



**MARCELA CAOVILO CARVALHO PINTO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BAGAÇO  
DE MALTE PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL 2G**

**LAVRAS – MG**

**2021**

**MARCELA CAOVILO CARVALHO PINTO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BAGAÇO DE MALTE PARA A  
PRODUÇÃO DE ETANOL 2G**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Luciano Jacob Corrêa

Orientador

**LAVRAS -MG**

**2021**

**MARCELA CAOVILO CARVALHO PINTO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BAGAÇO DE MALTE PARA A  
PRODUÇÃO DE ETANOL 2G**

**ANALYSIS OF THE ENERGETIC POTENTIAL OF MALT BAGASS FOR THE  
PRODUCTION OF 2G ETHANOL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 17 de novembro de 2021.

Dr. João Moreira Neto - UFLA

Dr. Tiago José Pires de Oliveira – UFLA

Prof. Dr. Luciano Jacob Corrêa

Orientador

**LAVRAS - MG**

**2021**

## AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho marca o fim de um ciclo onde fui muito feliz, cresci e aprendi muito. Agradeço a Deus por me guiar durante todo o caminho e por ter colocado tantas pessoas incríveis nele.

Aos meus pais, Marcelo e Marilane, por sempre acreditarem em mim e por nunca colocarem limites no tamanho dos meus sonhos, principalmente quando eu resolvi cursar engenharia química. A presença contínua de vocês na minha vida e o incentivo para que eu fosse independente e dedicada foram fundamentais durante toda a minha vida! Amo vocês!

À minha avó, Elisabeth, que sempre foi meu maior modelo e referência de inteligência e cultura. Minha graduação em uma universidade pública e renomada vem do seu exemplo e de seus ensinamentos. Obrigada!

A toda a minha família pelo apoio, incentivo e participação em todos os momentos da minha vida, e por me darem forças para não desistir nos momentos mais difíceis.

Aos amigos que fiz durante a graduação, principalmente à Jordana e ao Cristiano, que compartilharam comigo as ansiedades e inseguranças durante o período de produção dos trabalhos de conclusão de curso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Jacob Corrêa, por todo o conhecimento compartilhado comigo, pela paciência, dedicação e por todo o incentivo durante a realização deste trabalho. Você é um exemplo de profissional, muito obrigada!

À Universidade Federal de Lavras por proporcionar a realização deste sonho e por fornecer toda a estrutura para tal. Eu não poderia ter sido mais feliz em outro lugar!

Aos professores da Engenharia Química, principalmente àqueles que se tornaram amigos muito queridos, obrigada por, além de conhecimento, compartilharem experiências, angústias e conquistas. Vocês são sensacionais!

Obrigada por tudo!

*Viver é uma eterna despedida  
Entre o que somos agora  
E o que vamos ser em seguida.*  
(Lucão)

## RESUMO

As elevações no preço do petróleo e a produção de carros flex fuel, alinhados à expansão no setor sucroenergético e à busca por soluções que reduzam o impacto ambiental e a emissão de gases do efeito estufa, impulsionaram o consumo de etanol no século XXI. Com o aumento do consumo, surge o interesse em novas rotas tecnológicas e métodos alternativos de produção, como a produção do etanol de segunda geração (2G), produzido a partir de biomassas vegetais. Um outro mercado que apresenta destaque nacional, sendo responsável por 1,6% do PIB brasileiro, é o de produção de cerveja, cujo principal resíduo é o bagaço de malte, matéria-prima com composição que propicia a realização de hidrólise enzimática e a obtenção de açúcares que podem ser convertidos a etanol através da fermentação. Este trabalho objetivou a análise do potencial energético desta biomassa na produção de etanol 2G, avaliando a influência da granulometria do bagaço e do tempo de reação na produção de glicose através de hidrólise enzimática, além da análise da quantidade de energia consumida para cada grama de glicose gerada no processo. O bagaço de malte foi previamente seco em estufa a 60°C por 48h e moído em moinho de facas. Realizou-se a análise granulométrica a partir de um conjunto de peneiras de Mesh Tyler 16, 20, 32 e 42. Após, foi realizada a hidrólise enzimática (pH 4,8; 50°C; 48 h) em frascos de Erlenmeyer (volume de meio reacional 50 mL) com uma carga de 5% de bagaço e concentração enzimática de 10 FPU/gbiomassa. Foram retiradas alíquotas do meio reacional nos intervalos de 1, 2, 4, 6, 8, 24, 30 e 48h de reação. Em seguida, as amostras foram centrifugadas e a fase sobrenadante coletada e armazenada em freezer até posterior análise de glicose em espectrofotômetro pelo método de DNS. O diâmetro das partículas na faixa estudada não apresentou influência estatisticamente significativa na produção de glicose. Foram alcançadas concentrações máximas de glicose de 11,00, 9,55 e 12,00 g/L para os meshes 20, 32 e 42, respectivamente. O melhor tempo de hidrólise foi de 8 horas, visto que apresentou a melhor relação entre a quantidade de glicose produzida e a energia gasta, com gastos energéticos de 9,149 kWh/g de glicose para o mesh 20, 9,547 kWh/g de glicose para o mesh 32 e 7,658 kWh/g de glicose para o mesh 42. Os resultados indicam que esta biomassa apresenta um grande potencial energético para a produção de etanol, com rendimentos (g de açúcares produzidos/g de biomassa) em torno de 20%.

Palavras-chave: Hidrólise Enzimática. Consumo Energético. Granulometria. Açúcares redutores. Celulase

## ABSTRACT

The rise in oil prices and the production of flex fuel cars aligned with the expansion in the sugar-energy sector and the search for solutions that reduce the environmental impact and the emission of greenhouse gases boosted the consumption of ethanol in the 21st century. With the increase in consumption, there is an interest in new technological routes and alternative production methods, such as the production of second-generation (2G) ethanol, produced from plant biomass. Another market that presents national importance, accounting 1.6% of the Brazilian GDP, is the production of beer, whose main residue is malt bagasse, a raw material with a composition that allows the realization of enzymatic hydrolysis and the obtaining of sugars that can be converted to ethanol through fermentation. This work aimed to analyze the energy potential of this biomass in the production of 2G ethanol, evaluating the influence of bagasse particle size and reaction time on glucose production through enzymatic hydrolysis, in addition to analyzing the amount of energy consumed for each gram of glucose generated in the process. The malt bagasse was previously dried in an oven at 60°C for 48h and ground in a knife mill. The particle size analysis was carried out using a set of Tyler Mesh sieves 16, 20, 32 and 42. Afterwards, enzymatic hydrolysis was carried out (pH 4.8; 50°C; 48 h) in Erlenmeyer flasks (volume of reaction environment 50 ml) with a load of 5% of bagasse and an enzyme concentration of 10 FPU/g biomass. Aliquots of the reaction environment were removed at intervals of 1, 2, 4, 6, 8, 24, 30 and 48h of reaction. Then, the samples were centrifuged and the supernatant phase collected and stored in a freezer until further glucose analysis in a spectrophotometer using the DNS method. The diameter of the particles in the studied range did not show a statistically significant influence on glucose production. Maximum glucose concentrations of 11.00, 9.55 and 12.00 g/L were reached for meshes 20, 32 and 42, respectively. The best hydrolysis time was 8 hours, as it had the best ratio between the amount of glucose produced and the energy spent, with energy expenditure of 9.149 kWh/g of glucose for mesh 20, 9.547 kWh/g of glucose for the 32 mesh and 7.658 kWh/g glucose for 42 mesh. The results indicate that this biomass has a great energy potential for the production of ethanol, with yields (g of sugar produced/g biomass) around 20%.

Keywords: Enzymatic Hydrolysis. Energy Consumption. Granulometry. Reducing Sugars. Cellulase.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes fontes de biomassa .....	13
Figura 2 – Estrutura molecular da glicose.....	13
Figura 3 – Estrutura molecular da hemicelulose .....	14
Figura 4 – Estrutura molecular da lignina.....	14
Figura 5 – Fluxograma do processo de produção da cerveja .....	15
Figura 6 – Rota geral de produção do etanol de segunda geração .....	18
Figura 7 – Métodos de integração da hidrólise enzimática e da fermentação.....	22
Figura 8 – Amostra do bagaço de malte .....	25
Figura 9 – Moinho de facas.....	26
Figura 10 – Conjunto de peneiras e agitador de peneiras .....	27
Figura 11 – Fração mássica retida nas peneiras de <i>Mesh</i> 20, 32 e 42. ....	28
Figura 12 – Incubadora <i>shaker</i> utilizada.....	29
Figura 13 – Meios reacionais dispostos na incubadora .....	29
Figura 14 – Amostras analisadas pelo método DNS .....	30
Figura 15 – Wattímetro utilizado para aquisição da potência.....	31
Figura 16 – Concentração de glicose em função do tempo de hidrólise para o <i>Mesh</i> 2035	
Figura 17 - Concentração de glicose em função do tempo de hidrólise para o <i>Mesh</i> 3237	
Figura 18 - Concentração de glicose em função do tempo de hidrólise para o <i>Mesh</i> 4239	
Figura 19 – Ajuste logarítmico dos pontos até o tempo de 8 horas.....	40



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do bagaço de malte em porcentagem da massa seca..	17
Tabela 2 – Comparação dos tipos de hidrólise.....	20
Tabela 3 – Análise Granulométrica do Bagaço de Malte .....	33
Tabela 4 – Concentração de glicose por tempo de hidrólise enzimática para o <i>Mesh</i> 20. .....	34
Tabela 5 – Concentração de glicose por tempo de hidrólise enzimática para o <i>Mesh</i> 32 .....	36
Tabela 6 – Concentração de glicose por tempo de hidrólise enzimática para o <i>Mesh</i> 42 .....	38
Tabela 7 – Ajuste logarítmico e coeficiente de determinação dos perfis de concentração média de glicose até 8 horas de hidrólise enzimática .....	40
Tabela 8 – Voltagem, amperagem e potência da incubadora <i>shaker</i> .....	41
Tabela 9 – Consumo específico de energia médio na produção de glicose .....	42
Tabela 10 – Rendimento percentual (%) da hidrólise do bagaço de malte .....	43

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
2.1 Produção de etanol no Brasil.....	11
2.2 Biomassas .....	12
2.3 Matéria-prima: Bagaço de Malte.....	15
2.3.1 A produção de cerveja no Brasil.....	15
2.3.2 Bagaço de malte: Composição e principais usos .....	16
2.4 Etanol de segunda geração.....	17
2.4.1 Pré-tratamento.....	18
2.4.2 Hidrólise .....	19
2.4.2.1 Hidrólise ácida .....	20
2.4.2.2 Hidrólise Enzimática .....	21
2.4.3 Fermentação.....	23
2.4.4 Purificação .....	23
2.5 Consumo específico de energia.....	23
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
3.1 Material.....	25
3.2 Determinação da Umidade e Secagem do Material .....	25
3.3 Pré-tratamento físico do bagaço de malte.....	25
3.4 Análise granulométrica .....	26
3.5 Hidrólise Enzimática .....	27
3.6 Determinação da Concentração de Glicose .....	30
3.7 Análises Estatísticas .....	31
3.8 Cálculo do Consumo Específico de Energia.....	31
3.9 Cálculo do Rendimento de Açúcares Redutores.....	32
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>33</b>
4.1 Determinação da umidade.....	33
4.2 Análise Granulométrica .....	33
4.3 Determinação da Concentração de Glicose .....	34
4.4 Ajuste matemático dos dados.....	40
4.5 Cálculo do Consumo Específico de Energia.....	41
4.6 Rendimento da hidrólise .....	42
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>45</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O século XXI vem sendo marcado pela expansão do setor sucroenergético, principalmente no que tange à produção de etanol. A elevação do preço do petróleo e a produção de carros *flex fuel* no início do século, junto à elevação gradativa do teor de etanol anidro à gasolina, impulsionaram o consumo interno do produto, que conta hoje com a vantagem de emitir uma quantidade significativamente inferior de gases do efeito estufa quando comparado à gasolina (BUNDE, 2020).

Com o aumento do consumo, surge a necessidade de métodos alternativos e novas rotas tecnológicas visando atingir uma maior produção. Dentre as novas rotas, tem-se a produção de etanol de segunda geração, também conhecido como etanol 2G, produzido a partir de biomassas vegetais, como bagaço e palha de cana-de-açúcar.

Uma matéria-prima promissora para a produção de etanol de segunda geração é o bagaço de malte, principal resíduo gerado na produção cervejeira e frequentemente utilizado para a nutrição animal, onde vem apresentando problemas de contaminação dos animais por fungos e o desenvolvimento de botulismo. Sabe-se que o descarte incorreto e o não aproveitamento de resíduos como subprodutos ocasionam ao processo perdas tanto econômicas como ambientais (KLAGENBOECH; SILVA, 2017; CORDEIRO, 2011; BRUST *et al.*, 2015).

O bagaço de malte é constituído majoritariamente por amido, proteínas e fibras, composição propícia para a realização de hidrólise e para a obtenção de açúcares fermentescíveis que podem ser convertidos a etanol (LUFT, 2016).

O presente trabalho realizou a análise do potencial energético do bagaço de malte para a produção de etanol de segunda geração, avaliando a influência da granulometria do bagaço e do tempo de reação na produção de açúcares através da hidrólise enzimática, e avaliou também a quantidade de energia consumida para cada grama de glicose produzida. Espera-se, desse modo, encontrar as melhores condições físicas e energéticas para a realização da hidrólise enzimática desse material, além de comparar seu potencial para a produção de etanol 2G com biomassas provenientes de outras matérias-primas.

Os próximos capítulos apresentam uma revisão bibliográfica, trazendo um panorama geral da produção de etanol no Brasil, as características e aplicações de diferentes biomassas, o processo de produção cervejeira, com a geração do bagaço de malte e suas principais características, e as tecnologias utilizadas na produção de etanol de segunda geração e na avaliação do consumo energético, além da metodologia utilizada nessa pesquisa e de uma discussão aprofundada a respeito dos resultados obtidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Produção de etanol no Brasil

A cana-de-açúcar é uma matéria-prima importante para a economia brasileira desde 1532, quando o cultivo foi introduzido no país a fim de ocupar e desenvolver as terras portuguesas recém descobertas. A princípio, o produto era o açúcar, produzido principalmente na região nordeste do país (CORTEZ, 2016).

A produção de etanol teve início nos primeiros anos do século XX como alternativa à gasolina importada e para usos farmacêuticos e químicos. Na década de 1930, houve a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool pelo então presidente Getúlio Vargas, e tornou-se obrigatória a adição de 5% de etanol à gasolina importada; estas medidas foram tomadas visando o financiamento de usinas, o aumento da produção do açúcar e do álcool no país e a superação de uma crise no setor açucareiro.

A partir de 1938, com o início da operação da primeira refinaria de petróleo do Brasil, toda gasolina comercializada no país passou a receber a adição de um teor de etanol, que hoje equivale a 27% (SANTOS, 2013; NOVACANA, 2012).

Com o choque do petróleo em 1973 e a oportunidade de reduzir a dependência do petróleo importado, foi criado em 1975 o Programa Brasileiro de Alcool, conhecido por Proálcool, com objetivo de promover diversos estudos e avanços nos processos de fabricação e uso do etanol oriundo tanto da cana-de-açúcar quanto de outras matérias-primas, como a mandioca e o sorgo sacarino. O programa teve fim em 1980, com a transição do regime militar para a Nova República, porém as políticas de apoio e incentivo à produção de cana-de-açúcar e ao uso do álcool combustível foram continuadas (CORTEZ, 2016).

No fim dos anos 2000 houve o desenvolvimento de estudos avançados na área de integração do processo de produção de etanol de primeira geração com rotas bioquímicas e termoquímicas de segunda geração, promovendo o uso integral da cana-de-açúcar, além de uma emissão nula de CO<sub>2</sub> e da utilização de correntes do processo consideradas resíduos. Atualmente, há um interesse crescente nos estudos voltados à redução da emissão de gases de efeito estufa e do impacto do consumo do etanol no aquecimento global (CORTEZ, 2016).

Na safra de 2019/20 a produção brasileira atingiu seu recorde, com 35,6 bilhões de litros de etanol produzidos, dos quais 34 bilhões foram provenientes da cana-de-açúcar, o que coloca o Brasil na posição de maior produtor mundial de etanol de cana-de-açúcar (JACINTHO, 2021). Outra matéria-prima alternativa para produção do etanol que vem se destacando no país é o milho, cuja produção apresentou, segundo a Companhia Nacional de

Abastecimento (2021), um crescimento expressivo de 80,35% na safra de 2020/21 em comparação à safra anterior, atingindo uma produção total de 3,02 bilhões de litros.

O principal uso do etanol é como combustível substituto à gasolina, tendo como vantagem uma emissão de CO<sub>2</sub> aproximadamente 73% inferior (GLOBO RURAL, 2010). Outro mercado que tem se mostrado promissor para o etanol é o de biocombustíveis para aviação, cujas rotas de produção e matérias-primas ainda estão sendo analisadas. Um possível enfoque em materiais celulósicos, derivados principalmente do bagaço da cana-de-açúcar, acrescentaria um alto valor sustentável ao produto, sem apresentar custos elevados (CORTEZ, 2014).

A produção do etanol de segunda geração é mais uma alternativa aos desafios contemporâneos de redução da dependência do petróleo e de seus derivados e à busca de fontes energéticas renováveis.

Além de proporcionar um aumento na produção de energia e no volume de etanol para uma mesma quantidade de material e área plantada, a produção de etanol de segunda geração também impactará no desenvolvimento do mercado de polímeros verdes, que possuem alto valor agregado, grande potencial comercial, e, ao contrário dos demais polímeros derivados do petróleo, são produzidos a partir do etanol, portanto atuam na captura de CO<sub>2</sub> contribuindo para a redução da emissão de gases do efeito estufa (LORENZI; ANDRADE, 2019; BRASKEM, 2021).

## **2.2 Biomassas**

É considerado biomassa todo material orgânico, renovável e não fóssil que possua energia química em sua estrutura, podendo ser tanto de origem animal quanto vegetal. Com a vantagem de absorver dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante o ciclo de vida das plantas e a capacidade de transformação em diferentes formas de energia, esta matéria-prima vem atraindo a atenção e o interesse mundial (BRASIL *et al.*, 2021).

A Figura 1 apresenta os principais tipos de biomassa utilizados para a geração de energia.

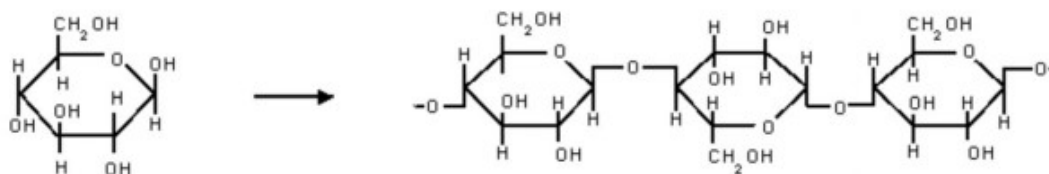
Figura 1 – Diferentes fontes de biomassa



Fonte: BRASIL *et al.* (2021)

A biomassa é composta majoritariamente por três polímeros – celulose, hemicelulose e lignina - cujas quantidades variam de acordo com o tipo do material. A Figura 2 apresenta a estrutura molecular da celulose, que é composta por um só monômero, a glicose. (ROSA; GARCIA, 2009).

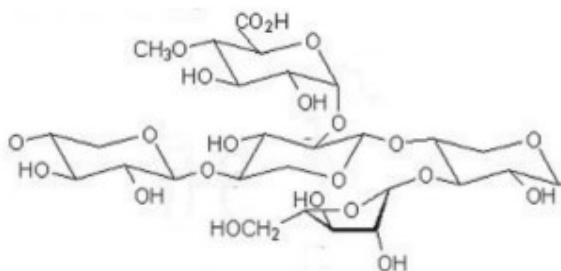
Figura 2 – Estrutura molecular da glicose



Fonte: ROSA; GARCIA (2009)

A hemicelulose, cuja estrutura é apresentada na Figura 3, é formada por cadeias ramificadas de diferentes tipos de açúcares, como arabinose e galactose.

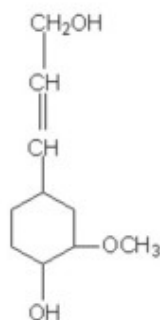
Figura 3 – Estrutura molecular da hemicelulose



Fonte: ROSA; GARCIA (2009)

Já a lignina possui uma estrutura de grandes dimensões e ainda mais complexa que as demais, e é apresentada na Figura 4

Figura 4 – Estrutura molecular da lignina



Fonte: ROSA; GARCIA (2009)

A estrutura da biomassa consiste em longas cadeias de celulose unidas entre si por ligações de hidrogênio e recobertas por camadas de hemicelulose e lignina. Estas camadas têm por finalidade proteger a estrutura celulósica da ação de agentes externos, o que dificulta o processo de obtenção de etanol a partir da biomassa, tornando necessária a remoção ou modificação dessas camadas através de pré-tratamentos (OGEDA; PETRI, 2010; ROSA; GARCIA, 2009).

A conversão da biomassa em etanol pode acontecer tanto através da hidrólise seguida da fermentação quanto por processos termoquímicos. Na hidrólise, a celulose e a hemicelulose são transformadas em açúcares, que posteriormente serão fermentados para a geração do etanol (HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAALJ, 2005).

## 2.3 Matéria-prima: Bagaço de Malte

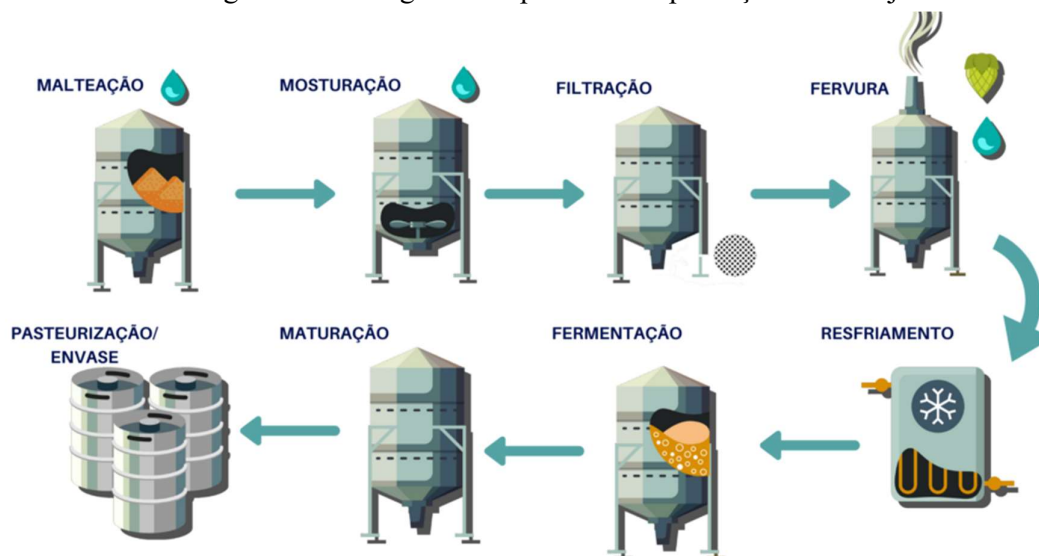
### 2.3.1 A produção de cerveja no Brasil

A indústria cervejeira possui um importante papel na economia brasileira, sendo responsável por 1,6% do PIB e colocando o país na terceira posição mundial no mercado da cerveja. Em constante expansão, o ramo apresentou em 2020 um crescimento de 14,4% no número de cervejarias no país, que estão presentes em todos os estados da federação (MAPA, 2021).

Os ingredientes essenciais para a produção da cerveja são água, malte, lúpulo e levedura, sendo o malte o principal, visto que é a fonte de açúcares fermentescíveis utilizados na fermentação alcoólica, além de interferir diretamente nas características sensoriais da cerveja, como coloração e aroma (PORTO, 2011).

O processo produtivo da cerveja, representado no fluxograma da Figura 5, varia de acordo com o tipo de cerveja a ser produzida, no entanto, independentemente do tipo, possui quatro etapas características, que são a malteação, a produção do mosto cervejeiro, a fermentação e o processamento final (REBELLO, 2009).

Figura 5 – Fluxograma do processo de produção da cerveja



Fonte: MICROAMBIENTAL (2021)

Na malteação, os grãos de cereais, geralmente da cevada, são submetidos a um processo controlado de germinação, que tem o intuito de desenvolver enzimas que são essenciais ao processo produtivo da cerveja e de modificar o amido presente nesse material, tornando-o mais solúvel e menos duro. A germinação é cessada através da secagem dos grãos



em temperaturas controladas, com objetivo de reduzir a umidade sem inativar as enzimas. O produto final é o grão germinado, conhecido como malte e utilizado como ingrediente na produção da cerveja (D. JUNIOR; VIEIRA; FERREIRA, 2009).

A produção do mosto cervejeiro abrange a mosturação, a filtração, a fervura e o resfriamento. O malte é misturado à água em temperatura controlada com objetivo de promover a hidrólise do amido presente, transformando-o em açúcares fermentescíveis como maltose, glicose e maltotriose. Finalizada a mosturação é realizada a separação das fases sólida e líquida através da filtração, que tem como produto o extrato aquoso, chamado de mosto. A fase sólida gerada é o bagaço de malte, material equivalente a 85% dos resíduos gerados durante a produção (LUFT, 2016; VENTURINI FILHO, 2018).

Após a filtração, há a adição do lúpulo ao mosto seguida pela fervura da mistura, visando a inativação das enzimas e a esterilização do mosto; é também nesse momento que ocorre a extração de compostos amargos e aromáticos do lúpulo e a formação de substâncias responsáveis pelo aroma e sabor da cerveja, além da remoção de compostos voláteis indesejados através da evaporação (LUFT, 2016; VENTURINI FILHO, 2018).

O mosto é então resfriado e segue para a etapa de fermentação, onde leveduras consomem os açúcares presentes no mosto, fermentando-os em etanol e gás carbônico. Após a fermentação principal tem-se a etapa de maturação, onde ocorre uma fermentação secundária a baixas temperaturas, em torno de 3°C, e por um período de 7 dias, com o intuito de contribuir na clarificação e carbonatação da cerveja e na melhoria de seu sabor (LUFT, 2016).

O processamento final consiste em operações para remoção do material insolúvel presente na cerveja e para aumento da vida de prateleira, como a pasteurização, além do processo de envase do produto (VENTURINI FILHO, 2018).

### 2.3.2 Bagaço de malte: Composição e principais usos

Também conhecido por resíduo úmido de cervejaria (RUC), o bagaço de malte é o principal resíduo gerado na produção cervejeira, sendo que para cada 100 litros de cerveja são produzidos aproximadamente 20 kg de bagaço de malte (LUFT, 2016).

A composição química do bagaço de malte é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do bagaço de malte em porcentagem da massa seca

<b>Componente</b>	<b>Teor (%)</b>
Celulose	15,99 ± 0,88
Hemicelulose	29,92 ± 1,60
Lignina	20,80 ± 0,42
Proteínas	21,16 ± 0,61
Extrativos	8,33 ± 0,76
Cinzas	3,76 ± 0,05

Fonte: MASSARDI, MASSINI; SILVA (2020) adaptado

Apresentando uma umidade elevada, entre 75 e 80%, e sendo composto predominantemente por fibras e proteínas, além de conter lipídeos, minerais, vitaminas, aminoácidos e compostos fenólicos, o bagaço de malte é altamente suscetível à degradação e deterioração microbiana, tendo a secagem como principal alternativa para a sua preservação (LUFT, 2016).

Por se tratar de um material com alto valor nutricional, com baixo custo de transporte, preços competitivos e disponibilidade praticamente constante durante todo o ano, o bagaço de malte é comumente utilizado na nutrição animal, principalmente de bovinos. Apesar das diversas vantagens, o consumo desse material tem sido responsável por quadros de botulismo e por contaminações dos animais por fungos, ocasionando problemas para os produtores rurais (BRUST *et al.*, 2015).

Outros possíveis usos para o bagaço de malte, segundo Massardi, Massini e Silva (2020), “são para a produção de etanol de segunda geração; de biocarvões e de ácidos orgânicos por carbonização hidrotérmica; de 5-hidroximetilfurfural (HMF); de ácido lático e, ainda, de suplementos que podem ser utilizados na nutrição humana”.

#### **2.4 Etanol de segunda geração**

Segundo Lorenzi (2018), o Brasil ocupa a quarta posição mundial em capacidade instalada para a produção do etanol de segunda geração, com expectativas de desenvolvimento, visto que o grupo Cosan S.A., detentor da empresa integrada de energia Raízen, pretende construir três novas usinas de etanol celulósico (UNIÃO NACIONAL DA BIOENERGIA, 2021).

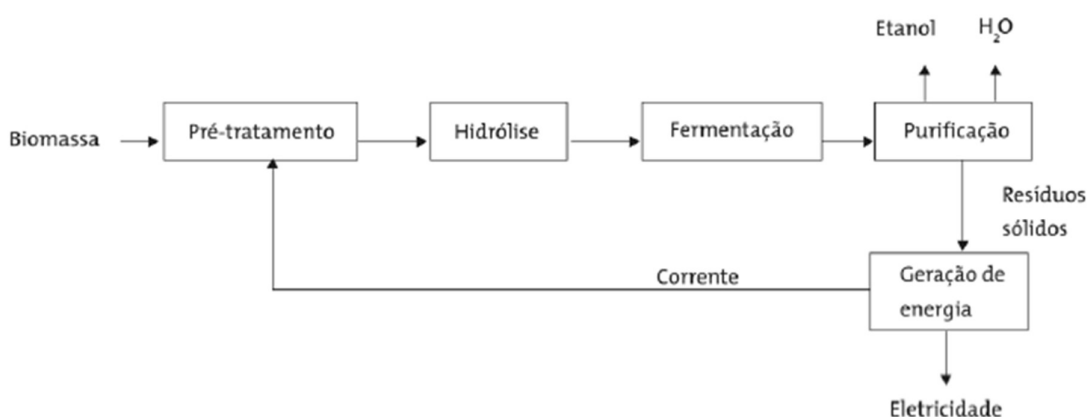
Com contratos para venda de 460 milhões de litros de etanol de segunda geração nos próximos nove anos, a empresa, que já possui uma usina de etanol celulósico com capacidade de produção de até 42 milhões de litros do biocombustível na cidade de Piracicaba (SP),

anunciou a construção de uma segunda unidade na cidade de Guariba (SP), com capacidade de até 82 milhões de litros por ano (BOSSLE, 2021).

Com a expansão do mercado, surge a necessidade de novos estudos para obtenção de rotas alternativas e otimizadas de produção do etanol de segunda geração, visando alcançar um volume de produção ainda maior e um melhor aproveitamento das inúmeras matérias-primas disponíveis.

A principal rota tecnológica utilizada para a produção do etanol de segunda geração é apresentada na Figura 6, e consiste nas etapas de pré-tratamento, hidrólise, fermentação e purificação (HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005).

Figura 6 – Rota geral de produção do etanol de segunda geração



Fonte: HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, (2005 apud ROSA; GARCIA, 2009)

#### 2.4.1 Pré-tratamento

Com a finalidade de facilitar o acesso das enzimas e ácidos à celulose e à hemicelulose, a etapa de pré-tratamento é fundamental para as operações seguintes. Ela consiste em processos físicos, químicos e/ou biológicos, que são definidos de acordo com o tipo da biomassa utilizada, visando a obtenção de uma maior quantidade de açúcar e menor degradação do substrato (HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005).

O pré-tratamento físico é um dos mais simples, porém um dos que demanda mais energia; ocorre através da moagem do material, no intuito de reduzir o tamanho das partículas ocasionando uma maior área superficial e maior porosidade do material, podendo também reduzir o grau de polimerização e a cristalinidade da celulose (OGEDA; PETRI, 2010; HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005).

As principais tecnologias de pré-tratamento encontram-se nos métodos químicos, que podem ser ácidos, alcalinos ou oxidativos. Ocasionalmente ocasionando modificações estruturais e químicas

da parede celular do material, esse tipo de pré-tratamento busca a remoção da lignina e da hemicelulose (OGEDA; PETRI, 2010; ROCHA, 2017).

O pré-tratamento biológico envolve o uso de fungos e bactérias capazes de secretar enzimas extracelulares que auxiliam na remoção de uma quantidade significativa de lignina. Atualmente temos o chamado bioprocessamento consolidado, tecnologia na qual o microrganismo responsável pela fermentação também atua no pré-tratamento com a secreção de enzimas (OGEDA; PETRI, 2010).

Há também os pré-tratamentos combinados, que envolvem mais de uma tecnologia, afetando tanto as propriedades físicas como as químicas da biomassa; temos como exemplo os pré-tratamentos hidrotérmico e de explosão à vapor.

O hidrotérmico é considerado ambientalmente amigável, de baixo custo e não apresenta problemas de corrosão; trata-se do uso de água quente e em alta pressão por um determinado período de tempo. A temperatura varia entre 150 e 240°C e a pressão entre 1 e 3,5 MPa, ocasionando a degradação seletiva da hemicelulose, sem impactar na lignina e na celulose (ROCHA, 2017).

Já na explosão à vapor, a biomassa é triturada e submetida ao contato com vapor saturado de alta pressão, com a temperatura numa faixa de 190 a 205°C, e a pressão de 13 a 17 kgf, por um período entre 2 e 30 minutos, seguido de uma rápida despressurização, ocasionando a ruptura nas ligações da lignina, da hemicelulose e da celulose (ROCHA, 2017; CORRÊA, 2016).

#### 2.4.2 Hidrólise

A etapa de hidrólise é realizada com a finalidade converter a celulose em moléculas de açúcares por meio da ação de catalisadores químicos ou enzimáticos, conforme a Equação 1. É essencial que, antes da hidrólise, o material seja submetido a pré-tratamentos que aumentem a área superficial e favoreçam a ação dos catalisadores, possibilitando conversões superiores a 90%, enquanto que, sem a etapa de pré-tratamento, as conversões são inferiores a 20% (HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005; OGEDA; PETRI, 2010).



A hidrólise pode ser realizada por rota química, com o uso de ácidos concentrados ou diluídos, e por via enzimática, com o uso de enzimas. São vários os modos de operação, devendo-se considerar o tipo do material utilizado, o microrganismo que será utilizado na fermentação e os custos do processo (OGEDA; PETRI, 2010).

Sabe-se que a hidrólise ácida ocorre mais rapidamente, no entanto a hidrólise enzimática possui uma elevada seletividade e custos reduzidos em termos de equipamentos. Além disso, grande parte dos esforços atuais concentram-se no desenvolvimento de tecnologias para a hidrólise enzimática (ROCHA, 2017; ROSA; GARCIA, 2009).

Deve-se ter em consideração que diversos fatores influenciam no rendimento da hidrólise; uma alta carga de sólidos no processo resultará numa elevada concentração de açúcares, no entanto ocasionará dificuldades nas transferências de calor e massa devido à dificuldade de mistura. Outro ponto é a degradação dos açúcares e a formação de compostos inibidores ou desativadores de enzimas, que resultarão em uma menor conversão (ROCHA, 2017).

A Tabela 2 apresenta uma comparação dos processos de hidrólise que serão descritos individualmente a seguir, bem como suas taxas de conversão de açúcares.

Tabela 2 – Comparação dos tipos de hidrólise

<b>Tipo de hidrólise</b>	<b>Catalisador</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tempo</b>	<b>Conversão em glicose</b>
Ácido diluído	< 1% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	215	3 min	50 a 70%
Ácido concentrado	30 a 70% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	40	2 – 6h	90%
Enzimática	Celulase	70	1,5 dias	75 a 95%

Fonte: HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, (2005)

#### 2.4.2.1 Hidrólise ácida

O uso do ácido diluído para a conversão da celulose é uma tecnologia há muito utilizada; comumente utiliza-se o ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) devido ao seu custo inferior e à redução de problemas de corrosão quando comparado ao ácido clorídrico (HCl). O processo ocorre em altas temperaturas, na faixa entre 180 e 230°C, o que torna necessário um estágio separado para a hidrólise da hemicelulose, visto que seus açúcares são rapidamente degradados em altas temperaturas, podendo posteriormente inibir a fermentação (OGEDA; PETRI, 2010).

Este primeiro estágio ocorre em condições mais brandas, com a concentração de ácido entre 0,7 e 1,2% (m/m) e temperaturas entre 170 e 190°C, visando a recuperação dos açúcares gerados na conversão da hemicelulose (HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005). Os sólidos restantes, com a fração de celulose, são tratados na segunda etapa em condições mais severas de temperatura, mas com a concentração de ácido inferior a 1%. Ambos os

estágios possuem um tempo de residência de aproximadamente 3 minutos (HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005).

A hidrólise com ácido concentrado pode ser aplicada a diversos tipos de biomassa, acontece em temperaturas amenas (em torno de 30°C) e possui uma alta taxa de conversão tanto para a hemicelulose quanto para a celulose, alcançando resultados em torno de 90%, com uma pequena degradação dos açúcares (OGEDA; PETRI, 2010). O ponto crítico desse processo são os custos elevados no uso de uma maior quantidade de ácido, tornando necessários estudos para a recuperação e o reuso desse ácido de uma maneira que seja economicamente viável, além dos problemas ocasionados pela natureza corrosiva desse material (HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005).

#### 2.4.2.2 Hidrólise Enzimática

O catalisador da hidrólise enzimática da celulose são as enzimas denominadas celulase, que são compostas por um complexo enzimático formado por endoglicanases, exoglicanases e  $\beta$ -glicosidases. Essas enzimas podem ser produzidas por fungos e bactérias e possuem uma alta especificidade (ROCHA, 2017).

O processo ocorre em um meio com condições mais brandas, com a temperatura entre 40 e 50°C e pH entre 4,0 e 5,0, e apresenta custos de manutenção inferiores à hidrólise ácida por não apresentar caráter corrosivo (CORRÊA, 2016; HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005). Em relação aos pré-tratamentos, são utilizados métodos que proporcionem a remoção da lignina e a exposição da hemicelulose e da celulose às enzimas. Os pré-tratamentos exclusivamente físicos não são recomendados neste caso (OGEDA; PETRI, 2010; HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005).

A respeito do experimento de hidrólise enzimática, pode-se afirmar que:

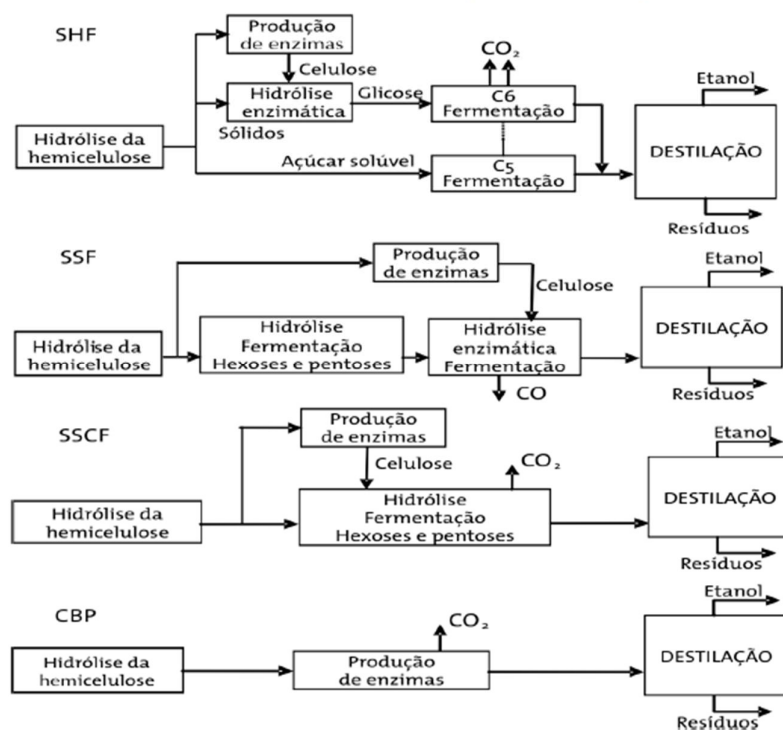
(...) é caracterizado no início por uma fase logarítmica, devido à liberação rápida de açúcares solúveis na reação. Após essa fase, há uma taxa de declínio na produção de açúcares (GREGG e SANDDLER, 1996). Essa queda da produtividade pode estar relacionada com inibição pelo produto, perda da enzima por adsorção à lignina ou inativação da enzima por diversos fatores, tais como desativação térmica e/ou mecânica (GREGG e SANDDLER, 1996 e DASARI e BERSON, 2007). (apud CORRÊA, 2016).

Os diferentes métodos de realização da hidrólise enzimática, integrados com a fermentação, são apresentados na Figura 7. O método SHF, do inglês *Separate Hydrolysis Fermentation*, consiste na fermentação posterior à hidrólise, em reatores diferentes. O obstáculo desse método está no fato de que os produtos da reação enzimática, a glicose e a celobiose, que são inibidores da celulase, permanecem no mesmo meio que as enzimas e que

a celulose, interferindo no rendimento da conversão (ROSA; GARCIA, 2009, OGEDA; PETRI, 2010).

Uma maneira de contornar esse problema está na adição de uma maior quantidade de enzimas, porém isto encareceria o processo. Surge então o método SSF, *Simultaneous Saccharification and Fermentation*, que opera com a hidrólise e a fermentação no mesmo reator. Os açúcares são fermentados a etanol, reduzindo a inibição da enzima e contribuindo também para evitar a proliferação de microrganismos invasivos e, conseqüentemente, a formação de produtos indesejáveis (OGEDA; PETRI, 2010).

Figura 7 – Métodos de integração da hidrólise enzimática e da fermentação



Fonte: HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ (2005) apud ROSA; GARCIA (2009)

Diferentemente dos açúcares redutores da hidrólise da celulose, que são hexoses, os açúcares redutores provenientes da hidrólise da hemicelulose são pentoses, cuja fermentação é mais complexa e ocorre em reatores separados. O método SSCF, *Simultaneous Saccharification and Cofermentation* representa um progresso no SSF, já que nesse método há a oportunidade de cofermentação de ambos os açúcares redutores em um mesmo reator (HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005).

O método mais avançado em termos de integração é o CBP, *consolidated bio processing*, no qual todas as operações biológicas acontecem em um único reator, inclusive a

produção de enzimas, ocasionando uma redução significativa nos custos do processo (HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005).

Quanto ao rendimento da hidrólise enzimática, além dos fatores já citados, tem-se também a influência do tempo de reação, do pH, da agitação do meio e da termoestabilidade das enzimas (CORRÊA, 2016).

#### 2.4.3 Fermentação

A fermentação é uma técnica utilizada desde a antiguidade, inicialmente para a produção de pães e bebidas alcoólicas. Trata-se de um processo anaeróbico de conversão dos açúcares em etanol e gás carbônico por meio da ação de leveduras (LIMA *et al.*, 2001).

Para a conversão da glicose comumente utiliza-se a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, já consolidada na produção industrial do etanol visto que apresenta naturalmente uma maior tolerância a meios com altas concentrações do produto. A reação de conversão da glicose em etanol e gás carbônico é apresentada na Equação 2 (LIMA *et al.*, 2001; ROCHA, 2017).



Um dos maiores desafios da fermentação para produção do etanol de segunda geração está relacionado à conversão dos açúcares resultantes da hidrólise da hemicelulose. Esses açúcares representam uma parcela significativa dos açúcares presentes no meio reacional, o que tem estimulado o desenvolvimento de novas tecnologias na área de engenharia genética para obtenção de bactérias ou leveduras capazes de fermentar ambos os tipos de açúcares (HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005).

#### 2.4.4 Purificação

Após a fermentação, há a necessidade de purificação do etanol contido na corrente, que é composta majoritariamente por etanol e água. Essa purificação ocorre através da destilação, pela volatilidade relativa de cada componente. Findo o processo, tem-se o etanol hidratado, que é utilizado como combustível, numa concentração entre 92,5 e 94,7% em massa (ROCHA, 2017; CORRÊA, 2016).

### 2.5 Consumo específico de energia

O uso racional de recursos como matéria-prima, água e energia tem recebido a cada dia um maior enfoque devido a uma demanda crescente do mercado em contrapartida às fontes limitadas desses insumos. Torna-se constante, portanto, a busca por processos mais



eficientes energeticamente, que possibilitem uma redução no consumo de energia sem afetar a qualidade do produto final (MOREIRA, 2017).

Uma maneira de avaliar a quantidade de energia consumida em um processo é através do indicador de performance SEC, do inglês *Specific Energy Consumption*, que caracteriza o gasto energético em relação à quantidade de produto produzida e é dado em unidade de energia por unidade de massa.

Esse indicador, cujo cálculo é apresentado na Equação 3, é um dos métodos utilizados em *benchmarking* entre indústrias em nível multinacional, regional, de planta ou de processo, sendo frequentemente utilizado em estudos de desenvolvimento de novos processos (LAWRENCE *et al.*, 2019).

$$SEC = \frac{\text{Energia Consumida}}{\text{Quantidade de produto}} \quad (3)$$

As unidades utilizadas são escolhidas arbitrariamente, de acordo com o processo analisado.

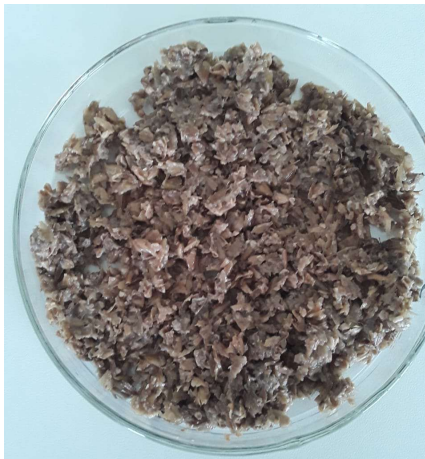
Para calcular a energia consumida pode-se utilizar um wattímetro, instrumento que permite medir a potência elétrica fornecida ou dissipada por um equipamento. O wattímetro implementa o produto das grandezas tensão e corrente elétrica no equipamento em que se deseja conhecer o consumo de potência, com sua ligação ao circuito feita simultaneamente em série e em paralelo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Material

Para a realização deste estudo o bagaço de malte foi fornecido pela empresa Cervejaria do Funil, localizada na cidade de Lavras/MG, e conservado em geladeira. Na Figura 8 tem-se uma amostra do material utilizado.

Figura 8 – Amostra do bagaço de malte



Fonte: Do autor (2021)

#### 3.2 Determinação da Umidade e Secagem do Material

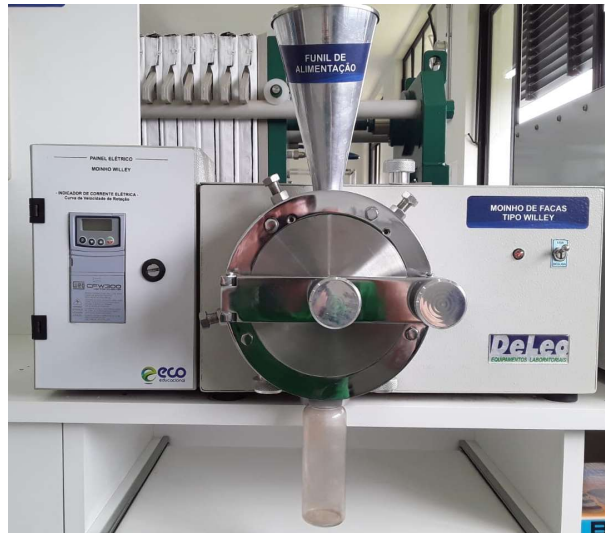
A umidade do material foi medida em dois momentos, antes e após a secagem. Foi utilizada uma balança determinadora de umidade (Marca Weblaborsp, Modelo i-Thermo 163L) com precisão de  $\pm 0,01$  (% umidade). Em ambos os momentos, pesou-se aproximadamente 1 grama de amostra e iniciou-se a medição, onde a biomassa foi seca até que não houvesse mais variação no seu peso.

Para a realização da secagem, uma amostra do material foi disposta em uma bandeja de alumínio e colocada em estufa a 60°C pelo período de 48 horas.

#### 3.3 Pré-tratamento físico do bagaço de malte

Após a secagem do material, a amostra foi moída em um moinho de facas apresentado na Figura 9, do tipo Willey, da marca Eco Educacional, com uma tela de 2 mm de diâmetro.

Figura 9 – Moinho de facas



Fonte: Do autor (2021)

### 3.4 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada para fins comparativos do diâmetro do material. Para tal, peneiras de *Mesh* 16, 20, 32, 42 e um prato de fundo foram pesados individualmente e sobrepostos em ordem crescente de *mesh*, com o prato de Mesh 16 no topo.

Uma amostra de bagaço já seco e moído, com massa média equivalente a  $117,37 \pm 68,53$  g, foi pesada e colocada na peneira superior do conjunto, que em seguida foi agitado em um agitador de peneiras da marca Bertel pelo período de 15 minutos, com o equipamento operando na intensidade 8. O conjunto de peneiras acoplado no agitador é apresentado na Figura 10.

Após a agitação, cada peneira e o prato de fundo foram novamente pesados individualmente, a fim de determinar a massa de bagaço de malte retida em cada um. Todo o procedimento foi realizado em duplicata.

Figura 10 – Conjunto de peneiras e agitador de peneiras



Fonte: Do autor (2021)

Determinou-se o diâmetro médio das partículas amostradas através do método Diâmetro Médio de Sauter, seguindo a metodologia utilizada por Cremasco (2018). A Equação 4 é utilizada para o cálculo, onde  $D_{ps}$  é o Diâmetro Médio de Sauter,  $x_i$  é a fração mássica retida na peneira de índice  $i$  e  $d_i$  é o diâmetro da peneira de índice  $i$ .

$$D_{ps} = \frac{1}{\sum \left( \frac{x_i}{d_i} \right)} \quad (4)$$

### 3.5 Hidrólise Enzimática

As frações mássicas retidas em cada peneira foram reservadas em frascos do tipo béquer, de acordo com o *Mesh*. Para a realização da hidrólise enzimática utilizou-se amostras das frações mássicas retidas nas peneiras de *Mesh* 20, 32 e 42, apresentadas na Figura 11. A fração mássica retida na peneira de *Mesh* 16 não foi utilizada.

Figura 11 – Fração mássica retida nas peneiras de *Mesh* 20, 32 e 42.



Fonte: Do autor (2021)

O complexo enzimático utilizado foi o Cellic CTEC2, doado pela Novozymes Latin America (Araucária – PR). O complexo é composto por uma mistura das enzimas celulasas,  $\beta$ -glucosidades e hemicelulasas, proporcionando uma hidrólise agressiva em uma grande faixa de materiais lignocelulósicos (NOVOZYMES, 2021)

A atividade enzimática do complexo possui valor de 241 FPU/mL, e foi determinada por Corrêa (2016) através da metodologia proposta por Ghose (1987).

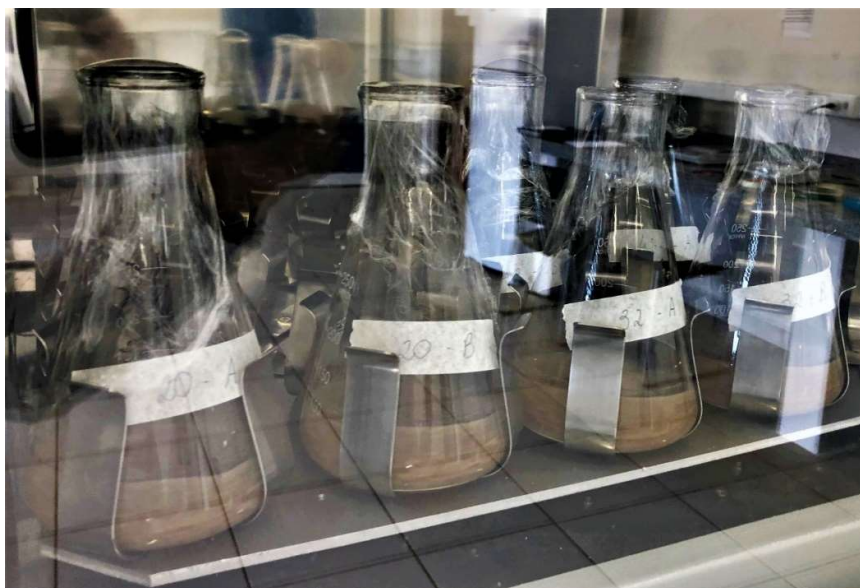
Para a realização da hidrólise, amostras das frações mássicas retidas nas peneiras de *Mesh* 20, 32 e 42 foram adicionadas a um meio reacional de 50 mL em frascos de Erlenmeyer, contendo uma carga de 5% (m/v) em base seca de bagaço de malte, o extrato enzimático na concentração de 10 FPU/g de bagaço de malte e uma solução tampão de citrato de sódio a 50 mM e pH 4,8. Os experimentos foram realizados em duplicatas.

Após, os frascos de Erlenmeyer contendo o meio reacional foram dispostos em uma incubadora *shaker* (Marca Lucadema, modelo LUCA-223), conforme apresentado nas Figuras 12 e 13, onde permaneceram por 48h na temperatura de 50°C, com uma rotação de 150 rpm. Aliquotas foram retiradas de cada um dos meios reacionais nos intervalos de tempo de 1, 2, 4, 6, 8, 24, 30 e 48 horas e colocadas em microtubos.

Figura 12 – Incubadora *shaker* utilizada

Fonte: Do autor (2021)

Figura 13 – Meios reacionais dispostos na incubadora



Fonte: Do autor (2021).

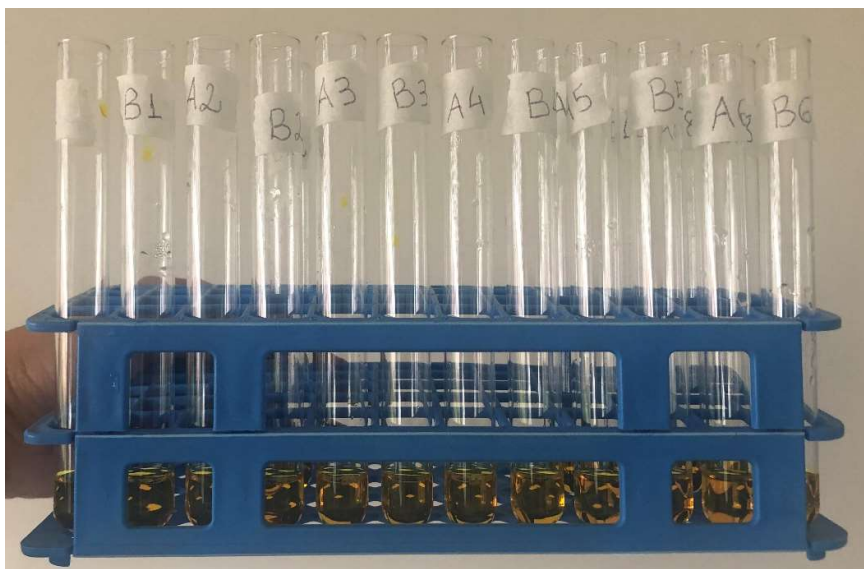
Com auxílio de uma centrífuga (Marca FANEM, Modelo Excelsa i2206), as amostras foram centrifugadas a 3000 rpm pelo período de 5 minutos. Em seguida, o sobrenadante de cada amostra foi coletado, colocado em microtubos e congelado para posterior análise de glicose.

### 3.6 Determinação da Concentração de Glicose

As amostras contidas nos microtubos foram descongeladas e agitadas em um agitador mecânico para homogeneização do material. Foi coletado 0,1 mL de cada amostra e colocado em tubos de ensaio com 0,9 mL de água deionizada. Para o branco, adicionou-se 1 mL de água deionizada no tubo de ensaio.

Para a análise dos açúcares fermentescíveis, utilizou-se o método 3,5-dinitrossalicílico ácido (DNS), descrito por Vasconcelos et al. (2013), com a adição de 1 mL do reagente DNS em cada um dos tubos de ensaio, que foram dispostos em banho maria (Marca Warmnest, Modelo HH-S<sub>18</sub>) a 100°C pelo período de 5 minutos. A Figura 14 apresenta as amostras em tubos de ensaio após o banho maria.

Figura 14 – Amostras analisadas pelo método DNS



Fonte: Do autor (2021).

Posteriormente, adicionou-se 10 mL de água deionizada para a diluição da amostra, e as amostras foram analisadas em espectrofotômetro (Marca BEL Photonics, Modelo V-M5) com comprimento de onda de 540 nm.

A conversão dos valores de absorbância para concentração de glicose foi realizada seguindo a curva-padrão representada pela Equação 5, onde  $y$  é a concentração de glicose, em g/L, e  $x$  é o valor da absorbância fornecida pelo espectrofotômetro.

$$y = 1,8443x - 0,1106 \quad (5)$$

A concentração de glicose obtida através da Equação 5 foi multiplicada por 10, valor equivalente à diluição utilizada.

### 3.7 Análises Estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas no software SISVAR através do teste de análise de variância de Scott e Knott (1974), com significância de 5%. O teste compara as médias de modo que se estas forem estatisticamente iguais serão representadas pela mesma letra no resultado, e caso contrário serão representadas por letras diferentes.

### 3.8 Cálculo do Consumo Específico de Energia

Para a realização do cálculo do consumo específico de energia, utilizou-se um wattímetro (Marca Minipa, Modelo ET-4080), apresentado na Figura 15, para a aquisição dos dados de potência fornecida pela incubadora *shaker*.

Figura 15 – Wattímetro utilizado para aquisição da potência



Fonte: Do autor (2021)

Para o cálculo do indicador do consumo específico de energia, considerou-se a potência obtida pelo Wattímetro dividida por seis, visto que durante o período de hidrólise haviam seis frascos com amostras de diferentes granulometrias na incubadora.

$$SEC = \frac{Potência\ Ponderada \times tempo}{Concentração\ de\ Glicose \times 0,05} \quad (6)$$

O indicador de consumo específico de energia foi calculado em kWh/g de glicose através da Equação 6, onde a potência ponderada é a potência média do wattímetro dividida por seis, em kW, o tempo de hidrólise para a amostra analisada, em horas, a concentração de glicose é a concentração média obtida para a amostra analisada, em g/L, e o valor de 0,05 é equivalente aos 50 mL do meio reacional utilizado em cada frasco.



### 3.9 Cálculo do Rendimento de Açúcares Redutores

Para cálculo do rendimento percentual de açúcares redutores foi utilizada a Equação 7, que relaciona a massa de açúcares redutores convertidos, em gramas, e a massa de biomassa inicial, equivalente a 2,5 g.

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{\text{g de açúcares redutores obtidos}}{2,5} \times 100$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Determinação da umidade

Antes da realização da secagem, fez-se a medição de uma amostra do material utilizando uma balança determinadora de umidade, obtendo o resultado inicial de 76,50%.

Após as 48 horas de secagem, realizou-se mais uma medição da umidade, resultando no valor da umidade do bagaço seco igual a 2,78%.

A redução da umidade foi essencial para uma melhor conservação do material e para reduzir uma possível proliferação de microrganismos.

### 4.2 Análise Granulométrica

As frações mássicas retidas ( $x_i$ ) em cada uma das peneiras, seus respectivos diâmetros ( $d_i$ ) e o valor de  $\frac{x_i}{d_i}$  estão disponíveis na Tabela 3. Os índices 1 e 2 subscritos indicam a amostra à qual os dados referem.

Tabela 3 – Análise Granulométrica do Bagaço de Malte

<i>Mesh</i>	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	$x_{i1}$	$\frac{x_{i1}}{d_{i1}}$	$\sum \frac{x_{i1}}{d_{i1}}$	$x_{i2}$	$\frac{x_{i2}}{d_{i2}}$	$\sum \frac{x_{i2}}{d_{i2}}$
16	1000	0,2059	0,000205		0,1635	0,000163	
20	850	0,2103	0,000247	0,00143	0,2016	0,000237	0,00147
32	500	0,3267	0,000653		0,3606	0,000721	
42	355	0,1146	0,000322		0,1238	0,000348	
Fundo	-	0,1424	-		0,1505	-	

Fonte: Do autor (2021).

O Diâmetro de Sauter foi calculado para cada uma das amostras através da Equação 1, onde obteve-se o valor de 699,44  $\mu\text{m}$  para a amostra 1 e o valor de 679,99  $\mu\text{m}$  para a amostra 2, resultando no valor médio de 689,72  $\mu\text{m}$ , com desvio padrão de 13,75  $\mu\text{m}$ .

Ao analisar os dados da Tabela 3, observa-se que a maior quantidade de biomassa foi retida na peneira de *Mesh* 32, o que é coerente com o resultado do diâmetro de Sauter, visto que a peneira de *Mesh* 32 possui diâmetro de 500  $\mu\text{m}$ , retendo partículas de diâmetro superior a esse valor.

### 4.3 Determinação da Concentração de Glicose

Os valores de absorvância obtidos através da leitura das amostras em espectrofotômetro e a concentração de glicose correspondente estão disponíveis nas Tabelas 4, 5 e 6 para os *Mesh* 20, 32 e 42 respectivamente.

Foi realizada a análise estatística comparando as concentrações médias de glicose em cada um dos tempos de coleta da amostra. Os coeficientes de comparação do teste estatístico estão representados pelos índices sobrescritos nos valores das médias de concentração de glicose.

Tabela 4 – Concentração de glicose por tempo de hidrólise enzimática para o *Mesh* 20.

Tempo (h)	Amostra	Absorvância	Concentração de Glicose (g/L)	Concentração Média de Glicose (g/L)
1	A	0,324	4,87	5,12 ± 0,25 <sup>A</sup>
	B	0,351	5,37	
2	A	0,419	6,62	6,61 ± 0,01 <sup>B</sup>
	B	0,418	6,60	
4	A	0,508	8,26	8,18 ± 0,08 <sup>C</sup>
	B	0,499	8,10	
6	A	0,495	8,02	8,36 ± 0,34 <sup>C</sup>
	B	0,532	8,71	
8	A	0,598	9,92	9,97 ± 0,05 <sup>D</sup>
	B	0,603	10,02	
24	A	0,618	10,35	11,00 ± 0,65 <sup>D</sup>
	B	0,691	11,65	
30	A	0,625	10,47	10,85 ± 0,38 <sup>D</sup>
	B	0,668	11,24	
48	A	0,569	9,47	8,60 ± 0,87 <sup>C</sup>
	B	0,472	7,74	

Fonte: Do autor (2021).

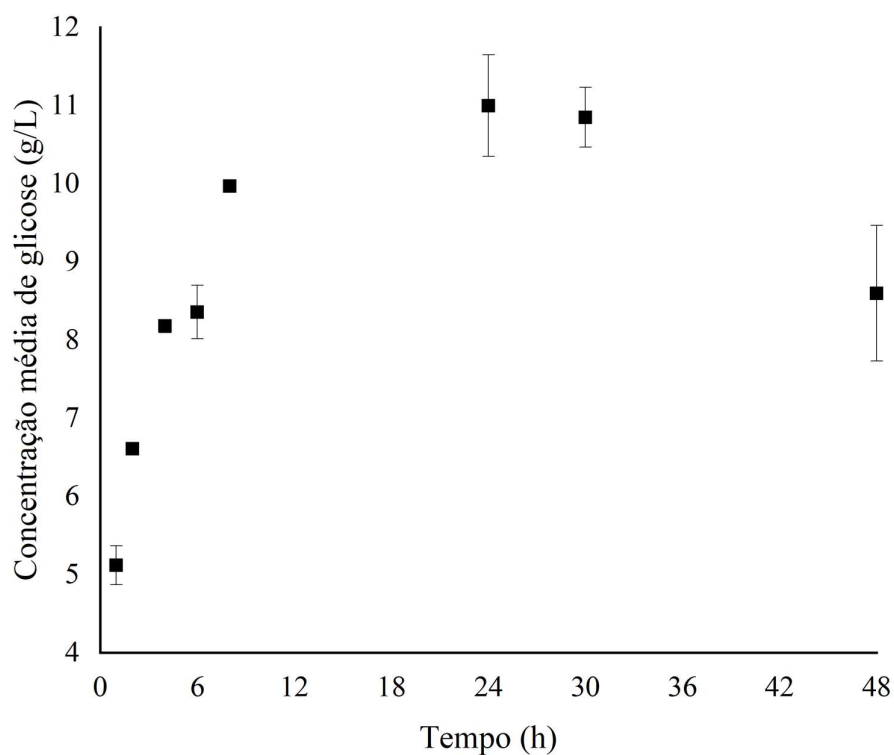
Na Figura 16, que ilustra a variação da concentração de glicose em função do tempo de hidrólise enzimática para o *Mesh* 20, observa-se um perfil crescente para a concentração de glicose até o tempo de 24 horas. Entre 24 e 30 horas, há estabilidade na concentração de

glicose, com uma leve redução de 1,36% em comparação com o tempo anterior, seguido por uma queda na concentração de glicose para o valor de 8,60 g/L no tempo de 48 horas.

A análise estatística apresenta diferenças significativas entre a concentração média amostrada nos três primeiros tempos, de 1, 2 e 4 horas; o tempo de 6 horas apresenta concentração de glicose média significativamente igual ao tempo de 4 horas.

Entre os tempos de 8, 24 e 30 horas há uma concentração média de glicose significativamente igual, porém diferente da concentração média no tempo de 48 horas. Essa diferença indica que o tempo de 8 horas é o mais adequado para a produção de glicose nas condições estudadas para o *Mesh 20*, visto que, após mais 16 horas de hidrólise, não houve diferença estatisticamente significativa na concentração média de glicose do meio reacional que justifique a utilização do tempo de 24 horas.

Figura 16 – Concentração de glicose em função do tempo de hidrólise para o *Mesh 20*



Fonte: Do autor (2021).

Tabela 5 – Concentração de glicose por tempo de hidrólise enzimática para o *Mesh 32*

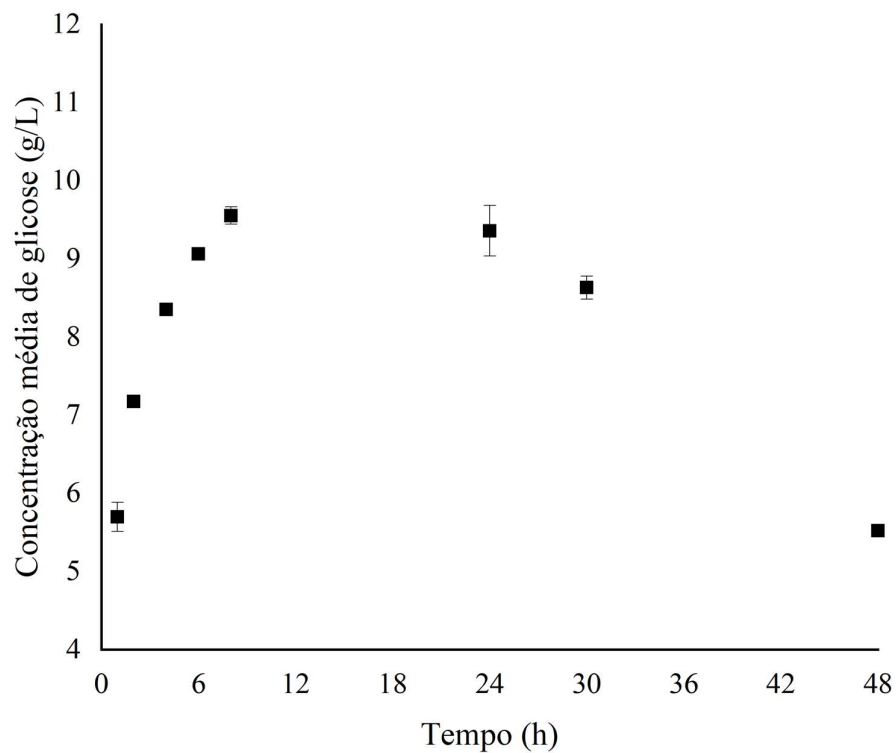
Tempo (h)	Amostra	Absorbância	Concentração de	
			Glicose (g/L)	Concentração Média de Glicose (g/L)
1	A	0,359	5,52	5,70 ± 0,18 <sup>A</sup>
	B	0,379	5,88	
2	A	0,449	7,17	7,17 ± 0,00 <sup>B</sup>
	B	0,449	7,17	
4	A	0,513	8,36	8,36 ± 0,00 <sup>C</sup>
	B	0,513	8,36	
6	A	0,553	9,09	9,07 ± 0,03 <sup>D</sup>
	B	0,55	9,04	
8	A	0,584	9,66	9,55 ± 0,11 <sup>D</sup>
	B	0,572	9,44	
24	A	0,585	9,68	9,36 ± 0,32 <sup>D</sup>
	B	0,55	9,04	
30	A	0,520	8,48	8,63 ± 0,15 <sup>C</sup>
	B	0,536	8,78	
48	A	0,363	5,59	5,52 ± 0,06 <sup>A</sup>
	B	0,356	5,46	

Fonte: Do autor (2021).

Para a variação da concentração média de glicose em função do tempo de hidrólise enzimática para o *Mesh 32*, ilustrada na Figura 17, há um crescimento na concentração de glicose até o tempo de 8 horas, com uma estabilidade no tempo de 24 horas, apresentando um leve decréscimo de 2,00% em relação ao tempo anterior.

A partir das 24 horas, há uma queda acentuada na concentração média de glicose, com uma possível degradação ou consumo dos açúcares presentes no meio, visto que a concentração média no tempo de 48 horas é inferior à concentração média no primeiro tempo, de 1 hora.

A análise estatística apresenta diferenças significativas entre as médias dos quatro primeiros tempos, 1, 2, 4 e 6 horas. As médias dos tempos de 8 e 24 horas são estatisticamente iguais à média do tempo de 6 horas. O decréscimo nos tempos de 30 e 48 horas torna as médias desses tempos estatisticamente iguais aos tempos de 4 e 1 hora, respectivamente.

Figura 17 - Concentração de glicose em função do tempo de hidrólise para o *Mesh 32*

Fonte: Do autor (2021).

As concentrações médias de glicose em função do tempo para o *Mesh 42* estão ilustradas na Figura 18. Novamente, observa-se um perfil crescente até o tempo de 8 horas, com um leve decréscimo no tempo de 6 horas, apresentando um desvio em relação aos perfis analisados para os outros *meshes*. Tal desvio pode ter ocorrido tanto por algum erro experimental ou variação durante a execução dos experimentos, quanto por uma degradação ou consumo dos açúcares.

O tempo de 8 horas apresenta o maior valor médio de concentração de glicose, com um valor de 12,00 g/L e desvio padrão de 1,04 g/L, seguido por uma queda na concentração média para o tempo de 24 e 30 horas, que apresentam uma concentração média de glicose estável, com uma pequena variação. No tempo de 48 horas, há mais uma leve queda na concentração média de glicose.

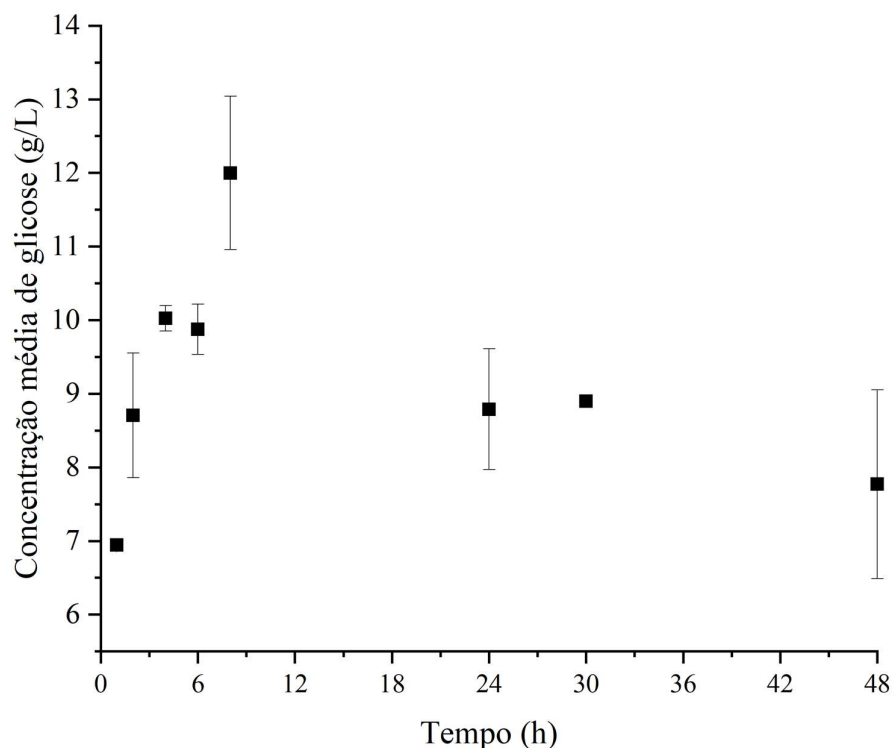
Tabela 6 – Concentração de glicose por tempo de hidrólise enzimática para o *Mesh 42*

Tempo (h)	Amostra	Absorbância	Concentração de Glicose (g/L)	Concentração Média de Glicose (g/L)
1	A	0,435	6,92	6,94 ± 0,03 <sup>A</sup>
	B	0,438	6,97	
2	A	0,578	9,55	8,71 ± 0,85 <sup>A</sup>
	B	0,486	7,86	
4	A	0,594	9,85	10,02 ± 0,18 <sup>A</sup>
	B	0,613	10,20	
6	A	0,577	9,54	9,88 ± 0,34 <sup>A</sup>
	B	0,614	10,22	
8	A	0,654	10,96	12,00 ± 1,04 <sup>A</sup>
	B	0,767	13,04	
24	A	0,492	7,97	8,79 ± 0,82 <sup>A</sup>
	B	0,581	9,61	
30	A	0,541	8,87	8,90 ± 0,03 <sup>A</sup>
	B	0,544	8,93	
48	A	0,551	9,06	7,77 ± 1,28 <sup>A</sup>
	B	0,412	6,49	

Fonte: Do autor (2021).

Apesar da apresentação de valores numericamente diferentes, com variações de até 57,83% entre as concentrações de glicose para diferentes tempos, a análise estatística não apontou diferenças significativas entre as concentrações médias de glicose para o *Mesh 42*.

Apesar dos desvios-padrão com valores maiores, o que dificulta a identificação, ainda é possível observar que o perfil de conversão da biomassa em glicose é semelhante ao dos outros *meshes* estudados.

Figura 18 - Concentração de glicose em função do tempo de hidrólise para o *Mesh* 42

Fonte: Do autor (2021).

Para os dados da comparação das concentrações de glicose para cada *mesh* no mesmo intervalo de tempo, embora os valores e os perfis da concentração de glicose em função do tempo sejam numericamente diferentes, não foram constatadas diferenças estatísticas, o que sugere que o tamanho das partículas, nas condições estudadas, não influenciou significativamente em uma maior eficiência da hidrólise enzimática.

Em todos os *meshes* estudados é possível notar um crescimento na concentração de glicose até um valor máximo, localizado entre os tempos de 8 e 24 horas, seguido por uma queda. Supõe-se que esta queda na concentração de glicose possa ter sido ocasionada por contaminação do material por microrganismos, que a partir de determinado instante começaram a consumir os açúcares produzidos, ou também pela degradação dos açúcares formados ao longo da reação.

A secagem prévia do bagaço de malte, realizada a 60°C, pode não ter sido suficiente para eliminar focos de contaminação do material por algum tipo de microrganismo indesejado.



#### 4.4 Ajuste matemático dos dados

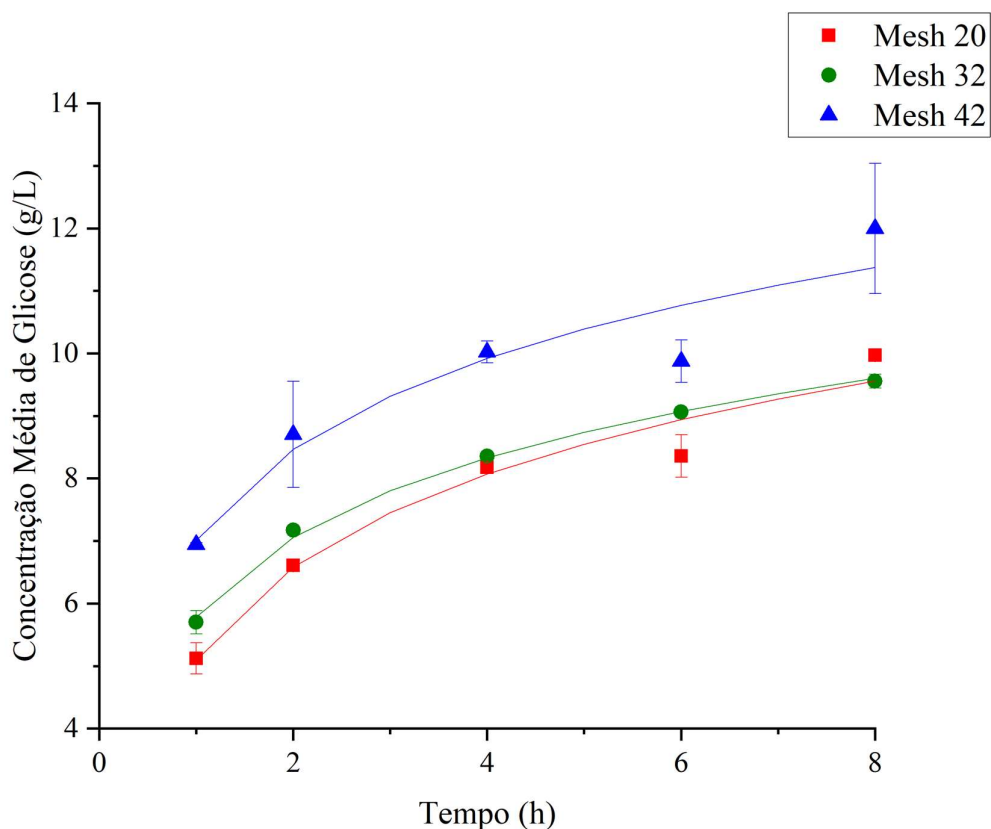
Quando analisados os perfis da concentração média de glicose em função do tempo de hidrólise enzimática, observa-se um crescimento na concentração média com tendência logarítmica até o tempo de 8 horas. Essa tendência é validada pelo ajuste dos dados nas equações e pelo coeficiente de determinação, apresentados na Tabela 7 e na Figura 19. Nas equações,  $y$  representa a concentração média de glicose em g/L e  $x$  o tempo em horas.

Tabela 7 – Ajuste logarítmico e coeficiente de determinação dos perfis de concentração média de glicose até 8 horas de hidrólise enzimática

Mesh	Equação	Coeficiente de Determinação ( $R^2$ )
20	$y = 2,1446 \ln(x) + 5,0955$	0,9623
32	$y = 1,8358 \ln(x) + 5,785$	0,9975
42	$y = 2,0973 \ln(x) + 7,0138$	0,9088

Fonte: Do autor (2021).

Figura 19 – Ajuste logarítmico dos pontos até o tempo de 8 horas.



Fonte: Do autor (2021)

Os dados para a amostra de *Mesh* 32 apresentaram o melhor ajuste, com o coeficiente de determinação igual a 0,9975. Os dados para as amostras dos outros dois *meshes* analisados, apesar de apresentarem coeficientes de determinação inferiores ao do *Mesh* 32, ainda apresentam um ajuste considerável.

Quando se excluí os dados de concentração média de glicose para o *Mesh* 20 e 42 referentes ao tempo de 6 horas, que podem ter sido alvo de maiores erros experimentais, os ajustes às equações apresentam coeficiente de determinação superior a 0,99 em ambos os casos.

#### 4.5 Cálculo do Consumo Específico de Energia

Para a realização do cálculo de Consumo Específico de Energia, mediu-se a voltagem, a amperagem e a potência da incubadora *shaker* utilizada durante o processo de hidrólise enzimática, para obter a quantidade de energia fornecida às amostras. Os resultados obtidos com o auxílio do Wattímetro são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Voltagem, amperagem e potência da incubadora *shaker*

Medida	Voltagem (V)	Corrente (A)	Potência (kW)
1	227	3,5	0,58
2	225	3,6	0,57
3	226	3,9	0,56

Fonte: Do autor (2021).

Os resultados obtidos para o Consumo Específico de Energia estão apresentados para cada *mesh* e tempo de hidrólise na Tabela 9.

Foi utilizada a potência média de  $0,57 \pm 0,01$  kW no cálculo do Consumo Específico de Energia, e considerou-se que essa potência foi igualmente distribuída entre os seis frascos amostrais, considerando assim o valor de 0,095 kW como a potência consumida para cada amostra.

Como já observado na análise da concentração média de glicose, o tempo ótimo de hidrólise aconteceu entre 8 e 24 horas.

Tabela 9 – Consumo específico de energia médio na produção de glicose

Tempo (h)	Energia consumida (kWh)	Mesh 20 (kWh/g glicose)	Mesh 32 (kWh/g glicose)	Mesh 42 (kWh/g glicose)
1	0,57	0,372 ± 0,026	0,334 ± 0,015	0,274 ± 0,001
2	1,14	3,448 ± 0,007	3,178 ± 0,000	2,644 ± 0,363
4	2,28	5,575 ± 0,080	5,458 ± 0,000	4,550 ± 0,112
6	3,42	8,191 ± 0,473	7,545 ± 0,033	6,931 ± 0,337
8	4,56	9,149 ± 0,060	9,547 ± 0,156	7,658 ± 0,939
24	13,68	24,971 ± 2,093	28,264 ± 1,427	31,400 ± 4,143
30	17,1	31,552 ± 1,578	39,632 ± 0,958	38,427 ± 0,183
48	27,36	64,253 ± 9,144	99,068 ± 1,637	72,356 ± 16,912

Fonte: Do autor (2021).

Nota-se através dos dados da Tabela 9 que em 24h há um aumento no consumo específico de energia de, aproximadamente, 173% para o *mesh* 20, 196% para o *mesh* 32 e 310% para o *mesh* 42, quando só houve aumento na concentração média de glicose para o *Mesh* 20, que foi de aproximadamente 10%. Para os *Meshes* 32 e 42, houve uma redução de 2% e de 26,75%, respectivamente, nas concentrações médias de glicose.

Deste modo, esse indicador demonstrou que ocorre um melhor equilíbrio entre a produção de açúcares redutores e o consumo energético no tempo de 8 horas.

#### 4.6 Rendimento da hidrólise

Para a análise do rendimento da hidrólise e da conversão da biomassa, considerando-se a carga de 5% de bagaço de malte em cada meio reacional, o que equivale a 2,5 g de bagaço de malte, calculou-se o rendimento de glicose em função da massa inicial de material utilizada para cada tempo de hidrólise. Os valores médios e o desvio padrão obtidos são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Rendimento percentual (%) da hidrólise do bagaço de malte

<b>Tempo (h)</b>	<b><i>Mesh 20</i></b>	<b><i>Mesh 32</i></b>	<b><i>Mesh 42</i></b>
1	10,24 ± 0,70	11,40 ± 0,52	13,89 ± 0,07
2	13,22 ± 0,03	14,35 ± 0,00	17,41 ± 2,39
4	16,36 ± 0,23	16,71 ± 0,00	20,05 ± 0,49
6	16,73 ± 0,97	18,13 ± 0,08	19,76 ± 0,96
8	19,94 ± 0,13	19,11 ± 0,31	24,00 ± 2,94
24	21,99 ± 1,84	18,72 ± 0,91	17,58 ± 2,32
30	21,71 ± 1,09	17,26 ± 0,42	17,80 ± 0,08
48	17,21 ± 2,45	11,05 ± 0,18	15,55 ± 3,63

Fonte: Do autor (2021).

Comparando os melhores resultados de conversão obtidos por *meshes*, temos os valores de 21,99% para o *Mesh 20*, 19,11% para o *Mesh 32* e 24,00% para o *Mesh 42*. Nota-se que, quando comparados os rendimentos para o tempo de 8 horas, houve um aumento de 20% no rendimento médio de glicose da hidrólise para o *Mesh 42* em relação ao *mesh 20*, e de 25% em relação ao *mesh 32*.

Tais resultados indicam que o bagaço de malte possui um potencial promissor na produção de etanol de segunda geração, visto que foram alcançadas conversões máximas em torno de 20% apenas com a aplicação de um pré-tratamento físico.

Luft (2016) comparou três tecnologias alternativas para a realização da hidrólise enzimática do bagaço de malte, com agitação mecânica, sonda de ultrassom e CO<sub>2</sub> supercrítico, utilizando o complexo amilolítico STARGEN™ 002 e diferentes variáveis para cada tecnologia. Obteve os rendimentos mássicos de 7,55% para a agitação mecânica, 37,09%

para ultrassom com sonificação direta, 16,58% para ultrassom com sonificação indireta e 21,94% para CO<sub>2</sub> supercrítico.

Salla (2008) apresentou um rendimento industrial de 343 kg de açúcares para 1000 kg de raízes de mandioca, equivalente a um rendimento de 34,3%. Ferreira *et al.* (2013) analisaram a hidrólise ácida e a hidrólise enzimática de farinha de arroz, obtendo os resultados de 2,25 mg/g de farinha no tempo de 9 horas para a hidrólise ácida e 46,60 mg/g de farinha para a hidrólise enzimática no tempo de 2 horas, equivalentes a 0,225% e 4,66% respectivamente.

## 5 CONCLUSÕES

Nas condições estudadas, constatou-se que o diâmetro das partículas não apresentou influências estatisticamente significativas na produção de glicose, com o tempo de 8 horas sendo o ideal para a hidrólise, tanto em relação à produção de glicose quanto ao gasto energético. Além disso, pode-se observar que a conversão da biomassa em glicose segue um padrão que se ajusta em equações logarítmicas até certo intervalo de tempo.

O bagaço de malte apresentou um alto potencial como matéria-prima para a produção de etanol de segunda geração, visto que, apenas com um pré-tratamento físico simples como a moagem, apresentou uma boa conversão de açúcares, com valores em torno de 20%.

Sugere-se que outras variáveis do processo sejam analisadas futuramente, objetivando uma maior produção de glicose e melhores valores para o indicador de consumo energético, além da análise completa do bagaço de malte para produção do etanol 2G, levando em consideração os rendimentos das etapas de fermentação e purificação.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para trabalhos futuros, sugerem-se a análise de outros pré-tratamentos, principalmente pré-tratamentos capazes de inibir a ação de microrganismos, o uso de outros tipos e concentrações de enzimas, bem como análises com diferentes cargas de bagaço no meio reacional. Além disso, dar sequência neste trabalho, com um *scale-up* para analisar o rendimento na etapa de fermentação na produção de etanol 2G.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOSSLE, R. **Raízen anuncia venda de 460 milhões de litros de etanol celulósico.** Novacana. [S.I.]. 2021. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/raizen-anuncia-venda-460-milhoes-litros-etanol-celulosico-100821>>. Acesso em: 20 de set. 2021.

BRASIL, A. C. M *et al.* **Caracterização e aplicação de biomassas em tecnologias de conversão termoquímica.** Laboratório de Bioprocessos Cervejeiros e Catálise em Energias Renováveis – LaBCCERva. Universidade de Brasília. Brasília/DF. 2021.

BRASKEM. **I'M GREEN™ BIO-BASED.** [S.I.]. 2021. Disponível em: <<https://www.braskem.com.br/imgreen/bio-based>>. Acesso em: 05 out. 2021.

BRUST, L. A. C. *et al.* **Enfermidades em bovinos associadas ao consumo de resíduos de cervejaria.** Pesquisa Veterinária Brasileira, v. 35. [S.I.]. 2015.

BUNDE, A. **(Re)estruturação do setor sucroenergético: formação e (re)territorialização da produção e do consumo de etanol no Brasil.** Geografia Ensino & Pesquisa, 37 ed. Vol 24. Santa Maria/RS. 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar.** Observatório Agrícola. Brasília/DF. V. 7, safra 2020/2021, n 4. 2021. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 29 set. 2021.

CORDEIRO, L. G. **Caracterização e viabilidade econômica do bagaço de malte oriundo de cervejarias para fins energéticos.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa/PB. 2011.

CORRÊA, L. J. **Estudos de melhorias no processo de hidrólise enzimática de biomassas para produção de etanol.** Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos/SP. 2016.

CORTEZ, L. A. B. **Roadmap for Sustainable Aviation Biofuels for Brazil: A Flightpath to Aviation Biofuels in Brazil.** São Paulo/SP. Editora Blucher. 2014.

CORTEZ, L. A. B. **Proálcool 40: Universidades e Empresas: 40 Anos de Ciência e Tecnologia para o Etanol Brasileiro.** 1 ed. São Paulo/SP. Editora Blucher. 2016.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos.** 3 ed. São Paulo/SP. Editora Blucher. 2018.

D. JUNIOR, A. A.; VIEIRA, A. G.; FERREIRA, T. P. **Processo de Produção de Cerveja.** Revista Processos Químicos, v. 3, n. 6. 2009.



FERREIRA, S. M. *et al.* **Produção de açúcares redutores por hidrólise ácida e enzimática de farinha de arroz.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais. v. 15, n.4. Campina Grande/PB. 2013

GHOSE, T.K. **Measurement of cellulase activities.** Pure & Appl. Chem., v. 59. 1987.

GLOBO RURAL. **Etanol de cana emite 70% menos gás carbônico que gasolina, segundo Embrapa.** Ambiente. [S.I.]. 2010. Disponível em: <<http://revistagloborural.globo.com/GloboRural/0,6993,EEC1698339-1934,00.html>>. Acesso em: 02 out. 2021.

HAMELINCK, C. N.; VAN HOOIJDONK, G.; FAAIJ, A. **Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle-and long-term.** Biomass and bioenergy. v. 28. n. 4. 2005.

JACINTHO, H. **Cadeia de etanol de milho cresce expressivamente no Brasil.** Forbes. [S.I.]. 2021. Disponível em: <<https://forbes.com.br/colunas/2021/09/helen-jacinto-cadeia-de-etanol-de-milho-cresce-expressivamente-no-brasil/>>. Acesso em: 30 set. 2021.

KLAGENBOECH, R.; SILVA, G. M. C. **Influência da velocidade na cinética de secagem e nas características nutricionais da mistura de bagaço de malte e levedura (*Saccharomyces cerevisiae*).** XVII SICITE – Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Toledo/PR. 2017.

LAWRENCE, A. *et al.* **Specific energy consumption/use (SEC) in energy management for improving energy efficiency in industry: Meaning, usage and differences.** Energies, v. 12. n. 2. 2019.

LIMA, U. A. *et al.* **Biotecnologia industrial: Processos fermentativos e enzimáticos.** v. 3. 1 ed. Blucher. São Paulo/SP. 2001.

LORENZI, B. R. **Etanol de segunda geração no Brasil: política e translações.** Tese (Doutorado em Ciência Política). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos/SP. 2018.

LORENZI, B. R.; ANDRADE, T. H. N. **O Etanol de Segunda Geração no Brasil: Políticas e redes sociotécnicas.** Revista Brasileira de Ciências Sociais. v. 34. 2019.

LUFT, L. **Hidrólise enzimática do bagaço de malte usando tecnologias alternativas visando à obtenção de açúcares fermentescíveis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS. 2016

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Anuário da Cerveja 2020.** Brasília/DF. 2021. Disponível em: <[http://www.cervbrasil.org.br/novo\\_site/wp-content/uploads/2021/04/anuariocerveja2.pdf](http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/wp-content/uploads/2021/04/anuariocerveja2.pdf)>. Acesso em: 18 de set. 2021.

MASSARDI, M. M.; MASSINI, R. M. M.; SILVA, D. J. **Caracterização química do bagaço de malte e avaliação do seu potencial para obtenção de produtos de valor agregado.** The Journal of Engineering and Exact Sciences, v. 6. n. 1. 2020.

MICROAMBIENTAL. **Por que monitorar a qualidade da água na indústria de cerveja?** [S.I.]. 2021. Disponível em: <<https://microambiental.com.br/analises-de-agua/por-que-monitorar-a-qualidade-da-agua-na-industria-de-cerveja/>>. Acesso em: 25 de set. 2021

MOREIRA, J. R. S. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética.** 2 ed. Rio de Janeiro/RJ. LTC. 2017.

NOVACANA. **História da legislação sobre o etanol.** [S.I.]. 2012. Disponível em: <[novacana.com/etanol/historia-legislacao](http://novacana.com/etanol/historia-legislacao)>. Acesso em: 25 set. 2021.

NOVOZYMES. **Cellic® CTec2.** [S.I.]. 2021. Disponível em: <<https://biosolutions.novozymes.com/en/bioenergy/products/biomass-conversion/cellic-ctec2>>. Acesso em: 27 de set. 2020.

OGEDA, T. L.; PETRI, D. F. S. **Hidrólise enzimática de biomassa.** Química nova, v. 33. n. 7. São Paulo/SP. 2010.

PORTO, P. D. **Tecnologia de fabricação de malte: Uma revisão.** Monografia (Graduação em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS. 2011.

REBELLO, F. F. P. **Produção de cerveja.** Revista Agrogeoambiental, v. 1. n. 3. [S.I.]. 2009.

ROCHA, M. S. R. S. **Estudo integrado das etapas de pré-tratamento e hidrólise enzimática da palha de cana-de-açúcar.** Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos/SP. 2017.

ROSA, S. E. S.; GARCIA, J. L. F. **O etanol de segunda geração: limites e oportunidades.** Revista do BNDES. N 32. [S.I.]. 2009.

SALLA, D. A. **Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca, cana-de-açúcar e milho.** Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu/SP. 2008.

SANTOS, M. A. D. **Fontes de Energia Nova e Renovável.** 1 ed. Rio de Janeiro/RJ. LTC. 2013.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. “**A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance.**” Biometrics. (1974)

UNIÃO NACIONAL DA BIOENERGIA. **Raízen quer construir três novas usinas de etanol celulósico, diz Ometto.** [S.I.] 2021. Disponível em:

<<https://www.udop.com.br/noticia/2021/03/16/raizen-quer-construir-tres-novas-usinas-de-etanol-celulosico-diz-ometto.html>>. Acesso em: 20 de set. 2021.

VASCONCELOS, N. M. *et al.* **Determinação de açúcares redutores pelo ácido 3, 5-dinitrosalicílico: histórico do desenvolvimento do método e estabelecimento de um protocolo para o laboratório de bioprocessos.** Embrapa Agroindústria Tropical-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), 2013.

VENTURINI FILHO, W. G. **Bebidas alcoólicas: ciência e tecnologia.** 2 ed. Vol. 3. São Paulo/SP. Editora Blucher. 2018.