

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ENGENHARIA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

SILVIO MEIRA SILVA

Estudo de viabilidade técnica e econômica do aproveitamento
energético do biogás proveniente do bagaço de malte produzido em
cervejaria

São Paulo

2019

SILVIO MEIRA SILVA

Estudo de viabilidade técnica e econômica do aproveitamento energético do biogás proveniente do bagaço de malte produzido em cervejaria

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

São Paulo

2019

SILVIO MEIRA SILVA

Estudo de viabilidade técnica e econômica do aproveitamento energético do biogás proveniente do bagaço de malte produzido em cervejaria

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de concentração: Biomassa e Energia.

Orientadora: Prof.^a Dra. Vanessa Pecora Garcilasso.

São Paulo

2019

Catálogo-na-publicação

Silva, Silvio Meira

Estudo de viabilidade técnica e econômica do aproveitamento energético do biogás proveniente do bagaço de malte produzido em cervejaria / S. M. Silva -- São Paulo, 2019.

108p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Biogás 2.Bagaço de malte 3.Estudo de viabilidade 4.Cervejaria
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos àqueles que sempre contribuem para que eu possa atingir todos os objetivos aos quais me proponho.

Aos meus pais, Lair e Carminha por serem os pilares de minha existência, que não mediram esforços e sempre orientaram para seguir o caminho do bem e dando exemplo irrefutável da prática do amor incondicional.

Ao meu irmão Sérgio, sempre amigo e disponível para uma palavra de carinho um conforto e orientação. À minha cunhada Luciana e sobrinhos Matheus e Vinícius, que fazem parte de uma família sensacional.

Aos amigos da “Família Palestina”: João Vitor, Fernanda, Gilson Dutra, Iara, Marquinho, Sophia e Celinho que sempre proporcionam momentos de descontração e alegria.

“In memoriam” ao Odilon e Júnior que estão felizes por mim, onde quer que estejam.

E ao motivo principal de todas as coisas em minha vida. Rosi, Manoel e Gabriel, meus amores e pelos quais existo.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que nos permite estar aqui para desfrutar momentos de alegria e felicidade como este.

À Universidade de São Paulo por disponibilizar nosso curso.

Aos professores do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética, que dedicaram um valioso tempo para nos proporcionar o conhecimento e nos preparar para novos desafios na transição da matriz energética mundial.

Aos amigos da 15^a. Turma do PECE: Dirlei, Carlão, Lucas, Serjão, Figueiredo, Paulinho, Rodrigo, Kelly, Marcelo que sempre me permitiram fazer parte dos grupos de trabalhos e a todos os outros colegas de turma que proporcionaram momentos agradáveis de convivência nas sextas e sábados.

Ao amigo Elmar Offenbacher, da BDI, por sua disponibilidade em ajudar nas e informações acerca do processo de biodigestão anaeróbica em reatores CSTR.

Aos amigos e companheiros da Cervejaria AMBEV que há 13 anos contribuem para um desenvolvimento contínuo e aprendizado constante na carreira.

Em especial à Professora Doutora Vanessa Garcilasso que gentilmente aceitou ser minha Orientadora, o que possibilitou a conclusão deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho aborda a possibilidade de utilização de resíduos de cervejaria para a geração e utilização de biogás como fonte renovável de energia. Esta possibilidade decorre da preocupação das empresas com a atuação responsável e em aumentar a sustentabilidade em seus processos para atender a uma demanda cada vez mais crescente por bens de consumo e alimentos, o que enseja o aumento do consumo de energia que é suprido na maioria das vezes com o uso de combustível fóssil. É neste cenário, que a indústria da cerveja, que é uma consumidora extensiva de água e energia, se destaca com ações cujo objetivo é diminuir a dependência de combustíveis renováveis. Neste viés, a utilização dos subprodutos do processo torna-se uma alternativa interessante para a geração de energia renovável. O bagaço de malte, que é o subproduto mais abundante no processo, pode ser utilizado como substrato no processo de biodigestão anaeróbica. O estudo envolveu a análise de dados de produção de bagaço de malte de uma cervejaria da região Sudeste do Brasil e a projeção de geração de biogás para ser aproveitado no processo após tratamento adequado. Foram analisados dois cenários, um com a geração de energia elétrica e outro com a substituição do gás natural para a queima em caldeiras. Os dados do projeto foram levantados a partir de informações de empresas especializadas e de levantamentos de campo. Os resultados econômicos foram avaliados utilizando as ferramentas padrão para estudos de viabilidade, o pay back, a TIR e o VPL. Analisando os resultados, conclui-se que existe viabilidade para ambas aplicações, num cenário mais positivo para a substituição do gás natural, por fato deste ter a tarifa mais cara em comparação com a energia elétrica. Como sugestão para trabalhos futuros, a produção de biometano e a recuperação de gás carbônico para o uso na produção da cerveja mostraram-se alternativas interessantes.

Palavras-chave: biogás, bagaço de malte, estudo de viabilidade, cervejaria.

ABSTRACT

This paper discusses the possibility of using brewery waste for the generation and use of biogas as a renewable source of energy. This possibility stems from the companies concern with responsible action and to increase the sustainability of their processes to meet an increasing demand for consumer goods and food, which results in the increase of energy consumption that is supplied in most of the companies. times with the use of fossil fuel. It is in this scenario that the beer industry, which is an extensive consumer of water and energy, stands out with actions aimed at reducing its dependence on renewable fuels. In this regard, the use of process by-products becomes an interesting alternative for renewable energy generation. Malt bagasse, which is the most abundant by-product in the process, can be used as a substrate in the anaerobic digestion process. The study involved the analysis of malt bagasse production data from a brewery in the Southeast region of Brazil and the projection of biogas generation to be used in the process after proper treatment. Two scenarios were analyzed, one with the generation of electricity and the other with the replacement of natural gas for boiler burning. Project data were collected from expert company information and field surveys. The economic results were evaluated using the standard tools for feasibility studies, pay back, IRR and NPV. Analyzing the results, it is concluded that there is viability for both applications, in a more positive scenario for the replacement of natural gas, because it has the most expensive tariff compared to electricity. As a suggestion for future work, biomethane production and carbon dioxide recovery for use in beer production proved to be interesting alternatives.

Keywords: biogas, malt bagasse, feasibility study, brewery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Escultura de Ninkasi a Deusa Suméria da cerveja.....	22
Figura 3.2: Tabuleta Suméria que continha o “Hino a Ninkasi”.....	22
Figura 3.3: Escultura de Ceres a Deusa da agricultura.....	24
Figura 3.4: A monja Hildegarda de Binguen.....	25
Figura 3.5: Joseph Groll.....	26
Figura 3.6: Luis Pasteur.....	27
Figura 3.8: Cevada.....	30
Figura 3.9: Etapas do processo cervejeiro.....	31
Figura 3.10: Diagrama do processo de fabricação da cerveja.....	32
Figura 3.11: Cevada de duas e seis fileiras.....	33
Figura 3.12: Maltaria Floor Malting.....	34
Figura 3.13: Os três processos utilizados na malteação.....	35
Figura 3.14: Vista interna do tanque de maceração.....	36
Figura 3.15: Grão de cevada germinado.....	37
Figura 3.16: Germinador de malte.....	37
Figura 3.17: Modelos de moinhos de malte.....	39
Figura 3.18: Curva de mostura.....	41
Figura 3.19: Sala com tina de mostura com aquecimento direto.....	43
Figura 3.20: Tina de mostura.....	44
Figura 3.21: Tanques fermentadores.....	48
Figura 3.22: Pasteurizador tipo flash.....	54
Figura 3.23: Pasteurizador tipo túnel.....	55
Figura 3.24: Trocador de calor de pasteurizador.....	55
Figura 3.25: Bomba de recirculação de água do pasteurizador.....	56
Figura 3.26: Sistema de esguichamento no pasteurizador.....	56
Figura 3.27: Esguicho tipo tubo.....	57
Figura 3.28: Esguicho tipo peneira.....	57
Figura 4.1: Gradeamento.....	61
Figura 4.2: Caixa de areia.....	61
Figura 4.3: Operação de peneiramento.....	62
Figura 4.4: Reator anaeróbico tipo Circulação Interna.....	63
Figura 4.5: Tanque de aeração.....	67

Figura 4.6: Decantador Secundário.....	68
Figura 4.7: Adensador de lodo.....	69
Figura 4.8: Decantador Centrífugo.....	70
Figura 4.9: Lodo desidratado.....	70
Figura 4.10: Planta para a secagem e medição do biogás.....	71
Figura 4.11: Sistema de regulação de pressão do biogás.....	72
Figura 4.12: Microturbina Caspstone.....	72
Figura 4.13: Planta de processamento de biogás para 1.250 Nm ³ /h.....	73
Figura 5.1: Bagaço de malte.....	75
Figura 5.2: Esquema básico de um reator CSTR.....	76
Figura 5.3: Sistema de alimentação de substrato sólido.....	77
Figura 5.4: Sistema de dosagem de substrato sólido – Rotacrex 750 [®]	78
Figura 5.5: Sistema de alimentação de substrato líquido com bomba parafuso....	78
Figura 5.6: Sistema de agitação com motor submersível.....	79
Figura 5.7: Sistema de agitação com motor externo e eixo vertical.....	79
Figura 6.1: Placa de Petri com 50g de bagaço úmido.....	82
Figura 6.2: Placa de Petri no interior da estufa a 103°C.....	83
Figura 6.3: Placa com bagaço de malte desidratado e peso da placa de Petri.....	83
Figura 6.4: Etapas do processo de biodigestão do bagaço de malte.....	84
Figura 6.5: Vaso para instalação do Sulfatreat [®]	86
Figura 6.6: Motor Jenbacher J 316 GS.....	91
Figura 6.7: Caldeira Miura SX-H300 SG.....	93
Figura 6.8: Decanter centrífugo Perialise [®]	94
Figura 6.9: Secador rotativo com ensacadeira.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Lista de microrganismos e suas respectivas UP's.....	53
Tabela 5.1: Composição química do bagaço.....	75
Tabela 6.1: Dados de produção de cerveja em 2018 na cervejaria estudada.....	81
Tabela 6.2: Geração de bagaço de malte em 2018 na cervejaria estudada.....	81
Tabela 6.3: Cálculo do teor de matéria seca do bagaço de malte.....	82
Tabela 6.4: Entrada e saídas da planta de biogás da Cervejaria Gösser.....	83
Tabela 6.5: Composição do substrato.....	87
Tabela 6.6: Saídas da usina de biogás.....	87
Tabela 6.7: Consumo da usina de biogás.....	87
Tabela 6.8: Consumos de energia dos equipamentos da usina de biogás.....	88
Tabela 6.9: Equipamentos que serão instalados na usina de biogás.....	88
Tabela 6.10: Composição do biogás obtido na biodigestão anaeróbica do bagaço de malte.....	89
Tabela 6.11: Custos para a implantação do projeto.....	95
Tabela 6.12: Saving anual com a produção de energia elétrica.....	98
Tabela 6.13: Cálculo da receita operacional com a geração de energia elétrica...	98
Tabela 6.14: Fluxo de caixa do cenário de produção de energia elétrica.....	98
Tabela 6.15: Cálculo da TIR e VPL do cenário com geração de energia elétrica..	99
Tabela 6.16: Cálculo do pay back com a opção de geração de energia elétrica...	99
Tabela 6.17: Saving anual com a substituição do gás natural.....	100
Tabela 6.18: Cálculo da receita operacional com a queima de gás natural.....	101
Tabela 6.19: Fluxo de caixa do cenário de substituição do gás natural.....	101
Tabela 6.20: Cálculo da TIR e VPL do cenário com substituição do gás natural...	102
Tabela 6.21: Cálculo do pay back com a opção de substituição do gás natural....	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDS - biogás desulfurizado e seco
CIP - clean in place
CNTP - condições normais de temperatura e pressão
CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente
CSTR - continuous-stirred anaerobic digester
DBO - demanda bioquímica de oxigênio
DQO - demanda química de oxigênio
ET - energia térmica
ETEI - estação de tratamento de efluente industrial
GNE- gás natural equivalente
GEE – Gases de efeito estufa
IC - internal circulation
MMA - Ministérios do Meio Ambiente
PCI - poder calorífico inferior
PCS -poder calorífico superior
pH - potencial hidrogeniônico
PLC - controlador lógico programável
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
PTE - potencial teórico de produção de energia elétrica
PVPP - polivinilpolipirrolidona
RSI - resíduos sólidos industriais
SGA - sistema de gestão ambiental
SST - sólidos suspensos totais
TIR - taxa interna de retorno
UASB - upflow anaerobic sludge blanket
UP - unidade de pasteurização
VPL - valor presente líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVO.....	21
2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	21
3. PANORAMA DO SETOR CERVEJEIRO.....	22
3.1 MARCOS IMPORTANTES NA HISTÓRIA DA CERVEJA.....	22
9000 a.C. – criação da cerveja. Para os Sumérios, Ninkasi era a cerveja dos Deuses.....	22
No Egito, a cerveja foi o pagamento dos construtores das pirâmides.....	23
500 a.C. – Ceres, deusa da agricultura de Roma deu nome à cerevisia.....	23
Idade Média – A monja Hildegarda de Bingen acrescenta lúpulo à receita.....	24
Na revolução Industrial a Porter foi a Cerveja símbolo.....	25
1842 – Joseph Groll, mestre cervejeiro bávaro, cria a cerveja Pilsen.....	25
Luis Pasteur descobriu o processo de fermentação e criou a pasteurização.....	27
Século 19. No Brasil a produção de cerveja veio para ficar junto com a Família Real Portuguesa.....	28
3.2 – O PROCESSO CERVEJEIRO.....	28
Matéria prima – Cevada.....	29
Outros cereais utilizados na fabricação da cerveja.....	33
A fabricação do malte.....	34
Maceração.....	35
Germinação.....	36
Secagem.....	38
Brassagem, a fabricação do mosto - Condição de mostura.....	38
Escolha do malte.....	38
Moagem do malte e a granulometria adequada.....	39
Sistema de mostura.....	40
Concentração do mosto.....	40
Composição do mosto.....	41
Curvas de mostura.....	41
Infusão.....	42
Decocção.....	42
Aquecimento direto.....	42

Filtração do mosto.....	43
Fervura do mosto.....	44
Reações químicas na fervura do mosto.....	45
O processo de fervura.....	45
A adição de lúpulo.....	46
Separação do trub quente.....	46
Resfriamento do mosto.....	47
Fermentação.....	47
O processo de Fermentação.....	48
Separação da levedura pós-fermentação.....	50
Maturação da cerveja.....	50
Filtração.....	51
Pasteurização.....	52
Processos de pasteurização.....	53
Pasteurização tipo flash.....	53
Pasteurização tipo Túnel.....	54
4 – A ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DOS EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS.....	60
4.1 – OBJETIVO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS.....	60
4.2 – ETAPAS DO PROCESSO.....	60
Tratamento primário e pré-tratamento.....	60
Gradeamento.....	60
Caixa de areia.....	61
Peneiramento.....	62
Tanque de equalização.....	62
4.3 – TRATAMENTO SECUNDÁRIO.....;	62
Digestão anaeróbica do efluente líquido.....	62
Reator/tanque de acidificação.....	62
Reator de metanização.....	65
Tanque de aeração (reator aeróbio).....	66
Decantador secundário.....	68
Adensador de lodo.....	69

Desidratação do lodo.....	70
Utilização do biogás produzido na cervejaria.....	71
5 – A BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DE SUBSTRATOS SÓLIDOS.....	74
5.1 – O BAGAÇO DE MALTE.....	74
5.2 – REATOR CSTR – CONTINUOUSLY STIRRED TANK REACTOR.....	76
Sistema de alimentação do substrato.....	77
Sistema de agitação.....	78
6 – ESTUDO DE CASO – APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DE CERVEJARIA.....	80
6.1 – DADOS LEVANTADOS.....	80
6.2 – SISTEMA DE TRATAMENTO DE BAGAÇO DE MALTE.....	84
Sistema de controle do processo.....	86
Entradas do sistema.....	86
Saídas do sistema.....	87
Consumos da usina de biogás.....	87
Lista de equipamento.....	88
6.3 – CENÁRIOS.....	89
Cálculo teórico do Poder Calorífico Superior (PCS) e do Poder Calorífico Inferior (PCI).....	89
Cenário 01 - Cálculo da energia elétrica gerada.....	91
Cenário 02 - Calculo para consumo na caldeira para geração de vapor.....	92
Biofertilizante.....	93
6.4 – ANÁLISE ECONÔMICA.....	94
Custos evitados.....	96
Receita com o biofertilizante.....	97
Receita com a venda de bagaço de malte.....	97
Análise de viabilidade econômica do cenário com produção de energia elétrica..	97
Análise de viabilidade econômica do cenário com substituição de gás natural.....	100
7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
8 – TRABALHOS FUTUROS.....	105
9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

1. INTRODUÇÃO:

Em dezembro de 1977 as atenções do mundo inteiro estavam voltadas para o Japão, mais precisamente para a cidade de Quioto, onde milhares de pessoas se reuniram para discutir e debater sobre as importantes mudanças climáticas que atingem nosso planeta e definir metas e obrigações necessárias para a redução da emissão de gases de efeito estufa para mitigar efeitos do aquecimento global.

A reunião era a Terceira Conferência das Partes, da qual participaram 159 países e o produto desta reunião por consenso dos participantes foi o Protocolo de Quioto, que se caracterizou como um importante marco das ações de combate à mudança climática, desde a criação da Convenção sobre Mudança no Clima em 1992, cujo objetivo era de alcançar a estabilização da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático. (CONVENÇÃO SOBRE MUDANÇA DO CLIMA, 1992).

O Protocolo de Quioto continha um compromisso legal e obrigatório, com medidas mais rígidas para os países mais desenvolvidos e economias em transição no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa. O documento estabeleceu que as emissões de GEE dos países desenvolvidos e de 36 países que compõe o Anexo I da Convenção Sobre Mudança do Clima, deveriam ser reduzidas 5% em relação aos níveis das emissões registradas em 1990 no período compreendido entre 2008 e 2012, com metas individuais distintas para vários países, como por exemplo: Japão – 6%, União Europeia – 8%, Estados Unidos - 7%, dentre outros. (SANCHES, 2003).

Cabe destacar, uma parte importante do Protocolo, o Artigo 2, que versa que, afim de promover o desenvolvimento sustentável, os países do Anexo I, devem implementar e/ou aprimorar diversas políticas e medidas, de acordo com as circunstâncias de cada país, dentre elas:

a. O aumento da eficiência energética em setores relevantes da economia nacional.

b. A pesquisa, a promoção, o desenvolvimento e o aumento do uso de formas novas e renováveis de energia, de tecnologias de sequestro de dióxido de carbono e de tecnologias ambientalmente seguras, que sejam avançadas e inovadoras.

c. A limitação e/ou redução de emissões de metano por meio de sua recuperação e utilização no tratamento de resíduos, bem como na produção, no transporte e na distribuição de energia.

Todas estas medidas que buscam o desenvolvimento sustentável refletem no mercado e nas indústrias que estão inseridas nestes mercados. Os mercados são competitivos e cada empresa que compete em uma indústria específica possui uma estratégia competitiva, que pode ser implícita através da atividade de seus vários departamentos funcionais, ou explícita, por meio de um processo de planejamento da empresa. O desenvolvimento desta estratégia, é a declaração da forma como e empresa irá competir, suas metas e as políticas necessária para levar a cabo estas metas (PORTER, 1986).

No contexto atual, a sustentabilidade faz parte das estratégias das empresas que buscam levar para os clientes e consumidores, as melhores experiências e os melhores produtos, da forma mais sustentável possível. Abrangendo três pilares: o ambiental, o social e o econômico, uma estratégia bem formulada, deve planejar meios para que a empresa opere de modo rentável sem danificar os recursos naturais e o ecossistema, além de ter atenção às causas sociais que estão relacionadas direta ou indiretamente com as atividades da empresa. (GOMES,2009).

Para a proteção dos recursos naturais, são importantes a eliminação de desperdícios e a otimização de recursos e, por conseguinte a redução de custos de produção, o que é uma postura obrigatória das empresas que buscam o respeito ao meio ambiente e a rentabilidade desejada pelos investidores e os anseios dos demais stakeholders no ambiente onde a indústria está inserida. Neste viés, a otimização energética e o reaproveitamento de subprodutos do processo produtivos são uma regra de ouro que deve ser seguida pelas empresas que apregoam a sustentabilidade em seu planejamento estratégico. Podemos dizer com isto, que a adoção de uma estratégia de sustentabilidade não se limita à prática de princípios sociais e ecológicos de forma desinteressada, mas sim, uma estratégia sustentável bem implementada e bem sucedida, que se dá pelo atendimento de uma estratégia win-win-win, ou seja, ganha-ganha-ganha, onde ganha a empresa porque a sua reputação e proposta de valor irão aumentar, ganham os stakeholders porque aumentam a probabilidade de obterem benefícios que podem ser financeiros ou não, e ganha o meio ambiente que passa a ser um bem valioso com a adoção de uma estratégia sustentável. (ELKINGTON,1994).

Nossa sociedade tem necessidades e desejos, e para atender a estes anseios as indústrias aumentam cada vez mais sua produção e, por conseguinte o consumo de insumos e de energia necessária para os processos industriais, e na grande maioria das indústrias, esta energia provém de fontes não renováveis, tais como o gás natural, o carvão mineral, o óleo combustível e o gás liquefeito de petróleo.

Dentro do contexto do planejamento estratégico, mais precisamente no que diz respeito à sustentabilidade e de proteção ao meio ambiente, a Norma Técnica NBR ISO 14000, é um documento necessário, que dá as orientações para o uso e os requisitos que devem ser seguidos para a implantação de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) nas indústrias brasileiras. A Norma apregoa que é fundamental um equilíbrio entre os três pilares da sustentabilidade: a sociedade, o meio ambiente e a economia, de forma que se possam satisfazer as necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas necessidades.

Ao atender as expectativas da sociedade em relação a um desenvolvimento sustentável, uma empresa ambientalmente responsável, presta contas sobre o seu desempenho ambiental, incluindo o respeito à legislação aplicável, à emissão de poluentes, eficiência energética e uso eficiente de recursos. (ABNT, 2015).

E na busca de uma maior eficiência na utilização de recursos, os resíduos dos processos produtivos tornam-se uma interessante fonte de recursos quando tratados adequadamente. Uma legislação específica foi sancionada pelo Poder Executivo em 2010, a lei 12.305/10, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que regulamenta a forma como será feita a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos.

Dentre os princípios desta lei está a eco eficiência, que prevê que deve existir uma compatibilização entre o fornecimento, com preços competitivos, de serviços e bens qualificados que venha a satisfazer as necessidades humanas, com qualidade de vida e redução do impacto ambiental e de consumo de recursos naturais a níveis aos quais o planeta tenha capacidade de sustentação, e o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e social, gerador de trabalho e renda com a promoção da cidadania.

Citando ainda esta lei, dentre seus objetivos, podemos destacar pontos importantes que preveem a reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, além da utilização de tecnologias limpas como forma de minimizar os impactos ambientais, aventando a possibilidade de utilização destas tecnologias para a

recuperação energética dos resíduos sólidos e dos gases gerados nas unidades de disposição final destes resíduos sólidos, desde que sejam técnica e economicamente viáveis. (PNRS, 2010).

No tocante aos resíduos sólidos industriais, a PNRS prevê obrigações para o setor produtivo. Além dos benefícios ambientais, o adequado gerenciamento dos resíduos sólidos industriais (RSI) se torna um importante viés, com a expansão adequada da infraestrutura econômica e social do Brasil. Pelo aspecto econômico, a Lei no 12.305/2010 obriga os grandes empreendedores a fazer uma opção entre a redução, o reuso e a reciclagem dos resíduos. Estas alternativas possibilitam a implantação de projetos sociais, incentivando a integração das indústrias com as cooperativas de catadores de materiais reciclados o que é uma forma de reconhecer o valor econômico dos subprodutos. (IPEA,2015).

O progresso do país e o crescimento da economia, levam, de forma inevitável, a um aumento de consumo de produtos industrializados, o que por sua vez aumenta a demanda por extração de matérias primas, que são processadas dentro de uma determinada indústria para a produção de um produto vendável que é distribuído para um mercado consumidor. Toda esta demanda gera impactos ambientais e resíduos ao longo da cadeia de valor do produto. As atividades industriais geram diferentes tipos de resíduos e com características mais diversas possíveis. Indústrias de vários setores competem pelo consumidor final de seus produtos, e dentre estes setores um dos mais competitivos é da produção de gêneros alimentícios, que se caracteriza como uma indústria diversificada, com empresas de diferentes portes, abrangência de atuação e participação no mercado de produção de alimentos. Neste mercado, a produção de Cervejas no Brasil tem resultado expressivo, com cerca de 133 milhões de hectolitros produzidos por ano, o país se consolida como o terceiro maior produtor mundial de Cerveja. (FREITAS, 2015).

O mercado de cerveja é bastante capilarizado, com mais de 50 fábricas de grande porte que abastecem mais de 1,2 milhões de pontos de venda em todo o Brasil, movimentando uma extensa cadeia produtiva que representa mais de 1,6% do PIB e mais de 14% da indústria de transformação Nacional. As iniciativas que buscam a sustentabilidade são rotineiras nesta indústria, a redução do consumo de água, o consumo responsável, o apoio a reciclagem de materiais como o alumínio e o vidro são itens essenciais nas políticas da indústria cervejeira. Outro ponto de destaque é a redução da emissão de gases de efeito estufa pela troca das fontes não renováveis,

representadas pelo consumo de derivados de petróleo por fontes renováveis de energia, onde se destacam a biomassa, energia eólica, energia solar e o aproveitamento dos gases oriundos do tratamento dos efluentes gerados na indústria de processamento da cerveja. Destaca-se também a oportunidade de utilização dos resíduos do processo produtivo para o aproveitamento energético com a geração e aproveitamento do biogás como combustível limpo na geração de energia renovável. (CERVBRASIL,2016).

Considerando a produção de resíduos, como destacado na lei 12.305, as indústrias de produtos alimentícios geram efluentes biológicos e químicos, além dos resíduos sólidos que são subprodutos do processo produtivo. Cada efluente em particular requer um tipo de tratamento específico, de forma que o efluente a ser descartado esteja em conformidade com a legislação aplicável para a proteção dos corpos receptores. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), vinculado ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), é o órgão que delibera sobre a Política Nacional do Meio Ambiente e estabelece dentre outras atribuições, os padrões de controle da poluição ambiental, através de Resoluções Normativas aplicáveis.

E alinhado com as políticas ambientais estabelecidas na legislação brasileira, neste trabalho avaliaremos a ideia de se utilizar um subproduto do processo cervejeiro para a geração de energia limpa, o bagaço de malte, que pode ser processado para produzir o biogás que pode ser aproveitado como combustível em substituição ao gás natural, como será detalhado nos objetivos nos capítulos seguintes.

2. OBJETIVO:

Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica para o aproveitamento energético do bagaço de malte produzido em cervejaria para a produção de biogás dessulfurizado e seco, que será utilizado para a geração de energia térmica ou elétrica.

Os subprodutos e efluentes que saem da cervejaria quando tratados adequadamente, quer por força de lei ou por simples estratégia de planejamento, podem gerar produtos que tenham valor comercial se tornando uma fonte de renda interessante para a Cervejaria. Hoje em dia, a sustentabilidade é palavra de ordem nas empresas, a busca pelo menor custo operacional é obrigatória dentre os planejamentos estratégicos que visam assegurar ações para garantir a sobrevivência das empresas em mercados cada vez mais competitivos. E dentre as ações mais adotadas está a redução de consumos de origem fóssil e o incentivo para buscar as fontes renováveis de energia. E alguns subprodutos gerados na cervejaria consistem um excelente substrato para este fim. O presente estudo abordará a possibilidade de geração de biogás que será utilizado para fins energéticos na indústria.

2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO:

Para a elaboração do estudo de viabilidade considerou-se neste trabalho a utilização de um subproduto que é gerado no processo produtivo da cervejaria: o bagaço de malte, um resíduo gerado em grande quantidade no processo de brassagem, que é o cozimento do malte para a produção mosto. Este subproduto será enviado para um reator do tipo CSTR (Continuously-stirred anaerobic digester), servindo de substrato para o processo de biodigestão anaeróbica, onde microrganismos irão metabolizar o substrato e produzir o biogás, cujo aproveitamento será estudado neste trabalho. Em suma a questão central a ser respondida é: Existe viabilidade técnica e econômica para a geração de biogás e seu aproveitamento energético com a utilização da biodigestão anaeróbica de subprodutos de cervejaria?

3. PANORAMA DO SETOR CERVEJEIRO:

3.1 MARCOS IMPORTANTES NA HISTÓRIA DA CERVEJA:

9000 a.C. – Criação da cerveja. Para os Sumérios, Ninkasi era a cerveja dos Deuses.

Uma bebida milenar, apreciada e cercada de possibilidades de produzir sabores diferentes de acordo com a receita, a cerveja chegou a ser considerada a bebida dos Deuses. Descoberta pelo Sumérios, a cerveja tem longa data, estudiosos do assunto preveem que foi descoberta há cerca de 10.000 anos atrás, e era uma fonte de alimento, pois para guardar os grãos, os Sumérios cozinhavam e armazenavam.

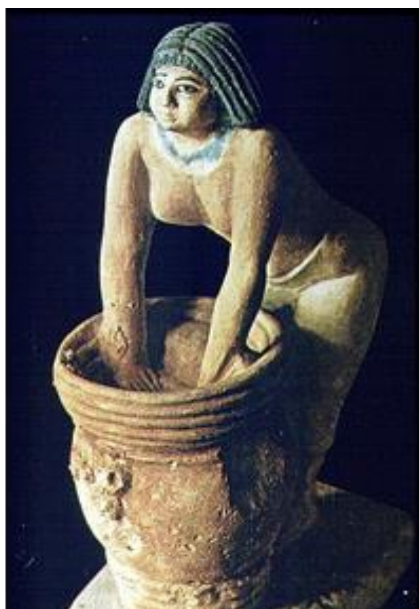


Figura 3.1: Escultura de Ninkasi a Deusa Suméria da cerveja.

Fonte: Beer Planet (2014).

Textos antigos revelam que potes com grãos cozidos que eram esquecidos e consumidos posteriormente produzia um sentimento de alegria. Foi o primeiro relato de produção de cerveja, a partir daí passaram a cozinhar e colocar os grãos em potes com água e outras substâncias tais como mel e frutas para dar aroma e sabor à cerveja. Mais tarde foi o povo babilônio que aperfeiçoou a cerveja dos Sumérios, quando utilizaram uma espécie de canudo para extrair o suco alcoólico dos potes. Nesta época os Sumérios acreditavam que a cerveja era uma bebida de criação divina

e atribuíram a Ninkasi o título de Deusa Suméria da cerveja. Achados arqueológicos descobriam uma tabuleta de cerâmica com um conteúdo que chamaram de “Hino a Ninkasi” que é um escrito Sumério que descreve uma das receitas mais antigas de cerveja que se tem notícia. Segundo a Mitologia, Ninkasi era quem preparava a cerveja dos Deuses Sumérios com o cozimento dos grãos e adição de mel, frutas e a fermentação em potes.



Figura 3.2: Tabuleta Suméria que continha o “Hino a Ninkasi”.

Fonte: Beer Planet (2014)

No Egito, a cerveja foi o pagamento dos construtores das pirâmides:

Foi descoberto no Egito, indícios de que algumas estruturas com mais de 4.500 anos, segundo arqueólogos que exploraram o local, seriam utilizados para a produção de alimentos. Estas estruturas, datadas de 2490 a 2472 a.C. funcionaram como uma espécie de sede, onde sacerdotes e altos funcionários do governo coordenavam a fabricação de pães e cervejas, no mesmo período da construção das pirâmides do Egito. Na construção das pirâmides foram utilizados milhares de trabalhadores, na maioria escravos, que precisavam de alimentos e líquidos, que era geralmente servido em geral, como cerveja. Escavações encontraram em Miquerinos, uma das três pirâmides de Gizé que foram construídas em homenagem ao faraó Menkaure, algumas instalações e ferramentas que se acredita que foram utilizadas para a fabricação de cerveja. (CIBERIA, 2019).

500 a.C. – Ceres, deusa da agricultura de Roma deu nome à cerevisia.

A mitologia é cheia de histórias fascinantes, reza a lenda que Ceres é a uma Deusa romana das plantas que brotam e do amor maternal, filha de Saturno e Cibele,

amante e irmã de Júpiter foi mãe de Perséfone. Esta importante figura na linhagem mitológica era personificada e celebrada por mulheres em rituais secretos, e sua veneração ficou associada às classes plebeias que cultivavam cereais, palavra derivada de seu nome, que é uma forma de associação da Deusa com os grãos comestíveis. Seu nome também foi associado pelo Celtas na antiga Gália, hoje França, à cerveja, que em latim é grafada como *Cerevisia* ou *Cerevisiae* e ao longo da história também emprestou seu nome à levedura da cerveja, a *saccharomyces cerevisiae*. (MORADO,2009).



Figura 3.3: Escultura de Ceres a Deusa da agricultura.

Fonte: Dodecateísmo (2012).

Idade Média – A monja Hildegarda de Bingen acrescenta lúpulo à receita.

Hildegarda de Bingen foi uma freira nascida na Alemanha em 1089, filha de uma casta nobre, era uma mulher à frente de seu tempo, dentre habilidade e atribuições, foi monja beneditina, teóloga, compositora, pregadora, naturalista, medica informal, poetisa, dramaturga e escritora. Era uma mulher influente tanto na religião como na política em sua época, seu trabalho com ervas medicinais a levou a testar várias ervas e plantas com diferentes sabores na incorporação da fabricação da cerveja. Ela descobriu que o lúpulo, com seu amargor e aroma conferia propriedades à cerveja que permitia o armazenamento por períodos mais prolongados. Uma experiência que alterou a forma de como a cerveja era fabricada e o curso da história

da cerveja até os dias atuais em relação ao seu amargor e aroma provocados pelo lúpulo. (MUNDO DA CERVEJA, 2015).



Figura 3.4: A monja Hildegarda de Bingen.

Fonte: Alto Astral (2018)

Na revolução Industrial a Porter foi a Cerveja símbolo.

A revolução industrial foi um movimento de grande importância para o progresso da humanidade, foi um conjunto de mudanças que aconteceram na Europa entre os séculos XVII e XIX, cujo principal legado foi a substituição do trabalho artesanal pelo assalariado com o uso de máquinas a vapor. Considerando a importância e a contribuição para a história da cerveja, um fato marcante foi que com a industrialização e o deslocamento do homem do campo para as metrópoles, deu-se como consequência, a aparição das famosas tavernas nas docas de Londres para atender ao enorme contingente de trabalhadores braçais (os porters) que trabalhavam na capital. E ao longo do rio Tâmesa se instalaram fábricas que começaram a produzir uma cerveja mais escura e encorpada para atender a este público. A essa cerveja deu-se o nome de Cerveja Porter. (SYMPLA,2017).

1842 – Joseph Groll, mestre cervejeiro bávaro, cria a cerveja Pilsen.

A cerveja Pilsen, é o tipo de cerveja mais vendido no mundo, é uma variação obtida da cerveja do tipo Lager, que é produzida com a utilização de um malte tipo Pilsen e lúpulo aromático do tipo saaz, o que confere ao produto um amargor sutil e

um aroma pronunciado. Apresenta um aspecto transparente e amarelo, beirando ao dourado, possui baixo teor alcoólico entre 4 a 5%, e quando bem filtrada, tem uma aparência límpida, que junto com o aroma e sabor agradável, a fazem uma bebida extremamente apreciada pelo público consumidor de cerveja ao redor do mundo. Esta líder no gosto dos consumidores foi descoberta na cidade de Pilsen, região onde hoje se situa a República Checa, que começou a produzir cervejas em 1295. A cerveja produzida era uma cerveja turva e escura de alta fermentação, com um padrão de qualidade e sabor muito irregular, o que invariavelmente causava a insatisfação das pessoas que consumiam a cerveja na região, e assim, um acontecimento naquela pequena cidade iria mudar a história da fabricação de cervejas. Em 1838, os consumidores despejaram barris inteiros de cerveja na praça da cidade como uma forma de protesto com a qualidade do produto que serviam para o consumo. Em resposta ao evento o governo da cidade de Pilsen decidiu fundar uma cervejaria em 1839, a “Bürger-Brauerei”, em português, a Cervejaria do Povo, batizada com o nome de Pilsener Urquell, para fazer uma cerveja inspirada naquelas produzidas na região da Baviera, na Alemanha. Cabe destacar que a marca Pilsener Urquell é comercializada até hoje e detém o título de cerveja Pilsen mais antiga do mundo. Voltando ao histórico da cerveja Pilsen, a Bürger-Brauerei contratou um mestre cervejeiro conhecido, Joseph Groll, que utilizando novos maltes do tipo zass, a boa qualidade da água de Pilsen e técnicas de estilo bávaro de produção de cervejas, conseguir formular e produzir uma cerveja leve, clara e dourada, que foi uma sensação na época, em 05 de outubro de 1842 apresentou o primeiro lote, que chamou de cerveja Pilsen e que hoje é a mais consumida no mundo com milhares de marcas e rótulos diferentes. (BEBO MELHOR, 2017).



Figura 3.5: Joseph Groll.

Fonte: Brookston Beer Buletin (2018)

Luis Pasteur descobriu o processo de fermentação e criou a pasteurização.

Luis Pasteur, um notável cientista francês é considerado um dos descobridores da microbiologia, viveu no século XIX e fez importantes descobertas que contribuíram para o avanço da medicina e a redução da mortalidade. Descobriu a vacina contra raiva em 1885 e também desenvolveu estudos na indústria vinícola e da cerveja, criando uma importante teoria sobre a fermentação como consequência da ação de micróbios, além da observação de que o vinho se transformava em vinagre pela ação de um fermento chamado *Micoderma Aceti*, e para evitar a degeneração, ele experimentou e comprovou que os microrganismos que eram responsáveis pela fermentação e deterioração do vinho e da cerveja morrem quando submetidos a uma temperatura de 65 a 75°C sem alterar as propriedades das bebidas, tais experimentos foram realizados em garrafas de vidro fechadas, e receberam o nome de pasteurização, que hoje é uma etapa importante no processo de fabricação de algumas bebidas, principalmente na fabricação da cerveja, uma vez que antes da pasteurização a bebida é comumente chamada de chopp que tem prazo de validade de 10 a 15 dias e após o processo de pasteurização é obtida a cerveja que tem sua validade aumentada para 180 dias. (CERVESIA, 2017, EBIOGRAFIA, 2019).



Figura 3.6: Luis Pasteur.

Fonte: Wikipedia (2019).

Século 19. No Brasil a produção de cerveja veio para ficar junto com a Família Real Portuguesa.

Dom João VI era um apreciador de cerveja, quando a Família Real desembarcou no Brasil, muita coisa mudou. Logo na chegada, decretaram a abertura dos portos às nações amigas e revogou o alvará assinado pela rainha D. Maria I que proibia a existência de fábricas de manufatura na Colônia. A abertura dos portos permitiu que a Inglaterra, que dominava o mercado de cervejas na época, exportasse sua cerveja para o Brasil. O domínio inglês no fornecimento de cerveja se deu até a 1870, quando por influência da imigração, a preferência passou a ser pela cerveja oriunda da Alemanha, que produzia uma cerveja leve, clara e que agradava mais ao paladar, foi a partir da entrada das alemãs no mercado brasileiro, que passou-se a consumir cervejas em garrafas de vidro, que eram arrolhadas com cortiça amarradas com barbante, e tinha um nome pitoresco de cerveja barbante, tal fato ocorria em função do baixo controle da fermentação produzir gases que aumentavam a pressão no interior da garrafa fazendo com que a rolha de cortiça se soltasse. O problema só foi resolvido com a introdução das rolhas metálicas em 1891 após descoberta por William Painter. (OPA BIER, 2015).



Figura 3.7: Cerveja barbante, garrafa com rolha amarrada com barbante.

Fonte: Opa Bier (2015)

3.2 O PROCESSO CERVEJEIRO

A cerveja como já mencionado é uma bebida de origem milenar, e seus componentes principais são o malte de cevada, a água, o lúpulo e o fermento. Alguns países adotam critérios rigorosos para determinar a composição da cerveja, como a famosa Lei da Pureza, promulgada na Alemanha em 23 de abril de 1516 pelo Duque

Guilherme IV da Baviera que instituiu que naquele país a cerveja só poderia ser fabricada com os quatro ingredientes supracitados. A lei, conhecida como Reinheitsgebot é vigente até hoje e é considerada uma garantia da qualidade das cervejas alemãs. (BREJAS,2007).

No Brasil, a formulação da cerveja é regulada pela Lei promulgada no decreto Nº 2314, de 04 de setembro de 1977 que define no artigo 64 que a cerveja é o produto obtido a partir da fermentação alcoólica do mosto cervejeiro oriundo do malte de cevada com água potável, por ação de leveduras com adição de lúpulo. Porém o que difere da Lei da Pureza Alemã, são os parágrafos segundo que permite que parte do malte de cevada pode ser substituído por cereais maltados ou não, e carboidratos de origem vegetal transformados ou não, o que abre a possibilidade de adição de substâncias que são denominados no processo cervejeiro como adjuntos, que podem ser: cevada, arroz, trigo, aveia e sorgo, todos integrais em flocos ou em sua parte amilácea e podendo ainda, segundo o artigo 68 desta mesma lei, ser adicionados sucos ou extratos vegetais, ou ambos, o que abre possibilidade de várias formulações para o produto, favorecendo atualmente a proliferação de cervejarias artesanais que fabricam cervejas com aromas diversos para paladares exigentes. O artigo 67 desta lei informa que no Brasil poderão ser fabricadas cervejas do tipo: “Pilsen”, “Export”, “Larger”, “Dortmunder”, “Munchehen”, “Bock”, “Malzbier”, “Ale”, “Stout”, “Porter”, “Alt”, “Weissbier” ou ainda outras denominações internacionalmente reconhecidas que vierem a serem criadas, resguardando as características do produto original. (MAPA, 1997).

Qualquer que seja o tipo de cerveja fabricado, as etapas do processo principal são as mesmas: brassagem, fermentação, maturação, filtração e envasamento. Tais processos podem ser subdivididos em sub-processos menores conforme o esquema das figuras 3.9 e 3.10, discutidos nos itens a seguir.

Matéria prima – Cevada:

A cevada é o principal cereal utilizado na fabricação da cerveja, e isto não é por acaso. Este importante grão tem características peculiares que são favoráveis e justificam a sua escolha para o processo cervejeiro:

- Relação amido/proteína.
- Cascas.

- Adequação à malteação.
- Fácil gelatinização do amido.
- Teor de lipídios.

A cevada apresenta uma boa relação entre a quantidade de amido e o teor de proteína, o que proporciona bons rendimentos na obtenção dos açúcares durante o processo de brassagem. As proteínas presentes na cevada ajudam a promover uma boa espuma e após a malteação, enzimas e aminoácidos necessários à fabricação de uma boa cerveja. A conservação das cascas após a colheita também é uma característica especial da cevada o que facilita o processo de malteação do grão e filtração do mosto.



Figura 3.8: Cevada.

Fonte: Contrisoja (2019).

Os grânulos de amido presentes gelatinizam-se quando submetidos à baixas temperaturas, o que facilita o processo de mostura, o baixo teor de lipídeo da cevada em torno de 1,7 a 2,9% é importante para a estabilidade da espuma.

As variedades mais comuns da cevada para o uso cervejeiro são a de duas e de seis fileiras. As duas apresentam características especiais: A de duas fileiras possui grãos maiores e maior relação amido/proteína, a cevada de seis fileiras apresenta maior teor de proteínas e as cascas desta variedade são menores. (AMBEV,2018).

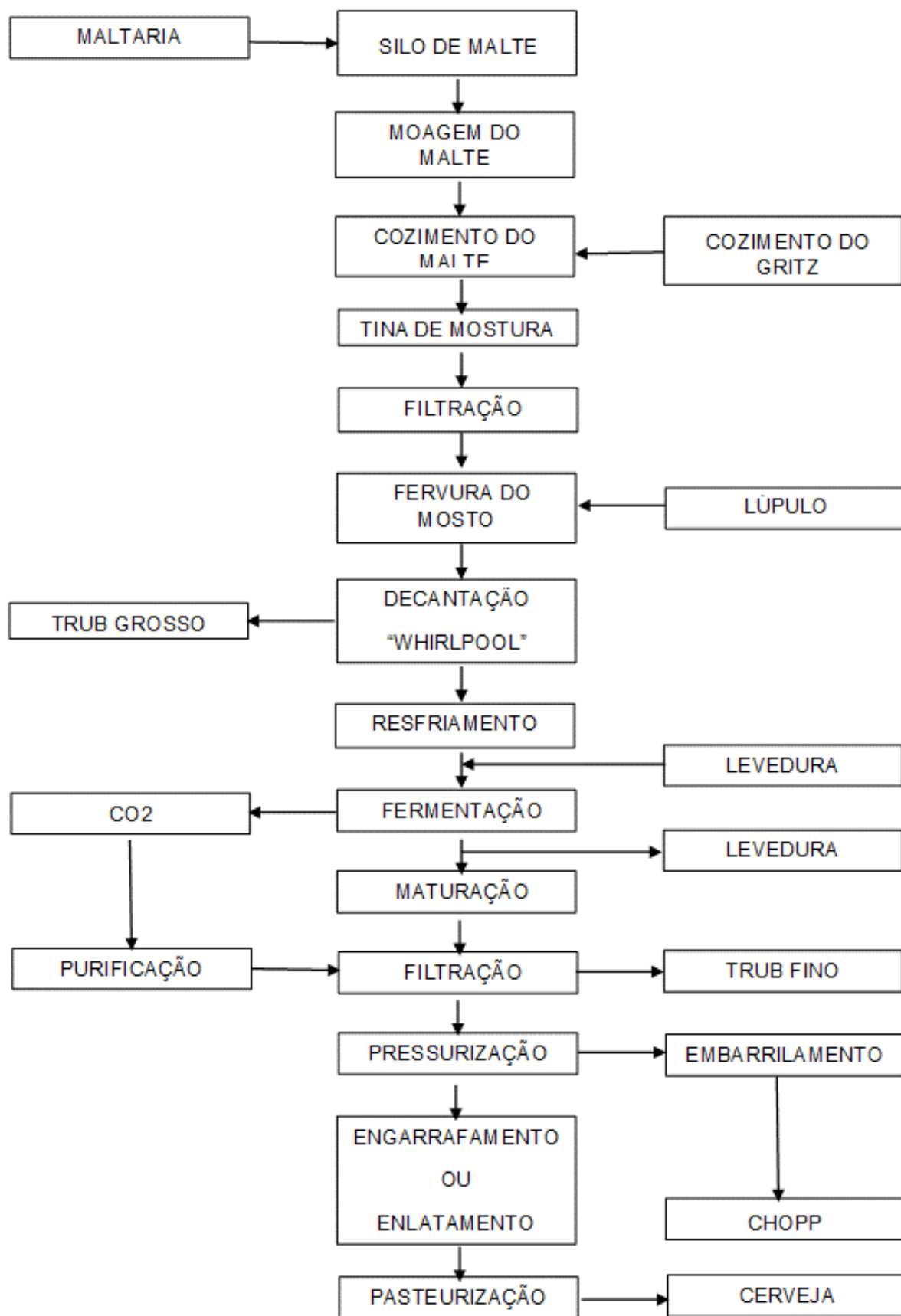


Figura 3.9: Etapas do processo cervejeiro.

Fonte: CERVESIA (2015).

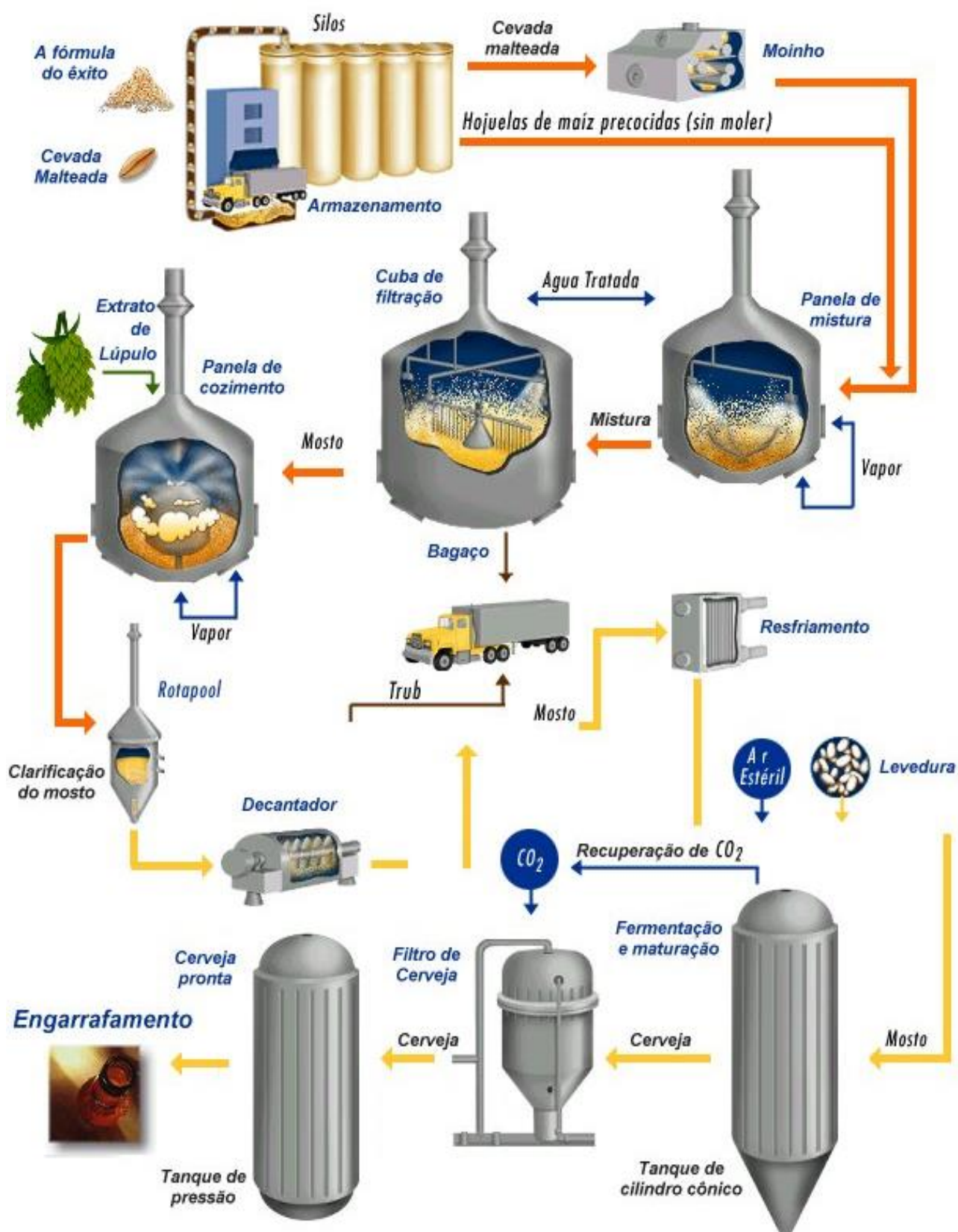


Figura 3.10: Diagrama do processo de fabricação da cerveja.

Fonte: Ianalítica (2013)



Figura 3.11: Cevada de duas e seis fileiras.

Fonte: Homebrewfinds (2019)

Outros cereais utilizados na fabricação da cerveja.

Além da cevada, outros cereais também podem ser utilizados na composição de alguns estilos de cerveja, tais como:

- Milho: Um cereal não maltado que não acrescenta aromas e sabores para a cerveja, é um dos principais adjuntos nas formulações atuais, geralmente denominado de grtíz, é utilizado tanto em cervejas Pilsen, Lagers e também em bebidas mais robustas como a Ales Belgas.
- Arroz: Entra como fonte de açúcar para a fermentação, sem muita influência no sensorial da cerveja. Confere leveza à cerveja, tem presença obrigatória na formulação de uma das cervejas mais vendidas no mundo, a Budweiser®.
- Aveia: é um cereal utilizado para conferir cremosidade à cerveja, comum em cervejas do tipo Stout, produzindo as peculiares Stout de aveia.
- Centeio: Um cereal de sabor pronunciado, é utilizado em algumas cervejas em quantidades menores confere ao produto uma cremosidade e sabor levemente picante e uma coloração levemente avermelhada, está presente em cervejas do tipo IPA e Pale Ale e também nas clássicas Roggenbiers alemãs.
- Trigo: Um dos cereais mais utilizados além da cevada, pode entrar na cerveja maltado ou não. É fundamental na composição das clássicas Weizenbiers Alemã e Wit Biers belgas, com um aspecto turvo, cremoso e refrescante. (G1, 2016).

Fabricação do malte:

A cevada é transformada em malte em instalações chamadas de maltarias. Há diversos tipos de plantas industriais destinadas à produção do malte. As mais antigas são chamadas de floor maltings, nelas, a germinação é feita em camadas rasas sobre o piso.

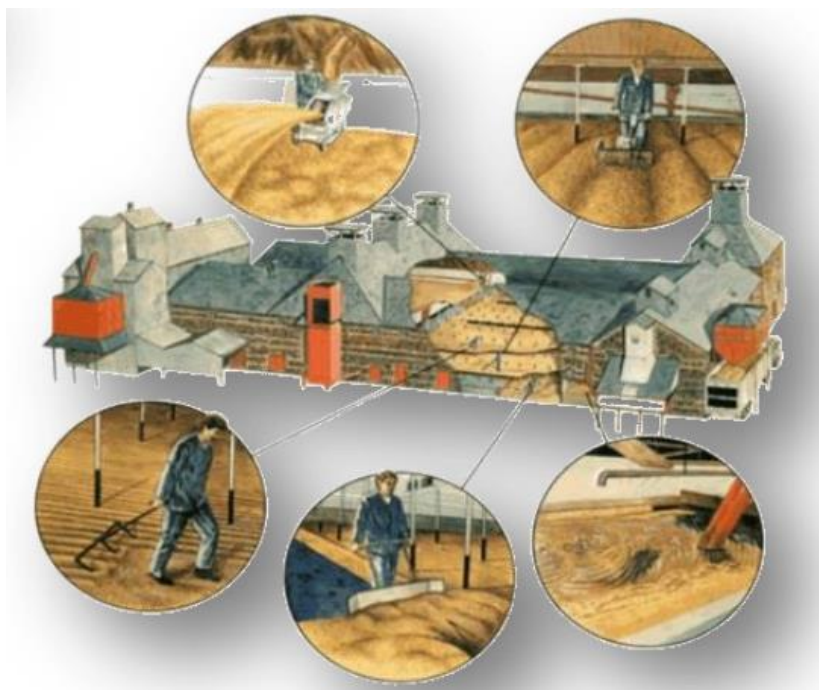


Figura 3.12: Maltaria Floor Malting.

Fonte: AMBEV (2018)

As maltarias de torre cilíndrica, proporcionam um malte mais homogêneo e maior produtividade. Os lotes de cevada chegam a 200 ou 300 toneladas, e os processos das maltarias modernas são quase todos automatizados. Os grãos são inspecionados, limpos e armazenados em silos, após a inspeção de qualidade dos lotes. A análise da cevada recebida auxilia na determinação dos parâmetros que serão utilizados nos processos de malteação. O processo de transformação da cevada em malte compreende três etapas:

- A. Maceração
- B. Germinação
- C. Secagem

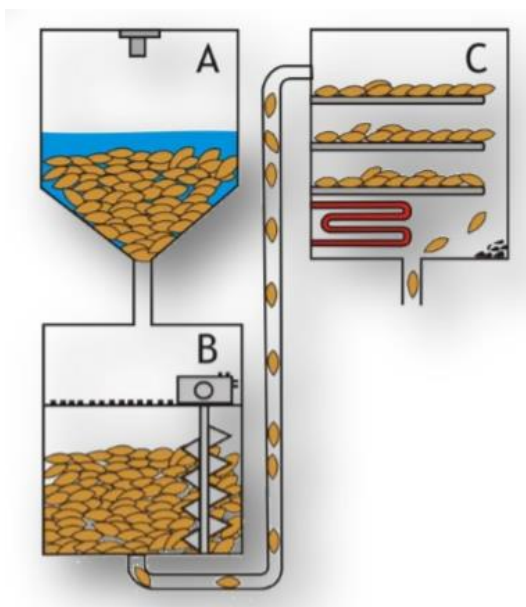


Figura 3.13: Os três processos utilizados na malteação.

Fonte: AMBEV (2018).

Maceração:

Neste processo a finalidade é fornecer o grau de umidade suficiente para a germinação do grão de cevada. O processo de hidratação é fundamental pois fornece água para a aleurona o que permite que ela sintetize as enzimas necessárias além de disponibilizar reservas nutritivas do endosperma para o processo de germinação. O processo pode variar de 3 a 5 dias e o teor de umidade do grão pode chegar a 50% do próprio peso. A temperatura é um fator importante no processo de absorção e deve ser mantida controlada entre 10 a 12°C durante todo o tempo com a água sendo continuamente renovada neste range de temperatura. A água deve possuir características próprias de dureza e pH, podendo em alguns tipos de água, ser necessária a adição de CaO para se conseguir a alcalinidade necessária. A maioria dos tanques de maceração são cilíndricos, de fundo plano e com altura máxima de 2 metros, o que permite condições mais aeróbicas para o processo de maturação. Uma abertura na parte superior do tanque permite a aeração natural ou forçada por agitação se necessário. O teor da umidade do grão determina o final da maturação. Além da semente se apresentar macia e com sinal de saída da radícula, na forma de intumescimento. Neste momento a germinação do grão deve ser interrompida. Retira-se a água e os grãos são lavados com água limpa e deixados drenar por duas horas. (PICINNI, 2012).



Figura 3.14 – Vista interna do tanque de maceração

Fonte: Brejafeitaemcasa (2017)

Germinação:

Cerca de 12 após o início da maceração, inicia-se o processo de germinação, cujo objetivo é desenvolver enzimas e modificar o amido do grão de cevada, de forma que fique mais macio e solúvel. Neste processo, temperatura, umidade e aeração são controladas e o processo é finalizado tão logo o processo de desenvolvimento de uma nova planta se inicie no grão. Neste estágio o grão é denominado “malte verde”. O processo de germinação acontece quando as enzimas miofíticas, que são secretadas no aleuroma promovem alterações no endosperma, as enzimas agem para desagregar e solubilizar o tecido multicelular do endosperma, através da destruição da matriz proteica dos grânulos de amido, permitindo a formação de enzimas que são fundamentais para o processo de fabricação de cerveja. O processo moderno de germinação tem equipamentos que realizam a operação em 3 a 4 dias. O germinador é um tanque de base retangular ou circular, provido de um fundo falso perfurado. O leito de malte é depositado sobre este fundo falso, com uma camada entre 1,0 a 1,5m de altura. Uma corrente de ar a 15°C flui através do leito de cima para baixo, de modos a assegurar a disponibilidade de oxigênio para os embriões, a eliminação do CO₂ e a manutenção da temperatura constante ao longo do leito de grãos. (PICINNI, 2002).



Figura 3.15: Grão de cevada germinado.

Fonte: Algomais (2017).



Figura 3.16: Germinador de malte.

Fonte: Ianalítica (2013)

Secagem:

Após as produções de enzimas e as modificações no endosperma se processarem, a atividade biológica do processo de germinação é interrompida pela operação de secagem do malte verde. Este possui cerca de 45% de umidade, e deve ser seco cuidadosamente de modo a preservar seu conteúdo enzimático. A temperatura do processo varia de 20 a 100°C, é utilizada água quente para aquecer o ambiente onde se processa a secagem. A larga faixa de temperatura de secagem se dá conforme o tipo de malte que se deseja obter, claro ou escuro. O malte escuro é obtido em condições de alta temperatura, onde os aminoácidos oriundos de reações proteolíticas reagem com os açúcares produzindo uma substância de cor escura chamada de meloidina. Um problema decorrente da operação com altas temperaturas é a perda da atividade enzimática do malte, nos maltes mais escuros, o processo a uma temperatura entre 200 e 300°C elimina quase na totalidade a atividade enzimática do malte. O malte seco possui um teor de umidade em torno de 4 a 5%, quando o malte passa por um processo de separação da radícula e do caulículo no processo de crivagem, O caulículo e a radícula são destinados para fábricas de ração. (PICCINI, 2012).

Brassagem, a fabricação do mosto - Condição de mostura:

Escolha do malte

O Malte é a alma da cerveja, participa conferindo sabor, coloração e na formação de espuma da cerveja, e também fornece as enzimas que atuam na degradação dos polímeros (amidos e proteínas) presentes nele próprio, dando origem aos açúcares fermentáveis e dextrinas que irão encorpar a cerveja produzida. O mestre cervejeiro, de acordo com o produto que irá entregar, fará a receita com a utilização de um ou mais maltes de procedências diferentes numa combinação que atenderá às necessidades da cervejaria. A cor, os aromas, os sabores e outras propriedades proporcionadas por maltes especiais também influenciam a escolha de uma mistura apropriada de maltes, adequada ao estilo de cerveja que se quer produzir.

Os requisitos principais para a escolha de um malte na cervejaria são:

- Homogeneidade;
- Facilidade de moagem;
- Bom poder enzimático;
- Bom conteúdo em amido;
- Baixos teores de glucanos que irá produzir um mosto com excelente filtrabilidade e rendimento em extrato. (LEWIS e YOUNG, 2002).

Moagem do malte e a granulometria adequada

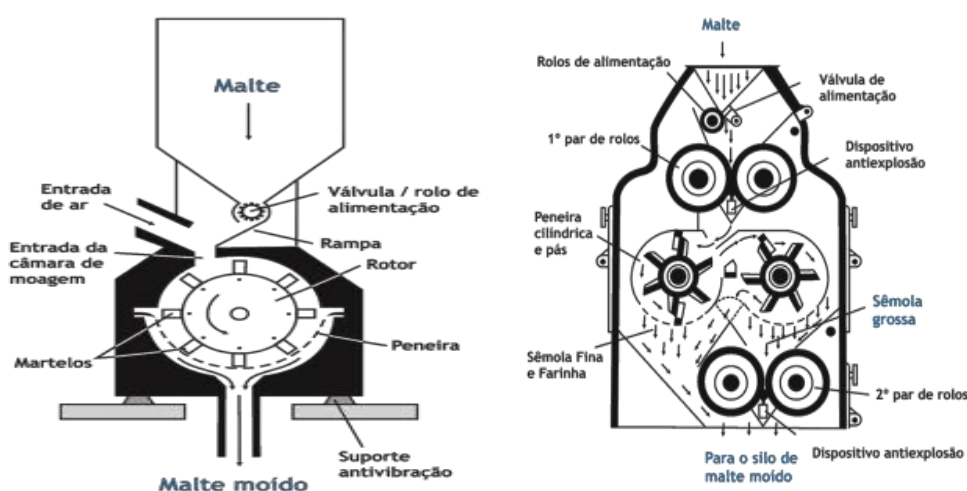


Figura 3.17: Modelos de moinhos de malte.

Fonte: AMBEV (2018)

A moagem do malte, uma das condições do processo, tem o objetivo de proporcionar uma granulometria mais adequada às transformações que ocorrerão durante a mostura. O grau de moagem é relacionado diretamente à tecnologia de filtração empregada na etapa de brassagem. Em alguns casos, as cascas devem ser preservadas, o que facilita a filtração do mosto. Em outras tecnologias, isso não é tão necessário, pois privilegia-se a recuperação do extrato presente nos grãos. A introdução de processos com moagem mais fina permitiu alterações nas curvas de mostura tradicionais e encurtou o processo. Além da extração mais intensa de açúcares, esse tipo de moagem ocasiona, em contrapartida, um aumento na extração e na solubilização de compostos como beta-glucanos e proteínas, que devem ter seus níveis regulados pelo uso de tempos menores nos processos de mostura e filtração do mosto, controle de pH, redução da incorporação de oxigênio e da agitação na

mostura e, eventualmente, pelo uso de enzimas tais como a beta-glucanase. Os tipos mais comuns de moagem nas cervejarias são: moagem seca ou levemente condicionada em moinhos de rolos; moagem em moinhos de impacto (moinhos “martelo” ou “disco”); moagem em moinhos de rolos com câmara de condicionamento; moagem condicionada por imersão (moagem úmida), em moinho de rolos.

Sistema de mostura

O objetivo principal da mostura é a transformação do amido contido no endosperma dos grãos em açúcares fermentáveis e não fermentáveis. Esta transformação que apresenta outras substâncias dissolvidas forma o extrato do mosto. Nos sistemas mais simples, após uma interrupção em uma ou mais faixas de temperatura, o mosto é separado dos resíduos sólidos, chamado de “bagaço”. Em alguns destes sistemas, uma parte do mosto é transferida para outro cozinhador, onde é aquecida e misturada de volta à tina de mostura principal. Em outro procedimento similar, o cozinhador também é utilizado para o cozimento de adjuntos, que são os cereais não maltados, que são transferidos para a tina de mostura principal para a finalização do processo. O mosto, após a filtração, segue para outro processo onde também ocorre a operação de aquecimento: a fervura. Ao final do processo de mostura, a temperatura é elevada para que a atividade enzimática seja reduzida ao máximo e também para facilitar a filtrabilidade do mosto, com isso, a viscosidade é minimizada. (AMBEV,2018).

Concentração do mosto:

O mosto é formado pelos sólidos que estão presente no extrato e pelo volume em que estes sólidos se encontram dissolvidos. As duas formas mais comuns de expressar a concentração do mosto são: densidade específica e a concentração em peso dos sólidos dissolvidos (graus plato), a densidade específica é mais utilizado nos Estados Unidos e Inglaterra e graus plato é mais utilizada nas Cervejarias ao redor do mundo. No Brasil, utilizamos esta terminologia. A eficiência de mostura geralmente é alta, em tinas de mostura mais antigas e nas micro e pequenas cervejarias pode varia de 85 a 95%. Nas salas de brassagem mais modernas com moinhos-martelo e filtros

de mosto de última geração, a eficiência pode atingir valores em torno de 100%. (AMBEV,2018).

Composição do mosto:

Na composição do mosto estão presentes os seguintes elementos: açúcares, dextrinas, beta-glucosanas, pentosanas, fosfatos e outros íons, proteínas, peptídeos, aminoácidos, lipídios, ácidos orgânicos e compostos fenólicos. Os principais componentes são os carboidratos com cerca de 90 a 92% e os compostos nitrogenados com cerca de 4 a 5% do extrato. A parte fermentável dos carboidratos será transformada em gás carbônico e etanol e a parte não fermentável, composta pelos açúcares maiores e as dextrinas, irá contribuir para a formação do corpo da cerveja. De fundamental importância para a formação da espuma e estabilidade coloidal da cerveja (brilho e turbidez), devido aos compostos nitrogenados solúveis, a mostura também influencia na formação dos aromas durante a etapa posterior, a fermentação, e isso se dá por conta dos aminoácidos presentes no mosto. (AMBEV,2018).

Curvas de mostura:

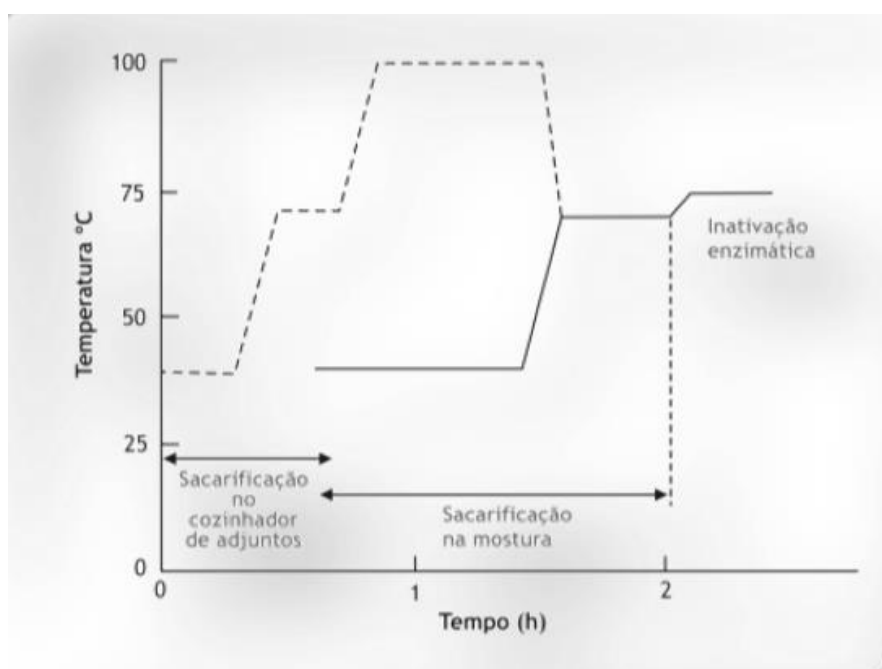


Figura 3.18: Curva de mostura.

Fonte: AMBEV (2018).

A curva de mostura é o perfil de rampas de aquecimento e de patamares de repouso de temperatura no processo de cozimento do mosto. Os processos mais tradicionais são: Infusão, decocção e aquecimento direto.

Infusão:

O método de infusão ocorre quando a água quente é adicionada aos grãos, geralmente em uma tina de mostura com fundo perfurado, que funciona também como tina de clarificação. Neste processo se utiliza uma moagem grossa. Este processo apresenta a vantagem de se utilizar um aquecimento indireto o que ajuda a preservar o teor enzimático e evita os off-flavors relacionados à queima do mosto, que acontecem com as temperaturas elevadas dos processos com aquecimento direto, como observados nas tinas a vapor. (AMBEV,2018).

Decocção:

No método de decocção tradicional, para se atingirem os patamares de temperatura, é feito o aquecimento de parte do mosto em outro cozinhador até a fervura. Em seguida, o mosto é devolvido à tina de mostura. Geralmente a diluição, nesses casos, é maior (cerca de 3 a 3,5 hL/100 kg de grãos), pois assim são facilitadas as transferências. As temperaturas dos patamares são atingidas por equilíbrio térmico entre os volumes de mosto da tina de mostura e do cozinhador. A fervura de uma porção do mosto resulta em:

- Quebra das estruturas celulares dos grãos;
- Gelatinização do amido;
- Desnaturação e precipitação das proteínas, inclusive as enzimas da parte fervida;
- Formação de aromas e mudança de cor com as reações de Maillard.

Aquecimento direto:

Atualmente, nas grandes cervejarias, há maior utilização do processo de mostura com concentração constante, por meio de tinas de aquecimento com paredes

duplas ou serpentinas que utilizam o vapor para o aquecimento do malte, o condensado é recuperado para melhor performance energética do processo.



Figura 3.19: Sala com tina de mostura com aquecimento direto.

Fonte: GEA (2019)

Filtração do mosto:

Após o processo de aquecimento do mosto é realizada a filtração, cujo objetivo é separar os componentes insolúveis do mosto. Nesta parte do processo são separados do extrato de mosto as cascas e partículas insolúveis do malte. A filtração do mosto é realizada nos filtros de separação, tina filtro, tina de mostura e tina de clarificação que são equipamentos de filtração de mosto formados por um tanque cilíndrico com um fundo falso, que não apenas age como filtro, mas ainda serve de suporte para a camada de sólido da mostura. (BLEIER et al., 2013).

Os filtros de mosto baseiam sua tecnologia na filtração em camada fina. Essa filtração ocorre com o uso de telas de material plástico resistente ao calor (geralmente polipropileno), dispostas sobre uma série de suportes verticais de perfil retangular ou quadrado (aproximadamente 1,5m de largura), com canais para escoamento do mosto e para passagem da água de extração. A espessura da camada filtrante varia entre 3 e 6 cm. Por possuir telas muito menos espessa do que as de uma tina-filtro, as velocidades de filtração nesse equipamento são maiores. As telas devem ser limpas

periodicamente com soda cáustica 0,15% a quente para evitar a colmatção dos furos, este processo é comumente chamado de CIP (clean in place) na cervejaria.

As tinas de mostura são equipamentos mais modernos que combinam as etapas de mostura e filtração em um único equipamento, o que agiliza o processo diminuindo o tempo de operação de brassagem o que permite um maior número de fabricos por dia. Como na tina de mostura as duas etapas ocorrem em um mesmo processo, os grãos devem ser moídos em uma granulometria maior para ficarem mais espessos, para evitar possíveis obstruções no equipamento. Os filtros de separação, tais como filtros prensa, podem trabalhar com grãos mais finos e permitem tempos de filtragem menores. Independente do filtro utilizado, ocorrem processos de enxague, que ajudam a extrair ainda mais açúcares dos grãos moídos de malte, auxiliando o processo de mostura. (BLEIER et al., 2013).

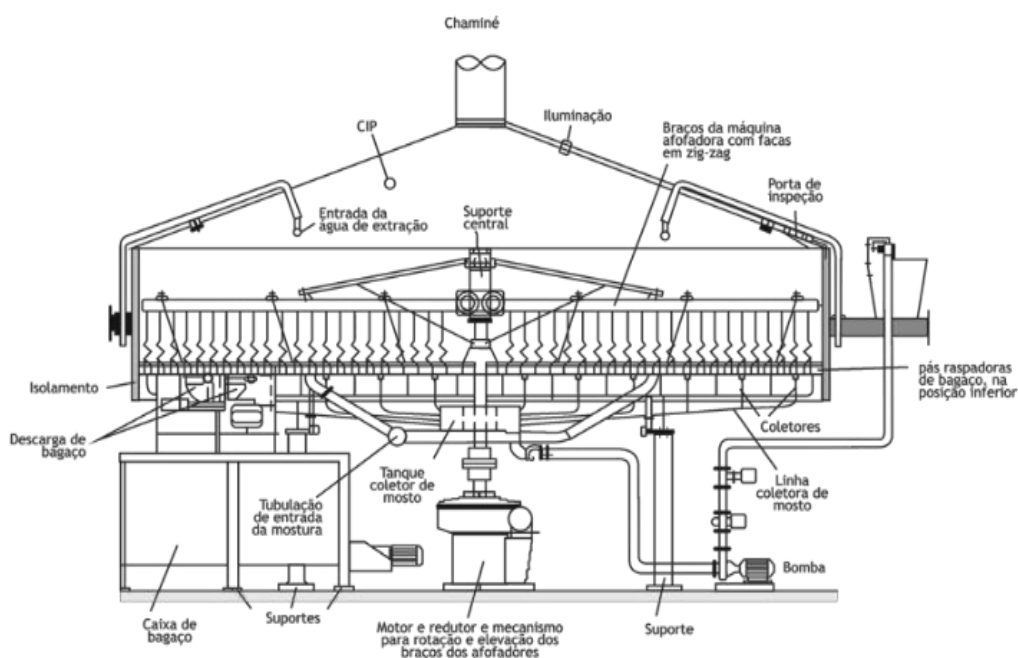


Figura 3.20: Tina de mostura.

Fonte: AMBEV (2018)

Fervura do mosto:

Após a filtração o mosto passa por um processo de fervura. O mosto filtrado é enviado para outro tanque onde é fervido até a temperatura de ebulição. Esta etapa do processo serve para concentrar o mosto por evaporação da água, desprender compostos indesejados. É nesta etapa do processo que se adiciona o lúpulo, que vai

incorporar o amargor da cerveja por intermédio da isomerização de α -ácidos contidos nos lúpulos. Algumas impurezas são eliminadas do processo, denominadas de “trub”, estão presentes proteínas, que são floculadas, e se não removidas irão prejudicar a aparência e o sabor da cerveja. O tempo de fervura é controlado para evitar a volatilização e o desprendimento dos óleos essenciais do lúpulo, responsáveis pelos sabores e aromas característicos (PALMER, 2006).

Reações químicas na fervura do mosto:

As principais mudanças ocorridas durante a fervura do mosto são:

- Inativação completa das enzimas;
- Esterilização do mosto;
- Extração e isomerização de compostos do lúpulo;
- Coagulação de material proteico do mosto;
- Formação de complexos proteína/polifenol;
- Formação de substâncias colorantes e aromáticas;
- Formação de substâncias redutoras;
- Diminuição do pH;
- Concentração do mosto pela evaporação de água;
- Evaporação de voláteis derivados do malte e do lúpulo.

Na fervura, poucas mudanças acontecem no teor de carboidratos do mosto, a não ser o aumento da concentração. Acima de 70°C, a taxa de inativação enzimática é muito intensa, de modo que, após a fervura, toda atividade enzimática cessou por completo, inclusive no caso das enzimas termoestáveis utilizadas comumente na cervejaria. (AMBEV,2018).

O processo de fervura:

O processo de fervura do mosto é realizado nas tinas de fervura ou “cozinheiros de mosto”. Após a filtração, o mosto é coletado diretamente no cozinador, ou em um tanque intermediário, onde é mantido aquecido para minimizar o risco de contaminação microbológica. Esta etapa não pode ser longa para evitar o crescimento de bactérias termófilas, assim como para evitar o escurecimento e as

alterações de sabor no mosto. O aquecimento nos equipamentos de fervura deve ser controlado a fim de que parte do mosto não seja caramelizada junto à interface de aquecimento, o que poderia prejudicar a troca térmica e, principalmente, ocasionar aromas de caramelo ou queimado para o mosto e para a cerveja. O pH da fervura pode ser ajustado com a adição de sais de cálcio ou ácido. Um valor de pH inicial de cerca de 5,2 ou 5,3 é considerado bom para o início do processo. A coagulação proteica e outros fatores acidificarão um pouco mais o mosto, que pode chegar a valores de pH próximos a 5,1. O lúpulo é adicionado diretamente à fervura ou geralmente em dispositivos de diluição compostos por pequenos tanques onde ocorre a circulação de mosto por uma diminuta bomba entre a tina de fervura e o tanque de dissolução. (AMBEV, 2018).

A adição de lúpulo:

Através do uso de tanques de diluição e de dosagem com ou sem bombas de circulação, as operações de lupulagem tornaram-se mais fáceis, principalmente no caso de lúpulo em pellets ou extrato. Certo grau de automação permite maior precisão no momento da dosagem, evitando desvios no amargor e nos aromas causados por erros na operação manual. As dosagens de lúpulo são calculadas por peso e pelo percentual de alfa-ácido nessa planta presentes. O volume de mosto e as taxas dos tipos de lúpulo utilizados devem ser levados em consideração no cálculo. O lúpulo e seus produtos são, em geral, conservados melhor a frio e longe de umidade, embora alguns tipos de extrato e de lúpulo pré isomerizados possam ser guardados em temperatura ambiente. A primeira porção adicionada é de lúpulo destinado ao amargor, a cerca de 60 minutos do final da fervura. Essa orientação não vale para o lúpulo pré isomerizado, que requer menos tempo. A segunda adição, de lúpulos aromáticos, é feita entre vinte minutos após o início e o final da fervura, dependendo do perfil de aromas desejado. (AMBEV, 2018).

Separação do trub quente:

Após a fervura, o trub formado deve ser separado do mosto, juntamente com os resíduos de lúpulo, se for o caso. As forças que mantêm os flocos de trub unidos são relativamente frágeis, desse modo, é preciso evitar forças de cisalhamento

excessivas no bombeamento do mosto para o equipamento de separação de trub. O equipamento mais utilizado é denominado comumente de Whirlpool e consiste em um tanque cilíndrico vertical, com uma relação altura/diâmetro entre 0,5 a 1,0m. O mosto é transferido tangencialmente para esse tanque, em velocidade suficiente para que as partículas mais densas se acumulem na porção central do fundo, que é plano na grande maioria dos casos, com uma leve inclinação (2 a 3°) para facilitar a limpeza. O processo de separação dura até 30 minutos. A retirada do mosto limpo é feita por saídas laterais em diferentes alturas, com a intenção minimizar o tempo de permanência do mosto no Whirlpool. Uma bomba envia o mosto para resfriamento por meio de um trocador de calor. É comum o uso de bombas com controle de velocidade para a redução da vazão ao final do resfriamento, esse procedimento visa a evitar o arraste de trub para a fermentação. Problemas relacionados ao desempenho do Whirlpool quase sempre são associados a fatores do processo de produção de cerveja em etapas anteriores, sendo os mais comuns à fervura em condições inadequadas ou o bombeamento agressivo. (AMBEV, 2018).

Resfriamento do mosto:

O mosto quente precisa ser resfriado rapidamente, em condições assépticas, até a temperatura de fermentação adequada para a levedura em uso. Os valores típicos para cervejas Lager estão entre 8 e 12°C, já para as cervejas de alta fermentação, entre 16 e 20°C. O equipamento usado para resfriamento é o trocador de calor de placas em estágio único ou duplo. Os fluidos refrigerantes são a água gelada a 2 ou 3°C, e a solução de etanol com temperaturas entre -3 e -5°C. A água quente resultante do resfriamento é recolhida a uma temperatura de 80°C. Essa água é reutilizada em algum ponto do processo de fabricação. Os volumes de água utilizados no resfriamento ficam em torno de 1,1 vezes o volume de mosto (para troca com água gelada). (AMBEV, 2018).

Fermentação:

É nesta etapa do processo de fabricação da cerveja que as leveduras são inoculadas no mosto, após o processo de resfriamento e aeração. O processo

fermentativo ocorre com a produção de álcool e liberação de gás carbônico. (MORADO, 2008).

Durante o processo fermentativo, os açúcares são metabolizados pelas leveduras liberando produtos que ajudam a formar o perfil de sabor da cerveja. O tempo varia de acordo com o perfil da cerveja e do grau alcoólico que se deseja para o produto final. (BLEIER, CALLAHAN et al. 2013).

A fermentação ocorre quando uma cultura de leveduras é adicionada ao mosto frio. A levedura utiliza os açúcares do mosto como fonte de energia. Boa parte das características organolépticas da cerveja vem de produtos e subprodutos da fermentação. Os microrganismos responsáveis pela fermentação da cerveja são as leveduras, que podem ser encontrados sob os formatos ovoides, elipsoidais, cilíndricos ou alongados. Podem estar dispostas isoladamente, em pares ou em cadeias curtas, com o tamanho variando entre 5 e 20 μm . (AMBEV,2018)



Figura 3.21: Tanques fermentadores.

Fonte: Edelbrau (2019).

O processo de Fermentação:

A levedura ao ser dosada em um tanque de fermentação, encontra-se inicialmente em um estado de repouso. Ao se inocular esta levedura em um mosto saturado em oxigênio, uma série de eventos necessários para a retomada do ciclo de reprodução celular começa a acontecer. As células que estavam em fase estacionária

reagem à presença de nutrientes e entra em estado de crescimento e entram em estado G1 (intervalo entre o final e o começo de um novo ciclo de reprodução da célula). Durante as próximas duas horas, o volume celular aumenta, o extrato de mosto se mantém inalterado e a biomassa total das células diminui em até 20%. Nesta fase, a energia das células vem da própria reserva de glicogênio das leveduras. Para que a divisão celular ocorra, é essencial que haja a síntese de esteróis e ácidos graxos insaturados, e isso ocorrerá com a utilização de oxigênio presente no mosto. Em seguida a levedura entra numa fase chamada de fase S (a levedura inicia o processo de síntese de DNA, durante o qual a célula filha começa a desenvolver-se), e cerca de 90% da população celular encontra-se nesse estágio após 6 horas de inoculação.

A população de células que contém os brotamentos (células-filhas) chega a 80% do total, e o número de células passa a aumentar velozmente a partir de sete horas da inoculação. Nesse ponto, começam a ser detectáveis mudanças significativas na biomassa e na utilização de açúcares pela levedura. Esses eventos são acompanhados por um aumento do volume das células em relação ao volume celular no estado estacionário (início da fermentação) chegando a um pico de 20% após seis horas de inoculação. Tais processos fazem parte da preparação da levedura para suas atividades na fermentação da cerveja.

Durante todo o processo de fermentação ocorrem três ou quatro ciclos de divisão celular, o que eleva a população de uma dosagem inicial próxima de 10 milhões de células /mL para mais de 80 milhões de células/mL.

O brotamento é um processo importante na fermentação pois representa a formação de uma célula-filha na superfície da célula mãe, com posterior separação entre as células, que são idênticas geneticamente, com exceção de eventuais mutações. O % de brotamento e o volume decaem ao longo do processo de fermentação e representam uma média da população das leveduras. A queda no % do brotamento, indica que a divisão celular é diminuída e cessa em um ponto intermediário da fermentação.

Dentre os diversos compostos gerados durante o processo de fermentação que dão corpo, aroma e sabor para a cerveja, o etanol obtido por via fermentativa confere o teor alcoólico da cerveja que varia entre os diversos tipos, mais comumente se situando em 4 a 5% nas cervejas tipo Pilsen, uma das as mais apreciadas em todo o mundo. Outro subproduto de destaque é o gás carbônico que é recuperado no

processo purificado e reutilizado na carbonatação da própria cerveja, melhorando algumas de suas propriedades organolépticas.

Separação da levedura pós-fermentação:

Ao final da fermentação a levedura é recolhida para ser reutilizada, isso é levado a cabo com a separação da levedura da cerveja, que é conseguida pela remoção periódica da levedura posteriormente sedimentada em temperaturas baixas ou por separação mecânica da levedura, através do processo de centrifugação da cerveja transferida entre os tanques de fermentação e maturação. O processo de separação mecânica é o mais utilizado nas cervejarias modernas, o equipamento utilizado para este fim é a centrífuga, que são construídas em aço inoxidável, contendo sequências verticais de discos, que em funcionamento giram a rotações elevadas. (AMBEV,2018).

Maturação da cerveja:

A cerveja contém proteínas e flavonoides simples, que formam pontes de hidrogênio frágeis com as proteínas. Estes complexos não contribuem muito com a turbidez visível devido ao seu baixo peso molecular. Neste estágio, ainda não são visíveis a olho nu. As temperaturas mais baixas intensificam a formação desses complexos, que pouco a pouco vão se tornando maiores. Os flavonoides se polimerizam após algum tempo, formando cadeias curtas de três ou quatro unidades chamadas de tanóides, que por sua vez são capazes de formar múltiplas ligações com proteínas criando partículas coloidais que se tornam visíveis a olho nu. Este fenômeno é chamado de *Chill Haze* ou turbidez a frio. Se não houver o processo de maturação esta turbidez aparecerá no produto quando ele for resfriado no local de consumo tornando o aspecto da cerveja pouco atraente. O fenômeno do *Chill Haze* é fundamental para uma boa separação futura em filtros especiais de adsorção com filtro de sílica-gel ou PVPP (polivinilpolipirrolidona) que absorvem as proteínas e os polifenóis, eliminando estes complexos da cerveja final. Após o processo de maturação a cerveja segue para o processo de filtração sob temperatura mais baixa possível (-1°C a -3°C) para que o processo possa separar todos os compostos menos solúveis neste intervalo de temperatura. (AMBEV,2018).

Filtração:

É na etapa de filtração que são eliminadas as partículas em suspensão, que aparecerem no processo de maturação da cerveja e que estão remanescentes da fermentação que podem ser resíduos de leveduras, resinas de lúpulo e ligações tanino-proteicas. O produto final é uma cerveja límpida e brilhante. Costuma-se dizer que a filtração é um processo de polimento da cerveja. As partículas em suspensão na cerveja se não forem removidas, podem alterar o sabor e a textura do produto final. O processo de filtração não altera a composição e o sabor da cerveja, mas é fundamental para garantir sua apresentação, conferindo-lhe um aspecto cristalino.

A complexidade do processo vai desde um simples filtro de terra diatomácea até os equipamentos mais sofisticados com diversos filtros em série, presentes nas cervejarias mais modernas de médio e grande porte.

Uma propriedade importante para se definir o processo de filtração ideal é o tamanho da partícula a ser removida do meio, são três as mais comuns: as dispersões graúdas, que são as maiores que $0,1\ \mu\text{m}$ e que são visíveis ao microscópio, tais como as leveduras, bactérias e proteínas. Os coloides que são as partículas com tamanho entre $0,01$ e $0,1\ \mu\text{m}$, que são aquelas que provocam o efeito Tyndal, neste caso temos proteínas com peso molecular maior que 60.000 , e as dispersões moleculares que são as partículas com tamanho menor que $0,001\ \mu\text{m}$, e que não são visíveis ao microscópio, que geralmente se apresentam solúvel no meio e que só podem ser separadas por adsorção ou troca iônica.

Dentre as possibilidades de separação das partículas presentes na cerveja temos: o efeito peneira, onde as partículas maiores permanecem sobre a superfície da camada filtrante não penetrando nos poros. O efeito de profundidade onde as partículas aderem aos poros em função da rugosidade do meio filtrante e o efeito de adsorção onde partículas muito pequenas são retidas por um fenômeno superficial de adsorção que pode variar de acordo com o material que é utilizado no processo.

Para uma boa filtrabilidade algumas características são importantes: a densidade da cerveja que está relacionada com o teor alcoólico, a viscosidade que é afetada pelas partículas dissolvidas e pela temperatura e as partículas turvadoras do meio que são o polifenóis, carboidratos, proteínas e outros materiais em suspensão.

Os materiais filtrantes mais comuns que são utilizados em cervejarias são: as terras diatomáceas (kieselgur), as perlitas, celulose, carvão ativo. Os equipamentos

mais utilizados são o filtro peneiras com elementos filtrantes horizontais, filtros de vela, filtro de PVPP, centrífugas. Filtros placa, filtros bag ou com cartucho filtros esterilizantes por membrana.

Na filtração o teor de gás carbônico da cerveja é corrigido antes de seguir para o envase e pasteurização. (CERVESIA,2015).

Pasteurização:

No processo cervejeiro após a filtração obtém-se o chopp que tem um tempo médio de validade de 12 dias, somente após a pasteurização é que a cerveja propriamente dita é produzida, e o tempo de validade passa para um período médio de 6 meses a partir da data de fabricação.

A cerveja possui em sua constituição água, álcool, açúcares, aminoácidos, CO₂, oxigênio, além de inúmeras outras substâncias e microrganismos que são os responsáveis pelo processo fermentativo e que permanecem no produto final mesmo após a filtração. Desta forma, existe a necessidade de inativar estes microrganismos remanescentes na cerveja, que apesar de não serem patogênicos, podem causar danos irreparáveis ao produto (turvação, sedimento, odores estranhos, sabores estranhos e acidez) se não forem controlados.

O método utilizado nas cervejarias para o controle biológicos dos microrganismos é o da Pasteurização, cujo princípio se baseia no aquecimento gradual da cerveja até que seja atingida uma carga térmica que elimine ou inative os microrganismos e enzimas que possam estar presentes na garrafa ou lata, e este processo deve ser realizado de modo a causar o menor impacto possível no paladar do produto. Na pasteurização, o objetivo não é a esterilização da cerveja, e sim prover um meio para reduzir a chance de contaminação por microrganismos presentes nesta.

O método exhibe vantagens e desvantagens. A parte positiva é que a estabilidade biológica é praticamente ilimitada e do lado negativo é a possibilidade de alteração no aroma e paladar da cerveja (estabilidade organoléptica), que piora à medida que a concentração de oxigênio dissolvido na cerveja aumenta. Assim, torna-se necessário o controle preciso do processo de pasteurização, a fim de evitar os efeitos nocivos ao sabor da cerveja. (SILVA, 2015).

Para o controle do processo de pasteurização, são estabelecidas formas de associar o tempo de exposição de determinado microrganismo a uma temperatura

suficiente para que seja reduzida 99% de sua população, ou seja, é fundamental para o sucesso do processo que sejam definidas as resistências dos microrganismos quando expostos às condições de pasteurização. Uma forma de medir esta resistência é com a utilização de uma grandeza chamada de Unidade de Pasteurização (UP) que é a medida da resistência de determinado microrganismo quando exposto a uma temperatura de 60°C durante 1 minuto. Como exemplo citamos o limite de resistência de alguns microrganismos descritos na tabela 4.1.

Tabela 4.1: lista de microrganismos e suas respectivas UP's.

Micrororganismo	Unidades de pasteurização (UP)
<i>Pectinatus</i>	0,5
<i>Pedicocos</i>	0,5
<i>Lactobacilus</i>	0,5
<i>Levedura selvagem</i>	10

Fonte: (SILVA, 2015).

O valor da UP depende entre outros fatores da resistência do microrganismo ao calor, do número de microrganismos iniciais na cerveja, da composição e do tipo de cerveja, do tipo de embalagem e do grau de segurança desejado.

A medida da UP pode ser manual ou automática, onde são avaliadas a temperatura e o tempo de permanência da embalagem dentro do pasteurizador. (SILVA, 2015).

Processos de pasteurização:

Pasteurização tipo flash:

Utiliza um trocador de calor tipo placas, com um fino filme e uma seção de espera. A cerveja passa pelo trocador de calor onde recebe uma carga térmica para atingir a temperatura de pasteurização. Neste processo a cerveja é pasteurizada inicialmente e envasada depois. A embalagem não é pasteurizada, o que oferece um maior risco à contaminação, neste caso são utilizadas temperaturas altas em um curto tempo de pasteurização.



Figura 3.22: Pasteurizador tipo flash.

Fonte: Zumex (2018).

Pasteurização tipo Túnel:

Neste método utiliza-se um túnel onde a embalagem recebe jatos de água com diferentes gradientes de temperatura durante o percurso no interior do pasteurizador. A água é utilizada como o fluido de aquecimento e resfriamento. Neste processo a cerveja é envasada primeiro em seguida sendo submetida toda embalagem ao processo de pasteurização. São utilizadas temperaturas relativamente baixas durante um logo tempo.

O pasteurizador tipo túnel possui tanques para a reserva de água utilizada no processo de pasteurização. Estes tanques devem ser dotados de controladores de nível para garantir a alimentação constante das bombas e a reposição da água utilizada no pasteurizador. O aquecimento da água no processo é garantido por um trocador de calor que trabalha com o set point indicado para se obter a UP desejada no processo de pasteurização.

Nos pasteurizadores o aquecimento da água para a pasteurização é feito por trocadores de calor que são instalados na parte externa do equipamento, para facilitar a manutenção e minimizar a corrosão no equipamento, os trocadores de calor devem possuir válvulas para o controle de vapor, purgadores e todo o aparato de segurança necessários para os equipamentos que utilizam vapor para aquecimento do fluido no processo. (SILVA,2015).



Figura 3.23: Pasteurizador tipo túnel.

Fonte: KHS (2016)



Figura 3.24: Trocador de calor de pasteurizador.

Fonte: Acervo do autor (2019)

As bombas de recirculação da água têm a finalidade de manter a pressão adequada nos esguichos para permitir a troca de calor constante entre a água e a embalagem. Na sucção das bombas são instaladas peneiras para evitar problemas como cavitação e entupimento por lama formada no processo.



Figura 3.25: Bomba de recirculação de água do pasteurizador.

Fonte: Acervo do autor (2019)

No interior do pasteurizador a distribuição da água é realizada por esguichos que devem ter uma pressão suficiente para permitir a troca térmica perfeita com a garrafa. Normalmente acima de 1 kgf/cm^2 , dependendo do tipo do pasteurizador. A geometria do da instalação deve permitir que os esguichos de água se entrecruzem para formar uma zona de temperatura intermediária entre um esguicho e outro, evitando assim estouro de garrafas, por conta de falha do esguichamento.

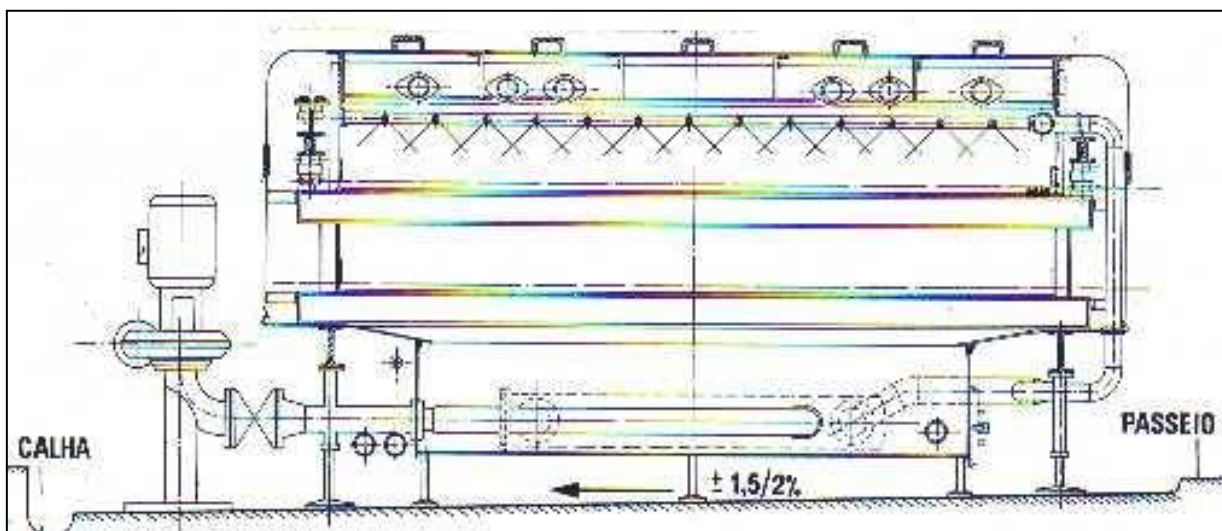


Figura 3.26: sistema de esguichamento no pasteurizador.

Fonte: AMBEV (2015)

A vazão no esguichamento deve ser igual ou superior a 20 m³/h. existem dois tipos de esguichos, o tipo tubo e o tipo peneira.



Figura 3.27: Esguicho tipo tubo.
Fonte: Acervo do autor (2019)



Figura 3.28: Esguicho tipo peneira.
Fonte: Acervo do autor (2019).

No tipo tubo, os esguichos estão ligados a um tubo coletor por uma luva de borracha que evita perda de pressão por vazamento. Esse tipo de esguicho forma um

leque, e é importante garantir que se tenha uma uniformidade no orifício do tubo para que o leque se forme.

No tipo peneira, o que garante a pressão nos esguichos é a espessura da lâmina de água na peneira instalada na parte superior da câmara de pasteurização. Este tipo de esguicho é muito susceptível a entupimentos.

Durante a pasteurização devem ser observados os parâmetros:

a. O controle da qualidade microbiológica final, para garantir a estabilidade microbiológica.

b. O aquecimento e resfriamento lento da cerveja evitando o choque térmico, numa taxa de 1,5 a 1,8°C/min.

c. O controle de pressão dos esguichos, temperatura e UP.

Dentre os parâmetros apresentados a água de processo tem grande influência na variação do aquecimento e resfriamento, controle de pressão, temperatura e UP.

Existem dois tipos de circuitos de água para pasteurizadores, o circuito aberto sem recirculação e o circuito fechado com recirculação e torre de resfriamento. No circuito aberto a água é utilizada apenas uma vez entrando e saindo do circuito, o que causa um grande desperdício de água e energia térmica. Como alternativa para a diminuição destes desperdícios, alteração nos projetos vem ocorrendo com frequência no sentido de se utilizar sistema abertos com recirculação. Nestes projetos o tratamento da água de processo é fundamental para garantir que os equipamentos fiquem livres de incrustação, corrosão e principalmente crescimento microbiológico que leva ao aparecimento de lama e biofilme que influenciarão na troca térmica e na pressão de esguichos no processo diminuindo a troca térmica e aumentando a quebra de garrafas, que propiciam eventuais contaminações da água com cerveja que em conjunto com a temperatura do processo aumentam a condição de proliferação de microrganismos que formam lama potencializando também o aparecimento de corrosão sobre depósito. Como resultado do descontrole há um aumento da manutenção do equipamento e problemas operacionais.

Um cuidado especial deve ser observado com relação ao pH da água, de acordo com o tipo de embalagem que está sendo pasteurizada. Para garrafas de vidro o pH deve ser mantido na faixa de 7,5 a 8,5 e nos pasteurizadores de lata de alumínio o pH deve ser mantido entre 6,5 a 7,0. Cuidados especiais com relação à prevenção de corrosão, incrustação, biofilme e lama também devem ser observados com a elaboração de um correto programa de tratamento com a utilização de inibidores de

corrosão, incrustação e biocidas oxidantes e não oxidantes para inibir o crescimento de microrganismos.

Com relação ao pasteurizador de latas alguns cuidados especiais devem ser tomados em virtude do alumínio utilizado para a confecção da lata. Processos corrosivos, muita das vezes estão associados como causa de perdas em latas de alumínio. Vazamentos por corrosão em tampas ou fundo de latas podem ocorrer por dois processos: vazamento primário ou corrosão secundária.

No vazamento primário o processo pode ser originário de uma corrosão na tampa, vazamento pela recravação ou ruptura nas latas.

Quando o processo ocorre na região da linha de corte da tampa, causa o seu enfraquecimento. A consequência é a ruptura da escotilha da tampa e o vazamento do líquido do interior da lata, fenômeno conhecido como blow out, que se manifesta entre 5 e 25 dias após o envase. Dentre os fatores que podem originar o blow out estão: cloretos na água de processo, cuja concentração deve ser menor que 20 ppm e o pH da água de processo que deve ser mantido entre 6,5 e 7,5.

A corrosão secundária é o outro tipo de processo corrosivo observado; neste caso ocorre de fora para dentro das latas, geralmente no fundo. O vazamento primário molha a caixa ou a bandeja com a bebida, que geralmente tem pH ácido. O líquido vazado ataca o fundo das latas. Durante o transporte, a temperatura elevada torna a ação ainda mais agressiva. Começa então uma reação em cadeia, com mais latas corroídas apresentando vazamento.

Outro problema que pode aparecer são o escurecimento do anel ou fundo da lata ou aparecimento de manchas no fundo das latas que podem ser originárias de: pH da água de processo superior a 7,5 ou inferior a 6,5, temperatura de pasteurização > 61°C, permanência prolongada da embalagem no warmer ou pasteurizador.

Desta forma um controle preciso do pH em pasteurizadores deve ser executado, fazendo a correção quando necessário. (SILVA,2015).

4 – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DOS EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS:

A estação de tratamento dos efluentes industriais é a área da fábrica responsável pelo tratamento e disposição final dos efluentes líquidos resultantes do processo de fabricação da cerveja. Atualmente o processo é realizado em duas etapas: O tratamento primário que utiliza processos físicos para a remoção de impurezas grosseiras que estão presentes no efluente e o processo secundário que são processos biológicos e que enquadram o efluente para o descarte adequado. (AMBEV, 2013).

4.1 – OBJETIVO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS:

O objetivo é tratar o efluente gerado na cervejaria, de modo que atenda aos requisitos legais de lançamento de efluentes, seja no corpo receptor ou rede de esgoto pública, sempre respeitando a legislação em cada local onde são instaladas as fábricas. (AMBEV,2013).

4.2 – ETAPAS DO PROCESSO:

Tratamento primário e pré-tratamento:

Nessa etapa o efluente fabril adquire características necessárias para o melhor processamento no tratamento biológico. São realizadas as seguintes operações:

Gradeamento:

É uma operação realizada para a remoção de sólidos grosseiros como rótulos, canudos e embalagens plásticas afim de proteger o sistema de bombeamento, tubulações e as unidades de tratamento subsequentes bem como o corpo receptor. Neste processo são utilizados sistemas que utilizam um tipo de peneira feita com grades com espaçamento entre elas. (AMBEV,2013).

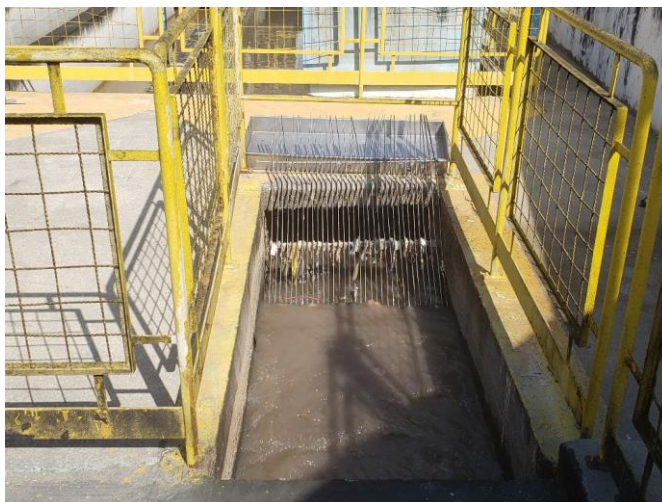


Figura 4.1: Gradeamento.

Fonte: Acervo do autor (2019).

Caixa de areia:

A finalidade desta etapa é a remoção da areia, uma vez que o efluente industrial também recebe o fluente pluvial e da lavagem de pisos da fábrica. O processo de remoção se dá pela sedimentação por gravidade da areia contida no efluente bruto. A remoção da areia é necessária pois pode causar abrasão e obstrução nas tubulações e por tender a ficar retida nos reatores aeróbicos e anaeróbicos e acumular material inerte no lodo, o que pode causar esfarelamento do mesmo. (AMBEV,2013).



Figura 4.2: Caixa de areia

Fonte: Acervo do autor (2019)

Peneiramento:

A peneira remove os resíduos sólidos de difícil biodegradação no reator anaeróbico, tais como, casca de malte e arroz que não são removidos no gradeamento e não possui peso suficiente para decantar na caixa de areia, e que não devem entrar no reator.

Esta etapa é uma etapa necessária para a proteção do reator anaeróbico, porém cabe ressaltar que quanto melhor for o efluente enviado para a estação de tratamento de efluentes (ETEI), melhores serão as condições de trabalho. O bagaço de malte por exemplo, deve ser retido no silo de bagaço. Um processo correto da transferência de bagaço do silo para o caminhão de que fará o transporte externo deve ser garantido para evitar que o bagaço caia no chão e possa acessar a coleta de efluente pluvial. Quanto melhor for esta operação, uma menor quantidade de bagaço irá para a estação, minimizando os riscos de parada a estação de tratamento de efluentes.



Figura 4.3: Operação de peneiramento.

Fonte: Acervo do autor (2019).

Tanque de equalização:

Este tanque tem a função de homogeneizar todo o efluente que chega na ETEI, evitando que os reatores recebam choque de vazão, demanda bioquímica de oxigênio

(DBO), demanda química de oxigênio (DQO), pH, temperatura, sólidos entre outros. No tanque de equalização são feitos os ajustes nos parâmetros do efluente de forma a enquadrar o efluente para o tratamento. A variação brusca de qualquer dos parâmetros de controle poderia prejudicar a eficiência do processo de tratamento, comprometendo o resultado final.

4.3 – TRATAMENTO SECUNDÁRIO:

Esta etapa é responsável pela redução da matéria orgânica do efluente com a utilização de agentes biológicos, de forma a enquadrar o efluente de saída da fábrica para o corpo receptor dentro da legislação aplicável. Em geral, nas Cervejarias o tratamento secundário tem dois tipos de tratamento biológico: o anaeróbico e o aeróbico. (AMBEV,2013).

Digestão anaeróbica do efluente líquido:

Nesta etapa, a matéria orgânica contida no efluente industrial é enviada para reatores anaeróbicos do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) ou IC (internal circulation), que fazem a biodigestão anaeróbica do efluente, com redução entre 75 a 90% da matéria orgânica medida através da DQO do efluente bruto. A digestão anaeróbia tem as seguintes etapas:

Reator/tanque de acidificação:

Nesta etapa, ocorrem três processos observados no mecanismo da biodigestão anaeróbica. O primeiro deles é a hidrólise, onde a matéria orgânica, que é composta principalmente de lipídeos, proteínas e carboidratos se apresenta em forma polimérica com grandes cadeias carbônicas, deve ser inicialmente quebrada em materiais dissolvidos mais simples para adquirir um tamanho suficiente para que possam atravessar a parede celular e serem digeridas pelas bactérias anaeróbicas. Este processo de conversão requer a interferência das chamadas exoenzimas que são excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas e fazem a digestão extracelular.

Neste processo, as proteínas se degradam e transforma-se em aminoácidos, os carboidratos em açúcares solúveis e os lipídeos em ácidos graxos.

Após a hidrólise, ocorrem dois processos: a acidogênese e acetogênese com a ação de dois tipos de bactérias as acidogênicas e as acetogênicas.



Figura 4.4: Reator anaeróbico tipo Circulação Interna

Fonte: Acervo do autor (2019)

Na acidogênese, as bactérias da espécie *Clostridium* e *Bacteroids* metabolizam os produtos solúveis produzidos na hidrólise, convertendo-os em compostos mais simples que são excretados pelas células. Nesta etapa são produzidos: ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, e o crescimento de novas células bacterianas. A denominação de acidogênese se deve ao fato de que o principal produto desta fase são os ácidos graxos voláteis. (AMBEV,2013).

Nesta etapa que são adicionados nutrientes para as bactérias. O pH na entrada do sistema anaeróbico deve ter um valor entre 6,8 a 7,2. A correção se dá pela adição de soda cáustica ou ácido clorídrico. O acerto de nutrientes é feito com base na análise de nitrogênio e fósforo, e são utilizados produtos como ureia para a correção de nitrogênio e ácido fosfórico para a correção de fósforo. O outro processo que ocorre praticamente simultaneamente com a acidogênese e a acetogênese, no qual as bactérias acetogênicas oxidam os ácidos graxos gerados na fase acidogênica formando hidrogênio, gás carbônico e acetato. (AMBEV,2013).

Reator de metanização:

Após a etapa de acidificação começa a metanogênese, que é a etapa final do processo anaeróbico. Nesta etapa um conjunto de bactérias chamadas de *arqueas metanogênicas* irão produzir o biogás, que é uma mistura de gases resultantes do processo de biodigestão anaeróbica, cuja composição tem percentuais variados de metano, gás carbônico, gás sulfídrico, nitrogênio, oxigênio e amônia em condição saturada com água.

Em função da afinidade pelo substrato e da magnitude de produção de metano, as bactérias metanogênicas são divididas em duas classes: as acetoclásticas e as hidrogenotróficas.

As acetoclásticas são as predominantes no processo de biodigestão anaeróbica e formam o metano a partir do ácido acético sendo responsáveis pela produção de 60 a 70% de todo o biogás gerado no processo. Estas bactérias pertencem a dois gêneros principais: as *Methanosarcina* (formadoras de cocos) e as *Methanosaetas* (formadoras de filamentos). A reação que se processa nesta etapa é:



A outra classe é a das bactérias metanogênicas hidrogenotróficas que produzem o metano a partir do hidrogênio e do gás carbônico. As bactérias hidrogenotróficas mais frequentemente isoladas em reatores anaeróbicos são do gênero *methanobacterium*, *methanospirillum* e *methanobrevibacter*. Esta via de produção de metano converte 30% do material orgânico em metano e a reação processada é:



O controle efetivo do pH do reator deve ser realizado na rotina de monitoramento do tratamento anaeróbico, pois a fermentação ácida tende a causar um abaixamento do valor do pH, e se a metanogênese não acompanhar a taxa de produção dos ácidos graxos, uma situação de instabilidade pode se instalar no processo, o que levará a queda da atividade metanogênica e um desequilíbrio do sistema com o aumento da produção líquida de ácido, e um “azedamento” do conteúdo do reator anaeróbico causando uma falha operacional. (ELS, 2007).

O perigo de azedamento pode ser evitado quando se mantém um equilíbrio entre as fermentações ácida e metanogênica, através da manutenção de uma capacidade metanogênica alta e uma boa estabilidade do valor do pH através do

tamponamento do meio reacional no reator anaeróbico. Normalmente a capacidade de tamponamento é suficientemente alta para afastar o perigo de azedamento do reator anaeróbico.

Um equilíbrio do reator anaeróbio é obtido pelo equilíbrio das populações bacterianas acidogênicas e metanogênicas, que é verificado através do acúmulo de ácidos voláteis no reator anaeróbico, concentrações abaixo de 200 mg HAc/L são indicativas de uma condição normal de operação do reator anaeróbico. (AMBEV,2013).

As metanobactérias são microrganismos exigentes com relação à temperatura, pH, oferta de nutrientes e necessitam que as condições de trabalho padrão para a operação do reator anaeróbico sejam respeitadas. Estas bactérias têm um crescimento lento, exigindo cuidados para evitar que saiam do reator anaeróbico junto com o efluente tratado. A presença de compostos tóxicos, pH fora da faixa, altas concentrações de ácidos voláteis, devem ser evitados, pois podem levar à perda da capacidade de decantabilidade do lodo, dificultando a retenção das metanobactérias no reator. A análise da estabilidade do sistema deve ser efetuada pelo conjunto de todos os parâmetros referenciados. (AMBEV,2013).

A efetiva remoção da matéria orgânica contida no efluente ocorre através da produção de metano e conseqüentemente da remoção da DQO, estes fatores são indicativos de estabilidade do sistema anaeróbico. Para que se possa operar o sistema anaeróbico é necessário determinar vazão máxima de operação do reator, considerando a massa de lodo no reator e sua atividade.

Tanque de aeração (reator aeróbio):

Após o efluente sair do reator anaeróbico, apesar da remoção de cerca de 75 a 90% da DQO, ele ainda necessita de uma etapa de polimento para que seja enquadrado conforme a legislação aplicável antes do descarte no corpo receptor. Este polimento é a remoção da matéria orgânica residual que é feito em um sistema aeróbico mediante a aeração do meio reacional. (AMBEV,2013).

Nesta etapa a matéria orgânica remanescente é estabilizada na presença de oxigênio, que é garantida pela aeração do meio, geralmente em cervejarias mais antigas, utilizam-se aeradores de superfície que garantem a concentração de oxigênio na água na faixa de 1,0 a 3,0 mg/l.

Em paralelo as bactérias aeróbicas auxiliam na remoção da matéria orgânica remanescente pela via bioquímica o que acontece por através de uma reação de oxidação microbiana juntamente com síntese celular. (BARBOSA, 2012).

Da mesma forma que as bactérias anaeróbicas, as aeróbicas também utilizam a matéria orgânica contida no efluente como fonte de alimento, porém não produzem biogás em seu metabolismo, as bactérias aeróbicas convertem a matéria orgânica em gás carbônico, água e crescimento celular que é removido do processo como lodo. (SILVA, [2009]).



Figura 4.5: Tanque de aeração com aeradores submersos

Fonte: Acervo do autor (2019)

O controle operacional do sistema aeróbico, considera o ajuste da quantidade de sólidos do tanque de aeração para atender a relação F/M (F=food e M=microrganisms) através de uma maior ou menor retirada de lodo excedente. O sucesso do tratamento dependerá da decantabilidade do lodo que é medida pelo índice volumétrico do lodo (IVL), sendo recomendado valores menores que 200 mL/g de sólidos suspensos totais (SST). Uma sobrecarga orgânica, que significa uma alta relação F/M, indica que há uma carência de oxigênio dissolvido, falta de nutrientes e presença de compostos tóxicos, o que irá influenciar na taxa de decantação do lodo. O controle operacional também deverá considerar a recirculação do lodo para o tanque de aeração de forma a manter a concentração de sólidos totais dentro da faixa

desejada de modo a evitar a subida excessiva do manto de lodo no decantador e o arraste de sólido para o efluente final.

O processo aeróbico é biológico e por isto necessita com certa frequência de uma análise microbiológica para verificar a qualidade do lodo. A presença de microrganismos filamentosos pode indicar baixa decantabilidade; protozoários e metazoários são indicadores de boas condições ambientais e nutricionais do sistema. (AMBEV,2013).

Decantador secundário:



Figura 4.6: Decantador Secundário

Fonte: Acervo do autor (2019)

No decantador secundário, a massa líquida composta por sólidos em suspensão na forma de flocos de microrganismos e água oriunda do tratamento aeróbico no tanque de aeração, chega por ação da gravidade. Este decantador é construído com o fundo em forma de cone, de modo a facilitar a decantação dos sólidos suspensos no processo de clarificação do efluente.

O efluente isento de sólidos é o efluente tratado que verte no topo do decantador sendo coletado por canaletas laterais e destinado para o corpo receptor passando antes por uma rápida desinfecção de forma a garantir que os índices de coliformes fecais e totais estejam dentro dos parâmetros definidos na legislação.

Os sólidos sedimentados no fundo do decantador (lodo biológico) são removidos continuamente por um mecanismo de raspagem e conduzidos para um poço central de onde são removidos do tanque e encaminhados para o sistema de retorno de lodo, onde parte do lodo retorna para o tanque aeróbico para garantir uma quantidade suficiente de microrganismos no processo. O excesso de lodo é transferido para o adensador de lodo. (AMBEV,2013).

Adensador de lodo:

No adensador, o lodo decanta novamente para que ocorra uma nova separação do líquido e conseqüente aumento da concentração de sólidos, que chega a atingir 2% e em seguida encaminhado para o sistema de prensas ou centrifugação e o líquido clarificado do adensador é drenado para o tanque de equalização ou para o sistema aeróbico para ser reprocessado. (AMBEV,2013).



Figura 4.7: Adensador de lodo

Fonte: Acervo do autor (2019)

Desidratação do lodo:



Figura 4.8: Decantador Centrífugo

Fonte: Acervo do autor (2019)



Figura 4.9: Lodo desidratado

Fonte: Acervo do autor (2019)

A desidratação do lodo é realizada com a prensa desaguadora, filtro prensa ou decantador centrífugo, onde o lodo após receber uma dosagem de polieletrólito para melhorar a floculação, é prensado para a remoção da maior quantidade possível de água, que retorna para o sistema aeróbio, e o lodo desidratado segue para descarte apropriado em aterro sanitário ou utilizado em sistema de compostagem. O processo

de compostagem permite que o lodo seja reaproveitado e utilizado como matéria orgânica fornecedora de nutrientes para o solo. A compostagem é uma técnica viável e de baixo custo para a reciclagem agrícola do lodo obtido na ETEI da cervejaria. O processo de compostagem promove a estabilização e higienização do composto formado por terra misturada como o lodo desidratado. O produto final atende aos padrões físicos, químicos e microbiológicos exigidos pela legislação pertinente e o processo torna-se uma alternativa segura para a disposição final do lodo da estação de tratamento de efluentes da cervejaria.

Utilizações do biogás produzido na cervejaria:

O biogás é produzido em todas cervejarias do grupo ao qual pertence a cervejaria cujos dados estão sendo avaliados neste trabalho. No Brasil são 25 fábricas de cervejas e refrigerantes e dentre as aplicações para o biogás incluem: a queima em caldeira, a geração de energia elétrica com a utilização de microturbinas e a queima em forno para a fabricação de vidro.

No processo de utilização para a queima em caldeiras e microturbinas, o biogás é seco por um processo de resfriamento a 8°C em trocadores de calor tipo casco tubo e a umidade removida em equipamento do tipo demister. O biogás seco é queimado na microturbina para a geração de energia.

A microturbina utilizada no projeto é fabricada pela Capstone® e tem a capacidade de geração de 200 kwh.



Figura 4.10: Planta para a secagem e medição do biogás

Fonte: Acervo do autor (2019)



Figura 4.11: Sistema de regulagem de pressão do biogás.

Fonte: Acervo do autor (2019).



Figura 4.12: Microturbina Capstone.

Fonte: Acervo do autor (2019).

No projeto onde o biogás é queimado em forno para a produção de vidro, foi instalada uma planta com capacidade nominal de processamento de 1.250 Nm³/h de biogás “in natura” produzido na ETEI de uma cervejaria localizada no Rio de Janeiro. Nesta planta o biogás é seco e dessulfurizado antes de ser enviado para a queima no forno. No processo de secagem, o biogás é submetido a resfriamento a 8°C com a utilização trocadores de calor que utilizam como fluido de resfriamento água gelada produzida em chiller, sendo que a remoção da água condensada é realizada em demister com sistema de controle de nível para a purga automática da água condensada. A dessulfurização do biogás é feita com o processo Sulfatreat®.

A planta opera com uma vazão média de 480 Nm³/h e por ano são queimados cerca de 4.200.000 Nm³ de biogás dessulfurizado e seco no forno de fabricação de vidro.



Figura 4.13: Planta de processamento de biogás para 1.250 Nm³/h.

Fonte: Acervo do autor (2019).

5 – BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DE SUBSTRATOS SÓLIDOS:

O processo de metanização como abordado anteriormente também pode ser utilizado para a biodegradação de subprodutos sólidos do processo cervejeiro para a produção e aproveitamento do biogás. Este estudo aborda um processo que não existe na cervejaria hoje: a biodigestão anaeróbica do bagaço de malte, que é um subproduto gerado na etapa de brassagem. Atualmente o bagaço de malte removido do processo é transportado por caminhões para ser utilizado como ração animal.

No processo de biodigestão anaeróbica são gerados alguns produtos, dentre eles o biogás, que por ter metano na sua composição, apresenta um poder calorífico inferior (PCI) na faixa de 5000 a 7000 kcal/m³. Esta variação observada no PCI depende do substrato utilizado e das condições de processamento. Este conteúdo energético permite que seja o biogás seja utilizado como combustível renovável. (LIMA; PASSAMANI,2012).

5.1 – BAGAÇO DE MALTE:

Na produção de cerveja são gerados inúmeros subprodutos, e o que é produzido em maior quantidade é o bagaço de malte. Este subproduto é gerado na etapa de brassagem numa proporção de 20 kg de bagaço para cada hectolitro de cerveja produzida. (CORDEIRO,2012).

Em função desta grande quantidade de bagaço gerado diariamente na cervejaria, é necessário a destinação correta deste resíduo sólido do processo, que geralmente é vendido para ser utilizado como ração animal, dadas suas características com relação ao conteúdo de fibras, proteínas e carboidratos que permitem que sejam aproveitados para este fim. Atualmente, são realizados estudos para novas utilização do bagaço como no processo de fermentação contínua como suporte pra leveduras, produtos de panificação, barras de cereais e suplemento alimentar. (BRANIK, 2002; FORSELL,2008).

O bagaço de malte é composto por fibras, proteínas, açúcares e cascas de cevada, o teor de umidade varia entre 75 a 80% nas cervejarias de médio e grande porte. (MATHIAS, 2015).



Figura 5.1: Bagaço de malte.

Fonte: Acervo do autor (2019)

Sua composição química depende do tipo de cevada, tempo de colheita e as condições como o mosto é produzido e adjuntos utilizados na preparação do mosto. Um valor representativo é demonstrado na tabela 5.1. (FORSSELL,2008).

Tabela 5.1: Composição química do bagaço:

Parâmetros	Valores
Umidade [g/100g]	75,45
Cinzas [g/100g]	1,29
Carboidratos [g/100g]	15,46
Proteínas totais [g/100g]	5,37
Gorduras totais [g/100g]	2,43
Fibra bruta [g/100g]	3,98
<i>Energia [Kcal/100g]</i>	<i>105,19</i>

Fonte: Forsell, 2008.

Avaliando as características mostradas na tabela, com relação ao teor de carboidratos, proteínas e gorduras, verifica-se que o bagaço de malte é um material que pode ser utilizado como substrato no processo de biodigestão anaeróbica para a produção de biogás e biofertilizante. O processo utilizado para estudar a viabilidade neste trabalho é o da biodigestão aneróbica do bagaço de malte em reatores do tipo Continuously Stirred Tank Reactor (CSTR).

5.2 – REATOR CSTR – CONTINUOUSLY STIRRED TANK REACTOR:

Este reator é um dos mais comuns utilizado para a produção de biogás em escala industrial na Europa, em países como Alemanha, Inglaterra, Suécia, Dinamarca, Irlanda e Áustria. Tem sido utilizado no tratamento de efluentes industriais e principalmente da agropecuária, onde dejetos da criação de animais (bovinos, suínos e aves) são misturados com resíduos da agricultura para formar o substrato orgânicos que é matéria prima para a biodigestão anaeróbica. Na Europa, a biodigestão anaeróbica é uma tecnologia madura que oferece bons resultados e rendimentos na produção de biogás com baixo custo operacional. (XINMEI et al.,2010).

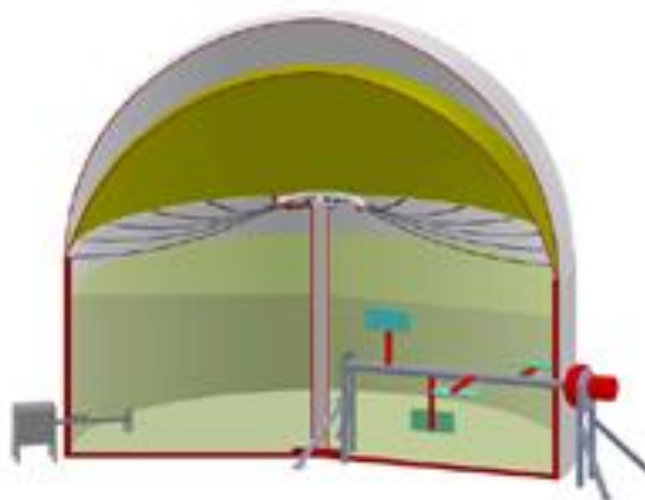


Figura 5.2: Esquema básico de um reator CSTR.

Fonte: PROBIOGÁS (2015).

O reator CSTR (reator de fluxo contínuo) opera com o substrato diluído, com um teor de matéria seca variando entre 2 a 12%. O processo pode ocorrer em um estágio, quando não há risco de acidificação ou em dois estágios quando o substrato tem um grande conteúdo de açúcares, gorduras, amido e proteínas. As bactérias dos processos de hidrólise, acidogênico, acetogênico e metanogênico estarão presentes em ambos estágios. (WELLINGER et al.,2013).

O reator pode ser construído em concreto ou chapas metálicas, tem um formato cilíndrico e um diâmetro que varia de 16 a 30 metros e altura entre 5 e 8 metros, o que confere grandes volumes de estocagem, o que é necessário em função do alto tempo

de retenção hidráulica utilizado para a biodigestão do substrato. Um sistema de mistura deve ser instalado para garantir a maior eficiência do sistema. (PROBIOGÁS, 2015).

Sistema de alimentação do substrato:

Um sistema de alimentação é necessário para transportar o substrato para dentro do reator CSTR fazendo a transição de um ambiente aeróbico para o anaeróbico, devendo ser adaptado ao tipo de matéria prima que será utilizado como substrato. Reatores em batelada podem utilizar um sistema descontínuo de alimentação, ao passo que os reatores de processo contínuo requerem um sistema de alimentação que opere de maneira contínua.



Figura 5.3: sistema de alimentação de substrato sólido.

Fonte: PlanET (2019).

O tratamento prévio da matéria-prima pode alterar as características físicas do substrato, tornando necessário a adaptação do sistema de alimentação. Para substratos líquidos geralmente se utiliza o bombeamento com bombas de lóbulo ou tipo parafuso, substratos sólidos podem ser transferidos do tanque de armazenamento

por um sistema de rosca sem fim. (TABATABAEI et al., 2018).



Figura 5.4: Sistema de dosagem de substrato sólido – Rotacrex 750[®].

Fonte: PlanET (2019).



Figura 5.5: Sistema de alimentação de substrato líquido com bomba parafuso.

Fonte: (TABATABAEI,2018).

Sistema de agitação:

Um sistema de agitação é primordial em reatores CSTR, pois promove a homogeneização do substrato no interior do tanque, o que é necessário para o melhor rendimento no processo de biodigestão.

O conteúdo de matéria seca e a viscosidade do meio são fatores chave na escolha do melhor sistema de agitação. Os agitadores podem ser classificados de acordo com a velocidade (lento ou rápido), potência (expressa em kW), modo de

instalação (motor submersível ou motor externo) e forma de instalação (vertical, horizontal, inclinado), podem operar de forma contínua ou intermitente, o que é definido na etapa de projeto para promover o maior rendimento na degradação da matéria orgânica e produção de biogás. (TABATABAEI,2018).



Figura 5.6: Sistema de agitação com motor submersível.

Fonte: AGRINZ, 2006.



Figura 5.7: sistema de agitação com motor externo e eixo vertical.

Fonte: AGRINZ, 2006.

6 – ESTUDO DE CASO – APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DE CERVEJARIA.

O estudo de caso foi realizado considerando os dados de produção de uma cervejaria de grande porte situada no Vale do Paraíba. O ano de referência para o estudo foi 2018, quando a cervejaria produziu 4.800.000 hectolitros (cada hectolitro corresponde a 100 litros) de cerveja conforme descrito na tabela 6.1. Esta quantidade de cerveja gerou 96.000 toneladas de bagaço de malte, conforme demonstrado na tabela 6.2. No presente trabalho será feito um estudo para avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização do bagaço de malte para a produção de biogás no processo de metanização anaeróbica e o aproveitamento energético deste gás.

Como já abordado, a metanização, ou digestão anaeróbia, é um processo de degradação da matéria orgânica, em condições de ausência de oxigênio livre, com produção de biogás pela ação de bactérias anaeróbicas. O biogás gerado é composto majoritariamente por metano (55 a 70%) e dióxido de carbono (30 a 45%) e, devido à presença do hidrocarboneto metano, é um gás energético, portanto, um biocombustível (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

6.1 – DADOS LEVANTADOS:

Na fabricação de cerveja, durante a produção do mosto é gerado o bagaço de malte. O processo, feito em batelada, na Cervejaria é denominado popularmente por “fabrico”, ou seja, a cada batelada no processo é contado um “fabrico” e ao final do processo, quando se separa o mosto do bagaço, é uma etapa do processo denominada no chão de fábrica como “arriada”.

Na produção do mosto, a cada 100 litros produzido são gerados 20 kg de bagaço de malte. A produção nas médias e grandes cervejarias do Brasil ocorre durante 24 horas/dia e nos 365 dias do ano. (CORDEIRO et al. 2012).

Na tabela 6.1 é informado o volume de cerveja produzido mensalmente em 2018 na cervejaria.

Tabela 6.1: Dados de produção de cerveja em 2018 na cervejaria estudada.

Mês	Produção de cerveja [hectolitros]
Janeiro	480.850
Fevereiro	376.750
Março	390.050
Abril	342.750
Maio	346.000
Junho	344.700
Julho	298.700
Agosto	392.500
Setembro	395.850
Outubro	435.200
Novembro	449.600
Dezembro	547.050
Total 2018	4.800.000

Fonte: construída pelo autor (2019).

A geração de bagaço de malte, considerando o volume de cerveja produzido é relatado na tabela 6.2:

Tabela 6.2: Geração de bagaço de malte em 2018 na cervejaria estudada.

Mês	Geração de bagaço [toneladas]
Janeiro	9.617
Fevereiro	7.535
Março	7.801
Abril	6.855
Maio	6.920
Junho	6.894
Julho	5.974
Agosto	7.850
Setembro	7.917
Outubro	8.704
Novembro	8.992
Dezembro	10.941
Total 2018	96.000

Fonte: construída pelo autor (2019).

6.2 – SISTEMA DE TRATAMENTO DO BAGAÇO DE MALTE:

Em 2018, realizou-se um experimento em uma cervejaria de Cuiabá para identificar o percentual de matéria seca do bagaço de malte. No experimento pesou-se 50g de bagaço de malte obtido no silo de armazenamento de bagaço e levado a

secar em estufa a 103°C por um período de 24 horas. Após a secagem a placa de Petri com o bagaço seco foi colocado para resfriar em um dessecador com sílica gel durante 6 horas. Em seguida pesou-se a placa de Petri com o bagaço seco e sem o bagaço. Por diferença de peso calculou-se o percentual de matéria seca da amostra. Os resultados são demonstrados na tabela 6.3:

Tabela 6.3 – Cálculo do teor de matéria seca no bagaço de malte

Item	Valor
Peso da amostra de bagaço [g]	50
Temperatura de secagem [°C]	103
Tempo de secagem [h]	24
Peso após secagem (bagaço+placa) [g]	55,23
Peso da placa [g]	42,27
Peso do bagaço seco [g]	9,96
Teor de matéria seca no bagaço [%]	19,92

Fonte: construída pelo autor (2019).



Figura 6.1: Placa de Petri com 50g de bagaço úmido.

Fonte: acervo do autor (2019).



Figura 6.2: Placa de Petri no interior da estufa a 103°C

Fonte: acervo do autor (2019).



Figura 6.3: Placa com bagaço de malte desidratado e peso da placa de Petri

Fonte: acervo do autor (2019).

Segundo dados obtidos em um projeto semelhante ao escopo deste trabalho realizado na Cervejaria Göess, localizada na cidade de Leoben na Áustria, a biodigestão anaeróbica do bagaço de malte gera aproximadamente 145 Nm³ de biogás por tonelada de bagaço. Os valores informados na tabela 6.4 foram obtidos a partir de dados operacionais. (BIOENERGY,2018).

Tabela 6.4: Entrada e saídas da planta de biogás da Cervejaria Gösser

Entradas		Saídas	
Bagaço de malte	37,31 T/dia	Biogás	5.200 Nm ³ /dia
		Vapor @ 8 kgf/cm ²	32.876 kg/dia
		Energia elétrica	1.752 kWh/dia

Fonte: BIOENERGY, 2018.

O biodigestor anaeróbico da Cervejaria Göess foi construído pela empresa austríaca BDI que optou por construir um projeto com o arranjo descrito na figura 6.4:



Figura 6.4: Etapas do processo de biodigestão do bagaço de malte.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O projeto analisado neste trabalho será baseado no arranjo desenvolvido pela BDI para o projeto instalado em Leoben. No projeto, o bagaço de malte será enviado do local onde é produzido, que é a sala de brassagem, cuja função no processo cervejeiro é cozinhar o malte para produzir o mosto, para um silo de armazenamento onde será misturado com o líquido reciclado proveniente do digestato, que é o material que passou pelo processo de biodigestão anaeróbica e que é removida do biodigestor e é composto pela fração sólida não digerida, massa bacteriana e a parte líquida do que é o que será reciclado para o início do processo após a remoção da fração sólida que será utilizada como biofertilizante. A mistura que constitui o bagaço de malte diluído será bombeada para o tanque de armazenamento do processo de biodigestão anaeróbica.

No projeto de biodigestão, a usina de biogás será constituída por um sistema mesofílico de dois estágios.

A primeira etapa será realizada em um tanque separado, o tanque de hidrólise. Neste estágio ocorre o processo biológico de hidrólise do substrato que através da acidificação. Os polímeros tais como amido, celulose, proteínas e gorduras são hidrolisados em açúcares, aminoácidos e ácidos graxos. Estes compostos que são facilmente degradáveis serão posteriormente convertidos em ácidos acético, propiônico e butírico durante a acidogênese. O tanque de hidrólise será projetado como uma unidade separada, sendo composto por um tanque de aço revestido com isolante térmico protegido por uma cobertura composta por material metálico tipo Aluzinc®. Um agitador central garante uma mistura ideal do tanque, e será instalado de forma externa, podendo ser removido sempre que necessário.

O segundo estágio será realizado no biodigestor anaeróbico que é um tanque que também será construído em aço e revestidos com material isolante térmico da

mesma forma que o reator de hidrólise. No biodigestor o sistema de agitação também será externo e dimensionado para garantir uma mistura ideal do substrato e dos microrganismos assegurando uma boa transferência de massa para o melhor rendimento na produção de biogás e também para facilitar a remoção para manutenção quando necessário. Um sistema de tubulações instalado na parte inferior do tanque permite a remoção do digestato produzido na biodigestão para envio para o sistema de desague ou tanque de armazenagem.

O processo pós digestão permitirá um tempo de retenção adicional garantindo o máximo rendimento de produção de biogás que será armazenado no teto de membrana dupla que atuará como um gasômetro. Tal como os tanques de hidrólise e de fermentação, o pós-fermentador também será construído em aço com isolamento térmico e misturadores externos em diagonal instalados na lateral do tanque. Misturadores internos também serão necessário nesta etapa do processo.

Um módulo central de bombeamento e aquecimento será construído para o transporte de substrato e do digestato entre os processos e também para fornecer calor de forma a compensar as perdas de energia térmica nos processos de hidrólise, fermentação e pós digestão, além de auxiliar com uma mistura adicional dos substratos nos tanques. Um trocador de calor tipo casco tubo fornecerá a energia necessária para compensar as perdas térmicas durante o tempo de retenção hidráulica do processo.

Todos os tanques do processo de biodigestão anaeróbica serão conectados à linha de distribuição do biogás. Para a utilização do biogás nos processos de geração de energia e produção de vapor, será necessária a remoção da umidade e do gás sulfídrico que é corrosivo para as partes em aço carbono do sistema e no processo de combustão com geração de SOx. O produto será o BDS - biogás desulfurizado e seco. Para a secagem do biogás será utilizado o processo de abaixamento do ponto de orvalho, com troca de calor com água gelada à 7°C que será produzida em um chiller e para a dessulfurização será utilizado um produto chamando de Sulfatreat®, em uma coluna de absorção onde o gás úmido entra em contra-corrente com o produto a base de óxido de ferro catalisado que reage com o gás sulfídrico removendo-o da mistura. Na figura 6.5 os vasos utilizados no processo do Sulfatreat®.



Figura 6.5: Vaso para instalação do Sulfatreat®.

Fonte: CAVALCO, 2019.

Sistema de controle do processo:

Para maximizar a segurança do processo e a qualidade uniforme do produto final, todo o processo de biodigestão será controlado por um programa e um supervisor de processo. Com sistema de controle de processo e Controladores Lógicos Programáveis o processo se torna totalmente automatizado desde a entrada do substrato até a saída do biogás. O processo será visualizado em uma tela no supervisor que será instalado na sala de operação da usina de biogás. Um processo amigável permitirá a operação da planta a partir da sala de comando através de ações no supervisor, o programa também permitirá a operação em manual quando for necessário.

Entradas do sistema

Conforme informado, o projeto da planta será elaborado utilizando a tecnologia empresa BDI BioEnergy International AG®, que detém patente tecnologia para o projeto e montagem da planta de biodigestão de substrato orgânico e será o parceiro tecnológico do projeto. Uma amostra do bagaço de malte foi analisada nos laboratórios da empresa localizado na Áustria. Os dados foram compilados pelo autor e os valores informados na tabela 6.5:

Tabela 6.5: Composição do substrato.

Substrato	Bagaço de malte
Quantidade [t/a]	96.000
Sólidos Totais [%]	22,00
Sólidos voláteis [%]	21,00
Demanda química de oxigênio [kg/t]	290
Água de processo [t/a]	17.000

Fonte: construída pelo autor (2019).

Saídas do sistema:

A tabela 6.6 foi construída a partir dos dados obtidos a partir da análise do bagaço de malte pela empresa BDI cujos dados se encontram na tabela 6.5, onde observa-se que os valores de sólidos totais são próximos aos valores encontrados na análise do bagaço realizado na cervejaria de Cuiabá. Foram utilizados softwares proprietários da empresa BDI para o cálculo do potencial de geração de biogás, metano, energia elétrica e digestato, baseado na quantidade e na composição do bagaço de malte disponível para o projeto.

Tabela 6.6: Saídas da usina de biogás:

Biogás [Nm ³ /ano]	14.000.000	Máx; 1.950 Nm ³ /h
Metano [Nm ³ /ano]	8.400.000	Máx 1.100 Nm ³ /h
Energia elétrica [MWh/ano]	84.000	Potencial total
Digestato [t/ano]	122.000	Máx 169,4 t/h

Fonte: preparado pelo autor (2019)

Consumos da usina de biogás:

A previsão de consumo de utilidades na usina de produção de biogás foi informada pela empresa BDI e compilados na tabela 6.7:

Tabela 6.7: Consumo da usina de biogás.

Eletricidade [MWh/ano]	1.200	
Calor [MWh/ano]	300	50°C substrato
Água para dessulfurização	7500	Litros por ano

Fonte: Preparada pelo autor (2019).

Lista de equipamentos:

Tabela 6.8: Consumos de energia dos equipamentos da usina de biogás.

Equipamentos	Quantidade	Consumo
Recepção do substrato		
Bomba bio-mix	01	15 kW
Hidrólise		
Agitador de topo	01	30 kW
Fermentação		
Agitador de topo	03	37 kW
Pós digestão		
Agitador lateral	02	18 kW
Agitador submerso	02	14 kW
Central de bombeamento e aquecimento		
Bomba de parafuso	02	30 kW
Tratamento do biogás		
Chiller	01	30 kW

Fonte: Preparada pelo autor (2019).

Tabela 6.9: Equipamentos que serão instalados na usina de biogás.

Equipamento	Quantidade
Bomba bio mix	01
Tanque de hidrólise (3.500 m ³)	03
Agitador para o tanque de hidrólise	01
Tanques de fermentação (5.100 m ³)	03
Agitador do tanque de fermentação	01
Tanque de pós digestão (7.900 m ³)	01
Agitadores externos pós digestão	02
Agitadores internos pós digestão	02
Bombas parafuso	02
Chiller	01
Trocadores de calor (desumidificação)	02
Demister	02
Soprador de biogás	02
Tanque para sulfatreat	02
PLC	01
Sistema supervisório	01
Tridecanter Perialise	01
Planta para ensacar fertilizante	01

Fonte: construída pelo autor (2019).

Os equipamentos a serem instalados no projeto foram baseados no projeto instalado na cervejaria Göess, e foram dimensionados pelo parceiro tecnológico BDI

e compilados pelo autor na tabela 6.8 que apresenta a quantidade e os consumos de energia elétrica dos equipamentos da usina de biogás e na tabela 6.9, onde são listados todos os componentes que fazem parte do projeto para a obtenção do biogás, energia elétrica e biofertilizante.

6.3 – CENÁRIOS:

Para o estudo de viabilidade do projeto são analisados dois cenários. O primeiro considerando o consumo de biogás para a produção de energia elétrica e o segundo considerando o consumo em uma caldeira para a geração de vapor. Em ambos os casos se considerou a venda do fertilizante seco e ensacado. O biogás a ser utilizado como combustível será dessulfurizado e seco.

Cálculo teórico do Poder Calorífico Superior (PCS) e do Poder Calorífico Inferior (PCI):

O biogás produzido na biodigestão anaeróbica do bagaço de malte possui entre 55 e 70% de metano em sua composição.

A tabela 6.10 informa a composição média obtida em estudos experimentais. (CECCHI, 2003).

Tabela 6.10: Composição do biogás obtido na biodigestão anaeróbica do bagaço de malte.

Componente	Percentual [%]
Metano	55 a 70
Dióxido de carbono	35 a 40
Água	2 a 7
Sulfeto de hidrogênio	2
Oxigênio	< 2
Nitrogênio	< 2
Hidrogênio	< 1
Amônia	< 0,05

Fonte: CECCHI, 2003.

Para o estudo em questão considerou-se a quantidade de metano presente no biogás em 60% que é um valor mediano do dado obtido em literatura.

Desta forma pode-se obter um valor teórico para o poder calorífico inferior do biogás após o processo de dessulfurização e secagem considerando a contribuição do metano:

Calor de combustão do metano = 213 kcal/mol. (SOQ, 2008)

Como base de cálculo, adotando as condições na CNTP, 1 m³ (1000L) de biogás tem 60% de metano, e considerando o volume molar normal como sendo 22,4 L/mol, calcula-se o número de mols de metano:

$$\eta \text{ CH}_4 = (1000 \times 0,6) [\text{L}] / 22,4 [\text{L/mol}] = 26,78 \text{ mols}$$

Conforme (SOQ, 2008), o calor liberado pelo metano com a água no estado líquido é 213 [kcal/mol].

Assim:

$$Q_{\text{CH}_4} = 213 [\text{kcal/mol}] \times 26,78 [\text{mols}] = 5704,14 [\text{kcal}]$$

Considerando que foi adotado 1m³ na base de cálculo nas CNTP, o volume medido é dito normalizado, sendo expresso em Nm³ (normal metro cúbico), assim:

$$\text{PCS} = 5704 [\text{kcal/Nm}^3]$$

Este é o PCS do biogás proveniente do tratamento anaeróbio do bagaço de malte.

Para calcular o PCI deve-se tirar a quantidade de calor relativa à condensação da água:



$$1 \text{ mol} - 2 \text{ mols}$$

$$26,78 \text{ mols} - X$$

$$X = 53,56 \text{ mols}$$

$$\text{Onde: } 53,56 [\text{mols}] \times 18 [\text{g/mol}] = 946,08 [\text{g}] \text{ ou } 0,946 [\text{kg}]$$

Considerando o calor de condensação da água como 586 kcal/kg. (SOQ, 2008).

Tem-se para o biogás:

$$0,946 [\text{kg}] \times 586 [\text{kcal/kg}] = 554,36 [\text{kcal}]$$

Assim o PCI é calculado como:

$$\text{PCI} = 5704 [\text{kcal}] - 554,36 [\text{kcal}] = 5.149 [\text{kcal}]$$

Considerando que foi utilizado 1 m³ nas CNTP como base de cálculo temos:

$$\text{PCI} = 5.149 [\text{kcal/Nm}^3]$$

Desta forma para o biogás dessulfurizado e seco com 60% de metano obtido no processo de biodigestão anaeróbica do bagaço tem-se os seguintes valores teóricos:

$$PCS = 5704 \text{ [kcal/Nm}^3\text{]}$$

$$PCI = 5149 \text{ [kcal/Nm}^3\text{]}$$

Cenário 01 - Cálculo da energia elétrica gerada:

Conforme apresentado na tabela 6.6, na usina serão produzidos 14.000.000 m³ de biogás por ano.

Considerando o PCI do biogás de 5149 [kcal/Nm³], pode-se calcular o potencial teórico de produção de energia elétrica (PTE) a partir do biogás, conforme segue:

$$PTE = \text{Volume do biogás [Nm}^3\text{/ano]} \times \text{PCI biogás [kcal/Nm}^3\text{]} \times \text{fator conversão}$$

$$PTE = 14.000.000 \text{ [Nm}^3 \text{/ano]} \times 5149 \text{ [kcal/Nm}^3\text{]} \times 1 \text{ [kW]} / 860 \text{ [kcal/h]}$$

$$PTE = 83.820.930 \text{ kWh ou } 83.820 \text{ MWh}$$

Considerando o rendimento do gerador de energia elétrica como sendo 38% tem-se a produção líquida de energia elétrica (PLE):

$$PLE = 83.820 \text{ [MWh/ano]} \times 0,38$$

$$PLE = 31.851 \text{ [MWh/ano]}$$

E para a seleção dos geradores considera-se a produção horária nominal de energia elétrica:

$$PLE = 31.851 \text{ [MWh/ano]} / 8760 \text{ [h/ano]}$$

$$PLE = 3,63 \text{ [MW]}$$

Considerando o potencial de geração de energia elétrica será selecionado 05 motores Jenbacher® J 316 GS (figura 6.6) com saída de energia entre 735 e 835 kWe. Neste arranjo 04 motores trabalhando full time e um em stand by. O sistema com PLC irá otimizar o processo para obter a maior saída de energia possível.



Figura 6.6: Motor Jenbacher J 316 GS

Fonte: JENBACHER,2019.

Cenário 02 - Cálculo para consumo na caldeira para geração de vapor:

No segundo cenário, considerou-se o consumo do biogás como combustível em caldeira para a geração de vapor. Com este arranjo o consumo de biogás irá deslocar o gás natural consumido atualmente na geração de vapor.

A quantidade de biogás produzida é de 14.000.000 [Nm³/ano] ou 1.598 [Nm³/h].

O PCI teórico é de 5.149 [kcal/Nm³]

A quantidade de energia térmica (ET) gerada com o biogás será de:

$ET = \text{volume biogás [Nm}^3\text{/ano]} \times \text{PCI biogás [kcal/Nm}^3\text{]}$

$ET = 14.000.000 \text{ [Nm}^3\text{/ano]} \times 5.149 \text{ [kcal/Nm}^3\text{]}$

$ET = 72.086.000.000 \text{ [kcal/ano]}$

O gás natural equivalente (GNE) é calculado como:

$\text{PCI gás natural} = 8550 \text{ [kcal/Nm}^3\text{]}. \text{ (ILHA, 2002).}$

$\text{GNE} = 72.086.000.000 \text{ [Nm}^3\text{/ano]} / 8550 \text{ [kcal/Nm}^3\text{]}$

$\text{GNE} = 8.431.111 \text{ [Nm}^3\text{/ano]} \text{ ou } 962 \text{ [Nm}^3\text{/h]}$

Para a geração de vapor serão utilizadas 05 caldeiras de alta eficiência da marca Miura® modelo SX-H-300 SG (Figura 6.7) que tem capacidade calorífica de 2.530.000 kcal/h, capacidade de produção de vapor 3.930 kg/h com água sendo alimentada a 20°C e eficiência de combustão de 95%, segundo dados do fabricante.

O consumo de biogás na caldeira será de:

$Q_{\text{biogás}} = 2.530.000 \text{ [kcal/h]} / 5.149 \text{ [kcal/Nm}^3\text{]}$

$Q_{\text{biogás}} = 491 \text{ Nm}^3\text{/h}$

Como são produzidos 1.598 Nm³/h de biogás no processo, a quantidade de caldeiras será:

$\text{Caldeiras} = 1.598 \text{ [Nm}^3\text{/h]} / 491 \text{ [Nm}^3\text{/h]}$

$\text{Caldeiras} = 3,25 \text{ ou } 4 \text{ caldeiras.}$

No projeto optou-se por 5 caldeiras, uma operando em stand by e as outras modulando. A produção de vapor prevista será de 11,7 toneladas/hora que suprirá aproximadamente 66% do vapor consumido na cervejaria.



Figura 6.7: Caldeira Miura SX-H300 SG.

Fonte: Miura (2019).

Biofertilizante:

O digestato gerado no processo passará por um processo de centrifugação via decanter centrífugo, que é o equipamento que será utilizado para a desidratação do efluente produzido no biodigestor para a remoção de umidade e separação da fração sólida. Após o processo de centrifugação o resíduo sólido será enviado para uma unidade de secagem com o aproveitamento dos gases quentes provenientes do sistema de queima do biogás, quer seja no gerador de energia elétrica ou na caldeira de geração de vapor. O objetivo é obter um produto final que é um biofertilizante orgânico com teor de umidade entre 5 a 10%, e desta forma o sistema de secagem deve ser dimensionado para atingir este objetivo e produzir um biofertilizante que será embalado em sacos de 25 kg e comercializado biofertilizante orgânico.



Figura 6.8: Decanter centrifugo PIERALISI®

Fonte: acervo do autor.



Figura 6.9: secador rotativo com ensacadeira.

Fonte: DHEY TÉCNICA (2018).

6.4 – ANÁLISE ECONÔMICA:

Na análise econômica para verificar a viabilidade econômica do projeto serão utilizados: O pay back, o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR).

O projeto para a geração de biogás com a biodigestão anaeróbica do bagaço de malte é ao mesmo tempo um projeto com investimento de capital para o corte de custos com a energia total comprada como também tem um viés de investimento estratégico, pois a utilização do biogás que é um combustível renovável, possibilitará a diminuição do consumo de gás natural que é um combustível de origem fóssil além de fomentar uma estratégia de sustentabilidade no processo, uma vez que o bagaço de malte que hoje é vendido para ser utilizado como ração animal passará a gerar energia que será consumida na própria cervejaria no processo fabril.

Para a realização do projeto, investimentos em obras, materiais, mão de obra e equipamentos serão necessários, estes investimentos serão solicitados via Capex (investimentos em bens de capital) com recursos próprios da cervejaria.

Os investimentos previstos para a implantação do projeto foram baseados em diversos orçamentos recebido entre julho e setembro de 2019 de players do mercado nacional e da BDI que é o parceiro tecnológico do projeto. Os dados obtidos foram compilados pelo autor e são descritos na tabela 6.11.

Tabela 6.11: Custos para a implantação do projeto:

Descrição	%	Valor
Projeto Básico, Licenciamentos e taxas	4,0%	R\$ 1.472.000,00
Recepção de Substratos Sólidos	2,6%	R\$ 956.800,00
Sistema de Bombas	1,2%	R\$ 455.688,60
Tanque de hidrólise (3500 m ³)	7,7%	R\$ 2.833.600,00
Tanque de fermentação (5100 m ³)	9,7%	R\$ 3.569.600,00
Limpeza e Armazenamento de Biogás	4,0%	R\$ 1.472.000,00
Motogeradores Jenbacher ou Caldeiras Miura	10,8%	R\$ 3.974.400,00
Tanque de pós digestão (7900 m ³)	4,1%	R\$ 1.501.554,23
Unidade de Processamento de biofertilizante	7,9%	R\$ 2.907.200,00
Bacias de Contenção	1,5%	R\$ 552.000,00
Flare	1,2%	R\$ 441.600,00
Seguros de engenharia	1,0%	R\$ 368.000,00
Automação e Controle	3,3%	R\$ 1.214.400,00
Sala de Controle, Laboratório, Administração	1,5%	R\$ 552.000,00
Infraestrutura	1,5%	R\$ 552.000,00
Start Biológico e Treinamento	3,7%	R\$ 1.362.069,41
Montagens e Comissionamento	3,4%	R\$ 1.251.200,00
SPDA e Incêndio	1,0%	R\$ 368.000,00
Segurança	1,2%	R\$ 441.600,00
Veículos	0,5%	R\$ 184.000,00
Controle de Gás	1,7%	R\$ 625.600,00
Obras civis auxiliares	3,5%	R\$ 1.288.000,00
Instalações Hidráulicas	3,0%	R\$ 1.104.000,00
Instalações Elétricas	2,6%	R\$ 956.800,00
Tubulações e conexões	5,1%	R\$ 1.877.619,05
Projetos executivos e Engenharia	4,4%	R\$ 1.619.200,00
Administração e Gerenciamento de Obra	7,9%	R\$ 2.907.200,00
Valor Total para Implantação	100,0%	R\$ 36.808.131,30

Fonte: Preparada pelo autor baseado em orçamentos de empresas especializadas (2019).

Portanto, pelo exposto na tabela 6.11, o custo total para a implantação do projeto para o tratamento anaeróbio do bagaço de malte e para o aproveitamento energético do biogás (geração de energia elétrica ou utilização como combustível em caldeira) na cervejaria estudo de caso é de R\$ 36,8 milhões.

Custos evitados:

Cenário 01 – geração de energia elétrica a partir do biogás:

Custo da energia elétrica na cervejaria estudo de caso = 355,00 [R\$/MWh]

Produção de energia elétrica a partir do biogás = 31.851 [MW/ano]

Consumo de energia elétrica da planta: 1.728 [MWh/ano]

Produção líquida de energia elétrica:

EE líquida = 31.851 – 1.728 = 30.126 [MWh/ano]

A energia elétrica líquida produzida atende a 40% do consumo anual de energia elétrica da cervejaria estudo de caso que é de 75.000 [MWh/ano], portanto não haverá excedente de energia no projeto e o consumo será de 100% na cervejaria.

Custo evitado com energia elétrica:

Custo evitado EE = 355,00 [R\$/MWh] x 30.126 [MW/ano]

Custo evitado com energia elétrica = 10.694.730 [R\$/ano]

Cenário 02 – Utilização do biogás para a geração de vapor em substituição ao gás natural

100% do biogás gerado no processo de biodigestão anaeróbica do bagaço de malte será consumido na cervejaria estudo de caso uma vez que o consumo de gás natural é maior que o biogás produzido no projeto.

Custo do gás natural na cervejaria estudo de caso (tarifa industrial) = 2,10 [R\$/Nm³]

Gás natural substituídos pelo biogás: 8.431.111 [Nm³/ano]

Custo evitado com o gás natural:

Custo evitado GN = 8.431.111 [Nm³/ano] x 2,10 [R\$/Nm³]

Custo evitado GN = 17.705.333 [R\$/ano]

Receita com o biofertilizante:

Venda do biofertilizante:

Produção de biofertilizante líquido que compõe o digestato é de 122.000 toneladas/ano conforme informado na tabela 6.6.

O teor de matéria seca no digestato é de 5%. (WRAP, 2012).

Desta forma após o processo de centrifugação e secagem do digestato será obtido o biofertilizante sólido.

Quantidade de biofertilizante sólido = 122.000 [t/ano] x 0,05

Quantidade de biofertilizante sólido = 6.100 [t/ano]

Como o fertilizante será vendido em sacas de 25kg o total de sacas comercializadas será de: 244.000 sacas por ano.

O preço por saco de 25kg é em média R\$ 15,00

Assim a receita com a venda do biofertilizante será de:

Receita biofertilizante = 244.000 [sacas/ano] x 15,00 [R\$/saca]

Receita biofertilizante = R\$ 3.660.000,00 / ano

Receita com a venda de bagaço de malte:

Atualmente o bagaço de malte é vendido para ser utilizado como ração animal, para a implantação do projeto esta receita não será mais auferida pela cervejaria, sendo substituída pelos savings de energia elétrica e a receita com a venda de bagaço.

O valor da tonelada de bagaço de malte vendido pela cervejaria é de R\$ 60,00 a tonelada, assim anualmente a receita com a venda de bagaço é:

A produção de bagaço de malte é registrada na tabela 6.5.

Venda de bagaço = 96.000 [t/ano] x 60,00 [R\$/t] = 5.760.000,00 [R\$/ano]

Este valor deve entrar no cálculo de viabilidade do projeto.

Análise econômica do cenário com produção de energia elétrica:

O projeto foi avaliado considerando um horizonte de 10 anos e uma correção de 2% no valor da taxa de energia elétrica e nas despesas como operação e manutenção da planta. O período de 10 anos é o período de depreciação da planta

de processamento de biogás. O cenário de energia elétrica apresentou o saving anual informado na tabela 6.12:

Tabela 6.12: Saving anual com a produção de energia elétrica.

Ano	EE produzida	EE consumida	EE líquida	Preço EE	Despesas O&M	Saving
1	31851	1728	30123	R\$ 355,00	R\$ 1.604.049,75	R\$ 9.089.615,25
2	31851	1728	30123	R\$ 362,10	R\$ 1.684.252,24	R\$ 9.223.286,06
3	31851	1728	30123	R\$ 369,34	R\$ 1.768.464,85	R\$ 9.357.224,22
4	31851	1728	30123	R\$ 376,73	R\$ 1.856.888,09	R\$ 9.491.314,76
5	31851	1728	30123	R\$ 384,26	R\$ 1.949.732,50	R\$ 9.625.434,41
6	31851	1728	30123	R\$ 391,95	R\$ 2.047.219,12	R\$ 9.759.451,12
7	31851	1728	30123	R\$ 399,79	R\$ 2.149.580,08	R\$ 9.893.223,57
8	31851	1728	30123	R\$ 407,78	R\$ 2.257.059,08	R\$ 10.026.600,64
9	31851	1728	30123	R\$ 415,94	R\$ 2.369.912,04	R\$ 10.159.420,88
10	31851	1728	30123	R\$ 424,26	R\$ 2.488.407,64	R\$ 10.291.511,94

Fonte: preparado pelo autor (2019)

A tabela 6.13 informa a receita operacional que é calculada considerando o saving, a venda do biofertilizante e a receita evitada em função de não vender mais o bagaço de malte. Na tabela 6.14 é informado o fluxo de caixa do cenário de produção de energia elétrica.

Tabela 6.13: Cálculo da receita operacional com a geração de energia elétrica.

Ano	Saving	Venda Biofertilizante	receita venda bagaço	Receita operacional
1	R\$ 9.089.615,25	R\$ 3.660.000,00	R\$ 5.760.000,00	R\$ 6.989.615,25
2	R\$ 9.223.286,06	R\$ 3.733.200,00	R\$ 5.875.200,00	R\$ 7.081.286,06
3	R\$ 9.357.224,22	R\$ 3.660.001,00	R\$ 5.760.001,00	R\$ 7.257.224,22
4	R\$ 9.491.314,76	R\$ 3.733.201,02	R\$ 5.875.201,02	R\$ 7.349.314,76
5	R\$ 9.625.434,41	R\$ 3.660.002,00	R\$ 5.760.002,00	R\$ 7.525.434,41
6	R\$ 9.759.451,12	R\$ 3.733.202,04	R\$ 5.875.202,04	R\$ 7.617.451,12
7	R\$ 9.893.223,57	R\$ 3.660.003,00	R\$ 5.760.003,00	R\$ 7.793.223,57
8	R\$ 10.026.600,64	R\$ 3.733.203,06	R\$ 5.875.203,06	R\$ 7.884.600,64
9	R\$ 10.159.420,88	R\$ 3.660.004,00	R\$ 5.760.004,00	R\$ 8.059.420,88
10	R\$ 10.291.511,94	R\$ 3.733.204,08	R\$ 5.875.204,08	R\$ 8.149.511,94

Fonte: preparado pelo autor (2019)

Tabela 6.14: Fluxo de caixa do cenário de produção de energia elétrica.

Ano	Investimento	Receita operacional	Depreciação anual	LAIR	IR e CS (35%)	Lucro líquido contábil	Volta da depreciação	Lucro líquido operacional
0	-R\$ 36.808.131,30	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
1	-R\$ 30.976.596,79	R\$ 6.989.615,25	-R\$ 3.680.813,13	R\$ 3.308.802,12	R\$ 1.158.080,74	R\$ 2.150.721,38	R\$ 3.680.813,13	R\$ 5.831.534,51
2	-R\$ 25.085.476,26	R\$ 7.081.286,06	-R\$ 3.680.813,13	R\$ 3.400.472,93	R\$ 1.190.165,53	R\$ 2.210.307,41	R\$ 3.680.813,13	R\$ 5.891.120,54
3	-R\$ 19.079.995,92	R\$ 7.257.224,22	-R\$ 3.680.813,13	R\$ 3.576.411,09	R\$ 1.251.743,88	R\$ 2.324.667,21	R\$ 3.680.813,13	R\$ 6.005.480,34
4	-R\$ 13.014.656,73	R\$ 7.349.314,76	-R\$ 3.680.813,13	R\$ 3.668.501,63	R\$ 1.283.975,57	R\$ 2.384.526,06	R\$ 3.680.813,13	R\$ 6.065.339,19
5	-R\$ 6.834.839,77	R\$ 7.525.434,41	-R\$ 3.680.813,13	R\$ 3.844.621,28	R\$ 1.345.617,45	R\$ 2.499.003,83	R\$ 3.680.813,13	R\$ 6.179.816,96
6	-R\$ 595.211,95	R\$ 7.617.451,12	-R\$ 3.680.813,13	R\$ 3.936.637,99	R\$ 1.377.823,30	R\$ 2.558.814,69	R\$ 3.680.813,13	R\$ 6.239.627,82
7	R\$ 5.758.667,97	R\$ 7.793.223,57	-R\$ 3.680.813,13	R\$ 4.112.410,44	R\$ 1.439.343,65	R\$ 2.673.066,79	R\$ 3.680.813,13	R\$ 6.353.879,92
8	R\$ 12.171.942,98	R\$ 7.884.600,64	-R\$ 3.680.813,13	R\$ 4.203.787,51	R\$ 1.471.325,63	R\$ 2.732.461,88	R\$ 3.680.813,13	R\$ 6.413.275,01
9	R\$ 18.698.851,15	R\$ 8.059.420,88	-R\$ 3.680.813,13	R\$ 4.378.607,75	R\$ 1.532.512,71	R\$ 2.846.095,04	R\$ 3.680.813,13	R\$ 6.526.908,17
10	R\$ 25.284.318,50	R\$ 8.149.511,94	-R\$ 3.680.813,13	R\$ 4.468.698,81	R\$ 1.564.044,58	R\$ 2.904.654,22	R\$ 3.680.813,13	R\$ 6.585.467,35

Fonte: preparado pelo autor (2019)

A taxa interna de retorno (TIR) e o valor presente líquido (VPL) para o cenário de geração de energia elétrica são apontados na tabela 6.15, considerando o fluxo de caixa simples e o fluxo de caixa descontado. Os cálculos foram realizados em planilha Excel®, com as próprias fórmulas do programa. Na tabela 6.16 são informados os valores de pay back para o projeto considerando o cenário de geração de energia elétrica. Ambos estudos foram feitos no programa Excel® com fórmulas existentes no próprio programa.

Tabela 6.15: Cálculo da TIR e VPL do cenário com geração de energia elétrica.

Fluxo de caixa simples				Fluxo de caixa descontado			
ANO	FC1	FC2	FC3	ANO	5,0%	6,0%	7,0%
0	-R\$ 36.808.131	-R\$ 36.808.131	-R\$ 36.808.131	0	-R\$ 36.808.131	-R\$ 36.808.131	-R\$ 36.808.131
1	R\$ 5.831.535	R\$ 5.831.535	R\$ 5.831.535	1	R\$ 5.553.842	R\$ 5.501.448	R\$ 5.450.032
2	R\$ 5.891.121	R\$ 5.891.121	R\$ 5.891.121	2	R\$ 5.343.420	R\$ 5.243.076	R\$ 5.145.533
3	R\$ 6.005.480	R\$ 6.005.480	R\$ 6.005.480	3	R\$ 5.187.760	R\$ 5.042.317	R\$ 4.902.261
4	R\$ 6.065.339	R\$ 6.065.339	R\$ 6.065.339	4	R\$ 4.989.970	R\$ 4.804.317	R\$ 4.627.218
5	R\$ 6.179.817	R\$ 6.179.817	R\$ 6.179.817	5	R\$ 4.842.048	R\$ 4.617.919	R\$ 4.406.124
6	R\$ 6.239.628	R\$ 6.239.628	R\$ 6.239.628	6	R\$ 4.656.106	R\$ 4.398.691	R\$ 4.157.727
7	R\$ 6.353.880	R\$ 6.353.880	R\$ 6.353.880	7	R\$ 4.515.584	R\$ 4.225.693	R\$ 3.956.877
8	R\$ 6.413.275	R\$ 6.413.275	R\$ 6.413.275	8	R\$ 4.340.757	R\$ 4.023.768	R\$ 3.732.584
9	R\$ 6.526.908	R\$ 6.526.908	R\$ 6.526.908	9	R\$ 4.207.303	R\$ 3.863.267	R\$ 3.550.206
10	R\$ 6.585.467	R\$ 6.585.467	R\$ 6.585.467	10	R\$ 4.042.906	R\$ 3.677.291	R\$ 3.347.718

i	5,0%	6,0%	7,0%	i	5,0%	6,0%	7,0%
TIR	10,57%	10,57%	10,57%	TIR	5,31%	4,32%	3,34%
VPL	10.871.565	8.589.656	6.468.149	VPL	R\$ 524.048,97	-R\$ 2.686.059,22	-R\$ 5.507.143,73

Fonte: preparado pelo autor (2019).

Tabela 6.16: Cálculo do pay back com a opção de geração de energia elétrica.

Pay back com fluxo de caixa descontado			
ANO	5,0%	6,0%	7,0%
0	-R\$ 36.808.131	-R\$ 36.808.131	-R\$ 36.808.131
1	-R\$ 31.254.289	-R\$ 31.306.683	-R\$ 31.358.099
2	-R\$ 25.910.869	-R\$ 26.063.607	-R\$ 26.212.566
3	-R\$ 20.723.109	-R\$ 21.021.290	-R\$ 21.310.305
4	-R\$ 15.733.139	-R\$ 16.216.973	-R\$ 16.683.087
5	-R\$ 10.891.091	-R\$ 11.599.054	-R\$ 12.276.963
6	-R\$ 6.234.985	-R\$ 7.200.363	-R\$ 8.119.235
7	-R\$ 1.719.401	-R\$ 2.974.670	-R\$ 4.162.358
8	R\$ 2.621.356	R\$ 1.049.098	-R\$ 429.774
9	R\$ 6.828.659	R\$ 4.912.365	R\$ 3.120.432
10	R\$ 10.871.565	R\$ 8.589.656	R\$ 6.468.149

Fonte: preparado pelo autor (2019).

Avaliando os resultados, para considerar um projeto com a utilização do biogás produzido para gerar energia, só viabiliza com uma taxa de atratividade em torno de 5,0%, apresentando uma TIR de 5,31% e um VPL de 524.048. Taxas acima de 5% apresentam VPL negativo, o que orienta a não realização do investimento. O pay back, considerando o fluxo de caixa descontado é de 7 anos para uma taxa de atratividade de 5% e o fluxo de caixa proposto. Estima-se que o projeto seja realizado com capital próprio da Cervejaria.

Análise econômica do cenário com substituição de gás natural:

O projeto foi avaliado considerando um horizonte de 10 anos e uma correção de 2% no valor da tarifa de gás natural e nas despesas como operação e manutenção da planta. O período de 10 anos é o período de depreciação da planta de processamento de biogás. A tabela 6.17 apresenta o cenário de substituição do gás natural e o cálculo do saving anual:

Tabela 6.17: Saving anual com a substituição do gás natural.

Ano	Biogás produzido [Nm ³ /ano]	Metano [Nm ³ /ano]	Gás natural deslocado [Nm ³ /ano]	Preço GN	Despesas O&M	Saving
1	14.000.000	8.431.111	8.431.111	R\$ 2,10	R\$ 2.655.800	R\$ 15.049.533
2	14.000.000	8.431.111	8.431.111	R\$ 2,14	R\$ 2.788.590	R\$ 15.270.850
3	14.000.000	8.431.111	8.431.111	R\$ 2,18	R\$ 2.928.020	R\$ 15.492.609
4	14.000.000	8.431.111	8.431.111	R\$ 2,23	R\$ 3.074.420	R\$ 15.714.621
5	14.000.000	8.431.111	8.431.111	R\$ 2,27	R\$ 3.228.141	R\$ 15.936.681
6	14.000.000	8.431.111	8.431.111	R\$ 2,32	R\$ 3.389.549	R\$ 16.158.570
7	14.000.000	8.431.111	8.431.111	R\$ 2,36	R\$ 3.559.026	R\$ 16.380.055
8	14.000.000	8.431.111	8.431.111	R\$ 2,41	R\$ 3.736.977	R\$ 16.600.885
9	14.000.000	8.431.111	8.431.111	R\$ 2,46	R\$ 3.923.826	R\$ 16.820.794
10	14.000.000	8.431.111	8.431.111	R\$ 2,51	R\$ 4.120.017	R\$ 17.039.495

Fonte: preparado pelo autor (2019)

A tabela 6.18 informa a receita operacional que é calculada considerando o saving, a venda do biofertilizante e a receita evitada em função de não vender mais o bagaço de malte.

Tabela 6.18: Cálculo da receita operacional com a queima de gás natural.

Ano	Saving	Venda Biofertilizante	receita venda bagaço	Receita operacional
1	R\$ 15.049.533,33	R\$ 3.660.000,00	R\$ 5.760.000,00	R\$ 12.949.533,33
2	R\$ 15.270.850,00	R\$ 3.733.200,00	R\$ 5.875.200,00	R\$ 13.128.850,00
3	R\$ 15.492.609,30	R\$ 3.660.001,00	R\$ 5.760.001,00	R\$ 13.392.609,30
4	R\$ 15.714.620,90	R\$ 3.733.201,02	R\$ 5.875.201,02	R\$ 13.572.620,90
5	R\$ 15.936.680,70	R\$ 3.660.002,00	R\$ 5.760.002,00	R\$ 13.836.680,70
6	R\$ 16.158.570,07	R\$ 3.733.202,04	R\$ 5.875.202,04	R\$ 14.016.570,07
7	R\$ 16.380.055,02	R\$ 3.660.003,00	R\$ 5.760.003,00	R\$ 14.280.055,02
8	R\$ 16.600.885,34	R\$ 3.733.203,06	R\$ 5.875.203,06	R\$ 14.458.885,34
9	R\$ 16.820.793,73	R\$ 3.660.004,00	R\$ 5.760.004,00	R\$ 14.720.793,73
10	R\$ 17.039.494,82	R\$ 3.733.204,08	R\$ 5.875.204,08	R\$ 14.897.494,82

Fonte: preparado pelo autor (2019)

Na tabela 6.19 é apresentado o fluxo de caixa da opção de substituição do gás natural pelo biogás. Para o cálculo são considerados a receita operacional, a depreciação dos equipamentos em um período de 10 anos e os impostos incidentes.

Tabela 6.19: Fluxo de caixa do cenário de substituição do gás natural.

Ano	Investimento	Receita operacional	Depreciação anual	LAIR	IR e CS (35%)	Lucro líquido contábil	Volta da depreciação	Lucro líquido operacional
0	-R\$ 36.808.131							
1	-R\$ 27.102.650	R\$ 12.949.533	-R\$ 3.680.813	R\$ 9.268.720	R\$ 3.244.052	R\$ 6.024.668	R\$ 3.680.813	R\$ 9.705.481
2	-R\$ 17.280.613	R\$ 13.128.850	-R\$ 3.680.813	R\$ 9.448.037	R\$ 3.306.813	R\$ 6.141.224	R\$ 3.680.813	R\$ 9.822.037
3	-R\$ 7.287.132	R\$ 13.392.609	-R\$ 3.680.813	R\$ 9.711.796	R\$ 3.399.129	R\$ 6.312.668	R\$ 3.680.813	R\$ 9.993.481
4	R\$ 2.823.356	R\$ 13.572.621	-R\$ 3.680.813	R\$ 9.891.808	R\$ 3.462.133	R\$ 6.429.675	R\$ 3.680.813	R\$ 10.110.488
5	R\$ 13.105.483	R\$ 13.836.681	-R\$ 3.680.813	R\$ 10.155.868	R\$ 3.554.554	R\$ 6.601.314	R\$ 3.680.813	R\$ 10.282.127
6	R\$ 23.504.538	R\$ 14.016.570	-R\$ 3.680.813	R\$ 10.335.757	R\$ 3.617.515	R\$ 6.718.242	R\$ 3.680.813	R\$ 10.399.055
7	R\$ 34.074.859	R\$ 14.280.055	-R\$ 3.680.813	R\$ 10.599.242	R\$ 3.709.735	R\$ 6.889.507	R\$ 3.680.813	R\$ 10.570.320
8	R\$ 44.761.419	R\$ 14.458.885	-R\$ 3.680.813	R\$ 10.778.072	R\$ 3.772.325	R\$ 7.005.747	R\$ 3.680.813	R\$ 10.686.560
9	R\$ 55.618.219	R\$ 14.720.794	-R\$ 3.680.813	R\$ 11.039.981	R\$ 3.863.993	R\$ 7.175.987	R\$ 3.680.813	R\$ 10.856.801
10	R\$ 66.589.875	R\$ 14.897.495	-R\$ 3.680.813	R\$ 11.216.682	R\$ 3.925.839	R\$ 7.290.843	R\$ 3.680.813	R\$ 10.971.656

Fonte: preparado pelo autor (2019)

A taxa interna de retorno (TIR) e o valor presente líquido (VPL) para o cenário de substituição de gás natural são apontados na tabela 6.20 seguir considerando o fluxo de caixa simples e o fluxo de caixa descontado. Na tabela 6.21 é calculado o pay back para o cenário de substituição do gás natural.

Tabela 6.20: Cálculo da TIR e VPL do cenário com substituição do gás natural.

Fluxo de caixa simples				Fluxo de caixa descontado			
ANO	FC1	FC2	FC3	ANO	11,0%	12,0%	13,0%
0	-R\$ 36.808.131	-R\$ 36.808.131	-R\$ 36.808.131	0	-R\$ 36.808.131	-R\$ 36.808.131	-R\$ 36.808.131
1	R\$ 9.705.481	R\$ 9.705.481	R\$ 9.705.481	1	R\$ 8.743.677	R\$ 8.665.608	R\$ 8.588.921
2	R\$ 9.822.037	R\$ 9.822.037	R\$ 9.822.037	2	R\$ 7.971.786	R\$ 7.830.068	R\$ 7.692.096
3	R\$ 9.993.481	R\$ 9.993.481	R\$ 9.993.481	3	R\$ 7.307.147	R\$ 7.113.162	R\$ 6.925.983
4	R\$ 10.110.488	R\$ 10.110.488	R\$ 10.110.488	4	R\$ 6.660.092	R\$ 6.425.398	R\$ 6.200.952
5	R\$ 10.282.127	R\$ 10.282.127	R\$ 10.282.127	5	R\$ 6.101.942	R\$ 5.834.355	R\$ 5.580.727
6	R\$ 10.399.055	R\$ 10.399.055	R\$ 10.399.055	6	R\$ 5.559.760	R\$ 5.268.485	R\$ 4.994.859
7	R\$ 10.570.320	R\$ 10.570.320	R\$ 10.570.320	7	R\$ 5.091.284	R\$ 4.781.476	R\$ 4.493.027
8	R\$ 10.686.560	R\$ 10.686.560	R\$ 10.686.560	8	R\$ 4.637.182	R\$ 4.316.122	R\$ 4.019.855
9	R\$ 10.856.801	R\$ 10.856.801	R\$ 10.856.801	9	R\$ 4.244.192	R\$ 3.915.071	R\$ 3.614.064
10	R\$ 10.971.656	R\$ 10.971.656	R\$ 10.971.656	10	R\$ 3.864.047	R\$ 3.532.580	R\$ 3.232.122

i	11,0%	12,0%	13,0%	i	11,0%	12,0%	13,0%
TIR	24,33%	24,33%	24,33%	TIR	12,01%	11,01%	10,03%
VPL	23.372.976	20.874.194	18.534.475	VPL	R\$ 1.347.419,8	-R\$ 1.247.369,2	-R\$ 3.574.814,7

Fonte: preparado pelo autor (2019)

Tabela 6.21: Cálculo do pay back com a opção de substituição do gás natural.

Pay back com fluxo de caixa descontado			
ANO	11,0%	12,0%	13,0%
0	-R\$ 36.808.131	-R\$ 36.808.131	-R\$ 36.808.131
1	-R\$ 28.064.454	-R\$ 28.142.523	-R\$ 28.219.210
2	-R\$ 20.092.669	-R\$ 20.312.455	-R\$ 20.527.114
3	-R\$ 12.785.522	-R\$ 13.199.293	-R\$ 13.601.130
4	-R\$ 6.125.430	-R\$ 6.773.895	-R\$ 7.400.179
5	-R\$ 23.488	-R\$ 939.540	-R\$ 1.819.452
6	R\$ 5.536.272	R\$ 4.328.945	R\$ 3.175.407
7	R\$ 10.627.555	R\$ 9.110.421	R\$ 7.668.434
8	R\$ 15.264.737	R\$ 13.426.544	R\$ 11.688.289
9	R\$ 19.508.929	R\$ 17.341.615	R\$ 15.302.353
10	R\$ 23.372.976	R\$ 20.874.194	R\$ 18.534.475

Fonte: preparado pelo autor (2019)

Avaliando os resultados, para considerar um projeto com a utilização do biogás produzido para substituir o gás natural, viabiliza com uma taxa de atratividade em torno de 11,0%, apresentando uma TIR de 12,01% e um VPL de 1.347.419. Taxas acima de 11% apresentam VPL negativo, o que orienta a não realização do investimento. O pay back, considerando o fluxo de caixa descontado é de 6 anos para uma taxa de atratividade de 11% e o fluxo de caixa proposto. Estima-se que o projeto seja realizado com capital próprio da Cervejaria.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS:

A sustentabilidade nos processos industriais é via de regra uma constante nos planejamentos estratégicos das diversas indústrias do mercado. Em um mundo globalizado a busca pela competitividade e pela atenção do consumidor deve ser um dos objetivos principais de qualquer empresa. Atentos ao olhar do cliente, devem buscar o uso racional e comedido dos recursos naturais disponíveis, aos quais a indústria tem acesso. E num viés de racionalidade e sobrevivência à longo prazo, a busca por fontes renováveis de energia é palavra de ordem na atualidade. Mais que comprovado são os efeitos nocivos ao meio ambiente do uso massivo de combustíveis fósseis, o que compromete a qualidade de vida da geração atual e principalmente de gerações futuras que certamente terão problemas de grande magnitude, se nada for agora.

E buscando alternativas sustentáveis, algumas empresas que geram subprodutos que tenha potencial para reutilização, estudam diversas maneiras de fazer o reuso, a reciclagem ou o reaproveitamento destes subprodutos para a geração de energia e este foi o tema deste trabalho. Especificamente para a Indústria Cervejeira que produz grandes quantidades de bagaço de malte no seu processo produtivo.

O trabalho abordou o estudo para avaliar a viabilidade de utilização do bagaço de malte para a geração de biogás e biofertilizante através de um processo de biodigestão anaeróbica em reatores do tipo CSTR, que é uma tecnologia madura e já aplicada em grande escala em países da Europa, Canadá e Estados Unidos.

O projeto propôs o estudo de dois cenários: Um com a utilização do biogás produzido para a geração de energia elétrica e outro para a substituição do gás natural no processo industrial. Em ambos os casos foi considerada a produção de biofertilizante orgânico que será ensacado e vendido como adubo orgânico.

Considerando as informações obtidas junto à empresa BDI, um grande player no mercado de biodigestão anaeróbica, foi realizado um estudo para uma grande cervejaria localizada na região Sudeste do Brasil.

Os resultados mostram-se promissores para a utilização do biogás em substituição ao gás natural com números que permitem adotar uma taxa de atratividade maior, em torno de 11% apresentando uma TIR de 12,01% e um VPL de 1.347.419, sendo que os estudos mostram que taxas de atratividade acima de 11%

apresentam VPL negativo, o que é um indicativo para a não realização do projeto. O valor de 11% na taxa de atratividade para a utilização de biogás na substituição parcial do gás natural é mais que dobro da taxa de atratividade permitida para a geração de energia elétrica que é em torno de 5%, o que sugere que o projeto siga no sentido da utilização de biogás em substituição ao gás natural.

Um dos fatores que dificultam a viabilidade é o de que o bagaço de malte atualmente é vendido para ser utilizado como ração animal, o que gera receita para a cervejaria e que deve ser considerada como perda de receita no estudo de viabilidade uma vez que o bagaço será o substrato a ser digerido no biodigestor.

Os números obtidos foram promissores e mostram haver viabilidade para o reaproveitamento interno do bagaço de malte para gerar energia para os processos produtivos da cervejaria.

Um ponto de atenção é que a possibilidade de produção de outros insumos que são utilizados na fabricação da cerveja, como o gás carbônico, que é gerado tanto no processo de biodigestão quanto na queima do combustível, podem ser utilizados em estudos futuros para verificar se haverá impacto positivo nos números do projeto, considerando o aumento no investimento com a construção de um módulo para a recuperação, purificação e estocagem do gás carbônico.

Os números foram positivos e a ideia de sustentabilidade mostram que este é um projeto que deve ser avaliado com a atenção e incluído nos estudos para implantação de projetos da cervejaria.

8 – TRABALHOS FUTUROS:

Este trabalho avaliou a viabilidade técnica de geração de biogás utilizando a biodigestão anaeróbica de bagaço de malte. Foram analisados dois cenários: a geração de energia elétrica e a utilização como combustível em caldeiras para a geração de vapor. Em ambos os casos foi considerado o desaguamento, a secagem e embalagem do digestato obtido no biodigestor anaeróbico para a venda como adubo orgânico.

Para trabalhos futuros deve ser considerado a possibilidade de se fazer a purificação completa do biogás para a produção de biometano que pode ser injetado na rede de gás natural ou ser comprimido para ser utilizado como combustível veicular na frota de veículos leves da área comercial ou nos caminhões de distribuição de cerveja que levam da fábrica para os Centros de Distribuição e destes para os clientes, que são os bares, restaurantes e mercados.

Uma outra alternativa também a ser estudada é a recuperação e purificação do gás carbônico para ser utilizado na carbonatação da cerveja e dos refrigerantes produzidos na cervejaria. Uma vez que o bagaço de malte é um subproduto que sai direto do processo para o biodigestor, torna-se uma matéria prima rastreável e desta forma o gás carbônico produzido no biodigestor poderá ter a classificação para grau alimentício e submetido à aprovação da ANVISA para a utilização na cervejaria.

Uma terceira oportunidade para estudos futuros consiste na utilização de ciclos de refrigeração por absorção onde o biogás será utilizado como fonte de energia térmica nos geradores dos circuitos de refrigeração por absorção para o aquecimento das soluções refrigerantes.

Desta forma percebemos uma vasta oportunidade para estudos relacionados à utilização do biogás como fonte renovável de energia para a geração de energia elétrica ou térmica como calor ou frio.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- AMBEV. **Curso de operação de estação de tratamento de efluentes industriais**. Apostila. Jacareí, 2013. 83p.
- AMBEV. **Curso de Técnico Cervejeiro**. Apostila, 2018. Jacareí. 2015. 68p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14001**: Sistemas de gestão ambiental - Requisitos com orientação para uso. Rio de Janeiro. 2015. 36 p.
- Barbosa, R.A.**; Fundamentos dos Parâmetros do PTP de ETEI. Workshop de Meio Ambiente. **AMBEV: Jacareí/SP, 2012**.
- BEBO MELHOR, História da Pilsen, 2017. Disponível em: < <https://www.wine.com.br/cervejas/bebomelhor/>>. Acesso em 19/09/2019 às 22:43.
- BLEIER, B. et al. **Craft Beer Production**. University of Pennsylvania. Filadélfia, p. 565. 2013.
- BRASIL. Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de resíduos Sólidos; altera a lei N° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília. 03/08/2010. Seção I. disponível em:<< <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636> >> consultado em 08/09/2019 às 20:20.
- BRASIL. Lei 2314 de 04 de setembro de 1997. Regulamenta a lei 8.919 de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. Diário Oficial da União. Brasília. 04/09/1997. Capítulo II, Seção I. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/vigilancia-agropecuaria/ivegetal/bebidas-arquivos/decreto-no-2-314-de-4-de-setembro-de-1997.doc/view>> Acesso em 23/09/2019 às 02:28.
- BRASIL. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. PROBIOGÁS; Catálogo de tecnologias e empresas de biogás; Ministério das Cidades; Brasília; 2015; 190p.
- BREJAS. Reinheitsgebot, 2017. Disponível em: <<https://www.brjeas.com.br/reinheitsgebot.shtml>> Acesso em 20/09/2019 às 19:13.
- CECCHI, F.; TRAVERSO, O.; PAVAN, P.; BOLZONELLA, D.; INNOCENTI, L. **Characteristics of the OFMSW and behavior of the anaerobic digestion process**. In: MATA-ALVAREZ, L. (ed.): Biomethanisation of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA Publishing, London, 2003.
- CERVBRASIL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CERVEJA, Anuário 2016, São Paulo. 2016. 64 p.
- CERVESIA. A pasteurização da cerveja. 2019. Disponível em: <<https://www.cervesia.com.br/artigos-tecnicos/tecnicos/qualidade/estabilizacao-da-cerveja/842-a-pasteurizacao-da-cerveja.html>> acesso em 20/09/2019 às 19:23.
- CERVESIA. A filtração da cerveja. 2015. Disponível em: < <https://www.cervesia.com.br/artigos-tecnicos/downloads/artigos-t%C3%A9cnicos/58-a-filtracao-da-cerveja/file.html>> acesso em 02/10/2019 às 02:25.
- CIBÉRIA. Arqueólogos encontraram cervejaria com mais de 4.500 anos no Egito. 2018. Disponível em: < <https://ciberia.com.br/arqueologos-encontram-cervejaria-com-mais-de-4-500-anos-no-egito-41733> > acesso em 19/09/2018 às 18:21.
- Convenção sobre Mudança do Clima, Nova York, 1992. Disponível em: <<<https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/08/convencaomudancadoclima.pdf>>>. Acesso em 18/08/2019.

- CORDEIRO, L. G.; EL-AOUAR, Â. A.; GUSMÃO, R. P.; **Revista verde de agroecologia e desenvolvimento sustentável**; V. 7; n.3; p 20-22; 2012.
- E BIOGRAFIA. Louis Pasteur – Cientista Francês. 2019. Disponível em: <https://www.ebiografia.com/louis_pasteur/> acesso em 20/09/2019 às 19:10.
- Elkington, J.; *Cannibals with Forks – The Tripple Bottom Line of 21st Century Business*, 417p., Oxford, England, Capstone Publishing Limited, 1997.
- Els. E. R., Keet K.; **Comparisson of acelerated anerobic granulation obtained with bench-scale rotating bioreactor vs. stationary container for three differents substrates**. 2007. In. Water SA, 33, 734-40.
- FAST PLANET. **Ninkasi, a Deusa Suméria da Cerveja**. 2015. Disponível em: <<https://blogthebeerplanet.com.br/wp-content/uploads/2014/01/Clay-Tablet-Ninkasi-.jpg>> acesso em 19/09/2019 às 18:01.
- FREITAS A. G. de; **Relevância do Mercado Cervejeiro Brasileiro: avaliação e perspectivas e a busca de uma Agenda de Regulação**. Revista Pensamento & Realidade V. 30, N.2, 1995. p. 22-33. Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados em Administração. FEA/PUC.ISSN 2237-4418.Disponível em: <<https://revistas.pucsp.br/pensamentorealidade/article/view/24655>. Acesso em 15/09/2018 às 21:51.
- G1. Conheça os cereais usados na cerveja além da cevada. 2016. Disponível em: <g1.globo.com/especial-publicitario/somos-todos-cervejeiros/noticia/2016/09/conheca-os-cereais-usados-na-cerveja-alem-da-cevada.html> acesso em 23/09/19 às 16:01
- Gomes, S. C. M.; *As Práticas de Sustentabilidade Estratégica nas Empresas Portuguesas Estudo de Caso: Corticeira Amorim; Cidade do Porto; Portugal; 2009; 93 p.* Tese de Mestrado em Marketing. Universidade do Porto, 2009.
- ILHA, M.S.O.; *Sistema predial de gás combustível*. Campinas, UNICAMP, 2002, 108p.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS APLICADAS, *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais*. Brasília, 2012, 67 p.
- LEWIS, M. J.; YOUNG, T. W. *Brewing*. 2^a. ed. Nova Iorque: Publishers, Kluwer Academic/ Plenum, v. I, 2002.
- LIMA, A.C.; PASSAMANI, F.C.; *Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES; Vitória; UFES; 2012; 73 p.*
- MUNDO DA CERVEJA. *Mulheres no Mundo da Cerveja*. Santa Hildgarda de Bingen. 2015. Disponível em: <www.blogmundodacerveja.com.br?p=3050> acesso em 19/09/2019 às 20:14.
- MORADO, R. **Larousse da cerveja**. São Paulo: Larousse do Brasil, 2009. p. 357.
- OPA BIER. *A história da cerveja no Brasil*. 2015. Disponível em: <<https://opabier.com.br/blog/historia-da-cerveja-no-brasil-parte-1-a-chegada-dos-holandes/>> acesso em 20/09/2019 às 23:35.
- PALMER, J. *How to Brew: Everything You Need To Know To Brew Beer Right The First Time*. 1^a. ed. [S.l.]: Natl Book Network, v. I, 2006. 325 p. ISBN 0937381888. Disponível em: Acesso em: 17/10/2019 às 20:21.
- Picini, A.R., Munhoz L., *Cerveja*. Disponível em: <www.ufrgs.br/alimentus1/feira/prcerea/cerveja/crivag.htm> UFRGS. Porto Alegre. 2012. Acesso em 29/09/2019 às 16:52
- Porter, M. E.; *Estratégia Competitiva: Técnicas para análise de indústria e da concorrência*; 7^a. Edição; Editora Campus; Rio de Janeiro; 1986. pg 15.
- SANCHES, C. S. **Mecanismo de desenvolvimento limpo do Protocolo de Kioto: há perspectivas para o setor sucro-alcooleiro paulista?** 2003. 300p. Tese (Doutorado). FGV-EASEP, São Paulo. 2003.

- SEADI T.; RUTZ D.; PRASLL H.; KÖTTNER M.; FINSTERWALDER T.; VOLK S.; JANSSES R.; **Biogas Handbook**; 125p.; Denmark; Biogas for Eastern Europe; 2008.
- SILVA, D.O.; CARVALHO, A.R.P.; **Etapas de um Tratamento de Efluentes**. Documento técnico, Kurita, São Paulo, 2009? 5 p.
- SILVA, S.M.; **Caderno de especificações técnicas para tratamento de água para torres de resfriamento, condensadores evaporativos e pasteurizadores**. AMBEV. Jacarei. 2015. 18p.
- SOQ PORTAL DE QUIMICA; Entalpia de Combustão. 2019. Disponível na Internet em < <http://www.soq.com.br/conteudos/em/termoquimica/p3.php>.>. Acesso em 18/11/2019 às 12:11.
- SYMPLA. A História do Mundo em sete cervejas. 2017. Disponível em <https://www.sympla.com.br/a-historia-do-mundo-em-7-cervejas_120339>. Acesso em 19/09/2019 às 20:38.
- TABATABAEI M.; GHANAVATI H.; **Biogas – Fundamentals, Process and Operation**; 449p.; Switzerland; Springer; 2018.
- WELLINGER A.; MURPHY J.; BAXTER D.; **The biogas handbook – Science, Production and Applications**; 453p.; Oxford; England; Woodhead Publications; 2013.
- WIKIPÉDIA. Reinheitsgebot. 2015. Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Reinheitsgebot>> acesso em 20/09/2019 às 23:50.
- XINMEI F.; ACHU I. N.; KRUEGER E.; BJÖRNSSON L.; Comparison of reactor configuration for biogas production from energy crops; Researchgate, 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/231547809_Comparison_of_Reactor_Configurations_for_Biogas_Production_from_Energy_Crops> acesso em: 06/10/2019 às 22:37.