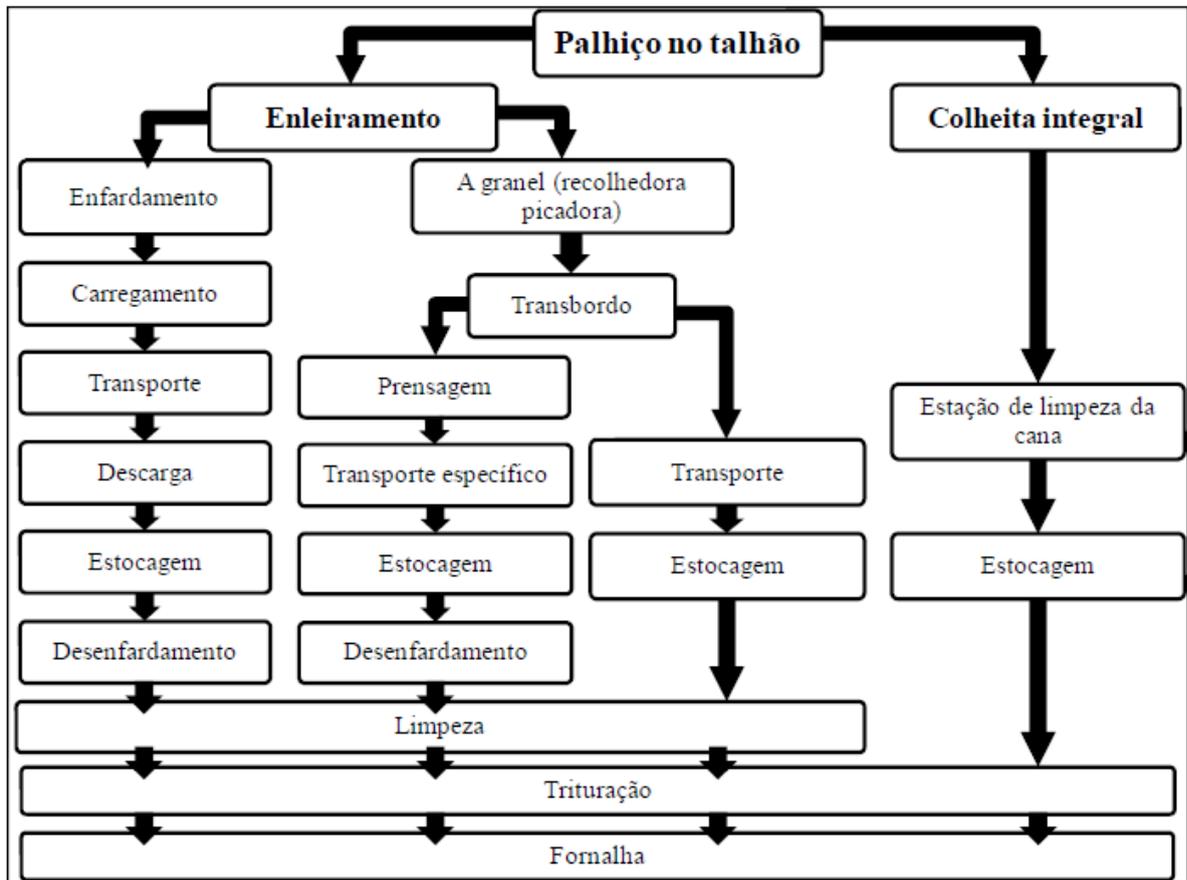


Figura 11 – Fluxograma do processo de recolhimento do palhicho até a queima para geração de energia
 Fonte: CARMO (2020)

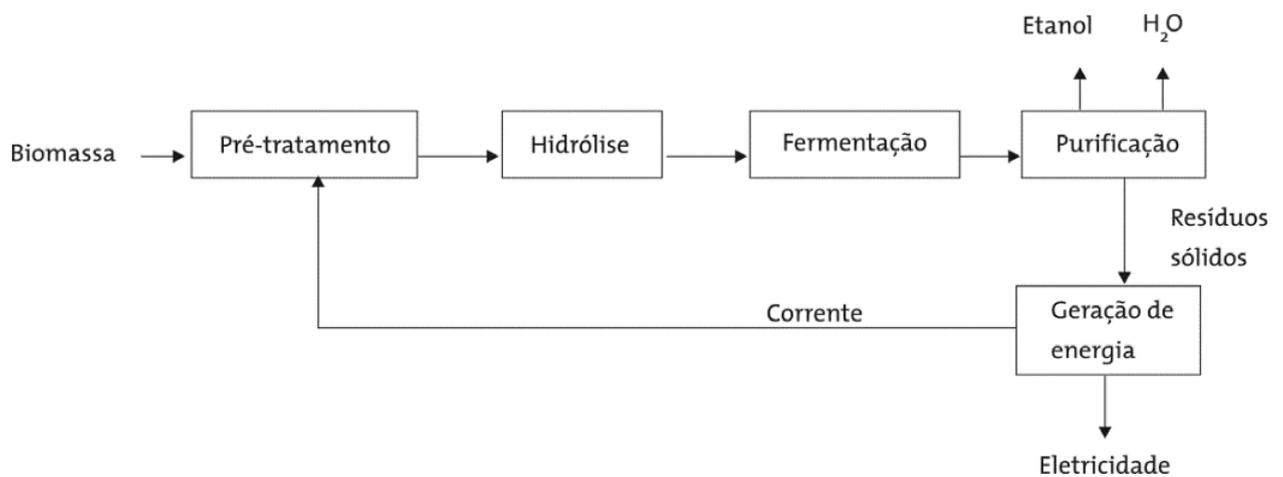


Figura 12 - Representação de uma usina E2G
 Fonte: Rosa e Garcia, 2009

4.5 Tabelas comparativas dos resíduos da biomassa

Serão apresentadas duas tabelas a seguir que demonstram qual seria o volume de etanol (em litros) gerado a partir de diversos tipos de biomassas. A Tabela 5 faz uma análise da produção de etanol a partir da celulose dos resíduos e a Tabela 6 a partir da hemicelulose.

Tabela 5 - Potencial de produção de etanol a partir da celulose

| Biomassa | Teor de Celulose por tonelada de resíduo (%) | Glicose obtida a partir da hidrólise da celulose ¹ (kg) | Etanol obtido a partir da fermentação da glicose ² (kg) | Volume de etanol por tonelada de resíduo ³ (L) | Volume de etanol por hectare de biomassa (L) |
|--------------------------|--|--|--|---|--|
| Palha de Cana-de-açúcar | 44,3 | 354,36 | 162,97 | 206,29 | 2.194,10 |
| Palha de Milho | 36,7 | 293,57 | 135,01 | 170,90 | 503,65 |
| Bagaço de Cana-de-açúcar | 38,8 | 310,37 | 142,74 | 180,68 | 1.921,70 |
| Sabugo de Milho | 35,4 | 283,17 | 130,23 | 164,85 | 124,92 |
| Palha de Trigo | 35,1 | 280,77 | 129,13 | 163,45 | 653,55 |
| Casca de coco | 41,0 | 327,97 | 150,83 | 190,93 | 2.426,20 |

1: 1,111 g/g; assumindo 80% de eficiência no pré- tratamento e 90% de eficiência na hidrólise;
2: $Y_{p/s} = 0,51$ g/g; assumindo 90% de eficiência na fermentação; 3: densidade do etanol 0,79

Fonte: Adaptado de Rocha, Almeida e Cruz (2017).

Tabela 6 - Potencial de produção de etanol a partir da hemicelulose

| Biomassa | Teor de Hemicelulose por tonelada de resíduo (%) | Xilose obtida a partir da hidrólise da hemicelulose ¹ (kg) | Etanol obtido a partir da fermentação da xilose ² (kg) | Volume de etanol por tonelada de resíduo ³ (L) | Volume de etanol por hectare de biomassa (L) |
|--------------------------|--|---|---|---|--|
| Palha de Cana-de-açúcar | 31,1 | 254,37 | 64,99 | 82,27 | 874,99 |
| Palha de Milho | 34,2 | 279,73 | 71,47 | 90,47 | 266,61 |
| Bagaço de Cana-de-açúcar | 29,4 | 240,47 | 61,44 | 77,77 | 827,16 |
| Sabugo de Milho | 26,9 | 220,02 | 56,22 | 71,16 | 53,92 |
| Palha de Trigo | 19,8 | 161,95 | 41,38 | 52,38 | 209,42 |
| Casca de coco | 21,5 | 175,85 | 44,93 | 56,87 | 722,73 |

1: 1,136 g/g; assumindo 80% de eficiência no pré-tratamento e 90% de eficiência na hidrólise;
 2: $Y_{p/s} = 0,51$ g/g; assumindo 50% de eficiência na fermentação; 3: densidade do etanol 0,79

Fonte: Adaptado de Rocha, Almeida e Cruz (2017).

A partir das Tabelas 5 e 6 é possível inferir que o Brasil ainda tem um grande potencial produtivo não realizado. A utilização desta biomassa resultante da indústria sucroalcooleira iria acrescentar valores relevantes ao montante de produção final. Além de que ao dominar tais processos produtivos, futuramente outras biomassas poderão ser utilizadas como matéria-prima do processo, diversificando ainda mais a matriz energética do país e diminuindo sua dependência de uma única fonte.

5 CONCLUSÕES

A busca crescente por energias renováveis acarreta uma constante evolução no setor. Pouco se falava décadas atrás sobre energia solar, eólica e de biomassa, mas estes recursos vêm ganhando cada vez mais espaço uma vez que as tecnologias vêm se desenvolvendo e as energias fósseis começam a ser substituídas.

Mesmo com o custo ainda superior do Etanol de Segunda Geração em relação ao de Primeira Geração, o Brasil tem um cenário muito favorável para se tornar um dos maiores líderes de produção do E2G.

É conhecido que a maior parte do bagaço resultante da produção das indústrias sucroalcooleiras é direcionado para a produção de energia elétrica, entretanto grande parte do palhiço ainda fica presente no solo, e este como discutido no trabalho, tem um estrutura química muito interessante, com teores de celulose e hemicelulose superiores ao do próprio bagaço. Logo, o palhiço torna-se uma matéria-prima muito mais completa para se trabalhar tanto na queima para efetuar a cogeração, quanto na produção do E2G.

Um dos maiores problemas destacados nas literaturas estudadas foi justamente como direcionar este resíduo da fase agrícola para a fase industrial da indústria. Alguns custos como o de maquinário, transporte e mão de obra irão aumentar. Entretanto, o potencial retorno é bem relevante, podendo produzir cerca de mais 10 bilhões de litros de etanol com apenas o que é deixado hoje no solo, cerca de 98 milhões de toneladas de palhiço. Outro problema seria o preço maior da produção do E2G atualmente, mas a longo prazo seu custo deve ficar menor que a própria produção do E1G.

A possibilidade de aumentar consideravelmente a produção utilizando o mesmo espaço é muito bem-visto pelas empresas, visto que desenvolvendo a tecnologia necessária para tal, o processo na totalidade tende a ficar mais barato. Diante de tudo que foi apresentado, a produção do E2G através da utilização dos resquícios da indústria sucroalcooleira (foco na cana-de-açúcar como matéria-prima), com enfoque no palhiço, é, sim, vantajosa a médio e longo prazo e pode alavancar as receitas das empresas do setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C. M. **Hidrólise Enzimática De Resíduos Lignocelulósicos Utilizando Celulases Produzidas Pelo Fungo *Aspergillus Niger***. Toledo: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2010. Dissertação (Mestrado).

ALMEIDA, I. C. **Estudos sobre o uso do arroz BRS AG para a produção de etanol**. 2017. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

ALVES, J. M. B.; MACRI, R. de C. V. **Etanol de segunda geração: estudo de materiais lignocelulósicos e aplicações da lignina**. *Ciência & Tecnologia*, [S. l.], v. 5, n. 1, 2013. Disponível em: <https://citec.fatecjaboticabal.edu.br/index.php/citec/article/view/54>. Acesso em: 7 dez. 2022.

ANDRADE, G.C. **Avaliação do cenário do etanol celulósico no brasil: desafios e soluções para inserção na matriz energética brasileira**. 2019. Dissertação (Bacharel) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2019.

ANEEL. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

BACCARIN, José Giacomo & CASTILHO, Raphael de Campos. **A geração de energia como opção de diversificação produtiva da agroindústria canavieira**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4, 2002, Campinas. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000100004&lng=en&nrm=abn. Acessado em: 31 out. 2022.

BARBELI, MARCELO CARLOS (2015). **A cogeração de energia e sua importância do ponto de vista técnico, econômico e ambiental** (Dissertação de Graduação). Faculdade de Tecnologia, Ciências e Educação – FATECE.

BARJA, Gabriel de Jesus Azevedo. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Mecânicas)-Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BHOWMICK G, SARMAH AK, SEN R. **Lignocellulosic biorefinery as a model for sustainable development of biofuels and value added products**. *Bioresour Technol*. 2018.

CHIERICATO, Thiago. **Sistemas de Cogeração**. 2010. Monografia (Curso de Curso de Gestão do Setor Sucroalcooleiro) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Disponível em: <http://www.etanol.ufscar.br/trabalhos-mta/sertaozinho-i-c/trabalhos/monografia-thiago-chiericato.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2022.

CHINELATO, G. **Como plantar cana-de-açúcar para altas produtividades**. Disponível em: <<https://blog.aegro.com.br/como-plantar-cana-de-acucar/#:~:text=A%20planta%20ent%C3%A3o%20vegeta%20nos>>. Acesso em: 7 dez. 2022.

Companhia Nacional de Abastecimento [CONAB]. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, v.9, n.2, agosto 2022. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 13 out. 2022.

CORRÊA NETO, V; RAMON, D. **Análise de Opções Tecnológicas para Projetos de Co-geração no Setor Sucroalcooleiro**. Setap. Brasília, 2002.

COUGHLAN, M. P. ,ed. **CeUulase: production, properties and applications**. Galway, Society Host

Colloquium, 1985. p.411-14.

DIAS, Heitor. **Avaliação Da Produção De Biogás A Partir Da Digestão Anaeróbia De Hidrolisado Hemicelulósico Gerado Pelo Pré-Tratamento Por Auto-Hidrólise Do Bagaço De Malte**. 2017. Monografia (Curso de Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2017. Disponível em:

<https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1088/1/MONOGRAFIA_Avalia%20a%20o%20Produ%20o%20Biog%20a%20s.pdf>. Acesso em 19 de out. 2022.

EMBRAPA. **Álcool**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacaotecnologica/tematicas/agroenergia/alcool#:~:text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20mundial%20de%20etanol>>. Acesso em: 7 dez. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE]. **Matriz energética**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 7 jun. 2022.

FAIRBANKS, M. **Demanda internacional fica aquém do previsto e preços despencam**. Revista Química e derivados .edição nº483. Março de 2009. Disponível em <<http://www.quimica.com.br/revista/qd483/bio/bio03.html>>. Acessado em 25 set. 2022.

FENGEL, D., WEGENER, G. **Wood, chemistry, ultrastructure, reactions**. New York :Waster & Grugter, 1984. 613p.

FERREIRA, V. R. **Hidrólise - Reações Químicas**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/reacoes-quimicas/hidrolise/>>. Acesso em: 30 nov. 2022.

FIORAVANTI, C. **O etanol que mobiliza o mundo**. Política de C & T – FAPESP. Ed. 187. Set. 2011.

HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 1, p. 10–18, jan. 2009.

IBGE: **PIB cresceu 1,2% em 2019, chegando a R\$ 7,389 trilhões**. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-11/ibge-pib-cresceu-12-em-2019-chegando-r-7389-trilhoes>>. Acesso em: 7 jun. 2022.

IEA. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15925#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20o%20maior>>. Acesso em: 7 jun. 2022.

INEE. **Sobre Geração Distribuída e Cogeração**. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_sobre_gd_cg.asp?Cat=gd>. Acesso em: 7 dez. 2022.

INNOCENTE, A.F. **Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar – estudo de caso**. 2011. 111f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2011.

JØRGENSEN, HENNING & KRISTENSEN, JAN & FELBY, CLAUS. (2007). **Enzymatic conversion of lignocellulose into fermentable sugars: Challenges and opportunities**. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*. 1. 119-134. 10.1002/bbb.4.

JORNAL CANA. **Setor sucroenergético representa 2% do PIB brasileiro, afirma diretor do ITC**. Disponível em: <<https://jornalcana.com.br/setor-sucroenergetico-representa-2-do-pib-brasileiro-afirma-diretor-do-itc/>>. Acesso em: 7 jun. 2022.

KHATIWADA, D.; LEDUC, S.; SILVEIRA, S.; MCCALLUM, I. Optimizing ethanol and bioelectricity

production in sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable Energy**, v.85, p.371-386, 2016.

KIELING, D. D. **Enzimas: Aspectos gerais**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos. Florianópolis, 2002. Disponível em: <http://www.enq.ufsc.br/labs/probio/disc_eng_bioq/lista_exerc/enzimas_aspectos_gerais.pdf>. Acessado em 08 out. 2022

KLOCK, U. et al. **Química da madeira** 3^{ed}. Curitiba: 2005. 86p. Apostila.

KUMAR, P., BARRETT, DM, DELWICHE, MJ E STROEVE, P. (2009) **Métodos de pré-tratamento de biomassa lignocelulósica para hidrólise eficiente e produção de biocombustíveis**. Pesquisa Química Industrial e de Engenharia, 48, 3713-3729.

LEAL, M. V. (2010), “Cana-energia”, in L. B. Cortez (org.), **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**, São Paulo, Blucher.

LIMA, A. O. S.; RODRIGUES, A. L. **Sacarificação de resíduos celulósicos com bactérias recombinantes como estratégia para redução do efeito estufa**. Revista de ciências ambientais, v.1 (2), p. 5-18, 2007. Disponível em: <http://www.cca.ufscar.br/lamam/disciplinas_arquivos/res/etanol_celulose_bacteriasrecombinantes.pdf>. Acessado em 19 out. 2022.

LOBO, Camila da Silva. **A Importância da Cogeração Utilizando Bagaço de Cana-de-Açúcar como Forma de Diversificação da Matriz Elétrica**. 2013. Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007284.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2022.

LOZANO, M. **Cogeneración: Area de Máquinas y Motores Térmicos**. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, 175p, 1998.

MACEDO, I.C.; LEAL, M.R.L.V.; DA SILVA, J.E.A.R. **Balço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. Secretaria do Meio Ambiente, Governo de São Paulo. 19 pp + anexos. Abril de 2004.

MAGALHÃES, P. G. & BRAUNBECK, O. A. (2010), “Colheita de cana-de-açúcar e palha”, in L. B. Cortez (org.), **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**, São Paulo, Blucher.

MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. A. **Colheita de cana-de-açúcar verde: energia renovável para uma agricultura sustentável**. 2001.

MARTINS, L. F. **Caracterização do complexo celulásico de *Penicillium echinulatum***. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. Dissertação (Mestrado). Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/8807>>. Acessado em 15 ago. 2022.

MENDES, F.M.; VASCONCELOS, M.H.; DIAS, M.O.S.; FERRAZ, A.; MILAGRES, A.M.F.; SANTOS, J.C; CHAGAS. M.; WATANABE, M.D.B., JUNQUEIRA, T.L.; BONOMI, A. Alkaline sulfite pretreatment for integrated first and second generation ethanol production: A Techno-economic assessment of sugarcane hybrids. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p.314-321,2018.

MOHD AZHAR, S.H.; ABDULLA, M.; JAMBO, S.A.; MARBAWI, H.; GANSAU, J.A.; FAIK, A.A.M.; RODRIGUES, K.F. **Yeasts in sustainable bioethanol production: a review**. **Biochemistry and Biophysics Reports**, Sabah, v.10, n.1, p.52-61, jul. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/periodicos/capes.gov.br/science/article/pii/S2405580816302424?via%3DIihub>. Acesso em: 16 jul. 2022.

MONLAU, F., AEMIG, Q., TRABLY, E., HAMELIN, J., STEYER, J.P., CARRERE, H. Specific inhibition of biohydrogen-producing *Clostridium* sp. after dilute-acid pretreatment of sunflower stalks. **International Journal of Hydrogen Energy**. 2013. v 38(28). p 12273-12282. 2013.

MORAIS, P. P., *et al.* Etanol de 2ª Geração: Atual Produção e Perspectivas. **Bioenergia em revista: diálogos**, Tocantins, v. 7, n. 1, p. 45-57, jan. /jun. 2017. Disponível em: <<http://www.fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/view/229>>. Acesso em: 03 jul. 2022.

OJUMU, T. V.; SOLOMON, B. O.; BETIKU, E.; LAYOKUN, S. K.; AMIGUN, B. **Cellulase Production by *Aspergillus flavus* Linn Isolate NSPR 101 fermented in sawdust, bagasse and corncob**. African Journal of Biotechnology, v. 2 (6), p.150–152, 2003. Disponível em: <<http://www.academicjournals.org/AJB/PDF/Pdf2003/JunePDFs2003/Ojumu%20et%20al.pdf>>. Acessado em 15 out. 2022.

OJUMU, T. V.; SOLOMON, B. O.; BETIKU, E.; LAYOKUN, S. K.; AMIGUN, B. **Cellulase production by *Aspergillus flavus* linn isolate NSPR 101 fermented in sawdust, bagasse and corncob**. African Journal of Biotechnology, v. 2, n. 6, p. 150-152, 2003.
Paudel SR, Banjara SP, Choi OK, Park KY, Kim YM, Lee JW. **Pretreatment of agricultural biomass for anaerobic digestion: Current state and challenges**. *Bioresour Technol*. 2017.

PITARELO, A. P. **Avaliação da susceptibilidade do bagaço e da palha de cana-de-açúcar à bioconversão via pré-tratamento a vapor e hidrólise enzimática**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. Dissertação (Mestrado). Disponível em: <http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/1884/15870/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Ana%20Paula%20Pitarelo_UFPR%202007.pdf>. Acessado em 22 ago. 2022.

PROPEQ. **Entenda como lidar com os resíduos da indústria sucroalcooleira**. Disponível em: <<https://propeq.com/residuos-industria-sucroalcooleira/#:~:text=aproveitamento%20dos%20compostos,->>>. Acesso em: 7 dez. 2022.

RABELO, S. C. **Avaliação de desempenho do pré-tratamento com peróxido de hidrogênio alcalino para a hidrólise enzimática de bagaço de cana-de-açúcar**. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2007. Dissertação (Mestrado). Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000418358>> Acessado em 15 out. 2022.

RABELO, S. C. **Avaliação e Otimização de pré-tratamento e hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar para a Produção de Etanol de Segunda Geração** – Campinas, SP, 2010.

ROCHA, R. L.; PANDOLFI, M. A. C. GERAÇÃO DE RESÍDUOS NO SETOR SUCROALCOOLEIRO. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 384–392, 30 out. 2022.

RODRIGUES, A. M.; REBELATO, M. G.; PAIXÃO, R. B. S.; ZEVIANI, C. H. **Gestão Ambiental no Setor Sucroenergético: uma análise comparativa**. Revista Produção Online, v. 14, n. 4, p. 1481-1510, 2014.

RUEGGER, M. J. S.; TAUKE-TORNISIELO, S. M. **Atividade da celulase de fungos isolados do solo da Estação Ecológica de Juréia-Itatins, São Paulo, Brasil**. Revista Brasileira de Botânica, vol.27, n.2. São Paulo, 2004. Disponível em: <http://200.189.113.123/diaadia/diaadia/arquivos/File/conteudo/veiculos_de_comunicacao/RBB/VOL27N2/V27N2A01.PDF> . Acessado em 21 out. 2022.

SAAD, A. L. M. **AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA UMIDADE EM PILHAS DE FARDOS DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2019. Dissertação (Mestrado).

SALIBA, E. DE O. S. et al. Ligninas: métodos de obtenção e caracterização química. **Ciência Rural**, v. 31, n. 5, p. 917–928, out. 2001.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES V. M.; REZENDE, S. T. **Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol**. *Química Nova*, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SAVAGE, D. **LignoBoost: lignin from pulp mill black liquor**. *Results Pulp and Paper*, n. 3, p.22-23, 2009.

SHULER, M. L.; KARGI, F. **Bioprocess Engineering – Basic Concepts**. Prentice Hall Int. Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences. New Jersey, 1992.

SOUZA, Z.J. **Bioeletricidade: O que falta para esta alternativa energética deslançar**.2012. Disponível em:<<http://www.unica.com.br/colunas/470156692036979688/bioeletricidadepor-cento3A-0-que-falta-para-esta-alternativa/>>. Acessado em: 01 de jul. 2022.

SOUZA, Z; AZEVEDO, P. **Energia Elétrica Excedente no Setor Sucroalcooleiro: um estudo a partir de usinas paulistas**. *Revista de Economia e Sociologia Rural*. BrasíliaDF, 2006.

TAHERZADEH, M.; KARIMI, K. Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 9, n. 9, p. 1621–1651, 1 set. 2008.

TROMBETA, N. de C.; CAIXETA FILHO, J.V. Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil: indicadores agroindustriais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.55, p.479-496, 2017.

ÚNICA. **Cana gerou 79% da bioeletricidade ofertada à rede**. Disponível em: <<https://unica.com.br/noticias/setor-sucroenergetico-gerou-79-da-bioeletricidade-ofertada-a-rede/>>. Acesso em: 7 dez. 2022.

ZABED,H.;SAHU,J. N.;SUELY,A.;BOYCE,A. N.;FARUQ,G. **Bioethanol production from renewable sources: current perspectives and technological progress**.*Renewable & Sustainable Energy Reviews*,Kuala Lumpur,v. 71,n. 1,p. 475-501, maio 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.076>.Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez6.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1364032116311339?via%3Dihub>. Acesso em: 21 jul. 2022.

ZANETONI, C. et al. **Avaliação da produção de etanol de segunda geração**. Universidade Federal de Uberlândia faculdade de engenharia química curso de graduação em engenharia química. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/24268/1/Avalia%C3%A7%C3%A3oProdu%C3%A7%C3%A3oEtanol.pdf>>. Acessado em 07 de dez. 2022.

ZANICHELLI, Alan Spósito. **Estimativa do Potencial de Acréscimo da Oferta de Energia no Setor Sucroalcooleiro Paulista a Partir de Cogeração e Gaseificação do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Utilização de Ciclo Combinado**. 2015. Monografia (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/139128/000865316.pdf?sequence=1>. Acesso em: 16 nov. 2022.

ZHANG, P.; HIMMEL, M. E.; MIELENZ, J. R. **Outlook for cellulase improvement: Screening and selection strategies.** *Biotechnology Advances*. v. 24, p. 452-481, 2006.

ZHANG, P.; LYND, R. L. **Toward an Aggregated Understanding of Enzymatic Hydrolysis of Cellulose: Noncomplexed Cellulase Systems.** Wiley Periodicals, Inc., 2004.

ZHENG, Y., ZHAO, J., XU, F., & LI, Y. (2014). **Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production.** *Progress in Energy and Combustion Science*, 42, 35-53.