

CENTRO DE TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL  
FACULDADE SENAI CETIQT  
ENGENHARIA QUÍMICA

MARCELLY SENNA DOS ANJOS XIMENES

AVALIAÇÃO DA HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DO BAGAÇO DE MALTE CERVEJEIRO  
PARA O REAPROVEITAMENTO DE AÇÚCAR FERMENTESCÍVEL NO CONTEXTO  
DA ECONOMIA CIRCULAR

RIO DE JANEIRO

2020

CENTRO DE TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL  
FACULDADE SENAI CETIQT  
ENGENHARIA QUÍMICA

MARCELLY SENNA DOS ANJOS XIMENES

AVALIAÇÃO DA HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DO BAGAÇO DE MALTE CERVEJEIRO  
PARA O REAPROVEITAMENTO DE AÇÚCAR FERMENTESCÍVEL NO CONTEXTO  
DA ECONOMIA CIRCULAR

Monografia para a Graduação a ser submetida à Comissão  
Examinadora do Curso de Engenharia Química da Faculdade  
SENAI-CETIQT como parte dos requisitos necessários à  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Professora Orientadora: Michelle Reich

RIO DE JANEIRO

2020

Marcelly Senna dos Anjos Ximenes

AVALIAÇÃO DA HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DO BAGAÇO DE MALTE CERVEJEIRO  
PARA O REAPROVEITAMENTO DE AÇÚCAR FERMENTESCÍVEL NO CONTEXTO  
DA ECONOMIA CIRCULAR

Ficha Catalográfica

Ximenes, Marcelly Senna dos Anjos

Avaliação da hidrólise enzimática do bagaço de malte cervejeiro para o reaproveitamento de açúcar fermentescível no contexto da Economia Circular. Marcelly Senna dos Anjos Ximenes – Rio de Janeiro, 2020.

54 p

Monografia para Graduação a ser submetida à Comissão Examinadora do Curso de Bacharel em Engenharia Química da Faculdade SENAI – CETIQT, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

1. Bagaço de malte. 2. Economia Circular. 3. Hidrólise enzimática

Marcelly Senna dos Anjos Ximenes

**Avaliação da hidrólise enzimática do bagaço de malte cervejeiro para o reaproveitamento de açúcar fermentescível no contexto da Economia Circular**

Monografia para a Graduação a ser submetida à Comissão Examinadora do Curso de Engenharia Química da Faculdade SENAI-CETIQT como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovada em: 07/07/2020.

**Aprovado por:**

---

Orientador: Michelle Reich, M.Sc.

**Banca Examinadora<sup>1</sup>:**

---

Héctor Napoleão Cozendey da Silva, D. Sc., Faculdade SENAI CETIQT

---

Marta Cristina Picardo, D. Sc., Faculdade SENAI CETIQT

---

Victória Emília Neves Santos, D. Sc., Instituto Senai de Inovação - ISI

Rio de Janeiro

2020

---

<sup>1</sup>As assinaturas foram geradas eletronicamente no site <https://www.assinaturagratis.com/> e encontram-se no final do documento.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela minha vida, por cuidar de mim em todos os momentos e por me conceder oportunidades que exigiram de mim toda minha dedicação e minha fé.

Ao meu avô, Jorge dos Anjos, por todo seu exemplo de coragem, força e resiliência que me faz não desistir dos meus objetivos.

À minha mãe, Valeria Senna, luz da minha caminhada, dona de todo meu amor e que nunca mediu esforços para me ajudar a realizar meus sonhos.

À minha grande amiga, Andressa Mariano, por ter me apoiado em todas as minhas decisões, tristes ou felizes, referentes a minha graduação e por ser a pessoa responsável por me alegrar em todos os dias do decorrer deste curso.

Às minhas amigas, Nathália Procópio e Nathália Paz, que me acompanham desde a melhor fase da minha vida, a escola técnica, e que cresceram juntas a mim, aprendendo a admirar a ciência e a pesquisa. CEFETEQ para sempre!

Ao meu namorado, Leanderson Fernandes, pelas maravilhosas conversas e pelo apoio que me estimulam a buscar novos questionamentos e a sair da zona de conforto.

A todos os funcionários da Cervejaria Rio de Janeiro, líderes, operadores e terceiros, por dividirem comigo suas experiências e conhecimentos. Em especial, à minha equipe da Qualidade Assegurada, que me ajuda a crescer profissionalmente.

A todos os professores do SENAI CETIQT, por todo empenho para a formação dos alunos, incluindo aos que não fazem mais parte da instituição, mas que foram essenciais para o meu aprendizado durante todas as disciplinas.

À minha querida orientadora Michelle Reich, excelente professora, que esteve sempre disposta a me ajudar, demonstrando preocupação, cuidado e boa vontade durante suas correções e orientações.

A todos que, direta ou indiretamente, influenciaram no meu desenvolvimento pessoal ou profissional e me fizeram amar a carreira que escolhi, minha eterna gratidão.

*“Fracassar é parte crucial do sucesso. Toda vez que você fracassa e se recupera, exercita perseverança, que é a chave da vida. Sua força está na habilidade de se recompor.”*

*Michelle Obama*

## RESUMO

XIMENES, Marcelly Senna dos Anjos. **Avaliação da hidrólise enzimática do bagaço de malte cervejeiro para o reaproveitamento de açúcar fermentescível no contexto da Economia Circular.**

Os impactos ambientais causados pelas indústrias relacionados ao uso de matéria-prima e à geração demasiada de resíduos devem ser estudados, sendo importante obedecer aos regulamentos a fim de preservar o meio ambiente e mantendo o processo viável economicamente com geração de eficiência e também em prol da maior qualidade de vida da população. Nos últimos anos, o conceito de Economia Circular, que visa à busca por alternativas sustentáveis e inovadoras para os resíduos industriais, tem se tornado importante nos centros de pesquisas de grandes empresas. As cervejarias brasileiras geram milhões de toneladas de resíduo orgânico por ano. Em maior número, destaca-se o bagaço de malte. Atualmente, este resíduo é destinado à alimentação animal, mas por ter em sua composição fontes ricas de fibras e proteínas, pesquisa-se o potencial reaproveitamento dentro do próprio processo cervejeiro através da hidrólise enzimática do bagaço, gerando açúcar fermentescível que será utilizado na etapa de fermentação, agregando valor a esse resíduo. Desta forma, fez necessário o estudo dos custos da retirada do bagaço de malte do processo, do uso do xarope de *high* maltose como adjunto, bem como os custos para a etapa da hidrólise. Em posse destes dados, comparou-se a receita atual de uma cervejaria obtida com a venda do bagaço com os custos do reaproveitando desse bagaço por meio da geração de açúcar. Observou-se que o rendimento de açúcar resultante da hidrólise enzimática não é suficiente para suprir a demanda de adjunto e que o custo da etapa da hidrólise é também mais elevado, dificultando a implementação do conceito da economia circular que visa a menor dependência de matéria-prima virgem e circulação máxima de materiais em sistemas industriais integrados. Inovações na tecnologia de produção de enzimas, condução do processo de hidrólise enzimática simultaneamente com fermentação e a venda de mais subprodutos da reação seriam formas de viabilizar a proposta.

**Palavras-chave:** bagaço de malte, hidrólise enzimática, economia circular

XIMENES, Marcelly Senna dos Anjos. **Evaluation of the enzymatic hydrolysis of beer malt bagasse for the reuse of fermentable sugar in the context of circular economy.**

### **ABSTRACT**

The environmental impacts caused by the industries related to the use of raw material and too much waste generation must be studied, it is important to comply with regulations in order to preserve the environment and keep the process economically viable with generating of efficiency and also in favor of the higher quality of life of the population. In recent years, the concept of Circular Economy, which aims to search for sustainable and innovative alternatives for industrial waste, has become important in the research centers of large companies. Brazilian breweries generate millions of tons of organic waste per year. In greater numbers, the malt bagasse stands out. Currently, this residue is destined for animal feed, but because it has rich sources of fibers and proteins in its composition, the potential reuse within the brewing process itself is investigated through the enzymatic hydrolysis of the bagasse, generating fermentable sugar that will be used in the fermentation, adding value to this residue. Thus, it was necessary to study the costs of removing malt bagasse from the process, the use of high maltose syrup as an adjunct, as well as the costs for the hydrolysis stage. In possession of these data, the current profit of a brewery obtained from the sale of bagasse was compared with the costs of reusing that bagasse through the generation of sugar in enzymatic hydrolysis. It was observed that the sugar yield resulting from enzymatic hydrolysis is not enough to meet the demand for adjunct and that the cost of the hydrolysis step is also higher. So, it is difficult to implement the concept of circular economy which aims at less dependence on virgin raw material and maximum circulation of materials in integrated industrial systems. Innovations in enzyme production technology, conducting the enzymatic hydrolysis process simultaneously with fermentation and selling more reaction by-products would be ways to make the proposal viable.

**Key words:** malt bagasse, enzymatic hydrolysis, circular economy.

## SUMÁRIO

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| <b>1 CAPÍTULO 1</b>                         | 10 |
| 1.1 INTRODUÇÃO                              | 10 |
| 1.2 OBJETIVOS                               | 12 |
| 1.2.1 Objetivo geral                        | 12 |
| 1.2.2 Objetivos específicos                 | 12 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA                           | 12 |
| 1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO                | 13 |
| <b>2 CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> | 14 |
| 2.1 CERVEJA                                 | 14 |
| 2.1.1 Definição                             | 14 |
| 2.1.2 História                              | 14 |
| 2.2 COMPOSIÇÃO DA CERVEJA                   | 15 |
| 2.2.1 Matéria-prima                         | 15 |
| 2.2.2 Adjuntos                              | 16 |
| 2.3 PRODUÇÃO DO MOSTO                       | 17 |
| 2.3.1 Moagem                                | 17 |
| 2.3.2 Mosturação                            | 18 |
| 2.3.3 Filtração                             | 19 |
| 2.3.4 Fervura                               | 19 |
| 2.4 FERMENTAÇÃO                             | 21 |
| 2.5 BAGAÇO                                  | 23 |
| 2.6 HIDRÓLISE ENZIMÁTICA                    | 25 |
| 2.6.1 Enzima                                | 25 |
| 2.6.2 Pré-tratamento                        | 27 |
| 2.6.3 Pré-tratamento hidrotérmico           | 28 |
| 2.7 ECONOMIA CIRCULAR                       | 29 |
| <b>3 CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA</b>           | 32 |
| 3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS                   | 32 |
| 3.2 CENÁRIO 1                               | 33 |
| 3.2.1 Venda do bagaço como resíduo sólido   | 33 |
| 3.2.2 Custo do uso de adjunto               | 33 |
| 3.3 CENÁRIO 2                               | 34 |
| 3.3.1 Hidrólise enzimática                  | 35 |

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS .....                    | 36        |
| <b>4 CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>       | <b>39</b> |
| 4.1 CENÁRIO 1 .....                                       | 40        |
| 4.1.1 Resíduo gerado no processo atual .....              | 39        |
| 4.1.2 Receita gerada com a venda do bagaço .....          | 40        |
| 4.1.3 Custo do uso de adjunto – <i>high</i> maltose ..... | 41        |
| 4.2 CENÁRIO 2 .....                                       | 42        |
| 4.2.1 Quantidade de bagaço disponível para a reação ..... | 42        |
| 4.2.2 Rendimento da reação de hidrólise enzimática .....  | 43        |
| 4.2.3 Custo da enzima .....                               | 43        |
| 4.2.4 Venda de subproduto .....                           | 44        |
| 4.3 ANÁLISE DE CUSTOS .....                               | 45        |
| 4.4 ECONOMIA CIRCULAR .....                               | 47        |
| <b>5 CAPÍTULO 5 .....</b>                                 | <b>48</b> |
| 5.1 CONCLUSÃO .....                                       | 48        |
| 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                | 48        |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                  | <b>50</b> |

## CAPÍTULO 1

### 1.1 INTRODUÇÃO

Os primeiros registros de consumo de bebida fermentada pela população datam de 2100 a.C, na Mesopotâmia. No Egito, a cerveja era mais consumida do que a água, representando uma atividade social e sendo usada como moeda de pagamento. O primeiro contato da cerveja com os brasileiros aconteceu em 1808, com a vinda da família real portuguesa, porém apenas para a população nobre. A primeira cervejaria do Brasil foi fundada em 1853. Atualmente, há mais de 50 cervejarias registradas na Associação Brasileira da Indústria Cervejeira (CERVBRASIL, 2019).

Em relação à indústria cervejeira, considera-se que é um dos setores de maior relevância para a economia brasileira, uma vez que, ao longo de sua cadeia, emprega mais de 2,7 milhões de pessoas. A atuação desse setor movimenta uma extensa cadeia produtiva, sendo responsável por 2% do PIB brasileiro, gerando 77 bilhões de faturamento por ano. (CERVBRASIL, 2019).

O cereal utilizado na produção de cerveja é a cevada, sendo muito rico em amido, com muitas proteínas que são aproveitadas na etapa da fermentação. O malte é todo e qualquer grão que tenha sido umedecido para iniciar a germinação, sendo o do grão da cevada, o mais típico na produção de cerveja. O mosto cervejeiro é uma solução de água potável, malte, lúpulo e adjuntos a ser fermentada, contendo carboidratos, proteínas e sais minerais (LEGISLAÇÃO DE BEBIDAS, 1997).

No processo de beneficiamento, a etapa de moagem é uma fase crítica, uma vez que o tipo de moagem está diretamente ligado à ativação das enzimas, que irá caracterizar a quantidade de extrato formada, ou seja, quantidade de açúcares fermentescíveis disponíveis e, consequentemente, o rendimento do processo de produção de cerveja (DRAGONE; SILVA, 2010).

Considera-se que quanto mais fina a moagem, maior a atuação das enzimas e formação de extrato, porém, a alta fragmentação do malte pode gerar extração de polifenóis, além de dificultar a clarificação do mosto. Desta forma, opta-se por limitar a moagem. A desvantagem dessa limitação é a maior produção de bagaço no final do processo. Além disso, disponibiliza-se menos açúcares provenientes do malte, sendo necessária a adição de adjuntos, como por exemplo, a *high maltose*, *grits* de milho e arroz a fim de melhorar o rendimento da etapa da brassagem (AMBEV, 2019).

De forma alternativa, a disponibilidade de açúcar pode ocorrer através da hidrólise enzimática. A hidrólise é a quebra de uma molécula pela ação da água, gerando íon hidrônio e hidroxila e formando novos compostos (KOTZ, 2015). No caso deste estudo, esta reação é catalisada por enzimas, as moléculas de celulose quebradas constituem o material lignocelulósico da biomassa e os compostos formados são os monômeros de açúcar.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei 12.305/2010, o resíduo reutilizável e reciclável é reconhecido como um bem de valor econômico e social que proporciona empregabilidade e, consequentemente, renda para movimentar a economia do país. Na indústria atual, o reaproveitamento de subprodutos e resíduos não está mais apenas relacionado com a lucratividade que a empresa pode obter e sim, alinhado à sua filosofia. Diante de conceitos como o de economia circular e sustentabilidade, a tendência é que a indústria busque alternativas inovadoras a fim de reduzir o impacto ambiental gerado em seu processo.

A economia circular busca otimizar a vida útil de um determinado material a fim de reduzir o uso de matéria-prima e de recursos não renováveis, substituindo-os por recursos renováveis e insumos de base biológica. Além disso, objetiva reaproveitar resíduos e subprodutos dentro de uma mesma cadeia industrial ou em setores de outras indústrias, agregando valor ao resíduo (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

O bagaço de malte é um subproduto do processo de produção das cervejarias constituído, principalmente, de material celulósico e polpa de malte, tendo em sua composição fontes ricas em fibras e proteínas. A quantidade de bagaço produzido em uma cervejaria é de, aproximadamente, 14 kg de bagaço de malte para cada 1 hL litro de cerveja produzida. Para cada 18 toneladas de malte, aproximadamente 13 toneladas de bagaço é descartado do processo (AMBEV, 2019). Diante desse expressivo valor, o presente trabalho se propõe a reutilizar o bagaço no processo após acrescentar a etapa de hidrólise enzimática, que consiste em converter a celulose oriunda do bagaço em açúcares fermentescíveis, diminuindo a necessidade de utilização de adjuntos.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar a agregação de valor ao resíduo do processo de produção de cerveja, dentro dos preceitos da economia circular, por meio do estudo da hidrólise enzimática do bagaço de malte cervejeiro, a fim de reaproveitá-lo no processo, mediante a produção de açúcar fermentescível, reavaliando o uso de adjunto utilizado na etapa da brassagem.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Interpretar os custos da produção do mosto e do descarte de bagaço de malte cervejeiro no processo atual;
- Demonstrar o rendimento da reação química na etapa da hidrólise enzimática do bagaço de malte;
- Avaliar o reaproveitamento do bagaço para geração de açúcar fermentescível utilizando a etapa de hidrólise enzimática;
- Comparar o custo do processo atual com o custo do novo processo proposto envolvendo os preceitos da economia circular;
- Analisar a redução de resíduos no processo e possibilidade de agregação de valor a esse.

## **1.3 JUSTIFICATIVA**

O presente estudo tem como motivação a importância econômica e social do setor cervejeiro no Brasil, como também, a expansão das atividades que visam aderir ao conceito economia circular, gerando maior valor agregado às etapas de produção, garantindo a sustentabilidade ambiental e a sobrevivência das futuras gerações.

O Brasil é o terceiro maior produtor de cerveja do mundo, atrás somente da China e dos Estados Unidos. A indústria cervejeira tem seu faturamento equivalente a 2% do PIB brasileiro, contribui com 25 bilhões em impostos, sendo o consumo no país de 13 bilhões de

litros por ano (SINDICERV, 2017). Considerando esses valores significativos, as cervejarias no Brasil geram empregos de forma direta e indireta, desenvolvendo outros setores econômicos ligados à sua produção, como é o caso do agronegócio, transporte, energia, vidro e alumínio, ou seja, as indústrias de matérias-primas, insumos e distribuição.

Agregar valor ao produto, reduzir os impactos ambientais causados durante a fabricação e garantir compromissos ambientais permite ao mercado cervejeiro ter um diferencial, sendo valorizado pelos consumidores ambientalmente conscientes. O crescimento passa a estar relacionado com a inovação de tecnologias para o aproveitamento dos recursos que já estão dentro do processo de produção, aderindo aos princípios de preservação, otimização e reaproveitamento.

O bagaço de malte é quantitativamente, o principal subproduto do processo cervejeiro. Este resíduo possui um alto conteúdo de fibras e proteínas. O bagaço de malte é um material lignocelulósico cuja composição varia entre 17% de celulose, 28% de hemicelulose e 28% de lignina (MUSSATTO *et al.*, 2006), que podem ser hidrolisadas enzimaticamente para a produção de glicose a ser fermentada na etapa de fermentação do processo.

A hidrólise enzimática é um processo que está se desenvolvendo devido às pesquisas referentes ao bioetanol. Neste trabalho, a hidrólise visa o reaproveitamento direto do bagaço de malte cervejeiro, agregando valor a esse subproduto, diminuindo o impacto ambiental causado e seguindo as atuais tendências da biotecnologia.

## **1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO**

Um estudo de caso é apresentado após avaliação do custo de venda do bagaço de malte para outras empresas e o custo de inserção de adjunto no processo cervejeiro comparado ao custo da hidrólise enzimática do bagaço de malte. Para isto, serão levantados dados de volume e preços do adjunto utilizado e da enzima necessária. As despesas serão estudadas levando em consideração o rendimento da reação enzimática e o meio de transporte utilizado.

O foco deste trabalho encontra-se em demonstrar, após uma avaliação dos custos se o bagaço de malte cervejeiro pode ser reintroduzido adequadamente no processo de produção de cerveja ao invés de ser descartado como resíduo sólido, baseando-se no conceito de economia circular e promovendo a geração de valor associada a uma única produção de insumos.

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CERVEJA

#### 2.1.1 Definição

A cerveja é o resultado da fermentação alcoólica de leveduras adicionadas ao mosto de cereal maltado, gerando uma concentração de álcool massa/volume entre 3% e 8%. Geralmente, este cereal maltado é a cevada, devido ao seu alto teor de enzimas naturais. Outra opção é uma mistura de cevada com outras matérias-primas denominadas adjuntos como, por exemplo, o milho, arroz, centeio ou trigo, que são fontes de carboidratos para o metabolismo da levedura. A cerveja possui grande volume de água em sua composição, sendo necessário garantir a qualidade da água do processo (DALLACORT, 2013).

O lúpulo também é um ingrediente fundamental na composição da cerveja, uma vez que é o responsável pelo seu amargor e aroma. Além disto, é o lúpulo que equilibra o sabor adocicado do malte, sendo também um conservante natural (LARA, 2018). O Decreto nº 2.314, de setembro de 1997 da Legislação brasileira define cerveja conforme os ingredientes vistos acima, ou seja, “bebida obtida pela fermentação alcoólica do mosto cervejeiro oriundo de malte de cevada e água potável, por ação da levedura, com adição de lúpulo” (SCHMIDELL *et al.*, 2016).

#### 2.1.2 História

A história da cerveja no mundo começou há mais de 6000 anos. Na Mesopotâmia, há indícios de produção de cerveja em uma região chamada Suméria, que possuía solo fértil, possibilitando o crescimento dos grãos. Os primeiros registros datam de 2100 a.C. e, nessa época, a cerveja possuía a função de alimentação. Já no Egito, aproximadamente 3000 a.C., toda sociedade utilizava a cerveja como forma de pagamento, ou consumia como forma de socialização e confraternização. Com a conquista do Egito pelo Império Romano, o costume do consumo da cerveja se propagou por toda Europa. Porém, a cerveja passou a ser consumida pela população mais pobre enquanto os mais nobres passaram a consumir o vinho (MEUSSDOERFFER, 2009).

A bebida foi batizada como “cerveja” pelos franceses, em homenagem à Ceres, deusa da agricultura e fertilidade. Em relação ao desenvolvimento da produção de cerveja, os mosteiros da Idade Média possuem grande importância. Nesses aconteceram as primeiras misturas de frutos e especiarias aromáticas, passando a documentar e aperfeiçoar a produção. Neste momento, o lúpulo passou a fazer parte da cerveja. No século XIV surgem as cervejarias comerciais a partir da produção doméstica, causando a diminuição da produção nos mosteiros (AMBEV, 2019).

A cerveja chegou ao Brasil em 1808, com a vinda da família real portuguesa. Porém, era acessível apenas para a nobreza, uma vez que os colonizadores impediam a sua popularização com o intuito de incentivar o maior consumo de vinho produzido em Portugal. A primeira cervejaria do Brasil foi fundada em 1853, em Petrópolis, Rio de Janeiro: a cervejaria Bohemia. Outras surgiram no fim do período monárquico (CERVESIA, 2020).

## 2.2 COMPOSIÇÃO DA CERVEJA

### 2.2.1 Matéria-prima

As matérias-primas da cerveja devem ter boa qualidade, pois influenciam diretamente os aspectos sensoriais<sup>2</sup>, físico-químico e microbiológico do produto. A água é a matéria-prima mais abundante, constituindo de 90 a 95% da cerveja e sendo muito usada durante todas as etapas do processo para limpeza dos equipamentos, esterilização de tubulações e tanques, diluição da cerveja e funcionamento dos pasteurizadores. Atualmente, já é possível produzir 1 hL de cerveja utilizando 2,9 hL de água (AMBEV, 2019).

Muitas cervejarias possuem sua própria estação de tratamento, captando água de rios próximos à planta e, posteriormente, tratando o efluente do processo. Estas estações têm capacidade de tratar a água que possui uma diversidade de características, obtendo uma água padronizada para produção de diversos tipos de cerveja e dentro dos critérios legais (AB INBEV, 2018).

A especificação do pH da água deve ser atendida. Normalmente, o pH deve estar entre 6,5 e 7,0, ou seja, levemente ácido para que não haja a dissolução de algumas substâncias presentes no malte. Além disso, o pH ácido proporciona maior atividade enzimática na etapa de mostura. Apesar destes fatores, o valor do pH pode

---

<sup>2</sup> Aspectos fundamentais referentes à estabilidade organoléptica, impressões olfativas e gustativas.

variar conforme o tipo de cerveja que deseja-se produzir (P&Q ENGENHARIA JR, 2020).

De acordo com a legislação brasileira, a cerveja deve possuir proporção de malte de cevada maior ou igual a 55% em peso, sobre o extrato primitivo, como fonte de açúcar (BRASIL, 2009). O malte é produzido após as etapas de maceração e germinação artificial controlada do grão de cevada seguida da sua dessecação. Os grãos de cevada de baixo valor protéico são as mais adequadas à produção de cervejas, porque quanto maior a quantidade de proteínas, maior o tempo de maltagem e menor a quantidade de amido presente, diminuindo a proporção de açúcares fermentescíveis e aumentando o gasto com o processo de germinação.

Durante a germinação, há o rompimento da parede celular, ou seja, quebra da fibra  $\beta$ -glucana presente na parede celular, facilitando uma boa filtração do mosto. Há também a produção de enzimas e a quebra do amido em cadeias menores, tornando o grão mais solúvel e menos rígido. A etapa de dessecação diminui o teor de umidade para preservar seu conteúdo nutritivo e o sistema enzimático, reduzindo também as chances de contaminação microbiológica (UFRGS, 2019).

O lúpulo é uma planta trepadeira que se desenvolve favoravelmente em climas frios e, por isso, seu cultivo se dá na Europa e América do Norte. Possui o nome científico *Humulus lupulus* e pertence à família *Canabinnaceae*. A planta possui os sexos feminino e masculino, mas as flores da planta fêmea formam glândulas de lupulina que possuem resinas e óleos que conferem aromas sensoriais harmônicos à cerveja. No século XII, passou a ser adicionado durante a etapa de fervura do mosto como flavorizante e como conservante da bebida, uma vez que possui substâncias que inibem a proliferação de bactérias.

Durante a fervura, os alfa-ácidos presentes no lúpulo sofrem isomerização, conferindo o amargor ao líquido e possuem propriedades tensoativas que garantem a estabilidade da espuma da cerveja. Outro fator importante é a presença de substâncias antioxidantes que atuam contra os radicais livres (INSTITUTO DA CERVEJA, 2017).

### 2.2.2 Adjuntos

São considerados adjuntos os cereais aptos para consumo humano, malteados ou não, bem como amido e açúcares de origem vegetal que podem substituir o malte utilizado como matéria-prima no processo, em até 45% em relação ao extrato primitivo (BRASIL, 2009). As matérias-primas podem ser utilizadas para ajustar parâmetros com pequenos custos à

cervejaria, como é o caso dos estabilizantes de espuma, e desenvolver características para as cervejas como, por exemplo, o caramelo utilizado para proporcionar cor, aroma e sabor.

Utiliza-se qualquer fonte de amido como adjunto, desde que haja disponibilidade, valor econômico e teor amiláceo considerável, por isso, *grits* de milho, arroz e trigo são geralmente usados. Porém, há a possibilidade de a enzima presente no malte não fazer a hidrólise do amido presente nestes adjuntos, sendo necessário realizar um processo denominado gelatinização para aumentar a acessibilidade ao amido, que posteriormente passará pelo processo de sacarificação (AMBEV, 2019).

Os xaropes de açúcar são considerados adjuntos líquidos e adicionados ao processo no cozinador do mosto, melhorando o rendimento da etapa de mostura. Isto acontece porque a quantidade de grãos de malte é reduzida, proporcionando menor retenção de bagaço na tina de filtração. Este tipo de adjunto não precisa passar pelo processo de sacarificação e elimina o uso da caldeira de adjunto, reduzindo os custos operacionais e o consumo de energia. A *high maltose* é o nome comercial da glicose de milho e é o xarope mais utilizado nas cervejarias atuais (AMBEV, 2019).

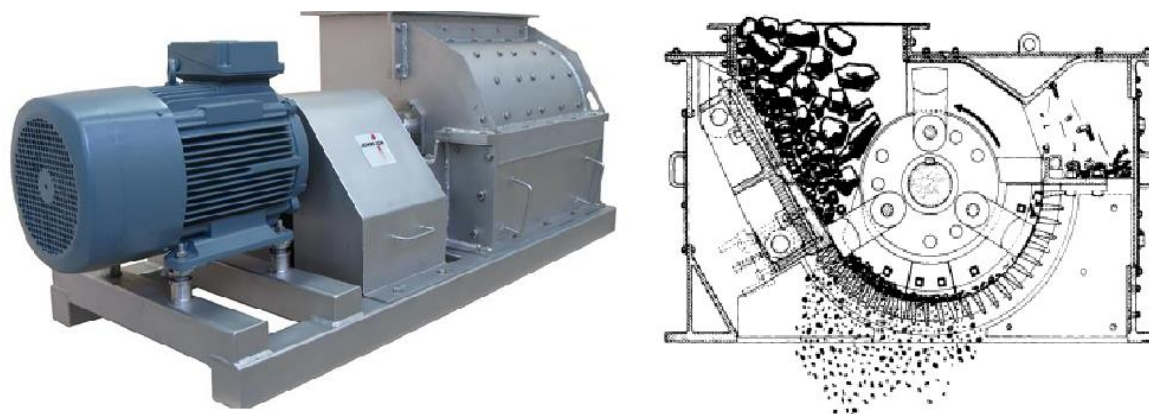
É importante ressaltar que quando na produção da cerveja utilizam-se adjuntos, a etapa de maturação deve ser controlada rigorosamente para que os índices de diacetil e de ésteres (acetato de etila e acetado de amila), formados posteriormente na etapa de fermentação, estejam dentro das especificações.

## 2.3 PRODUÇÃO DO MOSTO

### 2.3.1 Moagem

O equipamento utilizado nesta operação unitária é o moinho de martelo (Figura 1). A etapa da moagem tem como objetivo aumentar a superfície de contato do grão de malte e proporcionar a exposição do endosperma presente no seu interior. O endosperma é constituído basicamente de amido, que passará pelo processo de sacarificação. A parte externa do grão, o pericarpo, protege o grão da contaminação por microrganismos e controla a absorção de água durante a germinação. A casca, formada por lignina, é a parte mais externa do grão. No moinho, a casca e o pericarpo são rompidos e o tamanho da partícula é reduzido (PRIEST; STEWART, 2006).

Figura 1 – Moinho de martelos: visão externa e interna.



Fonte: MERCADO INDUSTRIAL, 2020.

A granulometria deve ser equilibrada conforme os padrões da indústria cervejeira, uma vez que caso a moagem proporcione produtos muito finos, torna-se lenta a filtragem do mosto e, por outro lado, caso obtenha-se produtos de grande espessura, o acesso ao amido é dificultado (AMBEV, 2019).

### 2.3.2 Mosturação

É na etapa da brassagem onde ocorre a mosturação, ou seja, a mistura do malte com a água cervejeira quente, insumos e adjuntos. É nesta etapa que ocorre a extração por infusão do mosto para, posteriormente, ser fermentado. As temperaturas são variadas e trabalhadas a fim de proporcionar um meio capaz de degradar as  $\beta$ -glucanas, as proteínas e o amido, transformando a mistura de grãos em um líquido pouco viscoso que contém açúcares fermentescíveis e fontes nitrogenadas (PICCINI, MORESCO; MUNHOS, 2002).

Os componentes são adicionados na tina de mostura, onde a temperatura é controlada criteriosamente entre 62 e 67°C, o pH pode variar entre 4,0 e 5,5 e, a homogeneização da mistura é feita pelo acionamento dos agitadores. Durante esta etapa, criam-se rampas de temperatura, ou seja, as válvulas de vapor são fechadas, assim como a modulação da agitação a fim de proporcionar o repouso do sistema (PICCINI, MORESCO; MUNHOS, 2002).

Os horários de início e final do repouso devem ser anotados para serem feitos os cálculos dos tempos de repouso e das taxas de elevação de temperatura. Cada receita pode variar as condições destas rampas. As enzimas são ativadas na faixa de temperatura que ocorre a mosturação e o final da mosturação ocorre com a inativação enzimática a, aproximadamente, 76°C (AMBEV, 2019).

### 2.3.3 Filtração

A filtração do mosto tem o objetivo de separar o líquido dos sólidos presentes, resultantes da aglutinação dos resíduos do processo. Estes sólidos formam o bagaço. O equipamento mais utilizado na indústria para esta operação unitária é o filtro prensa (Figura 2), um equipamento de alta robustez capaz de separar sólidos através do bombeamento do fluido que passa pelas placas de polipropileno filtrantes, retendo o sólido e permitindo a drenagem do líquido através de canais presentes nas placas (BOMAX DO BRASIL, 2019).

O resíduo sólido forma camadas espessas nas placas e é posteriormente retirado do equipamento. O bagaço é lavado com água quente, para liberar o extrato aderido a ele. Nesta etapa também se encontra uma grande oportunidade de melhoria do processo, a fim de reduzir o uso de água. Os principais aspectos considerados durante essa etapa são, a turbidez do mosto final e a recuperação de extrato. Estes índices avaliarão se a filtração foi eficiente.

Figura 2 – Filtro prensa: visão externa e interna.



Fonte: Portal Tratamento de água, 2020

### 2.3.4 Fervura

Na etapa de fervura do mosto ocorre a sua cocção a 100°C durante 60 a 90 minutos. A fervura promove a desinfecção do mosto, uma vez que os microrganismos presentes no líquido são eliminados em alta temperatura. Sem essa desinfecção, as leveduras responsáveis pela posterior etapa de fermentação precisariam competir com os microrganismos presentes no mosto para obter os nutrientes necessários para o metabolismo da fermentação. Além

disso, estes microrganismos contaminantes podem conceder a formação de *off-flavors*<sup>3</sup>, alterando o sensorial do produto ou aumentar o grau de turbidez (AMBEV, 2019).

É durante a cocção do mosto, que o lúpulo é adicionado e há a extração dos compostos responsáveis pelo amargor do produto. No final desta etapa, a composição de açúcares do mosto pode ser observada de acordo com o Quadro 1 a seguir.

Quadro 1 – Composição do mosto.

| <b>Carboidrato</b>   | <b>Composição</b> |
|----------------------|-------------------|
| Maltose              | 48% - 52%         |
| Glicose              | 12% - 15%         |
| Frutose              | 4% - 6%           |
| Sacarose             | 4% - 6%           |
| Maltotriose          | 10% - 12%         |
| Maltotetraose        | 2% - 6%           |
| Maltopentaose        | 1% - 2%           |
| Maltohexaose         | 2% - 6%           |
| Dextrinas Superiores | 15% - 20%         |

Fonte: Centro de Tecnologia SENAI, 2018.

Na temperatura de fervura, as proteínas são precipitadas e os componentes voláteis deixam o líquido. Após esta etapa, o mosto segue para a decantação. Um dos equipamentos mais utilizados para este fim é conhecido como *Whirpool* (Figura 3), onde o mosto é bombeado tangencialmente e repousa por um determinado tempo, fazendo com que a coagulação formada na etapa de fervura componha o *trub*<sup>4</sup> quente. Logo depois, o mosto é resfriado em um trocador de calor e aerado com ar comprimido a fim de ter oxigênio para a respiração das leveduras (AMBEV, 2019).

<sup>3</sup> Gosto ou aroma da cerveja que torna a experiência sensorial (paladar ou olfato) desagradável, desequilíbrio entre os 4 ingredientes básicos da cerveja (água, malte, lúpulo e fermento).

<sup>4</sup> Material mucilaginoso formado a partir da junção das proteínas do malte, com os taninos – polifenóis do malte e do lúpulo – e outras partículas que podem estar presentes no mosto.

Figura 3 – Whirpool.

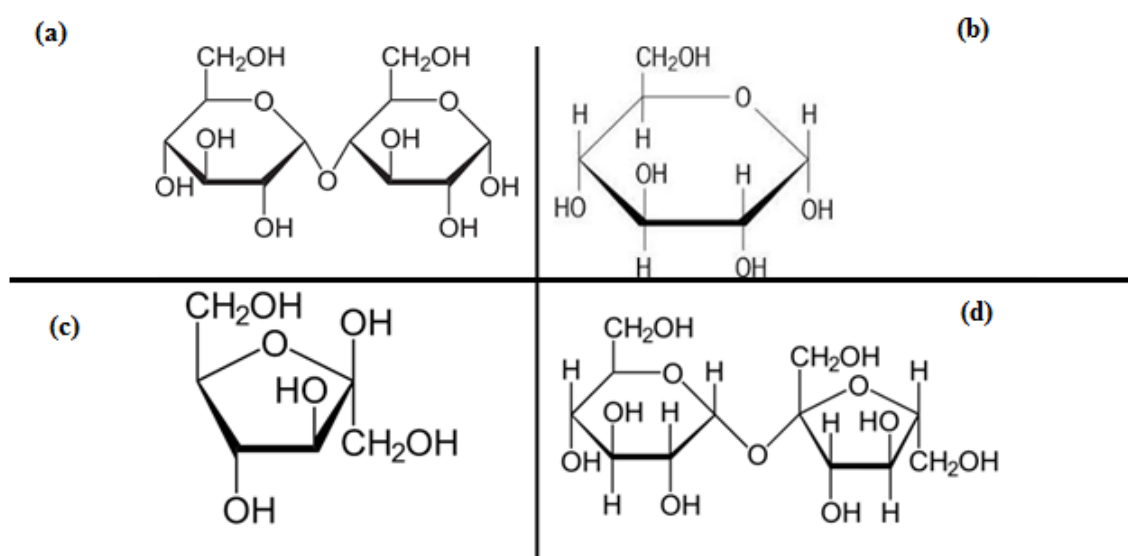


Fonte: ZEGLA, 2019.

## 2.4 FERMENTAÇÃO

A fermentação alcoólica é a transformação dos açúcares fermentáveis do mosto em álcool, gás carbônico e calor. Em relação aos açúcares e carboidratos presentes no mosto, apenas a maltose, glicose, frutose e sacarose são totalmente fermentáveis (Figura 4). A maltotriose é parcialmente fermentável, enquanto os demais não são fermentáveis (CENTRO DE TECNOLOGIA SENAI, 2018).

Figura 4 – Moléculas de (a) maltose, (b) glicose, (c) frutose e (d) sacarose, respectivamente.

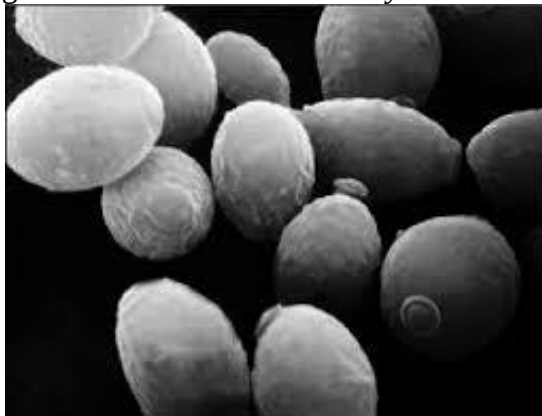


Fonte: ALBERTS, 2006.

Para as leveduras, o objetivo da fermentação é apenas produzir energia para a sua sobrevivência na forma da molécula ATP, adenosina trifosfato. A glicose e a frutose são difundidas para dentro da célula da levedura através da membrana plasmática. Já a sacarose precisa ser decomposta pela enzima invertase que se encontra na célula da levedura. A maltose é transportada para dentro da célula por transportadores específicos, as enzimas maltosepermeases. Uma vez dentro da célula, a maltose é hidrolisada pelas enzimas amiláceas em glicose (NARZIß; BECK, 2009).

As leveduras (Figura 5) são fungos unicelulares que podem possuir diferentes morfologias e cujo tamanho pode variar de 1 a 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro e de 5 a 30  $\mu\text{m}$  de comprimento. Apresentam características de seres eucarióticos e são ricas em sais minerais, carboidratos, vitamina B e em proteína porque possuem membrana citoplasmática lipoprotéica que regula as trocas do interior da célula com o meio externo. Na indústria cervejeira, as leveduras *Saccharomyces cerevisiae* são utilizadas na produção de cervejas ale (cervejas de fermentação de alta) e as *Saccharomyces pastorianus* são usadas na produção de cervejas lager (cervejas de fermentação de baixa) (MEIER-DÖRNBERG *et al.*, 2017).

Figura 5 – Levedura *Saccharomyces cerevisiae*.



Fonte: USP, Departamento de Biologia Celular e Molecular e Bioagentes Patogênicos, 2019.

As primeiras horas da fermentação correspondem à fase de adaptação da levedura ao meio. Posteriormente, a levedura entra na fase de multiplicação que é dependente da aeração do mosto, do teor de açúcares no meio e da temperatura do sistema, gerando grande produção de calor e gás carbônico. A fermentação propriamente dita é um processo de obtenção de energia que ocorre sem a presença de gás oxigênio, portanto, trata-se de uma via de produção de energia anaeróbia e a variável tempo é controlada conforme o teor alcoólico desejado (PICCINI, MORESCO; MUNHOS, 2002).

Embora seja simples realizar a inoculação de leveduras no mosto, ela deve seguir certos passos, com o intuito de reduzir a mortalidade das células de levedura e promover uma fermentação mais eficiente. Usualmente, a inoculação é realizada com 5 a 20 milhões de células de levedura por mililitro de mosto, número que aumenta devido à reprodução (EATON, 2006).

Ao término do processo, a levedura é separada da cerveja, recolhida dos tanques de fermentação e armazenada em uma tina a fim de ser acidificada com ácido, o grau alimentício para evitar contaminações microbiológicas e, posteriormente, ser reutilizada. Quando a viabilidade, vitalidade e porcentagem de células vivas decrescem, o fermento chega ao fim da sua atividade e é levado para a área de subprodutos para ser seco e vendido para o agronegócio como ração animal (AMBEV, 2019).

## 2.5 BAGAÇO

Segundo a NBR 1004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), resíduos sólidos industriais são todos os resíduos no estado sólido ou semissólido resultantes das atividades industriais, cujas características tornem inviáveis seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, que exijam soluções técnicas e economicamente viáveis para sua destinação (ABNT, 2004). Os resíduos sólidos do processo de produção de cerveja são a levedura residual, terra diatomácea, embalagens dos líquidos e bagaço de malte (Figura 6), sendo este último equivalente a 80% (AMBEV, 2019).

Figura 6 – Bagaço de malte de cevada.



Fonte: MFRURAL, 2020.

O bagaço é um material lignocelulósico que, além de fibra e proteína, é composto por cinzas, lipídeos, minerais (menos de 0,5%), vitaminas e aminoácidos. Os materiais lignocelulósicos, gerados da própria atividade agrícola e agroindustrial, possuem o potencial para se tornarem matéria-prima para a produção de etanol. Os materiais lignocelulósicos são constituídos por duas frações polissacarídicas (celulose e hemicelulose) e lignina (Figura 7) (VÁSQUEZ, 2007). A composição química do bagaço de malte pode ser observada no Quadro 2.

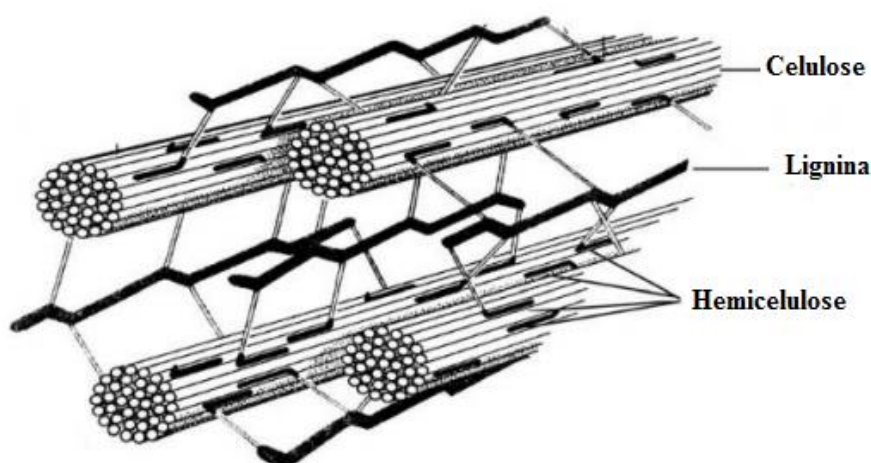
Quadro 2 – Composição química do bagaço de malte.

| Componentes  | % (p/p) |
|--------------|---------|
| Celulose     | 16,78   |
| Hemicelulose | 28,42   |
| Lignina      | 27,78   |
| Cinzas       | 4,6     |
| Grupo acetil | 1,35    |
| Proteínas    | 15,25   |
| Extrativos   | 5,82    |

Fonte: Adaptado de DRAGONE, 2007.

A composição do bagaço de malte varia conforme o tipo de cevada utilizada, tempo de colheita e característica dos adjuntos e do lúpulo utilizados no processo. A casca presente no bagaço contém quantidades consideráveis de sílica e polifenóis presentes no malte. Os principais minerais presentes no bagaço são cálcio, cobalto, cobre, ferro, magnésio, manganês, fósforo, potássio, selênio, sódio e enxofre (MUSSATTO, 2006).

Figura 7 – Arranjo da parede celular vegetal.



Fonte: MURPHY; MCCARTHY, 2005.

A celulose é um polímero linear de glicose com alta massa molecular formado por ligações  $\beta$  -1,4-glicosídica, insolúveis em água. A celobiose, um dissacarídeo, é a unidade repetida no polímero. A celulose quando separada dos outros componentes do material lignocelulósico apresenta alta reatividade devido à sua estrutura química e física. Os grupos hidroxilas da estrutura molecular são suscetíveis às reações de adição, substituição e degradação (SANTOS *et al.*, 2012).

A hemicelulose é um composto polissacarídico constituído por diferentes tipos de açúcares, tais como xilose, manose, glicose e galactose. É associada à celulose nos tecidos vegetais e juntas representam o material carbônico mais abundante nas plantas. Diferente da celulose, a estrutura da hemicelulose não apresenta alta cristalinidade. Dessa forma, são mais suscetíveis a hidrólise química em condições mais amenas (VÁSQUEZ, 2007).

A lignina é um polifenol de unidades fenil-propana (C6 – C3) sendo considerado um dos materiais mais resistentes da natureza. A lignina confere rigidez às fibras lignocelulósicas, sendo associada à celulose e hemicelulose, impedindo a degradação das mesmas (SANTOS *et al.*, 2012).

## 2.6 HIDRÓLISE ENZIMÁTICA

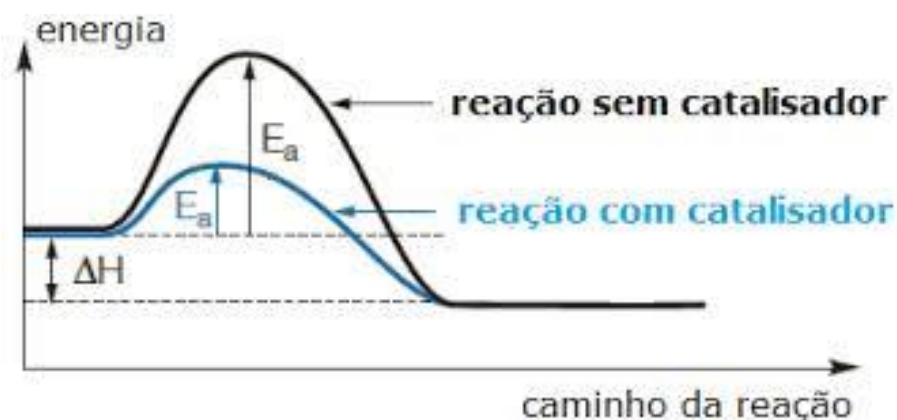
A hidrólise enzimática é a reação química catalisada por uma enzima que quebra uma molécula em partes menores utilizando água, promovendo a degradação sinérgica da biomassa (KOTZ, 2015). A escolha do coquetel enzimático e da relação sólido/líquido influenciam diretamente a eficiência da hidrólise. As matérias amiláceas fermentam após uma hidrólise que se denomina sacarificação. Neste processo, o amido se transforma em açúcar fermentescível.

### 2.6.1 Enzima

A teoria das colisões explica o comportamento da velocidade de uma reação ao definir que as moléculas presentes em uma solução precisam colidir, gerando uma quantidade mínima de energia que permita atingir o estado de transição e iniciar a reação. Sem alterar a quantidade de reagentes e produtos de uma reação, o valor de energia a ser atingido pode ser menor quando em presença de catalisadores, conforme observado na Figura 8. Como principal característica, um catalisador mantém sua forma original ao término de uma reação,

apesar de sofrer alterações estruturais durante as etapas intermediárias (SCHMIDELL *et al.*, 2001).

Figura 8 – Diagrama energia x caminho da reação de uma reação química com e sem catalisador.



Fonte: FOGAÇA, 2020.

Em química, define-se catálise como a presença de catalisadores capazes de promover o aumento da velocidade de uma dada reação. Para que possam se desenvolver, microrganismos devem ser capazes de catalisar e metabolizar reações químicas. Processos químicos podem ser termodinamicamente favoráveis (conteúdo energético dos produtos sendo menor do que o dos reagentes), mas serem muito lentos. Logo, faz-se necessário a catálise para que a reação ocorra dentro de um tempo adequado (NELSON; COX, 2011).

Os catalisadores dos sistemas biológicos são denominados enzimas, que são proteínas de alto poder catalítico e especificidade, mas as suas condições de atuação são mais brandas quando comparadas com os catalisadores sintéticos ou inorgânicos, ou seja, temperatura, pressão e pH mais amenos. De forma geral, como ações das enzimas, pode-se considerar a degradação de moléculas dos nutrientes e a construção de macromoléculas biológicas, conservando e transformando a energia química (NELSON; COX, 2011).

Segundo Schmidell *et al.* (2001), o sítio ativo de uma enzima é o lugar onde ocorre as reações, mais especificamente, que corresponde a uma cavidade com forma definida e abertura na superfície da molécula globular da enzima. Já a molécula sobre a qual a enzima age é denominada substrato, que pode ser considerado como reagente da reação. Normalmente, o sítio ativo retira o substrato da solução, formando um complexo com a enzima. Para ser reconhecida pela enzima como substrato, uma molécula deve ter uma

conformação a ser acomodada no sítio ativo, realizando ligações com os grupos químicos da enzima.

Há uma grande diferença em relação ao tamanho da enzima e do substrato ligado a ela, tendo a enzima um peso molecular muito maior. Além disso, as enzimas são sintetizadas no interior das células onde atuam, encontrando-se neste fato um aspecto favorável que justifica o grande investimento energético necessário para sua síntese e, consequentemente, seu alto custo (SCHMIDELL *et al.*, 2001).

A hidrólise enzimática do material lignocelulósico é realizada por celulasas (endoglucanase e exoglucanase), que quebram-no em celobiose, a qual é, subsequentemente, convertida em duas moléculas de glicose pela  $\beta$ -glucosidase (PALMQVIST e HAHN-HAGERDAL).

É importante ressaltar que alguns fatores podem inibir a ação enzimática. São eles: a presença de inibidores no meio, que se ligam à enzima, impedindo a ligação dela com o substrato; a regulação alostérica, quando compostos produzidos pelo metabolismo ligam-se a uma região da enzima (sítio alostérico), modificando sua estrutura e prejudicando a catálise; a modificação covalente, que consiste na ligação da enzima com um composto químico, mudando a conformação espacial da enzima; os valores extremos de pH e a temperatura muito elevada do meio, que provocam a desnaturação proteica da enzima (STRYER, 1996).

### 2.6.2 Pré-tratamento

Para viabilizar a conversão química e bioquímica dos açúcares extraídos da biomassa com a separação dos componentes principais, faz-se necessário o pré-tratamento da biomassa antes da hidrólise enzimática. Esta etapa é importante para aumentar a disponibilidade desses açúcares ao ataque enzimático.

Tecnologias têm sido estudadas para melhorar o rendimento das reações enzimáticas com o principal objetivo de tornar o sistema financeiramente competitivo. A utilização da biomassa de composição lignocelulósica em processos microbiológicos apresenta dificuldades durante o processo, pois a estrutura cristalina da celulose, altamente resistente à hidrólise e associada à lignina, forma uma barreira física que impede o acesso enzimático ou microbiológico ao substrato (SILVA *et al.*, 2010).

Durante a conversão, o aumento na acessibilidade das enzimas à fração celulósica é devido à remoção da fração hemicelulósica e da remoção parcial da lignina (lignina solúvel em ácido), causando uma pequena abertura na matriz (PEREIRA JUNIOR; COUTO;

SANT'ANNA, 2008). Como desvantagens, as técnicas de pré-tratamento aumentam o custo de operação, podem destruir parte do carboidrato e formar compostos tóxicos aos microrganismos.

Os pré-tratamentos podem ser divididos em quatro tipos: físico, em que há cominuição do material através de fragmentação ou moagem; físico-químico, utilizando-se a técnica de explosão a vapor catalisada ou não; químico, cuja hidrólise ácida é realizada em condições amenas e biológica (MC MILLAN, 1994; SUNG e CHENG, 2002, apud PEREIRA JUNIOR; COUTO; SANT'ANNA, 2008).

A celulose não é suscetível a tratamentos ácidos e térmicos isolados, porém essas técnicas podem ser utilizadas para aumentar a disponibilidade de seus polissacarídeos à ação das enzimas na hidrólise enzimática. A hidrólise enzimática utilizando celulase e hemicelulase é inibida pela estrutura complexa e cristalinidade do material lignocelulósico (WHITE; YOHANNAN; WALKER, 2008). Uma alternativa de pré-tratamento é a utilização de água em altas temperaturas, sem adição de catalisadores, chamada de processo hidrotérmico.

### **2.6.3 Pré-tratamento hidrotérmico**

O principal objetivo do pré-tratamento é a abertura da matriz lignocelulósica, de forma a tornar a celulose mais acessível para a biocatálise. O pré-tratamento hidrotérmico consiste na solubilização da hemicelulose com alta taxa de recuperação de pentoses, principalmente, xilo-oligossacarídeos. Este processo envolve água em alta temperatura (200°C). O pH do meio é ácido, devido ao ácido acético liberado da clivagem dos grupos acetis da cadeia de xiloses, proporcionando o rompimento da estrutura da biomassa lignocelulósica (PEREIRA JUNIOR; COUTO; SANT'ANNA, 2008).

A vantagem do tratamento hidrotérmico é a possibilidade de utilização de toda biomassa no contexto da biorrefinaria, devido à recuperação quase total da lignina e celulose na fração sólida. Além de poder ser aplicado para geração de produto com grau alimentício, devido à baixa formação de produtos tóxicos no meio (CARVALHEIRO et al., 2009).

O processo de tratamento hidrotérmico também pode ser considerado uma autohidrólise das ligações lignocelulósicas na presença dos íons  $H^+$ , gerados a partir da água e dos grupos acéticos liberados da fração hemicelulósica. O íon  $H^+$  produzido pela água ionizada age como catalisador em alta concentração e temperatura, fornecendo um meio

eficaz para a hidrólise ácida. Na reação de hidrólise, ocorre a formação de subprodutos no hidrolisado, como furfural e hidroximetilfurfural (HMF). A presença de furfural em baixa concentração não é impactante e este pode ser removido facilmente do hidrolisado por evaporação (AKIYA; SAVAGE, 2002).

O pré-tratamento hidrotérmico da biomassa é capaz de produzir hidrolisados com baixo nível de inibidores e alto nível de sólidos digestíveis. Como não é necessário o uso de ácido como catalisador, o método não apresenta problemas de corrosão, reciclo e disposição de produtos químicos (CARVALHEIRO et al., 2009).

## 2.7 ECONOMIA CIRCULAR

A economia mundial tem sido construída com base num modelo linear de negócios, que consiste em extrair, transformar, produzir, utilizar e descartar. Às vezes, inclui-se nesse a reciclagem, porém de forma não proveitosa. Esse modelo começa a ser ameaçado devido à disponibilidade limitada de recursos naturais (BRAUNGART *et al.*, 2003).

Projeções futuras indicam incompatibilidade entre os níveis de produção e consumo atuais com a disposição de recursos naturais para as próximas gerações. O tema economia circular destaca-se no meio empresarial e produtivo devido ao cenário de esgotamento de recursos naturais atual, a um maior rigor das legislações e porque associa melhoria do desempenho ambiental à criação e aumento da competitividade dos negócios, incentivando a mudança de modelos lineares de produção para circulares (UNEP, 2011).

O Brasil é referência mundial na produção de cerveja, porém este é um processo que gera resíduos sólidos, que podem ser mais bem aproveitados, aumentando a receita da indústria. A economia circular visa valorizar ao máximo cada insumo e matéria-prima utilizados, preservando ou agregando valor ao longo dos ciclos. O desenvolvimento do setor industrial, ao longo dos anos, ocorreu com a preocupação insuficiente em relação às questões ambientais referentes aos recursos utilizados e aos resíduos gerados. Desta forma, em muitos setores, não há o reaproveitamento adequado, desperdiçando eficiência, uma vez que as plantas são projetadas em ciclos abertos, diminuindo o ciclo de vida dos produtos e componentes (FISKEL, 2009).

O livro-manifesto publicado em 2002 por William McDonough e Michael Braungart tem como título a expressão *Cradle to Cradle*, que significa “do berço ao berço”. Esta publicação desenvolveu conceitos importantes no ramo da economia circular e se tornou uma das obras ecológicas mais influentes mundialmente. Analisando a expressão, considera-se que

uma produção precisa corresponder desde a extração da matéria-prima até o momento do descarte, proporcionando um modelo de negócio que viabiliza a máxima utilização de cada material. A economia circular busca o fechamento de ciclos em diferentes níveis de recuperação, por meio do uso eficiente de recursos, do aproveitamento energético em cada etapa e da máxima utilização dos produtos e subprodutos do processo (WITJES; LOZANO, 2016).

Em muitos casos, para aplicar-se o modelo de economia circular em uma planta, necessita-se de investimentos iniciais, como a compra de equipamentos e a implementação de outras plantas adjuntas. Porém, em longo prazo, trata-se de uma aplicação economicamente vantajosa. Uma empresa que implementa esses conceitos e visa sua produção além do consumo é uma instituição bem vista no mercado, porque oferece uma reeducação social em relação às consequências das atividades humanas ao meio ambiente. O modelo de economia circular permite que empresas atendam a demanda cada vez maior, associada ao crescimento econômico da sociedade com uma produção mais sustentável, havendo a restauração dos materiais e a regeneração de ecossistemas (LETT, 2014).

Segundo o relatório *Delivering the Circular Economy – A toolkit for policymakers*, da *Ellen Mac Arthur Foundation* (2015), a economia circular aborda três princípios:

1. Preservar e ampliar o capital natural, por meio do controle de estoques finitos e o equilíbrio de fluxos de recursos renováveis.
2. Otimizar a produção de recursos, de tal forma que produtos, componentes e materiais circulem com grande utilidade por mais tempo, tanto nos ciclos biológicos e técnicos.
3. Promover a eficácia do sistema ao identificar e excluir as externalidades negativas relacionadas ao uso de recursos, tais como: poluição e mudanças climáticas.

Para que os princípios sejam implantados, faz-se necessário uma mudança de cultura nas empresas, sendo incorporado um pensamento sistêmico de uma produção mais sustentável e sem tanta vulnerabilidade às oscilações dos preços de matérias-primas e de recursos energéticos (SANTIAGO, 2012).

A economia circular vai além da sistemática de reduzir, reutilizar e reciclar, para uma transformação mais profunda e que trará resultados mais eficientes às consequências das atividades humanas ao meio ambiente. Esse modelo de produção é similar ao que acontece na natureza, onde os nutrientes biológicos são recuperados e utilizados pelo meio. O mesmo

aconteceria com os resíduos ao serem valorizados e inseridos em novos processos, tornando-se “nutrientes” técnicos (MOHAN *et al.*, 2016).

Atualmente, a destinação dos resíduos sólidos de uma cervejaria está adequada conforme os conceitos da economia circular, mas as empresas buscam agregar um valor maior ao uso desses resíduos, principalmente do bagaço de malte. A conversão de biomassa residual em novos produtos a partir da reintrodução no ciclo econômico é uma opção que potencializaria o modelo circular (BARROS; NETO, 2007).

## CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

O método de pesquisa utilizado é o de pesquisa descritiva, que não busca resultados em caráter experimental. Esta metodologia estabelece a pesquisa de dados de dois cenários diferentes para um mesmo processo. O cenário 1 demonstra o atual destino do resíduo de bagaço de malte cervejeiro e o cenário 2 descreve um novo modelo de processo onde o resíduo é reinserido no mesmo processo produtivo, atendendo aos preceitos da Economia Circular. Desta forma, identificou-se a quantidade de bagaço de malte cervejeiro que pode ser reutilizado no lugar do adjunto *high maltose* ao invés de ser vendido às empresas terceiras, demonstrando a possibilidade da implementação deste processo.

### 3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Para comparar-se os custos do processo atual com o possível novo processo, separou-se a pesquisa em dois cenários e identificou-se os custos de cada etapa, conforme observado nos tópicos 3.1.1 e 3.1.2.

Para obtenção de resultados confiáveis, este estudo fez uso de referências bibliográficas, laudos de fornecedores, pesquisas relacionadas com os assuntos de hidrólise enzimática de bagaço e relatórios da empresa do ramo cervejeiro. A empresa AMBEV S.A. foi escolhida como base no estudo de caso deste trabalho porque controla 68% do mercado brasileiro de bebidas fermentadas, possuindo grande experiência no processo e um amplo fornecimento de dados. As informações mais importantes fornecidas pela companhia estão descritas a seguir:

- Quantidade de bagaço de malte gerado em cervejaria

Dado obtido a partir do Relatório anual de sustentabilidade da empresa referente ao ano de 2018, uma vez que os relatórios referentes ao ano de 2019 ainda não foram consolidados (AMBEV, 2018).

- Proporção de matéria-prima, bagaço e produto

Geralmente, as cervejarias mantêm a proporção de matéria-prima para determinado volume de líquido produzido em seus processos. A quantidade de matéria-prima está diretamente ligada com o resíduo obtido no processo e com a quantidade de adjunto a ser utilizado. Estes valores podem variar de acordo com a receita do produto, mas em média, trabalha-se com números fixos na hora de realizar os cálculos. Estes valores foram fornecidos pela empresa após consultar os mestres cervejeiros e a operação da etapa da brassagem (AMBEV, 2019).

### 3.2 CENÁRIO 1

Este cenário descreve o processo atual que faz uso do adjunto *high* maltose durante a etapa da brassagem e, depois da filtração do mosto, todo bagaço retirado do filtro prensa é separado e destinado à venda.

#### 3.2.1 Venda do bagaço como resíduo sólido

O preço de venda do bagaço de malte foi estipulado considerando o valor divulgado por empresas intermediárias no site de venda e compra de produtos para agronegócios (MFRURAL, 2019). A receita da venda do bagaço de malte obtido pelas cervejarias foi estimada a partir do preço de venda divulgado por intermediários, sendo considerado o desconto dos custos do frete. Também foram avaliados os custos de secagem do material (AMBEV, 2019).

#### 3.2.2 Custos do uso de adjunto – *high* maltose

Em relação ao uso de adjuntos, mais especificamente o xarope de *high* maltose, o preço de compra foi consultado junto ao fornecedor. Organizou-se as informações obtidas a partir do laudo e nota fiscal emitidos pela empresa produtora de *high* maltose, *Ingredion* Brasil Ingredientes Industriais Ltda (2020).

Em relação ao custo do transporte, cotou-se a média do valor do frete referente ao peso líquido transportado e à distância entre a origem (CEP do fornecedor) e destino (CEP da

cervejaria) (HIVECLOUD, 2020). Utilizou-se também de dados referentes à quantidade de xarope utilizado para um determinado volume de mosto (AMBEV, 2019).

### 3.3 CENÁRIO 2

O cenário 2 apresenta um novo processo dentro da produção de mosto cervejeiro ao introduzir a etapa de hidrólise enzimática. Desta forma, o bagaço retirado do filtro prensa passaria por uma etapa de pré-tratamento hidrotérmico e a celulose seria convertida em glicose, que seria utilizada na etapa de fermentação. Na figura 9 encontra-se o diagrama que elucida estas etapas do processo, demonstrando as frações solúveis e insolúveis obtidas.

Figura 9 – Fluxograma da etapa de hidrólise enzimática.

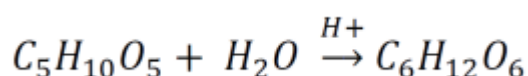


Fonte: Adaptado de SILVA *et al*, 2010.

Para o desenvolvimento desse cenário, utilizou-se dados da hidrólise enzimática pré-existent na literatura referentes ao bagaço de cana, conforme os resultados e fórmulas obtidas no estudo do artigo *Fermentation of cellulosic hydrolysates obtained by enzymatic saccharification of sugarcane bagasse pretreated by hydrothermal processing* (SILVA *et al*, 2010). Os dados da literatura da hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar foram utilizados por ter uma composição mais similar ao bagaço de malte.

### 3.3.1 Hidrólise enzimática

Hidrólise enzimática é a reação química de conversão teórica da celulose em glicose. De acordo com a estequiometria desta reação e da massa molar dessas moléculas, calcula-se o fator de hidrólise. Conforme a reação química expressa abaixo, observa-se que a estequiometria é 1:1 e a relação entre a massa molar da celulose e do monômero de glicose é de 90% (SILVA *et al*, 2010).



A conversão da celulose em glicose é calculada conforme Equação 1 (SILVA *et al*, 2010). Posteriormente, calcula-se a quantidade de glicose gerada pela hidrólise enzimática do bagaço de malte gerado como resíduo anualmente nas cervejarias da empresa.

$$CC = \frac{m_{glicose} \times fh}{m_{inicial} \times yi} \times 100$$

Equação 1: Fator de conversão da glicose em celulose (g/g).

Na qual, CC: rendimento da celulose;  $m_{glicose}$ : massa da glicose no hidrolisado;  $fh$ : fator de hidrólise da celulose;  $m_{inicial}$ : massa seca do material lignocelulósico e  $yi$ : teor de celulose no material lignocelulósico.

Nessa etapa, a fim de consolidar os custos, foi necessário calcular a quantidade de enzima utilizada, conforme metodologia a seguir. A possível receita obtida com a venda do subproduto da reação, a fração insolúvel rica em lignina também foi calculada (ALIBABA,2020).

A enzima utilizada foi a celulase na forma de um concentrado comercial denominado Celluclast 1.5L, produzido por *Trichoderma reesei*. A atividade enzimática do concentrado comercial de celulase é de 15 FPU/g substrato. Uma unidade de FPU (*Filter Paper Unit*) é definida como a quantidade de enzima necessária para liberar 1  $\mu$ mol de glicose (SILVA et al, 2010).

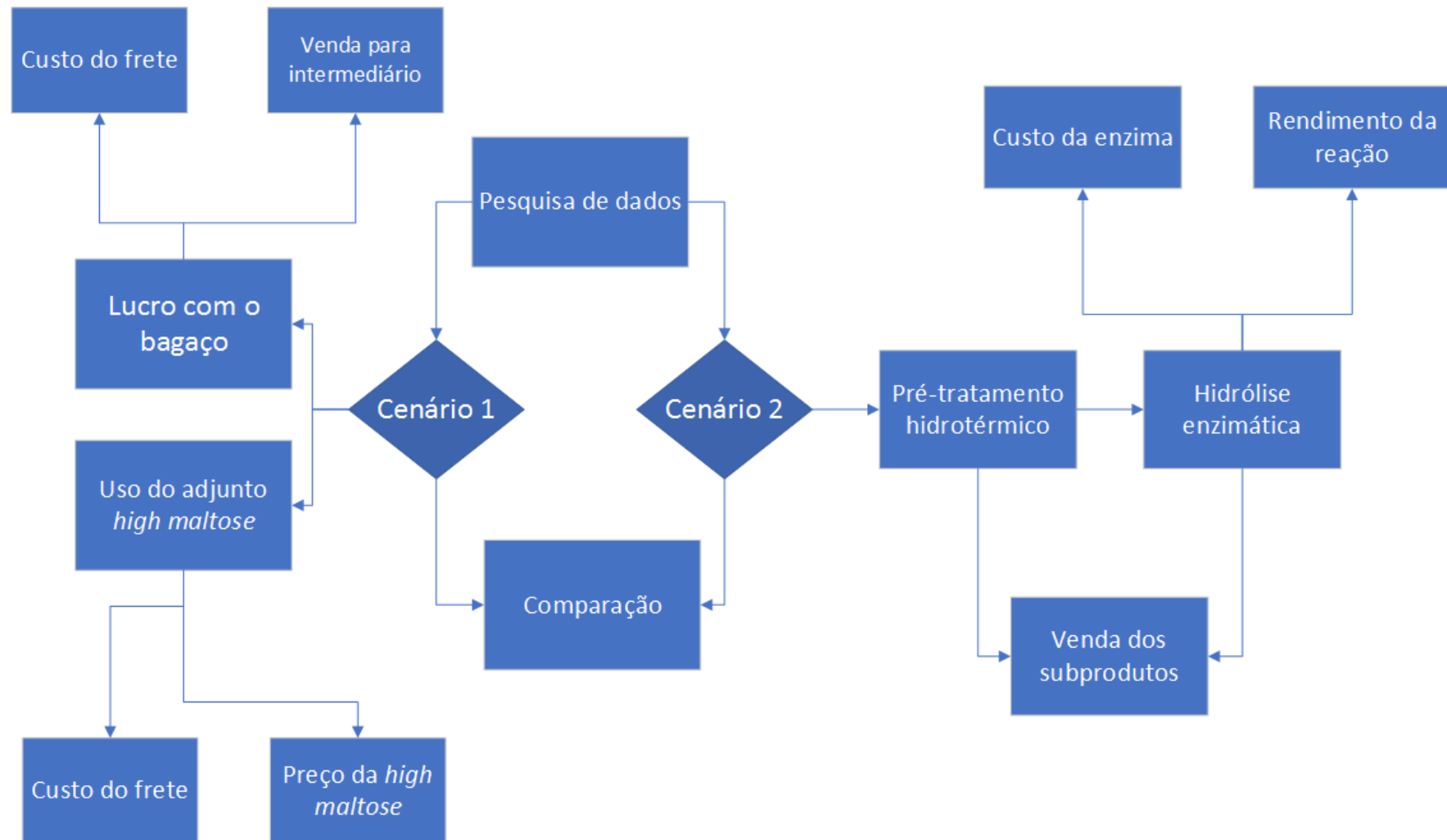
A metodologia para a medida em FPU é baseada no método que consiste na adição de 0,5 mL de enzima, 1 mL de solução tampão (pH 4,8) e 50 mg do papel de filtro *Whatman* nº 1 a um sistema, homogeneizar e incubar a 50°C por 1 hora. Após esse período, é adicionado 3 mL do reagente DNS (ácido dinitrosalicílico) para cessar a reação e ferve-se o sistema por 5 minutos. Posteriormente, quantifica-se a glicose produzida em um espectrofotômetro a 500 nm (EVELEIGH et al, 2009).

### 3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS

Os valores da quantidade de *high* maltose utilizada e da quantidade de bagaço gerado em cada batelada (cenário 1) permitem um posterior comparativo em relação à quantidade de glicose gerada na hidrólise enzimática (cenário 2). Em posse desses valores, pode-se avaliar a viabilidade de cada processo em termos de custos variáveis.

Esta comparação é feita identificando as vantagens e desvantagens de cada cenário dentro do contexto de economia circular. Desta forma, além dos custos, analisa-se a valorização da matéria-prima dos processos e a melhor forma de reaproveitar os resíduos. A metodologia deste estudo está apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma que resume as etapas da metodologia do trabalho.



Fonte: Elaboração própria.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante do levantamento de dados realizado, foi possível observar que nas cervejarias, a produção do mosto é feita em batelada, comumente chamada de fabrico. As informações que correlacionam a quantidade de malte utilizado como matéria-prima, de mosto produzido, de bagaço gerado e de maltose adicionada estão dispostas na Tabela 1. Estas informações foram necessárias para a realização dos cálculos propostos e podem variar de acordo com a receita da cerveja a ser produzida (AMBEV, 2018).

Tabela 1- Informações relacionadas a uma batelada de mosto.

| Fabrico    |            |             |              |              |
|------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| malte (kg) | mosto (hL) | bagaço (kg) | maltose (kg) | cerveja (hL) |
| 18560      | 1400       | 13000       | 13500        | 928,57       |

Fonte: Adaptado de AMBEV, 2018.

A substituição parcial do malte por adjuntos na fabricação de cervejas é permitida por lei, diminuindo os custos de produção em relação ao malte (VENTURINI, 2000), sendo vários os tipos de matérias-primas e adjuntos líquidos autorizados. O principal adjunto é o xarope de high maltose, uma vez que este possui preços competitivos (ENGLMANN; MIEDANER, 2005).

Em massa, as quantidades de malte e *high* maltose são semelhantes para um mesmo fabrico. Esta proporção é definida pela empresa conforme lhe convém, seguindo uma tendência mundial de aumento da quantidade de adjunto líquido por parte das cervejarias. A grande quantidade de maltose utilizada pode estar relacionada com o objetivo de reduzir uma das matérias-primas da cerveja, uma vez que a cevada produzida no Brasil ainda não supre a demanda. Desta forma, cervejas do tipo puro malte são mais caras. (AMBEV, 2019).

Quando comparado com o bagaço de cana de açúcar, o bagaço de malte gerado em cervejaria possui uma proporção muito maior em relação à massa do material de origem. Uma tonelada de cana de açúcar produz, em média, 250 quilogramas de bagaço com 50% de umidade (ADREOLI, 2008). Conforme a Tabela 1, o processo cervejeiro produz uma quantidade em massa bem maior de bagaço de malte, ultrapassando 70% da massa de malte adicionada no início do processo. Isso se dá também devido ao maior teor de umidade.

## 4.1 CENÁRIO 1

### 4.1.1 Resíduo gerado no processo atual

Segundo a Tabela 1, a quantidade de bagaço de malte com 80% de umidade é igual a 13.000 kg para cada 928,57 hL de cerveja produzido. Segundo o Relatório de sustentabilidade (AMBEV, 2018), sabe-se que o volume de cerveja produzido foi de 77.784.200 hL. Logo, a quantidade de bagaço gerado durante um ano foi de 1.088.980.475,35 quilogramas (Tabela 2).

Tabela 2 – Quantidade de bagaço gerada no ano de 2018.

| Período | Cerveja (hL)  | Bagaço (kg)      |
|---------|---------------|------------------|
| Fabrico | 928,57        | 13000,00         |
| Anual   | 77.784.200,00 | 1.088.980.475,35 |

Fonte: Adaptado de AMBEV, 2018.

### 4.1.2 Receita gerada com a venda do bagaço

O bagaço gerado no processo (80% de umidade) é transferido para o silo de bagaço do setor de subproduto. A principal destinação do bagaço úmido é para alimentação animal em fazendas próximas. A proximidade do destino se dá devido ao alto teor de carga orgânica e de água, tornando o material suscetível à contaminação microbiológica e sendo necessário estabilizar o bagaço com o processo de secagem da biomassa, a fim de se atingir destinos mais distantes (CORDEIRO *et al*, 2012).

O processo de secagem foi avaliado em pesquisas anteriores na indústria, concluindo-se que é inviável economicamente, pois necessitaria da venda para fins mais nobres para suprir o gasto energético e de manutenção do secador (AMBEV, 2019). Logo, a receita gerada com o bagaço foi considerada como aquela obtida com a venda do bagaço úmido.

O intermediário cobra um preço médio de R\$ 1500,00 por frete e o caminhão tem capacidade de transportar até 15 toneladas de bagaço. Desta forma, o custo mínimo do transporte é de R\$ 100,00 por tonelada, podendo ser mais caro em casos de o caminhão ser transportado com volume abaixo da sua capacidade total. O preço de mercado do bagaço de

malte cobrado pelo intermediário ao consumidor final é de R\$175,00 por tonelada (MFRURAL, 2019).

O valor de receita gerado para a cervejaria subtraindo o custo do frete foi igual a R\$ 75,00, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Dados de venda de uma tonelada de bagaço.

| <b>Etapas</b>                    | <b>Valor (R\$)</b> |
|----------------------------------|--------------------|
| Venda ao consumidor final        | 175,00             |
| Frete cobrado pelo intermediário | 100,00             |
| Receita da cervejaria            | 75,00              |

Fonte: Adaptado de MFRURAL, 2020; AMBEV, 2018.

Considerou-se a quantidade anual de bagaço gerado como resíduo pela empresa (Tabela 2), o valor de receita da cervejaria por tonelada de bagaço (Tabela 3) e consolidou-se o valor da receita anual da cervejaria com a venda de bagaço de malte, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Receita anual com a venda do bagaço.

| <b>Receita (R\$/ton)</b> | <b>Bagaço (ton)</b> | <b>Total (R\$)</b> |
|--------------------------|---------------------|--------------------|
| 75,00                    | 1.088.980,47535     | 81.673.535,65      |

Fonte: Adaptado de AMBEV, 2018.

#### 4.1.3 Custo do uso de adjunto – *high* maltose

Para determinação do custo total do uso da *high* maltose, considerando o valor do produto cobrado pelo fornecedor e do frete, elaborou-se a Tabela 5:

Tabela 5 – Custo da *high* maltose.

| <b>Empresa</b> | <b>Peso líquido (kg)</b> | <b>Valor (R\$)</b> | <b>Preço (R\$/kg)</b> |
|----------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|
| Fornecedor     |                          | 68.842,76          | 1,92                  |
| Transportadora | 35.850                   | 5000,00            | 0,14                  |
| Total          |                          | 73.842,76          | 2,06                  |

Fonte: Adaptado de *Ingredion* Brasil Ingredientes Industriais Ltda, 2020.

Analisando-se os dados da Tabela 1 referentes à quantidade do adjunto utilizada para um determinado volume de cerveja e da Tabela 5, que fornece o preço do quilograma de *high maltose*, calculou-se o custo anual e por fabrico do uso da *high maltose* no processo, conforme observado na Tabela 6.

Tabela 6 – Custo anual do uso de *high maltose* como adjunto.

| Período | Cerveja (hL)  | High maltose (kg) | Custo da high maltose (R\$) |
|---------|---------------|-------------------|-----------------------------|
| Fabrico | 928,57        | 13.500,00         | 27.810.000,00               |
| Anual   | 77.784.200,00 | 1.130.864.339,79  | 2.329.580.540               |

Fonte: Adaptado de AMBEV, 2018; *Ingredion* Brasil Ingredientes Industriais Ltda, 2020.

## 4.2 CENÁRIO 2

### 4.2.1 Quantidade de bagaço disponível para a reação enzimática

As quantidades de celulose, hemicelulose e lignina presentes no bagaço em base seca foram calculadas (Tabela 7) com base nas informações do Quadro 2, que estima a porcentagem peso de cada componente e da Tabela 2, quantificando a quantidade de bagaço úmido gerado anualmente.

Tabela 7 – Quantidade de componentes do bagaço em base seca por ano.

| Componentes  | Porcentagem (%) | Base seca (ton) |
|--------------|-----------------|-----------------|
| Bagaço       |                 | 217.796,10      |
| Celulose     | 16,78           | 36.546,19       |
| Hemicelulose | 28,42           | 61.897,65       |
| Lignina      | 27,78           | 60.503,76       |

Fonte: Adaptado de AMBEV, 2018; DRAGONE, 2007.

De acordo com Pitarelo (2013), a quantidade de celulose presente na cana de açúcar corresponde a 38,7%. Desta forma, espera-se uma quantidade de glicose menor após a hidrólise enzimática do bagaço de malte quando comparado à hidrólise enzimática do bagaço de cana de açúcar.

#### 4.2.2 Rendimento da reação de hidrólise enzimática

A massa de glicose obtida na reação de hidrólise enzimática do bagaço de malte foi calculada de acordo com a Equação 1 apresentada no item 3.2.2 (SILVA *et al.*, 2010). Os valores de cada parâmetro são explicitados abaixo.

- $CC$ : rendimento da celulose

O valor do rendimento da celulose varia conforme a temperatura e o tempo da etapa de pré-tratamento hidrotérmico. Segundo Silva *et al* (2010), a variável tempo foi fixada em 10 minutos e a temperatura, em 195°C, obtendo-se um valor de rendimento igual a 0,69 g de glicose/g celulose.

- $fh$ : fator de hidrólise da celulose

O fator de hidrólise adotado foi baseado na estequiometria da reação de hidrólise enzimática da celulose ( $C_5H_{10}O_5$ , massa molar= 162 g/mol) em glicose ( $C_6H_{12}O_6$ , massa molar= 180 g/mol) e correspondeu a 0,9.

- $m_{inicial}$ : massa seca do material lignocelulósico

Conforme a Tabela 7, este valor corresponde a 217.796.100 kg.

- $y_i$ : teor de celulose no material lignocelulósico

Conforme o Quadro 2, este valor corresponde a 0,1678.

Como resultado, a massa de glicose no hidrolisado ( $m_{glicose}$ ) correspondeu a 28.035.439,98 kg. Considerando o uso da massa de glicose resultante da reação no lugar do adjunto *high maltose*, multiplicou-se a massa de glicose pelo preço da *high maltose*, que é igual a R\$2,06/ kg (Quadro 7) e obteve-se o valor agregado para este produto igual a R\$ 57.753.006,36.

### 4.2.3 Custo da enzima

O complexo de celulase Celluclast 1.5L possui como especificação a densidade igual a 1,10g/mL (SIGMA-ALDRICH, 2020). Conforme a metodologia, a medida de FPU consiste na adição de 0,5 mL de enzima (EVELEIGH *et al*, 2009), ou seja, 0,55 g de enzima celulase, cuja proporção é de 15 FPU/g de substrato (SILVA *et al*, 2010).

O preço médio da celulase industrial é igual a R\$ 497,69/kg (ALIBABA, 2020). O frete marítimo foi calculado, obtendo-se um valor de R\$ 8.403,94 para cada *container* de capacidade igual a 30.820 kg (WORLD FREIGHT RATES). Estes valores foram compilados segundo a cotação do dólar em 06/06/2020 (BANCO CENTRAL, 2020).

Em posse desses dados, calculou-se a quantidade mássica de enzima necessária para hidrolisar a massa de celulose quantificada no item 4.2.1 e, posteriormente, definiu-se o custo total da quantidade de enzima utilizada, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Custo total da enzima no processo.

| Substrato (kg) | Enzima (kg)  | Frete (R\$)   | Enzima (R\$)  | Custo total (R\$) |
|----------------|--------------|---------------|---------------|-------------------|
| 36.546.190,00  | 20.100.404,5 | 5.480.943,062 | 10.003.770,32 | 15.484.713,38     |

Fonte: Alibaba; World Freight Rates, 2020.

O processo enzimático oferece potencial redução de custos em longo prazo, pois é possível se atender rendimentos próximos dos estequiométricos. No entanto, no estágio de desenvolvimento atual, o processo ainda é economicamente inviável, o que justifica o interesse pelos estudos das variáveis que afetam esse processo (RABELO, 2007).

### 4.2.4 Venda de subproduto

Fornecedores possuem um preço médio de venda igual a R\$ 500,00 por tonelada de lignina (ALIBABA, 2020). A Tabela 7 informa a quantidade de lignina em base seca obtida neste processo. Desta forma, quantificou-se a receita obtida com a venda deste subproduto, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Valor obtido com a venda de lignina.

| Lignina (ton) | Preço (R\$/ton) | Receita (R\$) |
|---------------|-----------------|---------------|
| 60.503,76     | 500             | 30.251.880,00 |

Fonte: Adaptado de Alibaba, 2020.

O potencial valor agregado da lignina foi estudado pela empresa Suzano Papel e Celulose, que passou a investir em uma fábrica específica para processar a lignina. Este fato posicionou a empresa em uma nova fronteira tecnológica da indústria, sendo a primeira da América Latina neste ramo. Antes, a lignina era usada somente para produção de energia, mas atualmente pode ser utilizada para substituir derivados de petróleo com aplicações na indústria civil e moveleira. Desta forma, o portfólio da empresa está em sinergia com os valores de sustentabilidade, agregando valor ao produto com soluções favoráveis ao meio ambiente (ECOLIG, 2020).

#### 4.3 ANÁLISE DE CUSTOS

Observou-se que o rendimento da reação de hidrólise enzimática não foi suficiente para suprir todo o uso de *high* maltose como adjunto. Desta forma, foi necessário calcular o custo do uso complementar da *high* maltose para o Cenário 2. A Tabela 10 resume os custos estudados em cada cenário.

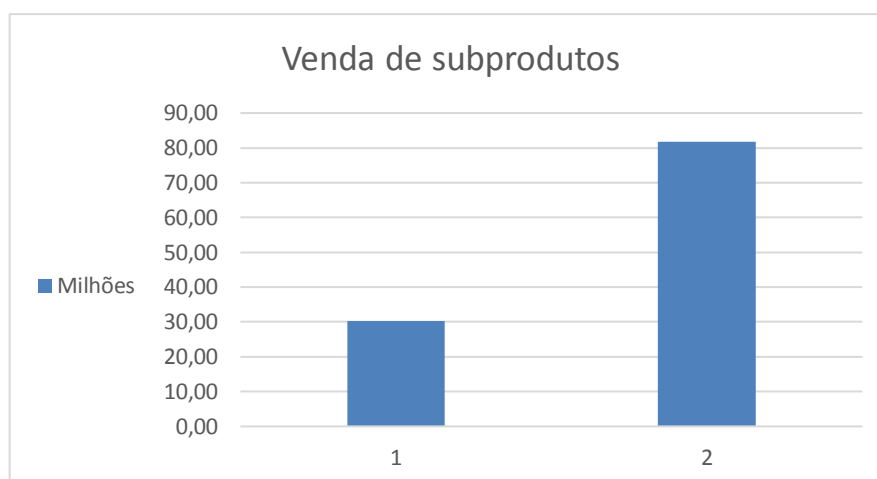
Tabela 10 – Comparação entre os custos dos cenários 1 e 2.

| CENÁRIO                                 |          | Valor (R\$/ano)         |
|-----------------------------------------|----------|-------------------------|
| <b>1</b>                                |          |                         |
| Uso da high maltose                     | -        | 2.329.580.539,97        |
| Venda do bagaço                         | +        | 81.673.535,65           |
| <b>TOTAL</b>                            | <b>=</b> | <b>2.247.907.004,00</b> |
| <b>2</b>                                |          |                         |
| Venda lignina                           | +        | 30.251.880,00           |
| Uso complementar da <i>high</i> maltose | -        | 2.271.827.534,00        |
| Enzima                                  | -        | 15.484.713,38           |
| <b>TOTAL</b>                            |          | <b>2.257.060.367,00</b> |

Fonte: Elaboração própria.

Para maior efeito comparativo, como a quantidade de açúcar utilizada nos dois cenários é a mesma, seja oriunda da hidrólise enzimática ou da compra do adjunto *high* maltose, expôs-se, no Gráfico 1 a seguir, a receita obtida com a venda de subproduto em cada cenário.

Figura 11 – Venda de subproduto nos cenários 1 e 2 em milhões de reais.



Fonte: Elaboração própria.

Em ambos os cenários, apesar do baixo preço da *high* maltose (R\$2,06/kg), os resultados apontam para o uso do adjunto como o maior custo devido à grande quantidade utilizada. Pode-se considerar que a receita para o cenário 2 poderia ser maior caso o rendimento de glicose na reação de hidrólise enzimática fosse superior.

Sabe-se que a composição do bagaço de malte é função de diversos fatores, tais como: variedade da cevada, o tempo de colheita, os cereais utilizados na maltagem, o processo tecnológico empregado na cervejaria, dentre outros (CORDEIRO *et al*, 2012). Estes fatores influenciam a quantidade de celulose presente no bagaço de malte, impactando diretamente no rendimento da reação.

A diferença principal entre o resultado deste estudo e os resultados obtidos nos estudos anteriores que serviram de embasamento científico para este trabalho (SILVA *et al*, 2010) está relacionada com o menor percentual de celulose presente na composição do bagaço de malte quando comparado com o bagaço de cana-de-açúcar.

Em relação ao custo total do cenário 1 (R\$ 2.247.907.004,00) e do cenário 2 (R\$ 2.257.060.367,00), observa-se uma diferença de aproximadamente 9 milhões. Os dados confirmam que o cenário 2 é o mais dispendioso devido, principalmente, ao alto custo da enzima celulase.

O desafio de todos os ramos de pesquisa que utilizam enzima em seu processo é diminuir os custos com a produção. Em relação as pesquisas referentes ao etanol de segunda geração, cientistas da Embrapa Agroenergia e do Centro de Pesquisa Canavieira estão desenvolvendo um coquetel enzimático, CMX. Trata-se de uma mistura de enzimas produzidas a partir de três microrganismos diferentes que mostrou alto desempenho em

desconstruir a biomassa da cana de açúcar. Este coquetel possui alto valor agregado, tecnologia brasileira e poderá ser produzido no próprio ambiente industrial (EMBRAPA, 2020).

#### 4.4 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular associa desenvolvimento econômico ao melhor uso de recursos naturais por meio de novas oportunidades de negócios e da otimização de fabricação de produtos. Para isso, busca-se depender menos de matéria-prima virgem, priorizando insumos mais duráveis, reduzindo perdas produtivas e criando fontes de receitas (LETT, 2014).

Segundo o artigo 9º da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Desta forma, o cenário 2 se adapta à redução e reutilização de resíduos sólidos, uma vez que a quantidade de bagaço de malte obtido no final do processo é menor quando comparada ao cenário 1.

Mesmo que o processo produtivo atual do cenário 1 destine o resíduo sólido de forma responsável, há uma dependência da demanda de ração animal, ou seja, o tratamento do resíduo depende de outro setor totalmente diferente, a indústria pecuária. Outra desvantagem para este modelo é a não responsabilidade da empresa em relação aos procedentes do processo. Por isso, quando o resíduo sólido é tratado dentro da empresa, há a maior garantia de não impactar ao meio ambiente (SANTIAGO, 2012).

Deve-se considerar que o cenário 1 utiliza maior quantidade de matéria-prima, a *high* maltose, havendo o risco de dificuldades de extração da matéria-prima o que traz maior instabilidade e insegurança em relação ao futuro (LETT, 2014).

## CAPÍTULO 5

### 5.1 CONCLUSÃO

De maneira geral, a utilização do bagaço de malte cervejeiro para a produção de glicose é uma alternativa promissora, porém o grande desafio ainda é fazê-la ser economicamente viável. O maior impacto financeiro se dá devido a ainda baixa conversão de celulose em glicose (69%). Logo, quanto mais estudos para otimizar essa etapa, maior será a possibilidade de implementar a hidrólise enzimática no tratamento do resíduo sólido do processo cervejeiro, o bagaço de malte. O custo da enzima também é relevante para a aplicação do cenário 2, impactando diretamente no custo total.

A quantidade de celulose presente no bagaço de malte é considerada baixa quando comparada, por exemplo, com o bagaço de cana de açúcar, impactando diretamente no rendimento de glicose. Logo, como a quantidade de glicose não é suficiente para a demanda, o uso de *high* maltose no cenário 2 ainda é muito alto, sendo o custo desse adjunto semelhante ao custo no cenário 1.

Diante das considerações referentes ao contexto da economia circular, o cenário 1 demonstrou ser o cenário mais viável em relação aos custos, resultando no aproveitamento mais competitivo do subproduto principal da produção de cerveja ao destiná-lo à alimentação animal. Apesar disso, entende-se que deve-se investir em novas tecnologias de forma a ser possível implementar a hidrólise enzimática do bagaço de malte a fim de agregar valor ao resíduo e potencializar o uso dos preceitos da economia circular.

Para resultados mais expressivos e representativos da realidade, seria necessário um estudo experimental que confirmasse a porcentagem de celulose presente especificamente no bagaço de malte da cervejaria e do rendimento desta reação de hidrólise enzimática.

### 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros a avaliação de outros custos relacionados a cada cenário como os custos de implementação de equipamentos, custo energético e custo de mão de obra, devido à dificuldade de encontrar essas informações para realização desse estudo durante o período de elaboração.

Recomenda-se também realizar a caracterização dos componentes do bagaço e a reação de hidrólise enzimática em caráter experimental e em escala laboratorial a fim de obter-se valores mais exatos da porcentagem de celulose no bagaço de malte e da quantidade de glicose obtida na reação.

Sabe-se que a atividade enzimática é inibida pela presença de glicose no meio. A sacarificação e fermentação simultâneas (SSF) é uma forma de evitar a inibição enzimática, uma vez que à medida que a glicose está sendo formada, também está sendo consumida para a produção de etanol, levando a uma conversão maior de celulose (SANTOS *et al*, 2010). Desta forma, propõe-se o estudo e avaliação deste processo em SSF, uma vez que uma conversão maior de celulose em glicose diminuiria a grande quantidade de *high maltose* utilizada no processo.

Em relação ao custo da enzima, sugere-se que os centros de pesquisas das empresas do ramo invistam no estudo da modelagem matemática de enzimas, sendo capazes de calcular como fungos podem produzir mais enzimas do que produzem atualmente em condições normais.

Estudos para produção de cepas de microrganismos fermentadores geneticamente modificados também são interessantes porque podem permitir a hidrólise do bagaço diretamente na etapa da fermentação. Além disto, a obtenção de leveduras capazes de fermentar a xilose também reduziria o uso da *high maltose* no processo, agregando mais valor à hidrólise enzimática.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB INBEV. **Anheuser-Busch InBev reports Second Quarter 2018 and Half Year 2018 Results: Press Release.** Bruxelas (Bélgica). AB INBEV, 2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma brasileira, ABNT NBR 10004. **Resíduos sólidos – classificação**, 2ª edição, de 31 de maio de 2004.

ADREOLI, Claudinei. **Convergência de Agricultura e Energia: I. Produção de biomassa celulósica para biocombustíveis e eletricidade.** Disponível. Economia e Energia, 2008. Disponível em: <  
 [Acesso em: 20/06/2020.](https://ecen.com/eee66/eee66p/convergencia_de_agricultura_e_energia.htm#:~:text=Para%20os%20processos%20industriais%20na,125%20kg%20de%20mat%C3%A9ria%20seca).>)

AKIYA, N.; SAVAGE, P. **Roles of Water for Chemical Reactions in High-Temperature Water.** Chemical Reviews, American Chemical Society [s.l.], v. 102, n. 8, p.2725- 2750. ACS Publications, 2002.

ALBERTS, B. **Molecular biology of the cell.** Garland Science. New York, 2008.

ALIBABA. Enzima celulase. Disponível em: <<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/best-cellulase-price-cellulase-enzyme-industrial-enzyme-cellulase-60026559718.html?spm=a2700.8699010.normalList.17.165d51b53Shnpo>>. Acesso em: 31/05/2020.

ALIBABA. Lignina. Disponível em: <[https://portuguese.alibaba.com/promotion/promotion\\_lignin-promotion-list.html](https://portuguese.alibaba.com/promotion/promotion_lignin-promotion-list.html)>. Acesso em: 06/06/2020.

AMBEV. **Treinamentos técnicos supply.** Módulo 2. Rio de Janeiro, 2019.

AMBEV. **Relatório de Sustentabilidade.** Disponível em: <  
<https://www.ambev.com.br/conteudo/uploads/2019/04/relat%C3%B3rio-de-sustentabilidade-ambev-2018.pdf>>. Acesso em: 06/12/2019.

BANCO CENTRAL. Cotação. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/>>. Acesso em: 06/06/2020.

BARROS, G.S; NETO, R.M. **A “velha” e a nova bioeconomia: Desafios para o desenvolvimento sustentável.** Cepea, 2007.

BRASIL. Decreto No 6.871, de 4 de junho de 2009. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 5 de junho de 2009. Seção 1, 20 p. 2009.

BRASIL, Legislação de bebidas. Decreto nº 2.314, de 4 de setembro de 1997. Legislação Cerveja. Publicado no D.O.U. de 05/09/1997. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/barreirastecnicas/ExigenciasTecnicas/documentos/BRA/DEC00002314.pdf>>. Acesso em 08/08/2019.

BRASIL, Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº 12.305/2010, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: <

BOMAX DO BRASIL. Filtros Prensa Prensamax, 2019. Disponível em: <<https://www.bomax.com.br/produtos/item/filtros-prensa-prensamax>>. Acesso em: 12/09/2019.

BRAUNGART, M; MC DONOUGH, W.; ANASTAS, P.T.; ZIMMERMAN, J. B. **Applying the principles engineering of green cradle-to-cradle design**. Environmental Science and Technology, 2003.

CARVALHEIRO, F. *et al.* **Hydrothermal processing of hardwoods and agro-industrial residues: evaluation of xylo-oligosaccharides production**. NWBC. 96–102 p., Finlândia. Setembro de 2009.

CENTRO DE TECNOLOGIA SENAI. Agraria.com.br, 2018. Disponível em: <[http://www.agraria.com.br/extranet/arquivos/agromalte\\_arquivo/mod\\_3\\_fermentacao\\_e\\_maturacao.pdf](http://www.agraria.com.br/extranet/arquivos/agromalte_arquivo/mod_3_fermentacao_e_maturacao.pdf)>. Acesso em: 12/09/2019.

CERVBRASIL – Associação Brasileira da Indústria da Cerveja. Disponível em: <[http://www.cervbrasil.org.br/novo\\_site/a-cervbrasil/](http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/a-cervbrasil/)>. Acesso em: 06/09/2019.

CERVESIA – Tecnologia Cervejeira. Disponível em: <<https://www.cervesia.com.br/artigos-tecnicos/cerveja/historia-da-cerveja.html>>. Acesso em 10/09/2020.

CORDEIRO, L. *et al.* **Caracterização do bagaço de malte oriundo de cervejarias**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável. v.7, n.3, p. 20-22. Mossoró, 2012.

DALLACORT, G. Curso de formação operador cervejeiro - Brassagem. 3. ed. Lages: AMBEV, 2013.

DRAGONE, G.; SILVA, J. B. A. Cerveja, in: VENTURINI FILHO, W. G. **Bebidas Alcoólicas: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Blücher, 2010.

DRAGONE, S.I.M. **Aproveitamento Integral de subproduto da indústria cervejeira em processos químicos e biotecnológicos**. Curso de Biotecnologia Industrial, Escola de Engenharia de Lorena. Universidade de São Paulo, Lorena, 2007.

EATON, Brian. **An Overview of Brewing**. In: PRIEST, G. Fergus; STEWART, G. Graham. Handbook of Brewing. New York, USA: Ed. Taylor & Francis Group, 2 ed, 2006. Cap. 3, p. 82 – 87.

ECOLIG. **Da natureza para a inovação.** Disponível em: <<https://www.suzanoecolig.com.br/ecolig.php>>. Acesso em: 22/06/2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Delivering the circular economy – A toolkit for Policymakers**, 2015. Disponível em: <[https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation\\_PolicymakerToolkit.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_PolicymakerToolkit.pdf)>. Acesso em: 07/09/2019.

EMBRAPA. **Mistura de enzimas mostrou alto desempenho para gerar etanol a partir do bagaço de cana.** Agroenergia, Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/52639673/mistura-de-enzimas-mostrou-alto-desempenho-para-gerar-etanol-a-partir-de-bagaco-de-cana>>. Acesso em: 22/06/2020.

ENGLMANN, J.; MIEDANER, H. Métodos de producción de cerveza: materias primas y aditivos de uso corriente. **Brewing and Beverage Industry Español**, Mindelheim, n.3, p.10-16, 2005.

EVELEIGH, D.E; MANDELS, M; ANDREOTTI, R; ROCHE, C. **Measurement of saccharifying cellulase.** Biotechnology for Biofuels, 2009.

FISKEL, J. **Design for environment: a guide for sustainable product development.** 2<sup>nd</sup> edition. McGrawHill, New York, 2009.

FOGAÇA, J.R. **Influência dos catalisadores na velocidade das reações.** Mundo Educação. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/influencia-dos-catalisadores-na-velocidade-das-reacoes.htm>>. Acesso em 09/01/2020.

HIVECLOUD. Cálculo de frete online para milhares de transportadoras. Disponível em: <<https://fretelink.hivecloud.com.br/>>. Acesso em: 15/01/2020.

INGREDION BRASIL INGREDIENTES INDUSTRIAIS. Produto High Maltose. Mogi-Guaçu, São Paulo, 2020.

INSTITUTO DA CERVEJA. Curso profissional de sommelier de cervejas, 2017.

KOTZ, J. C. **Química Geral e Reações Químicas.** Volume 2, 9ª edição, Cengage Learning, 2015.

LARA, Carlos. **O lúpulo e suas propriedades: aprenda como você pode explorá-las.** Homini Lúpulo, 2018. Disponível em: <<https://www.hominilupulo.com.br/cervejas-caseiras/lupulo-e-propriedades/>>. Acesso em: 08/09/2019.

LETT, Lina A. **Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular.** Revista Argentina de Microbiología, Buenos Aires, v. 46, n. 1, p.1-2, mar. 2014.

MEIER-DÖRNBERG, T. et al. **The Importance of a Comparative Characterization of Saccharomyces Cerevisiae and Saccharomyces Pastorianus Strains for Brewing.** MDPI: Fermentation. Suíça: 2017.

MFRURAL. Bagaço de cevada. Disponível em: <<https://www.mfrural.com.br/detalhe/263318/bagaco-de-cevada>>. Acesso em: 15/09/2019.

MEUSSDOERFFER, F.G. **A Comprehensive History of Beer Brewing**. Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets. Weinheim, 2009.

MOHAN, S. V.; NIKHIL, G. N.; CHIRANJEEVI, P.; REDDY, C. N.; ROHIT, M. V.; KUMAR, A. N.; SARKAR, O. **Waste biorefinery models towards sustainable circular bioeconomy: critical review and future perspectives**. Bioresource technology, v. 215, p. 2-12, 2016.

MURPHY, J.D.; MC CARTHY, K. **Ethanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in Ireland**. Applied Energy, 2005.

MUSSATTO, S. I.; DRAGONE, G.; ROBERTO, I. C. **Brewers' spent grain: Generation, characteristics and potential applications**. Journal of Cereal Science, 2006.

NARZIß, Ludwig; BACK, Werner. **Die Bierbrauerei: Band2: Die Technologie der Würzebereitung**. Weinheim, Alemanha: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2009.

NELSON, D.L.; COX, M. M. **Princípios de Bioquímica de Lehninger**. 5º Ed. Porto Alegre: Artmed, 2011.

PALMQVIST, E.; HAHN-HAGERDAL, B.; **Bioresour. Technol.** 2000, 74, 17

P&Q ENGENHARIA JR. **Produção de cerveja: etapa, características e a química da cerveja**, 2016. Disponível em: <<https://peqengenhariajr.com.br/processo-de-producao-de-cerveja/>>. Acesso em 10/09/2019.

PEREIRA JR, N., COUTO, M. A. P. G., e SANT'ANNA L. M. M. **Series on biotechnology: Biomass of Lignocelulosic Composition for fuel ethanol production within the context of biorefinery**. Escola de Química/UFRJ. v.2, 1ª edição, 47 p. Rio de Janeiro, 2008.

PICCINI, A.R; MORESCO, C.; MUNHOS, L. **Características Gerais**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/alimentus1/feira/prcerea/cerveja/defini.htm>>. Acesso em: 10/09/2019.

PITARELO, A. P. **Produção de etanol celulósico a partir do bagaço de cana pré-tratado por explosão a vapor**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2013.

PRIEST F.G, e STEWART G.G. **Handbook of Brewing**. CRC/ Taylor & Francis, 2006. 2ª edição. Flórida, 2006.

RABELO, S.C. **Avaliação do 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.

SANTIAGO, L. S.; DIAS, S, M. F. **Matriz de indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos**. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, 2012.

SANTOS, F.A. *et al.* **Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol.** Química Nova, Viçosa, v. 35, n. 5, 1004-1010 p. Janeiro de 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/qn/v35n5/a25v35n5.pdf>>. Acesso em 09/06/2020.

SANTOS, J.R.A *et al.* **Comparação entre processos em SHF e em SSF de bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol por *Saccharomyces cerevisiae*.** Química Nova, São Paulo, v.33, n.4. São Paulo, 2010.

SCHMIDELL, Willibaldo; BORZANI, Walter; LIMA, Urgel de Almeida; AQUARONE, Eugênio. **Biotecnologia industrial: Processos fermentativos e enzimáticos (volume 3).** São Paulo: Blucher, 2001.

SIGMA-ALDRICH. Cellulase from *Trichoderma reesei*. Disponível em: <[https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/c2730?lang=pt&region=BR&gclid=Cj0KCQjwiYL3BRDVARIsAF9E4GdqRim2GBbkpmuGASuHe52cYMZGM7s-bJZr7A\\_jxVvFmV-YQaOTp-saAqWUEALw\\_wcB](https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/c2730?lang=pt&region=BR&gclid=Cj0KCQjwiYL3BRDVARIsAF9E4GdqRim2GBbkpmuGASuHe52cYMZGM7s-bJZr7A_jxVvFmV-YQaOTp-saAqWUEALw_wcB)>. Acesso em: 31/05/2020.

SILVA V.F.N. *et al.* **Fermentation of cellulosic hydrolysates obtained by enzymatic saccharification of sugarcane bagasse pretreated by hydrothermal processing.** Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. v. 38, nº 7, 809 – 817 p. 2011.

SINDICERV – Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja. Disponível em: <<https://www.sindicerv.com.br/o-setor-em-numeros/>>. Acesso em 08/09/2020.

STRYER, L. **Bioquímica.** 4. Ed. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Koogan. 1996. 1000p.

UNEP. United Nations Environment Programme. International Resource Panel; United Nations Environment Programme. Sustainable Consumption; Production Branch. **Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth.** UNEP/Earthprint, 2011.

USP. **Departamento de Biologia Celular e Molecular e Bioagentes Patogênicos,** 2019. Disponível em: <<http://rbp.fmrp.usp.br/mestrado-em-genetica-molecular-de-leveduras-com-bolsa-da-fapesp/>>. Acesso em: 14/09/2020.

VÁSQUEZ, M. P. **Desenvolvimento de processo de hidrólise enzimática e fermentação simultâneas para a produção de etanol a partir de bagaço de cana-de-açúcar.** 2007. 205 Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

VENTURINI FILHO, W.G. **Tecnologia de cerveja.** Jaboticabal: Funep, 2000. 83p.

WHITE, J. S.; YOHANNAN, B. K. e WALKER, G. M. **Bioconversion of brewer's spent grains to bioethanol.** FEMS Yeast Research, v. 8, n. 7, 1175–1184 p. 2008.

WITJES, S.; LOZANO, R. **Towards a more Circular Economy: Proposing a framework linking sustainable public procurement and sustainable business models.** Resources, Conservation and Recycling, v. 112, p. 37-44, 2016.

WORLD FREIGHT RATES. Freight Calculator. Disponível em: <<https://www.worldfreightrates.com/en/freight>>. Acesso em: 31/05/2020.

ZEGLA – Soluções em tecnologia. Whirlpool. Rio Grande do Sul, 2019. Disponível em: <<http://www.zegla.com.br/produto/whirlpool/>>. Acesso em: 14/09/2019.



Datas e horários baseados no fuso horário (GMT -3:00) em Brasília, Brasil  
**Sincronizado com o NTP.br e Observatório Nacional (ON)**  
Certificado de assinatura gerado em 14/07/2020 às 13:14:22 (GMT -3:00)

TCC - Marcelly .pdf

 ID única do documento: #dba6c4e9-9b86-4398-a957-591f8788a885

Hash do documento original (SHA256): fe77d367da565d40bb2e21a37b5cb5944fe71d038658e108148bf1c0e02dd5e0

Este Log é exclusivo ao documento número #dba6c4e9-9b86-4398-a957-591f8788a885 e deve ser considerado parte do mesmo, com os efeitos prescritos nos Termos de Uso.

## Assinaturas (4)

- ✓ **Marta Cristina Picardo (Participante)**  
Assinou em 14/07/2020 às 13:31:27 (GMT -3:00)
- ✓ **Michelle Reich (Participante)**  
Assinou em 14/07/2020 às 14:03:56 (GMT -3:00)
- ✓ **Victória Emília Neves Santos (Participante)**  
Assinou em 15/07/2020 às 11:28:05 (GMT -3:00)
- ✓ **Héctor Napoleão Cozendey da Silva, (Participante)**  
Assinou em 15/07/2020 às 13:23:40 (GMT -3:00)

## Histórico completo

### Data e hora

14/07/2020 às 13:31:27  
(GMT -3:00)

14/07/2020 às 13:14:23  
(GMT -3:00)

14/07/2020 às 14:03:56  
(GMT -3:00)

### Evento

Marta Cristina Picardo E-mail mcpicardo@cetiqt.senai.br, IP: 201.17.95.233 assinou.

Marcelly Ximenes solicitou as assinaturas.

Michelle Reich E-mail mreich@cetiqt.senai.br, IP: 201.17.74.169 assinou.



**Data e hora**

**Evento**

15/07/2020 às 11:28:05  
(GMT -3:00)

Victória Emília Neves Santos E-mail VESantos@cetiqt.senai.br, IP:  
201.17.111.121 assinou.

15/07/2020 às 13:23:40  
(GMT -3:00)

Héctor Napoleão Cozendey da Silva, E-mail HNSilva@cetiqt.senai.br, IP:  
186.223.166.216 assinou.