



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA
E TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**ANÁLISE DE ROTAS TECNOLÓGICAS PARA O APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DE RESÍDUOS GERADOS NA INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

FERNANDO DAVID CÉSPEDES VILLALBA

Foz do Iguaçu
2022



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA
E TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**ANÁLISE DE ROTAS TECNOLÓGICAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO
DE RESÍDUOS GERADOS NA INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

FERNANDO DAVID CÉSPEDES VILLALBA

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Profa. Dra. Andreia Cristina Furtado
Co-orientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche

Foz do Iguaçu
2022

FERNANDO DAVID CÉSPEDES VILLALBA

**ANÁLISE DE ROTAS TECNOLÓGICAS PARA O APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DE RESÍDUOS GERADOS NA INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

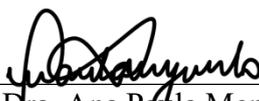
BANCA EXAMINADORA



Orientadora: Profa. Dra. Andreia Cristina
FurtadoUNILA

Documento assinado digitalmente
 LEONARDO DA SILVA ARRIECHE
Data: 02/08/2022 09:41:25-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Co-orientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva
ArriecheUNILA



Profa. Dra. Ana Paula Meneguelo
UFES

Firmado por CHAMORRO CAMAZON, CESAR RUBEN
(FIRMA) el dia 01/08/2022 con un certifi-
cado emitido por AC DNIE 004

Prof. Dr. Cesar Ruben Chamorro
UVa

Foz do Iguaçu, 29 de julho de 2022

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

V714

Villalba, Fernando David Cespedes.

Análise de rotas tecnológicas para o aproveitamento energético de resíduos gerados na indústria
cervejeira / Fernando David Cespedes Villalba. - Foz do Iguaçu, 2022.

69 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-
Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e
Sustentabilidade. Foz do Iguaçu – PR, 2022.

Orientador: Andreia Cristina Furtado. Coorientador: Leonardo da Silva Arrieche.

1. Gaseificação. 2. Biodigestão Aeróbia. 3. Sustentabilidade. 4. Indústria Cervejeira. 5. Engenharia de
Processos. I. Furtado, Andreia Cristina. II. Arrieche, Leonardo da Silva. III. Título.

CDU 628.4.038:502.13

**Dedico este trabalho à minha família,
Meu modelo de amor, resiliência e dignidade.**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar aos meus pais, Zunilda e Oscar, que me ensinaram o amor e o valor do trabalho, dignidade e honestidade. Meus guias e testemunhos fiéis desta caminhada.

À minha família, meu porto seguro, onde sempre encontrei o que precisava para ganhar forças e poder alcançar a meta.

A todos os meus amigos e colegas que me acompanharam neste caminho de formação, por serem o suporte emocional nas diferentes situações, tanto as más como as boas. Em especial a Shirley, Camila e Brenda pelo apoio e acompanhamento incondicional durante esta jornada.

Aos meus orientadores que, além do apoio acadêmico, me deram inspiração, direção e motivação para poder seguir em frente e concluir esta etapa, sempre com a maior paciência e compreensão apesar da pandemia e da distância.

À UNILA, este projeto que com vocação para o serviço alia culturas, integração e conhecimento, pela oportunidade de continuar crescendo na minha formação integral.

Por fim, obrigado à Pachamama por todos seus favores, e à Vida, que apesar dos pesares, é sempre bela.

O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é
um oceano.

Isaac Newton

RESUMO

A indústria cervejeira caracteriza-se por utilizar uma quantidade significativa de recursos naturais e gerar resíduos principalmente do tipo orgânico, sendo o bagaço de malte responsável por até 85% de todos os resíduos gerados. O objetivo deste trabalho é analisar duas mudanças tecnológicas para o aproveitamento energético do bagaço de malte, visando substituir o uso de combustíveis convencionais para os processos industriais. Foi realizado um estudo de caso em uma indústria chamada Cervejaria Paraná com capacidade de produção de cerveja de até 410.000 Hl/mês e uma produção média total de resíduos de 6.258,9 toneladas/mês, duas das quais uma geração de bagaço de malte representa em média 67% do total resíduos gerados mensalmente. As tecnologias abordadas para o estudo do uso de energia são a gaseificação e a biodigestão anaeróbia, com o objetivo de produzir biocombustíveis gasosos, gás de síntese ou biogás, para geração de calor e produção de vapor necessário no processo cervejeiro. A partir da análise técnica, apurou-se que há um aumento potencial na tarifa de energia comprada de 58,40% ao ano, com base na utilização de 50,41% do total de bagaço gerado para uso de energia via ciclo do gás e 20,92% para uma rota de biodigestão anaeróbica. As análises técnicas de ambas as propostas foram realizadas utilizando a metodologia de Engenharia de Processos, sintetizando o projeto realizado pelo método heurístico para gerar os fluxogramas base para cada tecnologia. A partir das propostas tecnológicas para cada sistema, foi realizada uma análise econômica, obtendo como resultado indicadores econômicos com uma discreta diferença entre as duas propostas, porém, considerando a menor necessidade de investimento (949,41 USD), as vantagens de lucro com uma TIR de 58,63 e IL de 297, e retorno do investimento (2,1 anos) concluiu-se que a tecnologia da gaseificação é mais atrativa.

Palavras-chave: Indústria Cervejeira. Gaseificação. Biodigestão Anaeróbia. Engenharia de Processos. Sustentabilidade.

RESUMEN

La industria cervecera se caracteriza por utilizar una cantidad importante de recursos naturales y generar principalmente residuos orgánicos, siendo el bagazo de malta responsable de hasta el 85% de todos los residuos generados. El objetivo de este trabajo es analizar dos rutas tecnológicas para el aprovechamiento energético del bagazo de malta, con el objetivo de sustituir el uso de combustibles convencionales para procesos industriales. Se realizó un estudio de caso en una industria denominada Cervecería Paraná con una capacidad de producción de cerveza de hasta 410.000 Hl/mes y una producción promedio total de residuos de 6.258,9 toneladas/mes, de los cuales la generación de bagazo de malta representa en promedio el 67% del total de residuos generados mensualmente. Las tecnologías abordadas para el estudio del aprovechamiento energético son la gasificación y la biodigestión anaeróbica, con el objetivo de producir biocombustibles gaseosos, syngas o biogás, para la generación de calor y producción de vapor necesarios en el procesos cervecero. Con base en el análisis técnico, se encontró que existe un ahorro potencial de energía comprada de 58.40% anual, en base a la utilización del 50.41% del total de bagazo generado para uso en gasificación y 20.92% para un vía de biodigestión anaeróbica. El análisis técnico de ambas propuestas se realizaron utilizando la metodología de Ingeniería de Procesos, realizado la síntesis de proyecto guiado por el método heurístico para generar los flujogramas base para cada tecnología. A partir de las propuestas tecnológicas para cada sistema se realizó un análisis económico, obteniendo como resultado indicadores económicos con una ligera diferencia entre ambas propuestas, sin embargo, considerando la menor necesidad de inversión (949,41 kUSD) y las ventajas de rentabilidad (TIR de 58,63 e IL de 2,97) y retorno de inversión (2,1 años) se concluyó que la propuesta de gasificación es más atractiva.

Palabras clave: Industria cervecera. Gasificación. Biodigestión anaeróbica. Ingeniería de Procesos. Sostenibilidad.

ABSTRACT

The brewing industry is characterized by using a significant amount of natural resources and mainly generating organic waste, with malt bagasse being responsible for up to 85% of all waste generated. The objective of this work is to analyze two technological routes for the energy use of malt bagasse, with the aim of replacing the use of conventional fuels for industrial processes. A case study was carried out in an industry called Cervecería Paraná with a beer production capacity of up to 410,000 Hl/month and a total average waste production of 6,258.9 tons/month, of which the generation of malt bagasse represents on average 67% of the total waste generated monthly. The technologies addressed for the study of energy use are pyrolysis/gasification and anaerobic biodigestion, with the aim of producing gaseous biofuels, syngas or biogas, for the generation of heat and steam production necessary in the brewing process. Based on the technical analysis, it was found that there is a potential saving of purchased energy of 58.40% per year, based on the use of 50.41% of the total bagasse generated for use in gasification and 20.92% for an anaerobic biodigestion route. The technical analysis of both proposals was carried out using the Process Engineering methodology, carrying out the synthesis of the project guided by the heuristic method to generate the base flowcharts for each technology. Based on the technological proposals for each system, an economic analysis was carried out, obtaining as a result economic indicators with a slight difference between both proposals, however, considering the lower need for investment (949.41 kUSD) and the advantages of profitability (IRR of 58,63 and IL of 2,97) and return on investment (2.1 years) it was concluded that the gasification proposal is more attractive.

Key words: Brewing Industry. Gasification. Anaerobic Biodigestion. Process engineering. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ranking Mundial de Produção de Cerveja.	14
Figura 2: Produção anual de cerveja no Brasil.	15
Figura 3: Ciclo de produção da cerveja.	16
Figura 4: Demanda de vapor no ciclo de produção de cerveja.	18
Figura 5: Fluxograma de geração de resíduos da indústria cervejeira.	19
Figura 6: Síntese de processo de aproveitamento energético do bagaço de malte.	21
Figura 7: Representação gráfica de um processo por árvore de estados.	22
Figura 8: Relação entre volume de produção e geração de resíduos.	25
Figura 9: Proporção entre a quantidade de bagaço de malte e o total de resíduos gerados na Cervejaria Paraná.	26
Figura 10: Vista superior do setor da caldeira de Biomassa.	27
Figura 11: Sistema de geração de vapor a Biomassa.	28
Figura 12: Caldeira de biomassa da indústria cervejeira Paraná.	29
Figura 13: Proporção entre quantidade de bagaço produzido e cavaco consumido para alimentação da caldeira de biomassa.	29
Figura 14: Comparação de parâmetros de composição do bagaço de malte.	30
Figura 15: Rotas tecnológicas da gaseificação (Rota A) e biodigestão anaeróbia (Rota B).	35
Figura 16: Teor de Umidade do Bagaço de Malte.	40
Figura 17: Análise Imediata do Bagaço de Malte.	41
Figura 18: Árvore de estado rota da gaseificação.	44
Figura 19: Heurísticas Subsistema de Secagem.	45
Figura 20: Heurísticas Subsistema de Compactação.	45
Figura 21: Heurísticas Subsistema Reator.	46
Figura 22: Representação do fluxograma base para o processo de gaseificaçã.	47
Figura 23: Árvore de estado rota da biodigestão anaeróbia.	49
Figura 24: Heurísticas Subsistema de Acondicionamento.	51
Figura 25: Heurísticas Subsistema de Reator.	51
Figura 26: Heurísticas Subsistema Purificação.	51
Figura 27: Representação do fluxograma base para o processo de biodigestão anaeróbia.	52
Figura 28: Secadora Dingli.	28
Figura 29: Peletizadora Chavantes 50CV.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caldeiras utilizadas na Cervejaria Paraná.	26
Tabela 2: Composição química elementar e imediata do bagaço de malte.....	31
Tabela 3: Poder Calorífico do Bagaço de Malte.	42
Tabela 4: Comparação entre Briquetes e Pellets.	43
Tabela 5: Composição do investimento inicial do projeto da rota A.	53
Tabela 6: Geração de receita com a implementação do projeto da rota A.	54
Tabela 7: Fluxo de caixa livre do projeto da rota A.	55
Tabela 8: Fluxo de caixa e valores presentes do projeto da rota A.	55
Tabela 9: Indicadores económicos do projeto da rota A.	56
Tabela 10: Demanda mensal de bagaço para produção de biogás.	57
Tabela 11: Composição do investimento inicial do projeto da rota B.	58
Tabela 12: Geração de receita com a implementação do projeto da rota B.	58
Tabela 13: Fluxo de caixa livre do projeto da rota B.	59
Tabela 14: Fluxo de caixa e valores presentes do projeto da rota B.	59
Tabela 15: Indicadores económicos do projeto da rota B.	60
Tabela 16: Comparação entre indicadores económicos das rotas A e B.	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
2.2 PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA BIOMASSA	21
2.3 FUNDAMENTOS DE ENGENHERIA DE PROCESSOS.....	22
2.4 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA BIOMASSA	24
3 APRESENTAÇÃO DE CASO DE ESTUDO	26
4 METODOLOGIA DE TRABALHO	31
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS GRÃOS USADOS DE MALTE.....	31
4.2 SÍNTESE DE PROCESSOS.....	35
4.3 ANÁLISE ECONÔMICA.....	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	41
5.2 SÍNTESE DE PROCESSOS.....	43
5.2.1 ROTA A: Gaseificação.....	43
5.2.2 ROTA B: Biodigestão Anaeróbia	48
5.3 ANÁLISE ECONÔMICA.....	52
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais a implementação de ações que contribuam com a sustentabilidade social e ambiental no setor industrial deixa de ser uma opção de modelo produtivo para se tornar uma prática imperativa para a promoção de uma economia sustentável.

As indústrias de alimentos caracterizam-se por serem grandes geradoras de resíduos agroindustriais (Rech & Zorzan, 2017). Esse setor da agroindústria ganha destaque nos centros de estudos sobre sustentabilidade, não somente devido ao grande volume de resíduos gerados, mas também pela possibilidade de aproveitamento deles para o abastecimento de energia da própria indústria a partir da sua conversão física, química ou biológica (EVARISTO *et al.*, 2017).

Devido a sua extensa cadeia produtiva, a quantidade de mão de obra empregada e ao seu alto nível de faturamento, a indústria cervejeira representa um dos setores mais importantes da indústria brasileira (CERVBRASIL, 2016). Pelas próprias características da atividade, as cervejarias têm um impacto positivo em outros setores econômicos, como o agronegócio, transporte, energia, veículos, alumínio e vidro, entre outros (SINDCERV, 2020).

Segundo dados do IBGE (2019), no ano de 2018, a produção de grãos de cevada no país foi de 325.081 toneladas, enquanto a previsão para o ano de 2019 foi de 420.394 toneladas. Isso representa um aumento de 29,3 % na safra desse grão. Já em questão de geração de emprego, estima-se que 2,7 milhões de pessoas são empregadas direta e indiretamente por esse setor industrial, seja dentro das unidades fabris ou nas indústrias dos insumos e da distribuição (SINDCERV, 2020).

Elaborada a partir de quatro ingredientes principais a cerveja se compõe basicamente de cevada, água, lúpulo e levedura. É obtida pela fermentação alcoólica do mosto de malta de cevada em água pela ação de levedura e adição de lúpulo (IANNICELLI, 2008).

Uma das características da indústria cervejeira, assim como da maioria das indústrias de alimentos, é o grande volume de resíduos gerados e efluentes líquidos com elevada carga orgânica e de nutrientes, os quais se forem mal dispostos ou tratados de forma inadequada podem ser graves poluentes para o meio ambiente. Os grãos usados de cevada ou bagaço de malte representam a maior parcela dos resíduos gerados dentro das indústrias cervejeiras, sendo responsável por até 85% de todo o volume de resíduos produzidos (VERDE *et al.*, 2018). Esse subproduto compõe-se basicamente de casca de cevada e de outros cereais utilizados como materiais adjuntos (milho, arroz, etc.) provenientes do processo de elaboração da cerveja, todos eles considerados matéria lignocelulósica. Em muitos casos os resíduos das cervejarias são descartados

devido à falta de estudos de viabilidade para o seu tratamento ou aproveitamento. Contudo, o descarte desses resíduos incrementa os custos operacionais da indústria, visto que a disposição incorreta dos resíduos pode resultar em sérios problemas ambientais (CUBILLOS, 2018).

Os resíduos da indústria cervejeira possuem elevados teores de proteínas e fibras e altos níveis de umidade. Frequentemente são destinados para a produção de suplementos alimentícios para animais ruminantes (RECH & ZORZAN, 2017). Além da produção de alimentação animal, algumas alternativas para o aproveitamento dos grãos usados de cevada são: forragem animal, adubo orgânico, complemento nutricional para pessoas, indústria da construção civil e aproveitamento energético (ALIYU & BALA, 2011).

O potencial energético dos grãos usados de cevada e o desenvolvimento de alternativas tecnológicas para o tratamento desses resíduos para o seu aproveitamento como fonte de energia dentro da própria indústria poderão contribuir no fortalecimento da sustentabilidade do setor cervejeiro. Nesse contexto o presente trabalho tem por objetivo estudar alternativas tecnológicas que permitam o aproveitamento energético dos grãos usados de cevada dentro da indústria cervejeira além de analisar a viabilidade econômica do projeto para substituição do uso do cavaco de eucalipto como combustível, otimizando os custos de produção relacionados a gastos por compra de combustíveis e contribuindo para a sustentabilidade dentro do setor industrial. O trabalho foi desenvolvido utilizando a metodologia da engenharia de processos e apresentam-se análises técnica e econômica de cada alternativa tecnológica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção do trabalho serão abordados brevemente os processos de elaboração da cerveja, os principais resíduos e subprodutos gerados nesta indústria e rotas tecnológicas convencionais para o aproveitamento energético dos resíduos orgânicos gerados (biomassa).

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1.1 Indústria Cervejeira

Segundo Garcia Paz (2017) a cerveja ocupa o quinto lugar entre as bebidas mais consumidas no mundo. O Brasil, além de contar com uma das populações mais consumidoras de cerveja do mundo, é também responsável por grande parte da produção de cerveja mundial (DE OLIVEIRA, 2020). Em 2017 o Brasil se posicionou como terceiro maior fabricante mundial de cerveja, com 13,3 bilhões de litros produzidos, atrás, somente, da China - 46 bilhões e dos Estados Unidos - 22,1 bilhões, gerando nesse período aproximadamente R\$ 77 bilhões em faturamento. Isso equivale aos 2% do PIB e 14% da indústria de transformação nacionais (SINDCERV, 2020). Pela análise da Figura 1 é possível observar o *ranking* mundial de produção de cerveja.

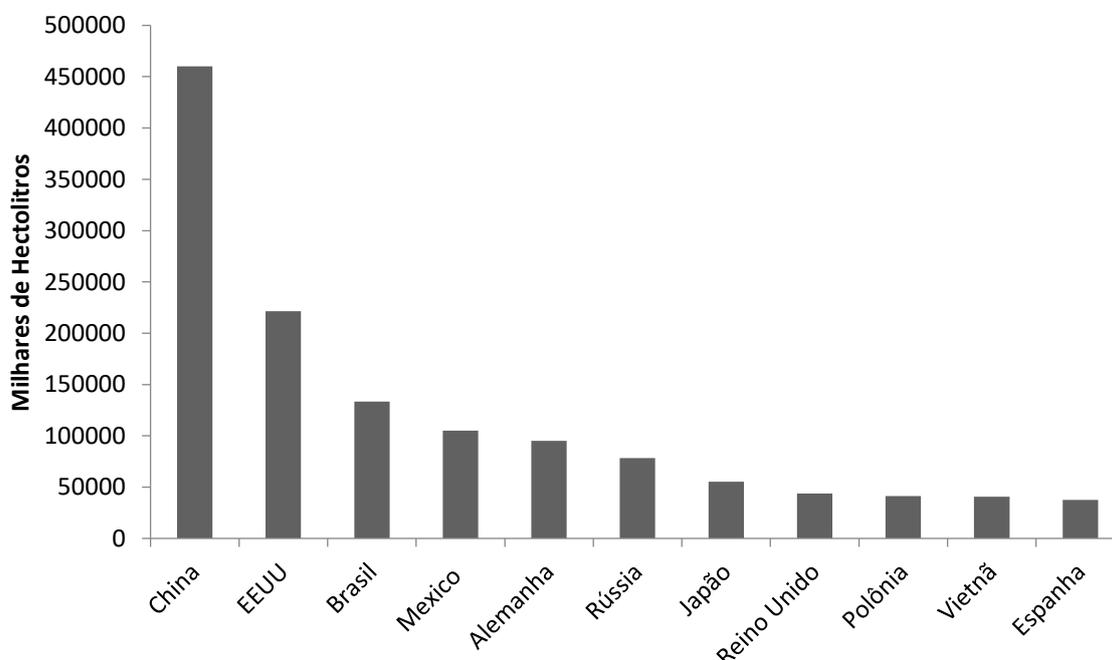


Figura 1: Ranking Mundial de Produção de Cerveja.

Fonte: Adaptado de CERVBRASIL, 2016.

A produção mundial de cerveja apresentou ao longo do tempo um crescimento

contínuo, fomentado principalmente pelo aumento do consumo desta bebida em países subdesenvolvidos. Especificamente no Brasil, nos últimos 30 anos o consumo de cerveja apresentou uma tendência crescente importante, conforme pode-se verificar na Figura 2, se mantendo acima da faixa de 120 milhões de hectolitros produzidos ao ano a partir da década de 2010, inclusive atingindo o patamar de 140 milhões de hectolitros em 2012 (MARTINS, PANDOLFI, & COIMBRA, 2017).

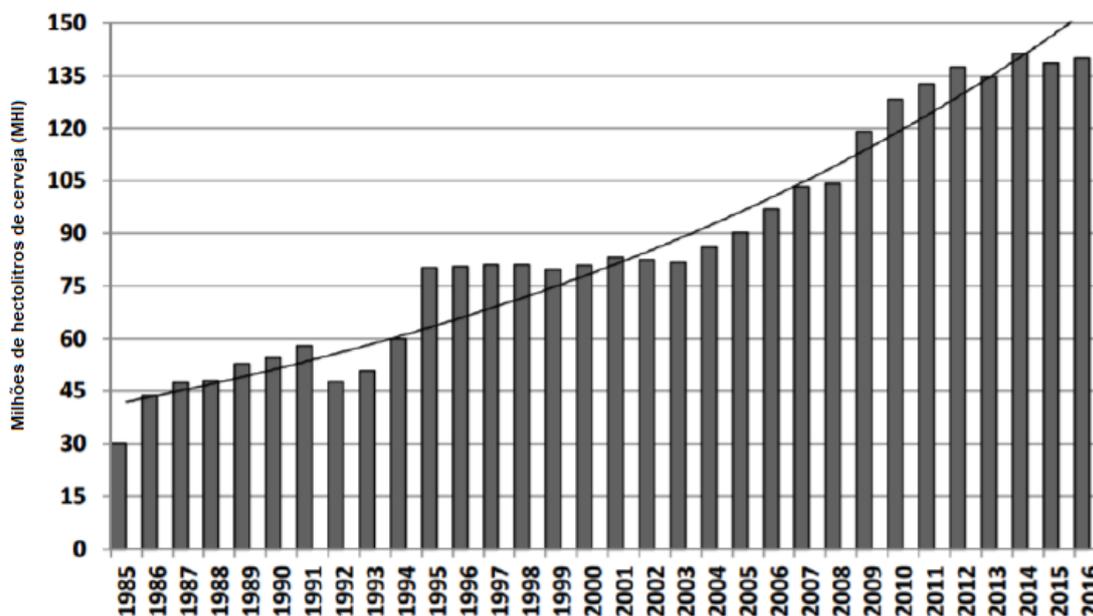


Figura 2: Produção anual de cerveja no Brasil.

Fonte: Adaptado de CERVBRSIL, 2016.

Destacando a importância desta indústria, Castro (2002) descreve a cadeia produtiva da indústria cervejeira como um sistema complexo que engloba subsistemas que são constituídos por vários processos interligados entre si, incluindo sistemas produtivos, fornecedores de insumos e serviços, indústrias de processamento e transformação, e agentes de distribuição e comercialização. Daí a importância dessa indústria que se destaca, além da sua envergadura e sua influência econômica e ambiental, mas também por seu impacto social, devido à grande quantidade de empregos que gera ao longo da sua cadeia produtiva e logística.

2.1.2 Ciclo de Produção de Cerveja

O ciclo de produção da cerveja é representado simplificadaamente na Figura 3, elaborada a partir de um compilado dos trabalhos de Garcia Paz (2017), Iannicelli (2008), Géczi *et al.* (2021) e Cubillos *et al.* (2018). Na sequência são detalhadas as etapas de elaboração da cerveja.

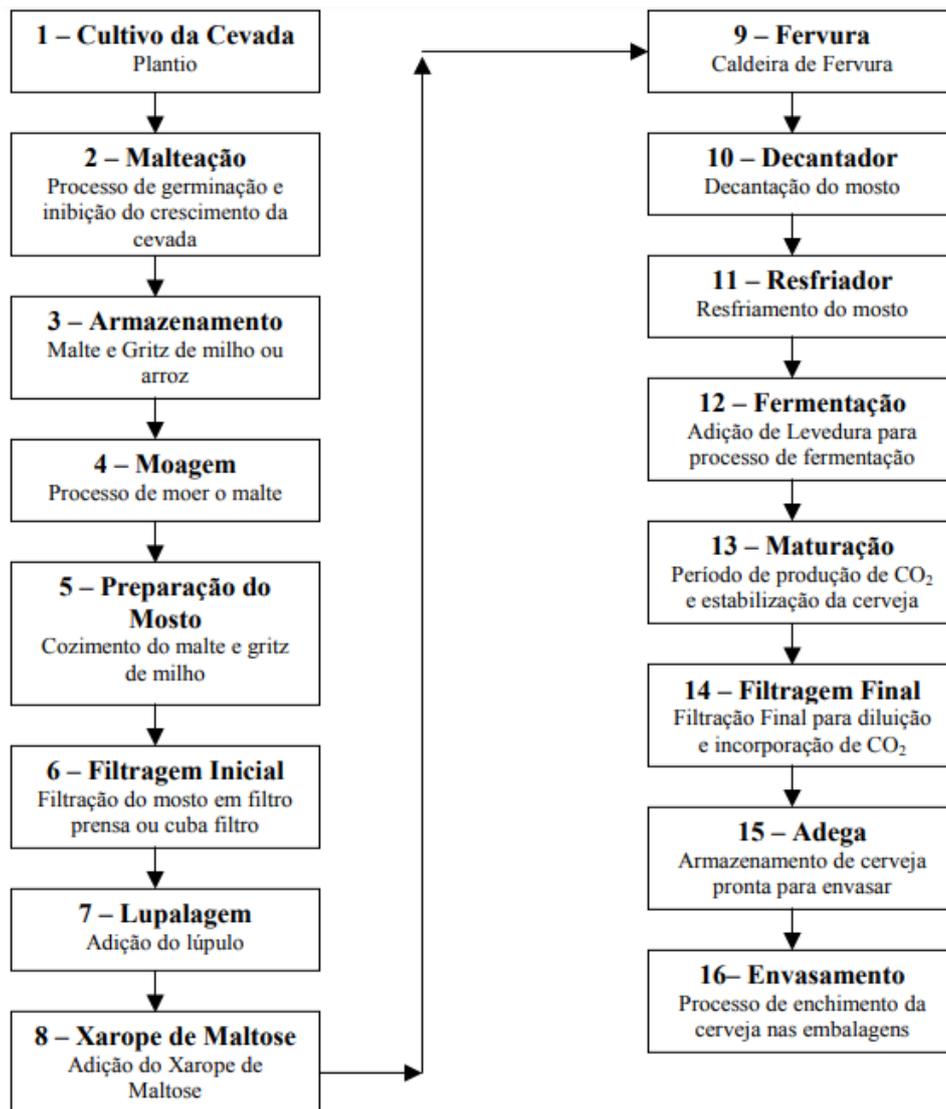


Figura 3: Ciclo de produção da cerveja.

Fonte: Adaptada de Iannicelli, 2008.

Após a colheita e recepção dos grãos de cevada, estas passam primeiramente por uma limpeza e submersão em água, aumentando seu teor de umidade e promovendo a germinação do grão, processo que demora aproximadamente 4 a 5 dias, e é interrompido mediante o aquecimento e secagem da malta. Posteriormente é realizada a moagem da malta para a extração da casca do grão, seguido da maceração em água quente. Nesta etapa as enzimas atuam convertendo o amido da malta em açúcares fermentáveis. Ao final deste processo obtém-se o mosto, o qual passa por uma etapa de filtração e clarificação, pela recirculação através da própria casca, o produto da moagem.

Logo após a filtragem, o mosto passa pelo cozimento e adição de lúpulo, principal

responsável pelo amargor da bebida. No passo seguinte é realizado novamente a filtração do mosto, com o objetivo de retirar os restos de malta, lúpulo e proteínas precipitadas, para ser em seguida resfriado até a temperatura adequada para promover a fermentação, aproximadamente 20°C. Na etapa de fermentação adiciona-se a levedura ao mosto. Em seguida inicia-se a formação de etanol e dióxido de carbono dentro dos tanques. Após determinado período, as células de levedura floculam e são retiradas mediante filtração, obtendo-se o produto denominado cerveja verde.

Para a consolidação do sabor, aroma e aspecto, essa cerveja verde passa para a etapa de maturação, que basicamente consiste em uma sub-etapa quente, semelhante à temperatura de fermentação, para retirada de compostos que podem alterar as características sensitivas do produto, e outra sub-etapa fria, em torno de -2°C, visando à estabilidade coloidal da cerveja para reduzir a turbidez. Por último o produto passa por mais um processo de filtração onde se realiza a diluição e incorporação do gás carbônico. Finalmente é conduzida à adega para ser envasada e enviada para seu destino final.

2.1.3 Utilização de Energia nas Cervejarias

Entre as matérias primas da cerveja se encontram a cevada, lúpulo, levedura, adjuntos e água. Mas, além da matéria-prima para a produção industrial de cerveja, são necessários uma grande quantidade de processos e entre os mais importantes, em questão de envergadura e complexidade, encontra-se o processo de geração e distribuição de vapor. Na Figura 4, a seguir, mostra-se um diagrama dos principais pontos onde é utilizado o vapor dentro do ciclo de produção industrial da cerveja.

O vapor utilizado para produção de cerveja é do tipo vapor saturado e é gerado em caldeiras em sua maioria do tipo flamotubular com pressões relativamente baixas, 6 a 10 bar. O custo de geração de vapor tem uma participação importante dentro do custo total de produção, e esse impacto é maior ou menor em função do tipo de combustível e a eficiência global do sistema de geração e distribuição do vapor.

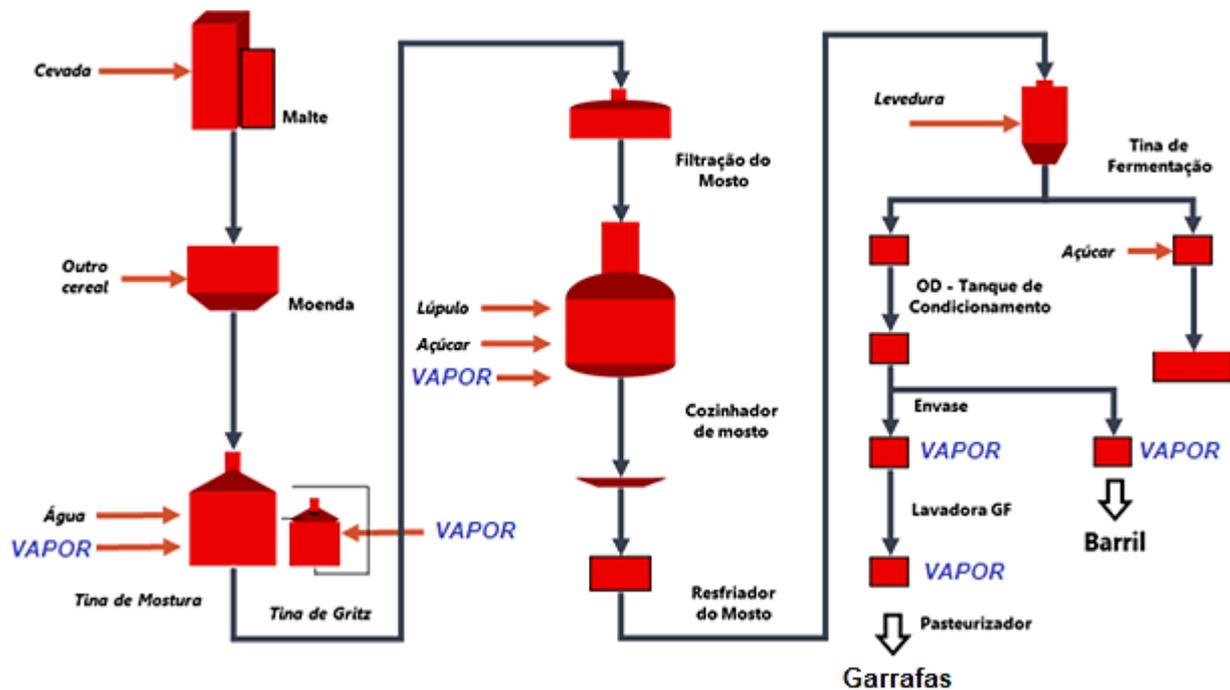


Figura 4: Demanda de vapor no ciclo de produção de cerveja.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.4 Geração de Resíduos na Indústria Cervejeira

As cervejarias estão entre as indústrias alimentícias que geram maior volume de resíduo, principalmente resíduos do tipo orgânico, sendo os principais o bagaço de malte, levedura cervejeira, resíduos de *packaging* e o lodo da estação de tratamento de efluentes (Verde *et. al.*, 2018). Um esquema gráfico dos principais resíduos gerados pela indústria cervejeira pode ser observado na Figura 5.

Os principais pontos de geração de resíduos são as etapas de filtragem, fermentação, envase e tratamento de efluentes. A seguir uma breve descrição dos resíduos sólidos mais importantes em cada etapa do processo de acordo com Cordeiro (2011):

- a) Na filtragem:
 - a.1) Bagaço de malte: obtido da filtração após a caldeira de mostura, antes da fervura.
 - a.2) *Trub* grosso: retirado da primeira filtração após o cozimento.
 - a.3) *Trub* fino: subproduto da segunda filtração e são misturados à terra diatomácea e leveduras.

A junção desses três resíduos compõe o denominado *Grãos Usados de Malte*. Estima-se que, em média, para cada hectolitro de cerveja são produzidos entre 14 a 20 kg de bagaço

de malte, com teor de umidade na faixa de 60 a 85% (DO LAO LINHARES, 2018) (CORDEIRO, 2011).

- b) Na fermentação: excesso de levedura, produto da reprodução bacteriana durante a fermentação. Parte dessa levedura é coletada e utilizada para outros preparos fermentativos e o excesso é classificado como subproduto.
- c) No packaging: na etapa de envasamento geram-se resíduos lignocelulósicos, resultantes de rótulos e etiquetas da lavagem de garrafas, vidro de garrafas quebradas, metal (latas amassadas, tampas), plásticos e papelão.
- d) Na Estação de Tratamento de Efluentes: da etapa final de tratamento de efluentes é obtido lodo, resultante do processo de prensagem, filtração ou centrifugação do efluente líquido antes da disposição final, com o objetivo de remover a porção de sólidos suspensos.

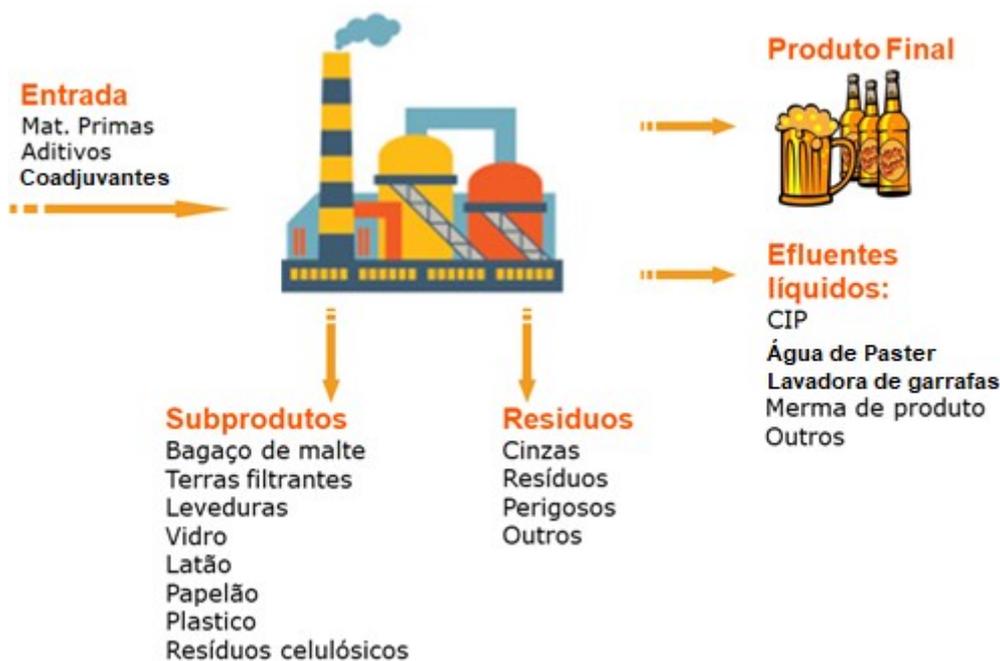


Figura 5: Fluxograma de geração de resíduos da indústria cervejeira.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em questão de volume de resíduos totais gerados no processo de produção de cerveja, o grão usado de malte é o principal subproduto dessa indústria, constituído basicamente por restos de casca e polpa do grão de malte e material adjunto. Quando comparado com os demais, representa até 85% do total de resíduos gerados (MUSSATTO, 2014; RECH & ZORZAN, 2017).

2.2 PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA BIOMASSA

O potencial energético da biomassa está dado por determinadas características físico-químicas, que revelam as propriedades do combustível e indicam as tecnologias mais adequadas para o seu aproveitamento. Entre algumas das propriedades energéticas da biomassa podemos citar:

a) Granulometria: que diz respeito ao tamanho e distribuição de partícula de uma amostra. Para estudos energéticos de um material, a sua granulometria é importante para determinar o seu desempenho dentro de um determinado processo, uma vez que quanto menor o tamanho de partícula maior será sua área superficial (PEREIRA *et al.*, 2009).

b) Massa específica: faz referência à concentração de massa em determinado volume, fator que tem influência no custo de transporte dos combustíveis fósseis.

c) Teor de Umidade: segundo (SOUZA, 2010) quando se visa utilizar materiais lignocelulósicos como fonte de energia o teor de umidade representa um dos parâmetros mais importantes. Esse parâmetro determina o conteúdo de água dentro da matéria orgânica (NOGUEIRA & RENDEIRO, 2008) e está diretamente relacionada com o conteúdo de energia do material, a eficiência do processo de aproveitamento energético e, até mesmo, com o custo de combustível, que impacta no custo de transporte da mesma até o local de consumo.

d) Poder Calorífico: indica a quantidade de energia, por unidade de massa, liberada em forma de calor quando uma substância é submetida ao processo de combustão, fazendo referência ao potencial energético do mesmo por unidade de massa e é considerado um parâmetro fundamental para avaliação dos combustíveis (DIONIZIO, 2017). O poder calorífico se divide basicamente em Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI), o primeiro considera o calor de vaporização da água ocorrido durante processo de combustão e o segundo é obtido subtraindo a energia de condensação da água do calor de reação (SILVA, 2018).

e) Densidade energética: se define a partir do produto entre o poder calorífico e a massa específica do combustível, evidenciando a quantidade de energia disponível em uma unidade de volume (MJ/m³).

2.3 FUNDAMENTOS DE ENGENHARIA DE PROCESSOS

2.3.1 Sínteses de projetos

A engenharia de processos representa uma ferramenta de análise cujo objetivo principal é sistematizar e simplificar o estudo de processos e projetos de engenharia. A Síntese de Projeto é a primeira etapa desta metodologia de análise e, segundo Dal-Bó (2016) e Perlingeiro (2005), é a etapa criativa do projeto, tratando sua concepção a partir da definição combinatória do problema, caracterizado principalmente pela multiplicidade de soluções possíveis. O objetivo desta etapa é ter um panorama geral do processo e as alternativas disponíveis para o tratamento do estudo em questão.

Na Figura 6 é possível observar a visão macro do processo cervejeiro e as principais alternativas tecnológicas para obtenção de energia a partir do tratamento e conversão da biomassa, considerando como objeto de estudo o bagaço de malte.

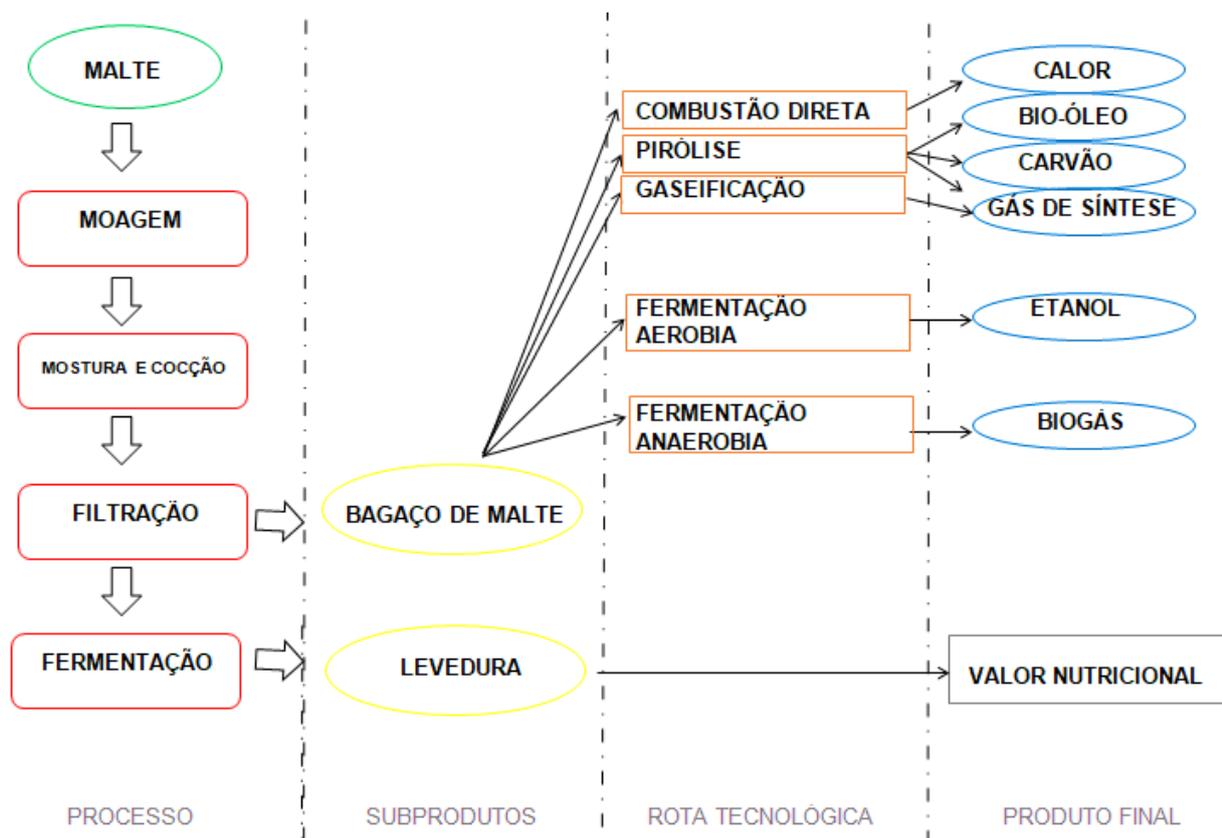


Figura 6: Síntese de processo de aproveitamento energético do bagaço de malte.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Perlingeiro (2005), quando a abordagem do problema gera uma

superestrutura complexa devido ao grande número de alternativas, equipamentos, de equações, de variáveis, e/ou de restrições, é recomendável a segmentação do sistema todo dentro de uma árvore de estado.

2.3.2 Árvores de Estados e Subsistemas

Uma Árvore de Estados é uma representação comumente utilizada para simplificar a visualização das alternativas de estruturas e subsistemas possíveis dentro de um determinado processo. Esta é uma ferramenta muito utilizada na engenharia de processos com o intuito de facilitar o entendimento do processo por meio da categorização do mesmo em subsistemas.

Na abordagem de um problema, sob a ótica da engenharia de processos, na raiz da árvore encontra-se a finalidade do processo, que é a produção de um determinado produto e nos ramos, cada nível corresponde a um subsistema ou etapa do processo (PERLINGEIRO, 2005).

A Figura 7 mostra um exemplo de representação gráfica por árvore de estado de um processo hipotético.

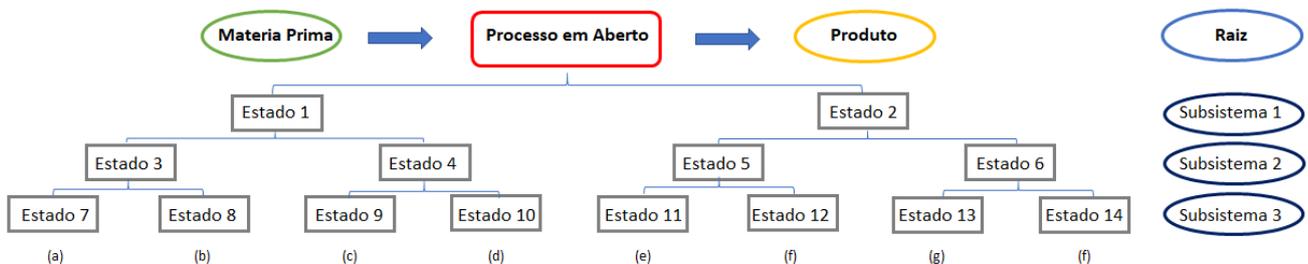


Figura 7: Representação gráfica de um processo por árvore de estados.

Fonte: Adaptado de Dal- Bó, 2016.

Mediante a representação em árvore de estados se objetiva estabelecer a combinação de soluções para obter o produto final a partir do processo mais eficiente, aquele com maior rendimento e a melhor relação custo/benefício. Após a segmentação do processo em subsistemas e diante da multiplicidade de soluções e alternativas, Dal-Bó (2016) destaca a importância de analisar todas as rotas com o auxílio dos métodos heurísticos e evolutivos.

2.3.3 Técnicas Heurísticas

Dentro da abordagem da engenharia de processos, as técnicas heurísticas representam uma estratégia de otimização estrutural da árvore de estado. Como descreve Dal-Bó (2016), a resolução do problema por meio da técnica heurística é baseada na aplicação, em cada estado ou subsistema, da regra que se mostra mais apropriada nas circunstâncias vigentes naquele estado, em consonância com experiências prévias, evidências científicas ou estudos teóricos para cada caso. O intuito da utilização das regras heurísticas é a construção de um fluxograma base que defina o processo em sua forma ótima, ou mais próximo possível desta.

2.3.4 Fluxograma Base

O resultado da aplicação das regras heurísticas dentro de cada subsistema converge para um fluxograma base (MALVERDI, DE SOUZA, SHIMOSAKAI, 2016). A representação do processo mediante o fluxograma base ou embrião constitui o resultado da síntese de processo, cuja proposta é definir um sistema otimizado que entregue o máximo de produto final desejado da maneira mais eficiente e com melhor relação custo/benefício.

2.4 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA BIOMASSA

Neste trabalho serão propostas e analisadas duas rotas principais: gaseificação e biodigestão anaeróbia para o aproveitamento energético do bagaço de malte dentro da indústria cervejeira, visando produzir biocombustíveis gasosos.

2.4.1 Gaseificação

A gaseificação é um processo de conversão termoquímica de materiais sólidos ou líquidos em combustível gasoso ou mesmo para a produção de outros compostos químicos de valor agregado (BASU, 2010). Segundo Nunes Santos (2016), a gaseificação ocorre num ambiente com quantidade restrita de oxigênio, onde ao material é fornecido o hidrogênio e retirado o elemento carbono. Em outro trabalho, Henriques (2004) descreve a gaseificação como a degradação da matéria orgânica que ocorre em uma atmosfera pobre em oxigênio (abaixo da relação

estequiométrica) e com estágios de reações a temperaturas diferentes. Estas reações acontecem em quatro etapas: secagem, pirólise, redução e combustão parcial, gerando finalmente um produto de natureza gasosa.

A composição química do produto da gaseificação, conhecido como gás de síntese ou *syngas*, sofre influência de vários parâmetros. Dentre eles tem-se: características do material, tipo de reator, energia requerida no processo, agente oxidante, tempo de residência, sistema de retirada de gases (DAL-BÓ, 2016).

2.4.2 Biodigestão Anaeróbia

A biodigestão anaeróbia é um processo biológico complexo no qual ocorre a degradação de um material orgânico mediante reações consecutivas, causadas pela ação de microrganismos específicos dentro de uma atmosfera livre de oxigênio. O produto principal desse processo é o biogás, combustível potencial, cuja composição pode variar no seguinte intervalo: 50% a 70% de metano (CH_4) e 30% a 50% de dióxido de carbono (CO_2), além de vapor d'água e traços de gases como hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), amoníaco (NH_3), entre outros (RODRÍGUEZ, 2012). A complexidade do processo anaeróbico deriva das reações bioquímicas que ocorrem, muitas delas em simultâneo, com o intuito de simplificar o entendimento da decomposição anaeróbia da matéria orgânica. FAO (2011) descreve essas reações em quatro etapas: hidrólise, estágio fermentativo ou acidogênico, estágio acetogênico e estágio metanogênico. Diversos fatores influenciam o rendimento do processo de digestão anaeróbia e, segundo Dal-Bó (2016), nenhum parâmetro pode ser considerado de forma isolada no monitoramento destes sistemas. Entre os parâmetros de controle mais relevantes, estão: composição do substrato, temperatura, pH, alcalinidade, tempo de retenção e relação Carbono/Nitrogênio (RODRÍGUEZ, 2012) (KUNZ *et al.*, 2022).

3 APRESENTAÇÃO DE CASO DE ESTUDO

Para a abordagem da metodologia, o trabalho foi subdividido em quatro etapas principais: a) definição e apresentação do estudo de caso, b) a caracterização teórica e experimental da biomassa, c) a sínteses e análise técnica do projeto d) a análise de viabilidade econômica do projeto.

3.1 DEFINIÇÕES DO ESTUDO DE CASO

O estudo de caso se desenvolveu numa cervejaria real, localizada na região de fronteira do estado do Paraná, denominada Cervejaria Paraná (nome fictício utilizado para proteger a identidade industrial e os dados da empresa). Esta cervejaria conta com uma capacidade de produção de até 410.000 Hl/mês de cerveja e a média de geração de resíduos totais é de 6258,88 t/mês aproximadamente. Conforme os dados apresentados na Figura 8 é possível observar uma correlação entre a capacidade de produção de cerveja (em hectolitros) e o volume de resíduos gerados (em toneladas) no período de um ano (Março 2019 a Fevereiro 2020).

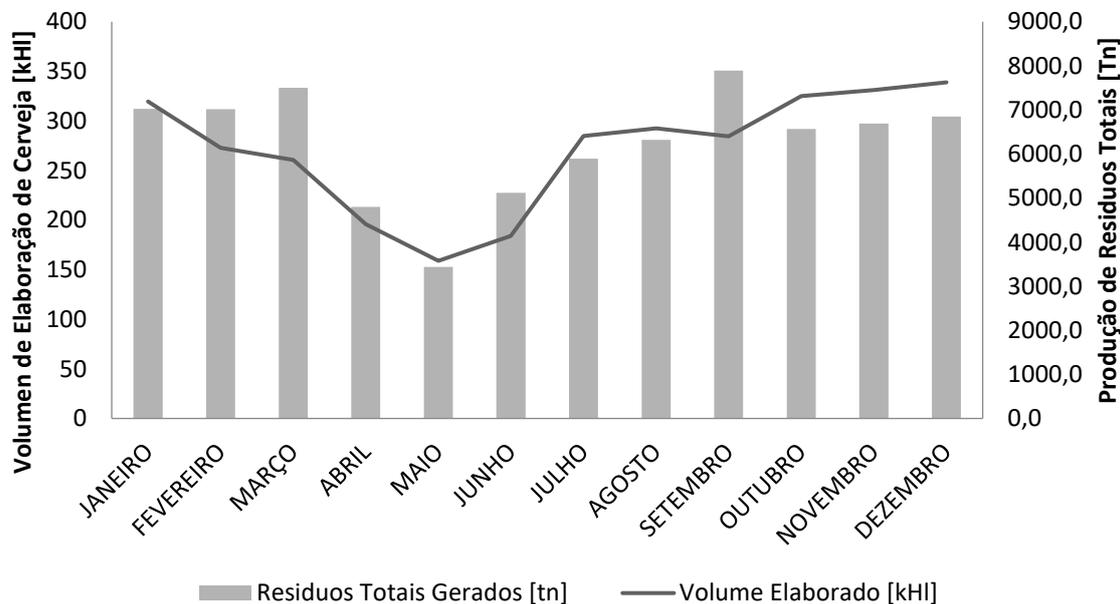


Figura 8: Relação entre volume de produção e geração de resíduos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mencionado na revisão da literatura, dentre todos os resíduos gerados pela indústria cervejeira, o bagaço de malte ocupa o primeiro lugar em relação à quantidade. Pela análise

de dados oriundos da Figura 9 é possível observar que o bagaço de malte é o resíduo de maior proporção gerado na Cervejaria Paraná em um ano de produção, com produção média de bagaço em torno de 4.200 kg/mês. Os dados estão em consonância com os observados por outros autores descritos na revisão bibliográfica.

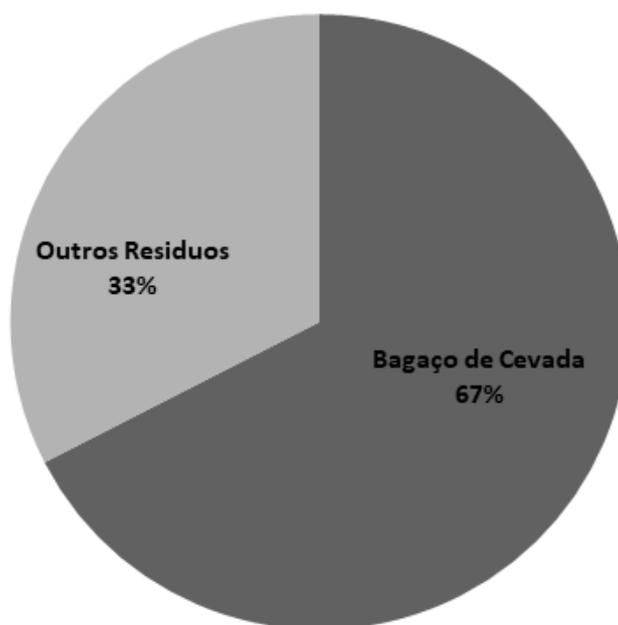


Figura 9: Proporção entre a quantidade de bagaço de malte e o total de resíduos gerados na Cervejaria Paraná.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para suprir a demanda de vapor dos setores produtivos (elaboração e *packaging*) esta cervejaria conta com quatro caldeiras do tipo flamatubulares, que geram vapor saturado a uma pressão de 5,50 bar na linha principal de envio. Na Tabela 1 são detalhadas as características básicas dessas caldeiras.

Tabela 1: Caldeiras utilizadas na Cervejaria Paraná.

Caldeira	Tipo de Combustível	Poder Calorífico Médio (MJ/kg)	Capacidade Média (t vapor/h)
1	Gasóil	41,79	10
2	<i>Fuel Oil</i>	40,19	14

3	<i>Fuel Oil</i>	40,19	12
4	Biomassa	8,35	20

Fonte: Elaborado pelo autor.

O mix médio anual em MJ de combustíveis utilizados para geração de vapor no ano 2019 foi: 62% biomassa, 27% *fuel oil* e 11% gasoil. Destaca-se que em questão de envergadura e capacidade de produção de vapor, a caldeira de biomassa é o sistema mais importante e complexo da planta de vapor do local em estudo. Na Figura 10 é apresentada uma vista superior do setor da caldeira de biomassa da Cervejaria Paraná.

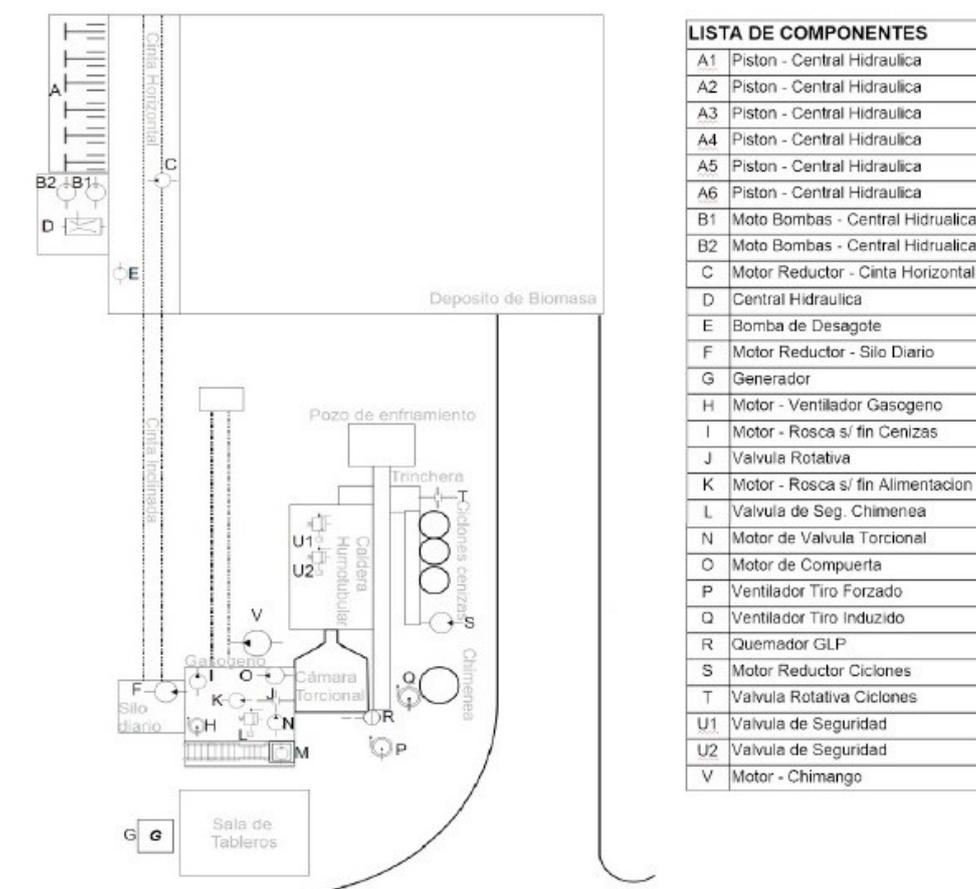


Figura 10: Vista superior do setor da caldeira de Biomassa.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A biomassa utilizada como combustível na caldeira é o cavaco de madeira (Eucalipto - Eucalyptus) sendo consumida em média 75500 kg/dia de cavaco. Após a recepção e disposição do cavaco de eucalipto dentro do silo o mesmo é empurrado, mediante pistões (A) para a

cinta de alimentação (C) onde a biomassa é transportada até o silo diário (F) para posteriormente descarregar o combustível dentro do gasógeno, reator gaseificador, onde ocorre a gaseificação da biomassa, sendo gerado um gás rico em monóxido de carbono que logo é transportado até a câmara torcional onde ocorre a combustão do gás de síntese. A energia liberada pela combustão é aproveitada, mediante a fornalha, para mudança de fase da água de alimentação da caldeira, sendo gerado assim o vapor requerido nos processos. Após a queima, os gases provenientes da combustão passam por um sistema de ciclone múltiplo para retirada de particulados e, mediante tiragem induzida, são direcionados finalmente para a chaminé. Nas Figuras 11 e 12 são apresentados o esquema do sistema de caldeira de biomassa da Cervejaria Paraná e uma foto da mesma, respectivamente.

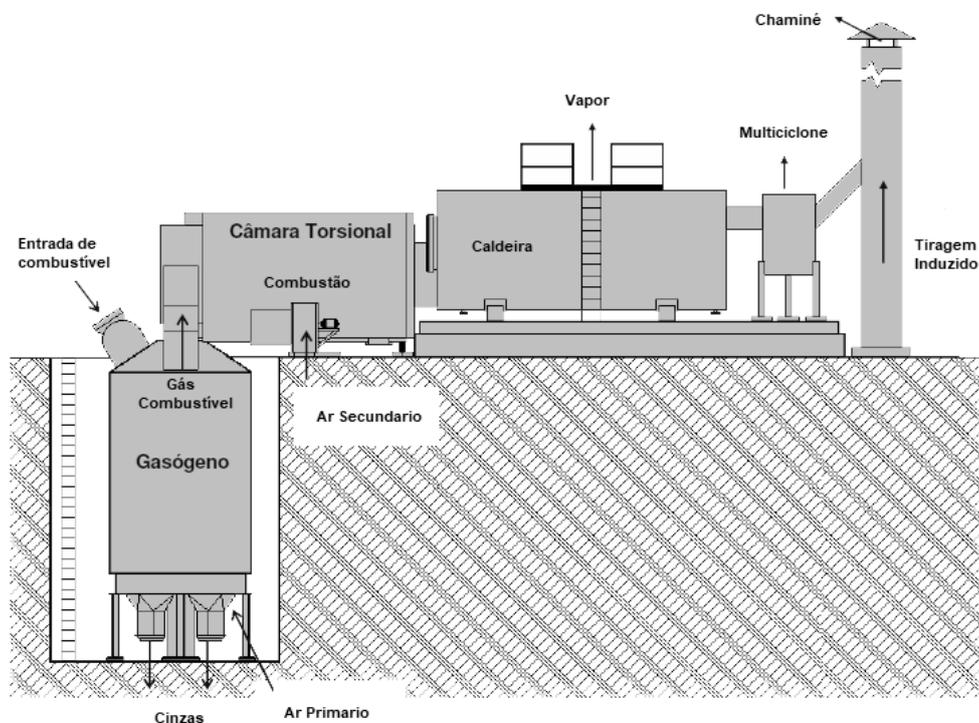


Figura 11: Sistema de geração de vapor a Biomassa.

Fonte: Adaptado de Todo Calderas, 2021.¹

O presente trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade de substituir o uso do cavaco de eucalipto como combustível pelo bagaço de cevada, principal subproduto gerado pela indústria cervejeira. De forma a evidenciar a disponibilidade da matéria-prima, na Figura 13 é mostrada uma comparação mensal entre a quantidade de bagaço gerado como subproduto do processo de elaboração da cerveja e a quantidade de cavaco consumido pela caldeira de biomassa.

¹ Disponível em: < <https://todocalderas.com.ar/articulos/definiciones-especificas-calderas-de-vapor> > Acesso em mar. 2021.



Figura 12: Caldeira de biomassa da indústria cervejeira Paraná.

Fonte: Elaborada pelo autor.

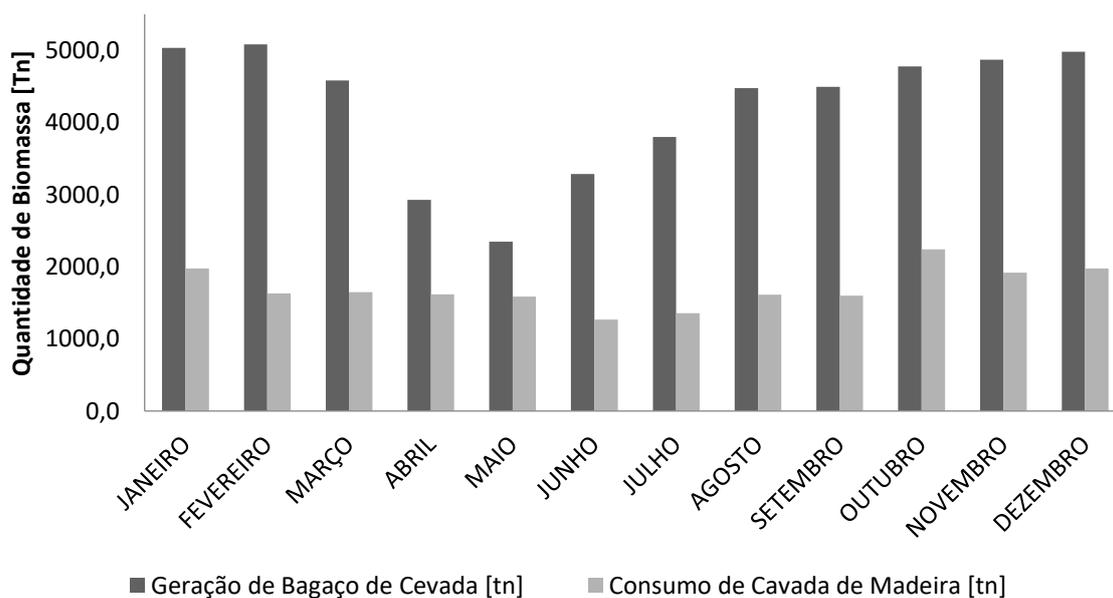


Figura 13: Proporção entre quantidade de bagaço produzido e cavaco consumido para alimentação da caldeira de biomassa.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando o tipo de sistema de geração de vapor apresentado anteriormente, neste trabalho serão analisadas duas rotas tecnológicas de aproveitamento energético do bagaço de cevada: gaseificação e digestão anaeróbia para produção de biogás. A análise contemplará a abordagem técnica desde o ponto de vista da engenharia de processos e estudará os benefícios, oportunidades e desafios no âmbito econômico de cada proposta.

4 METODOLOGIA DE TRABALHO

Para a abordagem da metodologia, o trabalho foi subdividido em quatro etapas principais: a) definição e apresentação do estudo de caso, b) a caracterização teórica e experimental da biomassa, c) a sínteses e análise técnica do projeto d) a análise de viabilidade econômica do projeto.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS GRÃOS USADOS DE MALTE

4.1.1 Caracterização Teórica da Biomassa

Um parâmetro fundamental na definição da melhor rota para o aproveitamento energético de resíduos agroindustriais é a composição físico-química destes. Os grãos usados de cevada compõem-se de casca de cevada, polpa, bagaço de malte e material adjunto (resíduos de arroz, milho, etc.), basicamente material lignocelulósico rico em proteínas e fibras provenientes do processo de elaboração da cerveja. O bagaço é composto principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, além de cinzas, lipídios, minerais, vitaminas e aminoácidos, enquanto a casca contém quantidades significativas de sílica, polifenóis e minerais (MUSSATTO, 2014). Na Figura 14 evidencia-se uma tendência nos valores de alguns parâmetros da composição do bagaço de malte, de acordo com vários autores.

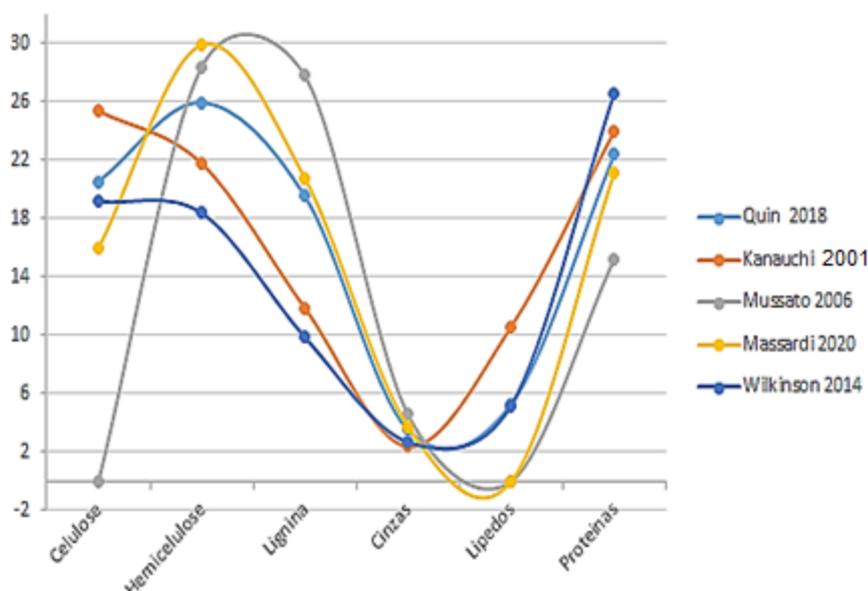


Figura 14: Parâmetros de composição do bagaço de malte.

Fonte: Adaptado de (QIN, JOHANSEN, & MUSSATTO, 2018); (KANAUCHI, MITSUYAMA, & ARAKI, 2001); (MUSSATTO, DRAGONE, & ROBERTO, 2006); (MASSARDI, MASSINI, & DE JESUS SILVA,

2020); (WILKINSON, SMART, & COOK, 2014).

Com relação à composição química do subproduto, a Tabela 2 apresenta a composição elementar do bagaço de malte.

Tabela 2: Composição química elementar e imediata do bagaço de malte.

Análise imediata	Matéria Volátil (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)			Autor CORONADO (2020)
	78,47	17,48	4,05			
Análise elementar	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Nitrogênio (%)	Oxigênio (%)	Enxofre (%)	CORONADO (2020)
	43,59	6,18	3,46	37,22	-	CELAYA, LADE & GOLDFARB (2015)
	49,70	6,54	3,86	34,87	0,33	

Fonte: Adaptado de (CELAYA, LADE, & GOLDFARB, 2015); (CORONADO, 2020).

Além dessas análises, Coronado (2020), mediante as técnicas de espectroscopia de fluorescência de raios-X por dispersão de energia (EDX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e bomba calorimétrica, avaliou também outras propriedades físico-químicas dos grãos usados de cevada. Nas amostras foram encontrados cálcio (Ca), fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S). Outra informação importante é a distribuição percentual das camadas da parede celular dos vegetais. Nessa análise o autor obteve 17,13% de lignina, 26,80% de celulose e 37,17% de hemicelulose. Na avaliação do potencial energético, o poder calorífico do resíduo foi avaliado em 18,70 MJ/kg e, com respeito ao teor de umidade Coronado (2020) declara ter obtido um valor médio de 77,32%, enquanto Rech e Zorzan (2017) identificaram valores de até 87,5% para a umidade média dos grãos usados de cevada, ao final do processo de elaboração da cerveja.

Cabe mencionar que esses teores são influenciados por alguns fatores como a origem do grão de cevada, características do processo de elaboração da cerveja, tipo de cerveja produzida e adição ou não de adjuntos (Rech & Zorzan, 2017). A partir do mapeamento das características físico-químicas da biomassa é possível definir rotas tecnológicas que permitam seu aproveitamento energético, obtendo como produto final a energia ou o recurso energético secundário com maior valor agregado.

4.1.2 Caracterização Experimental da Biomassa

Além da caracterização teórica do material em estudo, foi realizada a análise experimental da biomassa, seguindo a Norma Regulamentadora Brasileira NBR 8112 para caracterização de material a partir de análise imediata, que possibilita a determinação de teores de umidade, voláteis, cinzas, e carvão fixo, além da determinação de poder calorífico.

4.1.2.1 Análise Imediata:

A primeira parte do estudo experimental foi realizada nas instalações do laboratório da Planta de Tratamentos Industriais e do Laboratório de Qualidade e Segurança Alimentar da própria Cervejaria. A seguir o procedimento adotado em cada etapa:

- a) Coleta e preparação da amostra: a amostra foi retirada dos silos de disposição do bagaço. Foram realizadas três coletas, uma coleta em cada Sala de Brasagem. As amostras foram coletadas com temperatura médias de 80°C e colocadas em recipiente hermético de isopor para conservação. Aproximadamente 1 g de cada amostra foi colocada em cadinhos de porcelana e pesadas em uma balança analítica (*Sartorius*).
- b) Teor de Umidade: para determinar a umidade do resíduo, após pesadas as amostras, os cadinhos foram colocados em uma estufa (Memmert) previamente aquecida, a 105 C° por 1 hora e 30 minutos, até atingir massa constante. Uma vez constatado a não variação da massa, as amostras foram colocadas em um dessecador até atingir a temperatura ambiente. O teor de umidade foi calculado a partir da Equação 1:

$$\%U = \frac{m_1 - m_2}{m} * 100\% \quad (1)$$

Onde:

U : teor de umidade;

m : massa da amostra antes da secagem (g);

m_1 : massa cadinho + massa da amostra antes da secagem (g);

m_2 : massa cadinho + massa da amostra seca em estufa (g).

- c) Teor de Voláteis: após a análise de umidade, as amostras foram retiradas do

dessecador e levadas para uma mufla (Quimis). Primeiramente os cadinhos (com tampas) foram deixados sobre a tampa aberta da mufla (aprox. 300°C) por dois minutos, e depois colocados dentro da mufla, na parte frontal (aprox. 500°C) ainda com a porta aberta por três minutos, logo foram colocados no fundo na mufla e fechado a porta (aprox. 950°C) por seis minutos. Finalmente foram levados de volta ao dessecador por um período de 20 minutos, para aguardar o enfriamento das amostras. As amostras então foram pesadas em balança analítica e o teor de voláteis calculado mediante a Equação 2.

$$\%MV = \frac{m_2 - m_3}{m} * 100\% \quad (2)$$

Onde:

MV: teor de voláteis;

m: massa da amostra antes da secagem (g);

*m*₂: massa cadinho + massa da amostra seca antes da mufla (g);

*m*₃: massa cadinho + massa da amostra após a mufla (g).

- d) Teor de Cinzas: após a determinação do teor de voláteis, as amostras foram colocadas novamente em mufla, na temperatura de 750 °C por um período de seis horas. Depois desse tempo, os cadinhos foram colocados novamente no dessecador por 20min e pesados na balança analítica. O teor de cinzas foi determinado a partir da Equação 3.

$$\%Z = \frac{m_3 - m_4}{m} * 100\% \quad (3)$$

Onde:

Z: teor de cinzas;

m: massa da amostra antes da secagem (g);

*m*₄: massa cadinho + massa da amostra seca antes da mufla (g);

*m*₅: massa cadinho + massa da amostra após a mufla (g).

- e) Teor de Carbono Fixo: a proporção de carbono fixo foi obtida de forma indireta a

partir da Equação 4.

$$\%CF = 1 - (MV + Z) \quad (4)$$

Onde:

CF: teor de carbono fixo;

MV: teor de voláteis;

Z: teor de cinzas;

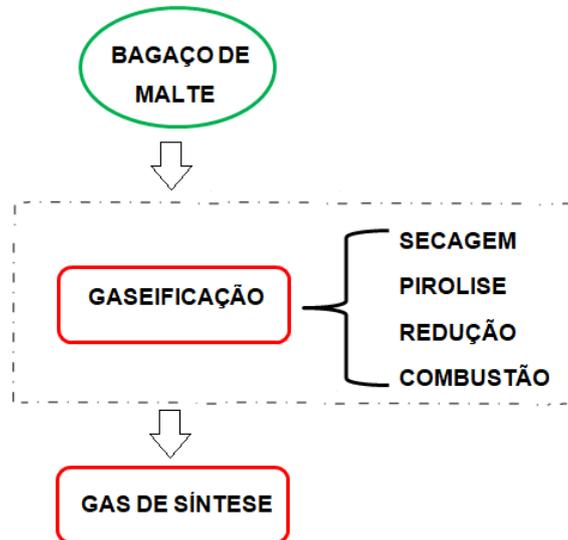
4.1.2.2 Análise de Poder Calorífico:

Para obtenção do potencial energético da biomassa em estudo foi realizada a análise de poder calorífico. Devido à falta de equipamento de fácil acesso e as restrições da pandemia este estudo foi realizado de forma terceirizada por um laboratório externo certificado pelo Instituto Nacional de Tecnologia e Normalização (INTN) do Paraguai. A metodologia utilizada seguiu a norma ASTM D 4868 para análise de Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI), com uso de uma bomba calorimétrica.

4.2 SINTESE DE PROCESSOS

A partir das alternativas tecnológicas para o aproveitamento energético do bagaço de malte apresentadas na Figura 6 e considerando o tipo de caldeira e queimador já instalados na Cervejaria Paraná, foram analisadas neste trabalho duas rotas tecnológicas: gaseificação e digestão anaeróbia, apresentadas na Figura 15. Em ambos os processos, se mantém como critério o produto ser um combustível gasoso.

Rota A: Gaseificação



Rota B: Biodigestão Anaeróbia.

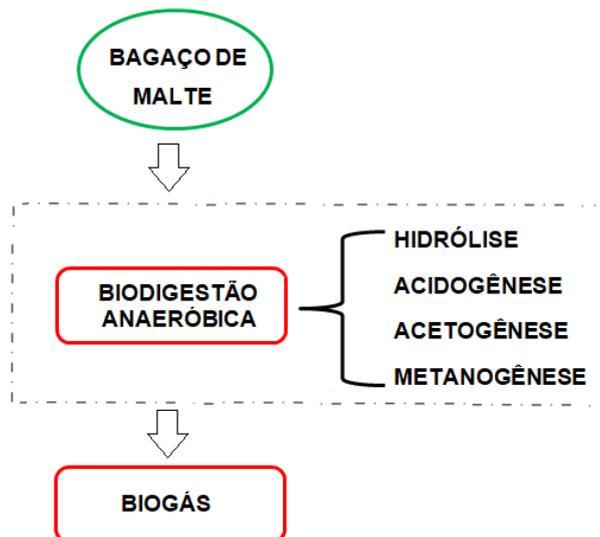


Figura 15: Rotas tecnológicas da gaseificação (Rota A) e biodigestão anaeróbia (Rota B).

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.1 Subsistemas envolvidos

Para cada rota tecnológica definiu-se os subsistemas que compõem cada alternativa, isto considerando as etapas chaves de cada processo de conversão energética. Assim

delimitou-se as seguintes propostas:

ROTA A:
Gaseificação.

- Subsistema de secagem;
- Subsistema de compactação;
- Subsistema reator de gaseificação;
- Subsistema de limpeza/separação.

ROTA B:
Biodigestão Anaeróbia.

- Subsistema de acondicionamento;
- Subsistema reator anaeróbico;
- Subsistema de limpeza/purificação.

4.2.2 Árvore de Estados

Uma vez definida cada rota e categorizadas as etapas em diferentes níveis ou subsistemas, se procedeu à construção da árvore de estado. Assim, foram analisadas para cada rota as tecnologias disponíveis para cada etapa do processo, atendendo como critério ou prioridade os seguintes pontos: alternativas tecnológicas mais convencionais ou tradicionais e aquelas que estão mais consolidadas e de fácil acesso no mercado para aplicação industrial. A partir destas considerações foram elencadas, para cada nível dos sistemas, as seguintes propostas:

ROTA A: *Gaseificação.*

- Subsistema de secagem: secadores do tipo solar, disco, rotativo, leito fluidizado, esteira e a alternativa de sem secagem (*in natura*);
- Subsistema de compactação: pelletização, briquetagem e sem compactação (*in natura*);
- Subsistema de reator de gasificação: reatores gaseificadores do tipo leito fixo, leito fluidizado, ablativo, a vácuo, rotativo;
- Subsistema de limpeza/separação: condensador, filtro manga, ciclone, precipitador eletrostático e o lavador de gases.

ROTA B: *Biodigestão Anaeróbia.*

- Subsistema de acondicionamento: redução granulométrica, pré-tratamento biológico, explosão de vapor, pré-tratamento ácido, pré-tratamento alcalino.

- Subsistema de reator anaeróbico: BLC (Biodigestor de Lagoa Coberta), UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*) e Biodigestão em Fase Sólida (*Dry Digestion*);

- Subsistema de limpeza/purificação: sistemas biológicos (baterias fototróficas), membranas (zeólitas hidrofílicas), absorção (com água) e absorção (com óxido de ferro).

4.2.3 Otimização Estrutural: Método Heurístico

A partir da definição das etapas e das alternativas tecnológicas propostas para cada subsistema, foram construídas as regras heurísticas com o objetivo de definir qual opção ou recurso tecnológico é mais adequado para cada rota. Os critérios que compõem as regras heurísticas de cada subsistema foram formulados com base na aplicação e abrangência de cada tecnologia, as especificações técnicas, características básicas e condições operacionais de cada equipamento, além da consulta bibliográfica de cada alternativa.

4.2.4 Fluxograma Base

Por fim o fluxograma base resultou da otimização estrutural via aplicação das regras heurísticas dentro de cada estado. Esse fluxograma base indica a configuração do sistema que melhor se ajusta para geração de energia de forma eficiente e de qualidade em cada cenário técnico proposto. A partir da definição dos sistemas de gaseificação e biodigestão anaeróbia foi possível proceder ao estudo econômico comparativo que permitirá determinar qual proposta é mais viável do ponto de vista financeiro.

4.3 ANÁLISE ECONÔMICA

A energia representa um custo importante dentro de qualquer empresa. Economizar energia de forma eficiente e sustentável contribui consideravelmente no custo de produção de uma indústria. Frente à oportunidade de investimento e/ou implementação de um projeto, torna-se imperativo realizar um estudo de viabilidade econômica. Os indicadores de

desempenho econômico do projeto irão determinar se a aplicação financeira terá um retorno suficientemente atraente. Quando se trata de projetos de sistemas energéticos, a análise econômica está ligada intimamente a três pontos principais: programas ou políticas de incentivo, influência de fatores externos e o ganho associado com a implementação do projeto. Para a análise econômica foram considerados os seguintes indicadores: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), *Payback* Descontado e Índice de Lucratividade (IL), determinados pelas Equações 5 a 8 a seguir:

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+j)^t} \quad (5)$$

$$VPL = 0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (6)$$

$$Payback = t_- + \sum_{t=1}^{n=t_-} \frac{FC_t}{FC_{t+}} \quad (7)$$

$$IL = \frac{VPL + I_0}{I_0} \quad (8)$$

O cálculo do VPL permite trazer para o presente o valor de uma sucessão de pagamentos futuros somados ao investimento inicial. A TIR se define como a taxa de desconto que deve ser aplicada ao projeto para tornar o VPL igual a zero. Por outra parte o *Payback* indica o tempo mínimo estimado para que o projeto tenha retorno positivo e o investimento seja recuperado. O Índice de Lucratividade se refere a capacidade financeira de geração de lucro do projeto, indicando a eficiência operacional do empreendimento. De acordo com as referências NAKABAYASHI (2015) e MIRANDA (2014) a atratividade dos investimentos é constatada se o projeto cumprir com os seguintes critérios:

- $VPL > 0$: Significa que os lucros gerados são maiores que os esperados com a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Quanto maior o VPL maior é o ganho.
- $TIR > TMA$: Se a TIR for maior à taxa de rentabilidade de uma inversão de baixo risco, por exemplo, um investimento em uma conta poupança.
- $Payback < \text{Tempo útil do projeto (T)}$: Se o prazo de amortização do

investimento estiver dentro do período útil do projeto.

- $IL > 1$: Se o investimento é recuperado remunerando acima da taxa mínima exigida, no caso o TMA = 15%.

- Custo de Geração (CG) < Custo de compra de combustível (CU: Quando custo de geração for menor ao valor pago pela compra do cavaco de eucalipto.

Para determinação destes parâmetros de viabilidade, a análise econômica foi avaliada a partir das seguintes sub-etapas:

- Levantamento do investimento inicial;
- Cálculo da receita gerada, pela economia de energia total comprada;
- Projeção do fluxo de caixa;
- Determinação dos indicadores econômicos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os principais resultados obtidos da análise técnico-econômica para o aproveitamento energético do bagaço de malte.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASA

5.1.1 Análise Imediata:

A partir da análise imediata descrita pela NBR 8112-83 foram determinados os teores de umidade, carbono fixo, voláteis e cinzas. Os resultados são apresentados nas Figuras 16 e 17:

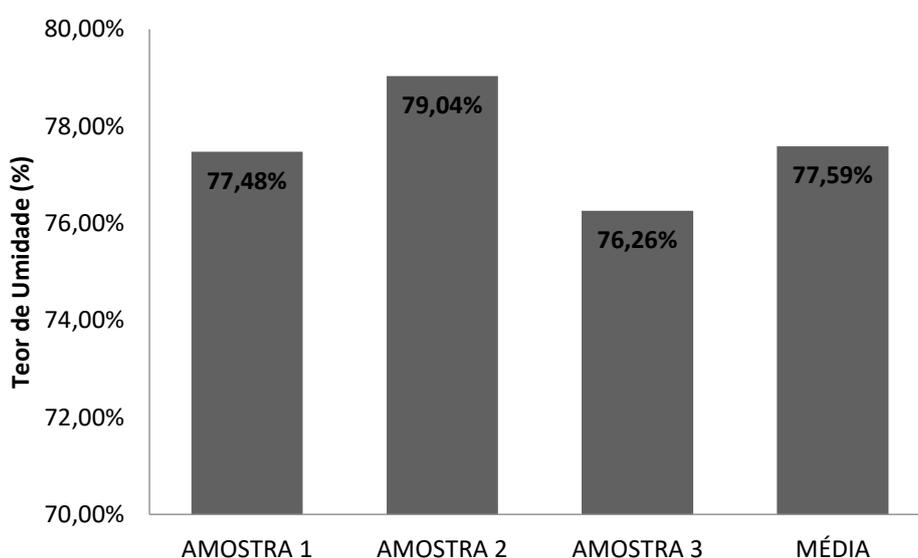


Figura 16: Teor de Umidade do Bagaço de Malte.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A determinação deste parâmetro é de suma importância para a performance e eficiência do reator de gaseificação. Para o processo de gaseificação da biomassa, o reator da caldeira requer valores de umidade da biomassa inferiores a 40%, o que justifica a necessidade da etapa de secagem dentro do processo. O teor de umidade das amostras da cervejaria encontra-se dentro da faixa descrita por vários autores que trabalharam na caracterização do bagaço de malte tais como Cordeiro (2011), Mahmood *et al.* (2013) e Rech & Zorzan (2017), que determinaram valores de umidade de 75,45%, 79,15% e 87,47%, respectivamente. É importante destacar que diferenças percentuais podem divergir em função da variedade da cevada, tipo de cereal adjunto na

mosturagem, do processo de maltagem e brasagem, da tecnologia de filtração e da própria receita das cervejas.

Respeito aos resultados encontrados da análise imediata, na Figura 17 percebe-se um conteúdo significativo de voláteis e carbono fixo. O percentual de voláteis e carbono fixo são parâmetros de suma importância para o processo de combustão e pirólise da biomassa, estes dois componentes determinam a eficiência do reator, além da correlação com o conteúdo de energia da biomassa. No experimento foram encontrados teores de voláteis no bagaço de malte, com uma média de 78,16% e 21,55% para carbono fixo. A concentração de voláteis proporciona um indicio do conteúdo e qualidade energética da biomassa analisada, uma vez que a volatilidade está relacionada com o grau de reatividade e facilidade de ignição do material durante a queima, já o teor de carbono indica a capacidade energética do material, teores altos de carbono permitem uma queima mais lenta e um tempo de residência maior da biomassa (SILVA, 2018). Estes valores proporcionam vantagens interessantes para o tipo de caldeira desta indústria e se encontram alinhado com a faixa de valores mencionados nos trabalhos na literatura.

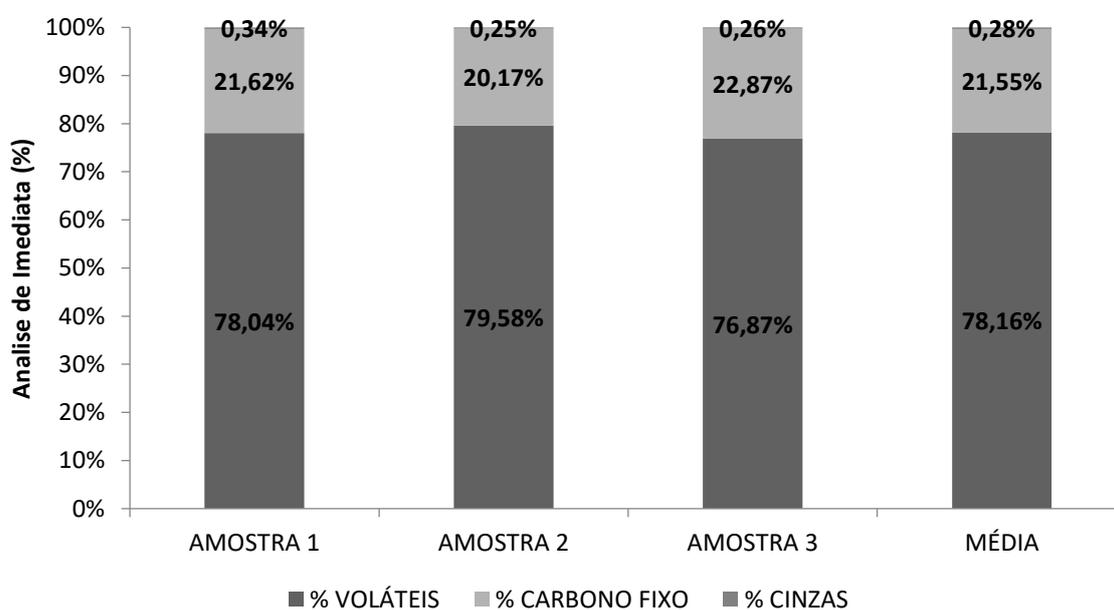


Figura 17: Análise Imediata do Bagaço de Malte.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por último o conteúdo de cinzas, cuja importância se destaca na geração e gestão de resíduos e na manutenção e limpeza da caldeira ou do reator gaseificador. Um alto conteúdo de cinzas pode afetar o leito do reator, a fornalha e o rendimento da caldeira. Para o bagaço de malte

determinou-se um valor médio de cinzas de 0,28%, que diz respeito ao baixo conteúdo de minerais na biomassa, valores que se encontram abaixo do indicado pela literatura, Cordeiro (2011) com 0,74%. Quanto maior o conteúdo de minerais na biomassa, maior a geração de cinzas e menor o será o conteúdo energético, por unidade de massa, do combustível.

5.1.2 Poder Calorífico

Devido ao contexto da pandemia e limitações por disponibilidade do equipamento de determinação de poder calorífico nos laboratórios da UNILA, a análise deste parâmetro foi realizada em um Laboratório Externo - GUIDE, seguindo a norma ASTM D 4809. Na Tabela 3 se observa os resultados obtidos desta análise:

Tabela 3: Poder Calorífico do Bagaço de Malte.

AMOSTRA	PCS [MJ/kg]	PCI [MJ/kg]
BGZ 03.06.22	20,55	18,04

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados de poder calorífico se encontram em consonância com os estudos realizados por Borel *et al.* (2018), que determinou um valor para PCS de 21,6 MJ/kg, e Silva (2018), cujo valor encontrado foi de 20,33 MJ/kg, resultados que denotam o potencial desta biomassa residual para fins de aproveitamento energético. No entanto, é importante destacar a influência do teor de umidade no poder calorífico, uma vez que contra resta aproximadamente o 12,21% do poder calorífico superior para o poder calorífico inferior, o que justifica a necessidade de reduzir o teor de umidade do bagaço do malte através do processo de secagem.

5.2 SÍNTESE DE PROCESSOS

5.2.1 ROTA A: Gaseificação

5.2.1.1 Subsistemas envolvidos

Neste tópico será abordada a tecnologia da gaseificação, visando à produção de gás de síntese para posterior queima na caldeira de biomassa. O processo de gaseificação é categorizado em quatro subsistemas principais.

- Subsistema de secagem;

- Subsistema de compactação;
- Subsistema de reator de pirólise;
- Subsistema de limpeza/separação.

É importante destacar que devido à matéria-prima ser o resíduo de grãos usados, a sua granulometria é suficientemente pequena para ser pirolisado ou gaseificado, tornando desnecessária a etapa de redução granulométrica, que geralmente é requisito para a maioria das biomassas utilizadas nos processos de pirólise e gaseificação.

Contudo, os grãos usados de cevada atingem alto teor de umidade (Rech & Zorzan, 2017). Dessa forma para o seu aproveitamento energético via tecnologia da gaseificação, a matéria-prima em questão deve necessariamente passar por uma *etapa de secagem*, com o objetivo de reduzir esse teor de umidade. O teor de umidade considerado satisfatório para o processo é na faixa de 35% (CORDEIRO, 2011).

Finalizada a etapa de secagem, o bagaço passa para a *etapa de compactação* cujo objetivo principal é maximizar a massa específica e densidade energética da biomassa (DAL-BÓ, 2016). As opções convencionais para a etapa de compactação são a briquetagem e peletização, diferenciadas entre si pelas dimensões do grão obtido. Na Tabela 4 é apresentada uma comparação simplificada entre as características do briquete e *pellet*. Para o estudo de gaseificação serão consideradas essas duas alternativas convencionais além da alternativa de não compactação do bagaço.

Tabela 4: Comparação entre Briquetes e Pellets.

Característica	Briquete	Pellet
Diâmetro (mm)	50 - 100	6 - 16
Comprimento (mm)	250 - 400	25 - 30
Umidade (%)	<10	10 - 15
Manutenção	Baixa	Alta

Fonte: Adaptado de (DIAS, 2012), (TUMULURU, 2011).

O seguinte subsistema a ser analisado é o *subsistema de reação* considerado o coração do processo da gaseificação, a partir dela define-se as características operacionais do conjunto. No reator gaseificador ocorre a degradação termoquímica da biomassa em uma atmosfera controlada e sob determinadas condições de temperatura, quantidade de agente oxidante, tempo de residência e tamanho de partícula, definidos em função do produto desejado (DAL-BÓ, 2016). Dentre as várias alternativas e configurações possíveis, neste trabalho foram consideradas cinco

tipos de reatores comumente encontrados na literatura: leito fixo, leito fluidizado, ablativo, a vácuo e rotativo.

O último subsistema do processo é o conjunto de *limpeza e separação* do produto final. Nessa etapa se realiza o tratamento do recurso energético bruto que sai do reator. Basicamente, as tecnologias convencionais disponíveis para a separação dos produtos da pirólise são: o ciclone, filtro manga, lavador de gases, precipitador eletroestático e condensador. Estes são usados para retirar possíveis partículas sólidas arrastadas pela corrente de gases na saída do reator e promover, por condensação, a separação do bio-óleo e do gás (FREITAS, RIBEIRO, & BACELOS, 2016).

5.2.1.2 Árvore de Estados

Na Figura 18 observa-se, em uma árvore de estado, o processo da gaseificação dos resíduos de grão usados de cevada, dividido nos quatro subsistemas descritos anteriormente.

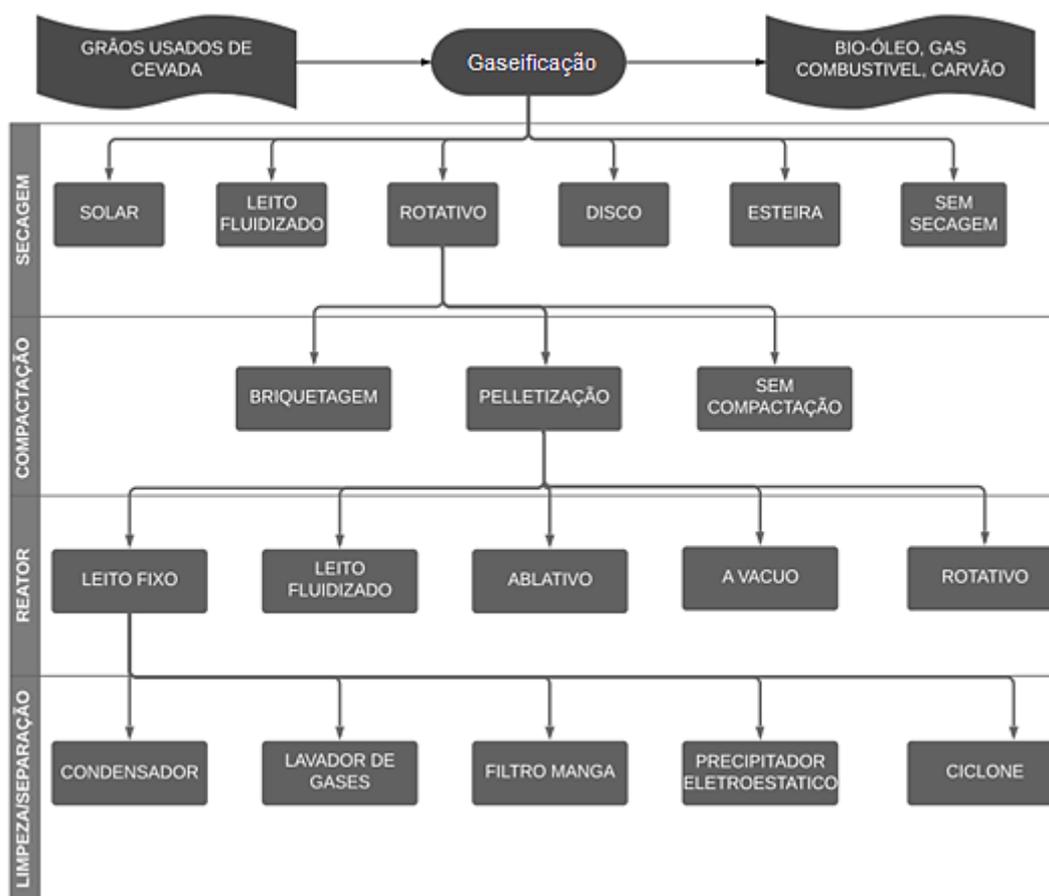


Figura 18: Árvore de estado rota da gaseificação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.1.3 Otimização Estrutural: Método Heurístico

A seguir apresentam-se as regras heurísticas para cada subsistema (Figuras 19 – 21), definidas com base na teoria e resultados experimentais obtidos em estudos realizados por autores, tais como: Basu (2010), Mussatto (2014) Dal-Bó (2016), Linhares (2018), Massardi, Massini & De Jesus Silva, D. (2020), entre outros. As regras heurísticas foram definidas com o objetivo de alcançar o fluxograma base do processo de gaseificação dos grãos usados da cevada.

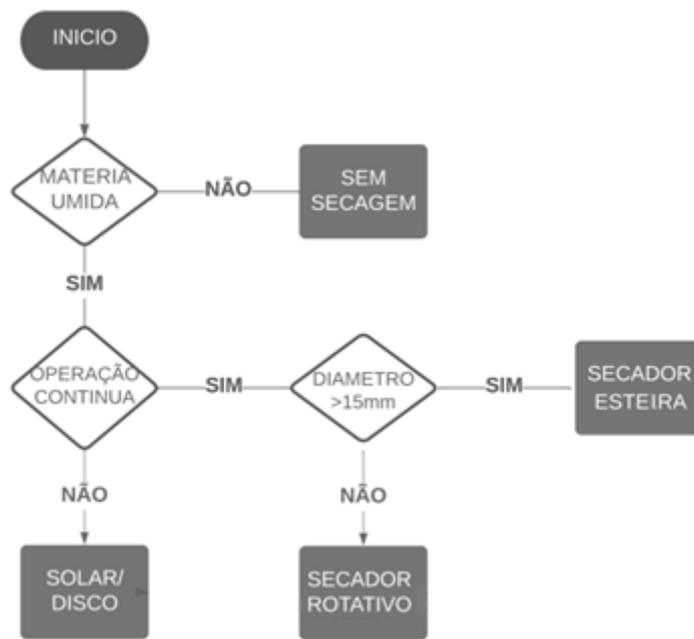


Figura 19: Heurísticas Subsistema de Secagem.

Fonte: Elaborada pelo autor.

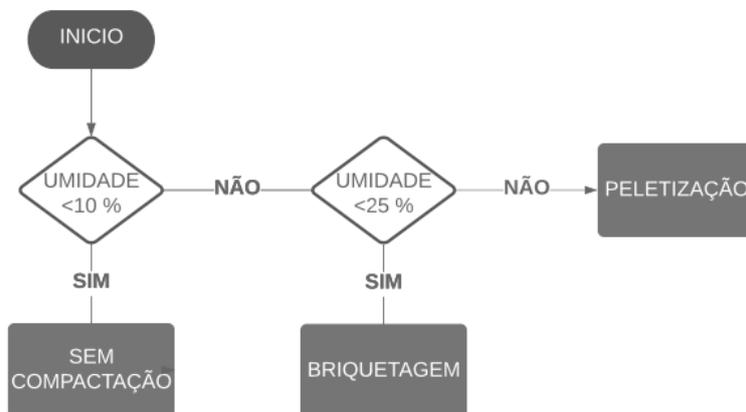


Figura 20: Heurísticas Subsistema de Compactação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

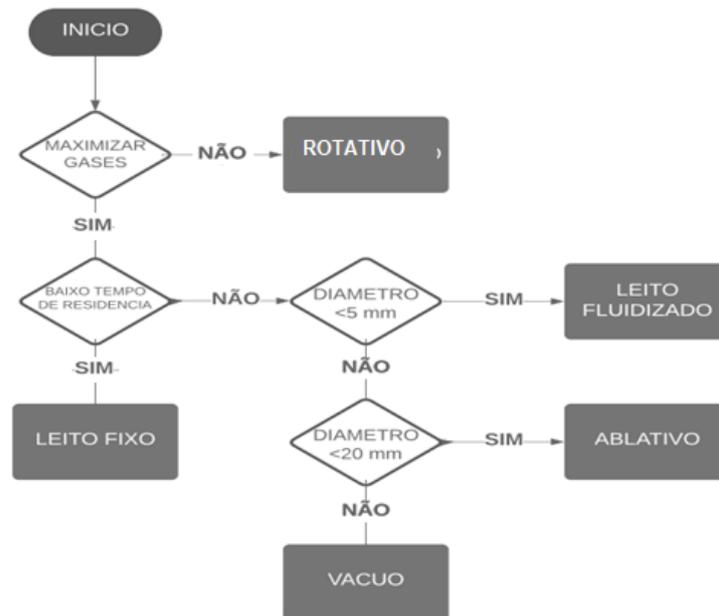


Figura 21: Heurísticas Subsistema Reator.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir das alternativas apresentadas para cada subsistema na árvore de estado da Figura 18 e considerando as regras heurísticas definidas para o processo de gaseificação, definiu-se uma proposta de rota para o aproveitamento energético dos grãos usados de cevada, via tecnologia da gaseificação. Deste modo, as rotas a serem empregadas em cada etapa do processo, tendo como objetivo maximizar a geração do produto desejado, *syngas*, são:

- Subsistema de secagem: secador rotativo.
- Subsistema de compactação: peletização.
- Subsistema de reator de pirolítico ou de gaseificação: leito fixo.
- Subsistema de limpeza/separação: ciclone e condensador.

5.2.1.4 Fluxograma Base

Finalmente a representação do fluxograma base é apresentada na Figura 22.

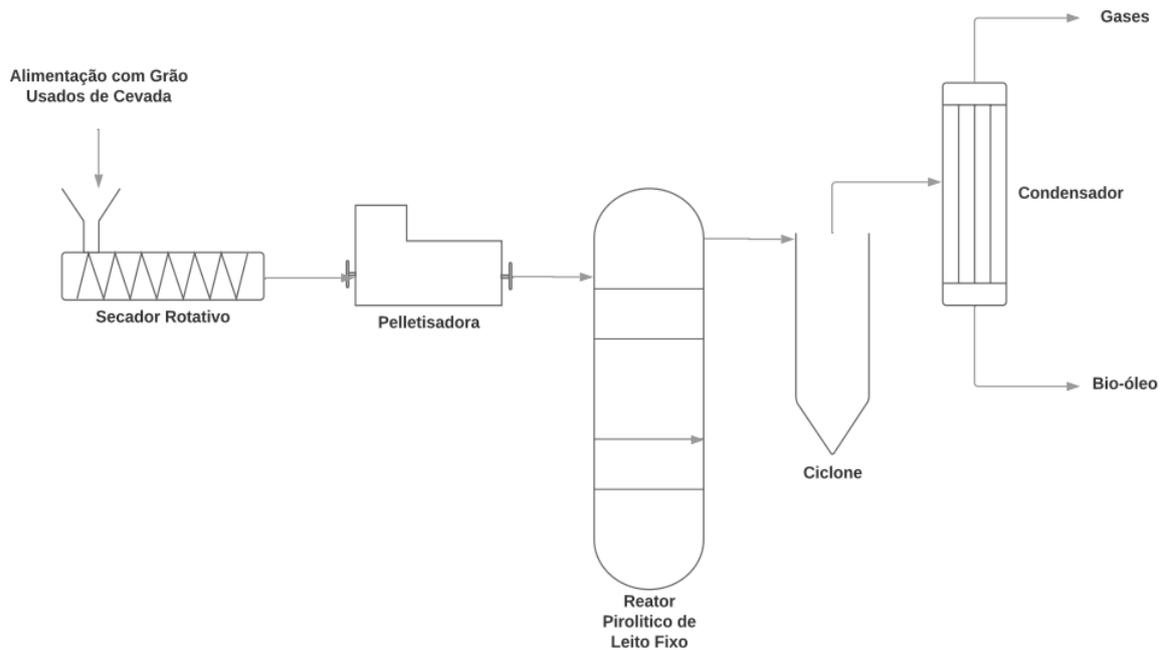


Figura 22: Representação do fluxograma base para o processo de gaseificação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.2 ROTA B: Biodigestão Anaeróbia

5.2.2.1 Subsistemas envolvidos

Nesta alternativa tecnológica o objetivo final é a produção de biogás para posterior aproveitamento como combustível para geração de vapor. O processo de biodigestão anaeróbia foi categorizado em três subsistemas principais.

- Subsistema de condicionamento ou pré-tratamento da biomassa;
- Subsistema de reator anaeróbico;
- Subsistema de limpeza e purificação.

Devido à complexidade das cadeias de celulose, hemicelulose e lignina que compõem biomassa, é necessário a degradação destas em cadeias de açúcares mais simples que possam tornar essa fonte de alimento mais acessíveis para os microrganismos produtores de biogás. Para a utilização de resíduos lignocelulósicos como substrato na digestão anaeróbia, GUERI *et al.* (2021) mencionam que a aplicação de métodos de pré-tratamento da biomassa é fundamental para melhorar a digestibilidade da matéria-prima e logo garantir a viabilidade técnica do projeto, assim primeiramente é requisito do processo a *etapa de condicionamento*. Como indica DAL-BÓ (2016) em seu trabalho, atualmente existem mais de 60 alternativas e combinações de pré-tratamentos para o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos na geração de biogás. Assim conforme descrito por

DAL-BÓ (2016), GUERI *et al.* (2021) e SILVA (2018), neste trabalho serão considerados as tecnologias mais consolidadas e mencionadas na literatura, entre elas: redução granulométrica, explosão com vapor, pré-tratamentos ácidos, alcalinos e biológicos. Segundo Gonzalez (2020), a aplicação do pré-tratamento nos resíduos lignocelulósicos traz vantagens como facilitar o processo da decomposição microbiológica no reator, maior rapidez no processo de digestão anaeróbia, incremento na produção de biogás e desenvolvimento de novos tipos de substratos.

Uma vez pré-tratada e acondicionada, a matéria prima se converte em substrato e é utilizada para alimentar o sub-sistema ou etapa reator anaeróbio. Nesta etapa o substrato serve de alimento às baterias anaeróbicas e estas por sua vez degradam a biomassa em quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, cada etapa é realizada por diferentes grupos de microrganismos (KUNZ *et al.*, 2022). Atualmente no mercado tem-se um grande número de alternativas de reatores anaeróbicos, mas a escolha deles se dá em função das características da matéria prima, o fluxo de alimentação e geração do gás de interesse, a complexidade e operações do sistema. Igualmente, devido a ampla gama de opções dos tipos de reatores de biodigestão anaeróbia disponíveis, optou-se por seguir aquelas com configurações mais tradicionalmente utilizados na indústria e mencionados por KUNZ *et al.* (2022), que são a: BLC (Biodigestor de Lagoa Coberta), UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* - Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente), CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor* - Reator com Tanque Agitado Continuamente) e *Dry Digestão*.

Obtido o produto desejado, o biogás, no último estágio do processo se realiza a limpeza e tratamento do produto, conforme as normativas para seu uso e/ou armazenamento, assim o último subsistema é denominado etapa de limpeza/purificação. Respeito aos processos de tratamento e purificação do biogás, esta etapa tem como premissas: (1) ajuste do poder calorífico e a remoção de contaminantes que afetam a qualidade do biogás e a vida útil dos componentes do sistema; e (2) a purificação do biogás e a concentração do biometano para sua inserção em linhas de distribuição e transporte de biogás (KUNZ *et al.*, 2022). É importante salientar que a escolha da tecnologia de tratamento depende diretamente da vazão do biogás produzido, da composição do biogás e, principalmente, do nível de purificação do biogás que se pretende alcançar (KUNZ *et al.*, 2022).

5.2.2.2 *Árvore de Estados*

A seguir, na Figura 23, apresenta-se a árvore de estado para o processo da biodigestão anaeróbia dividido nos três subsistemas descritos anteriormente.

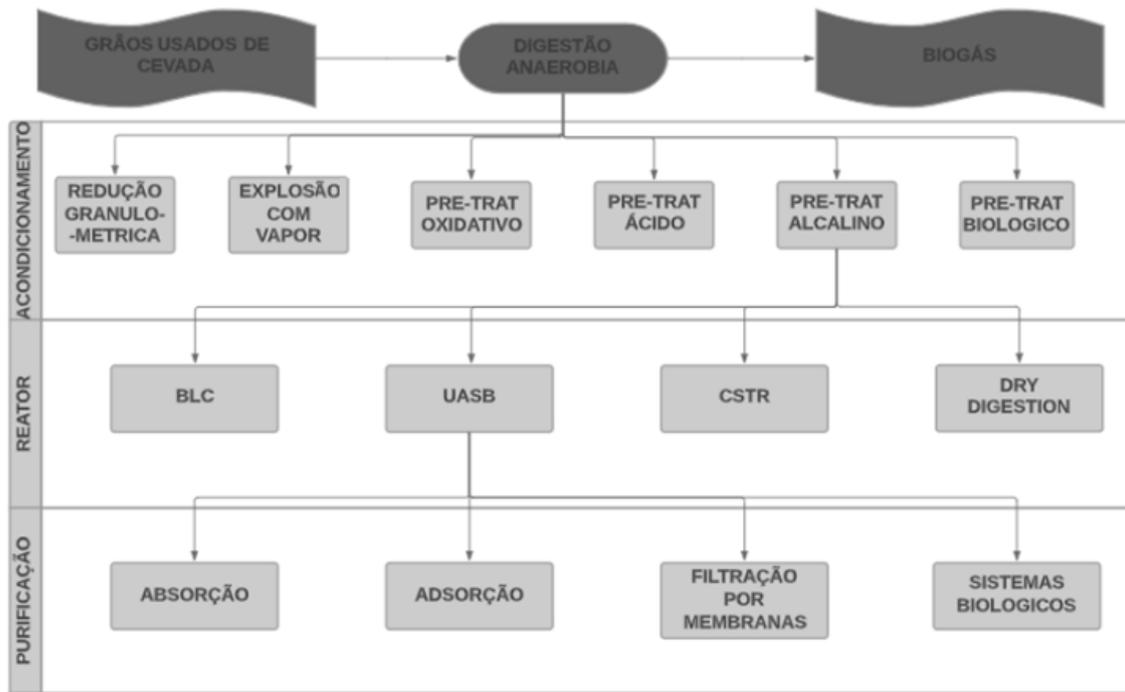


Figura 23: Árvore de estado rota da biodigestão anaeróbia.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.2.3 Otimização Estrutural: Método Heurístico

Seguidamente, nas Figuras 24, 25 e 26 se expõem as regras heurísticas para cada subsistema da rota tecnológica B. Proposta construída a partir dos trabalhos de Rodriguez (2012), Koss (2019), Gonzalez (2020), Diniz, Gonçalves & Furtado (2021), Geczi (2021), entre outros.

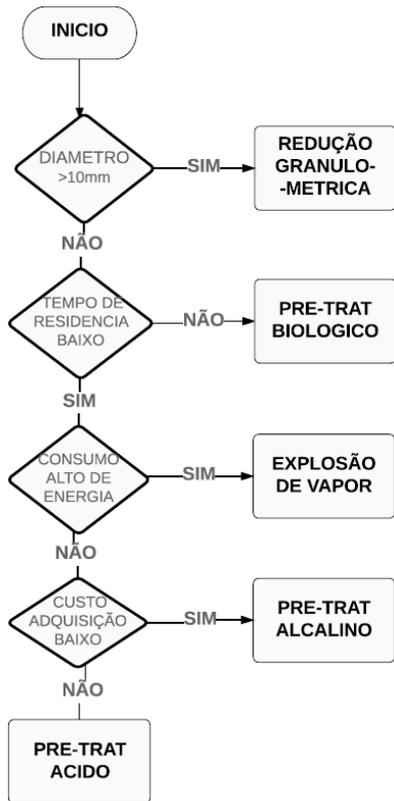


Figura 24: Heurísticas Subsistema de Acondicionamento.

Fonte: Elaborada pelo autor.

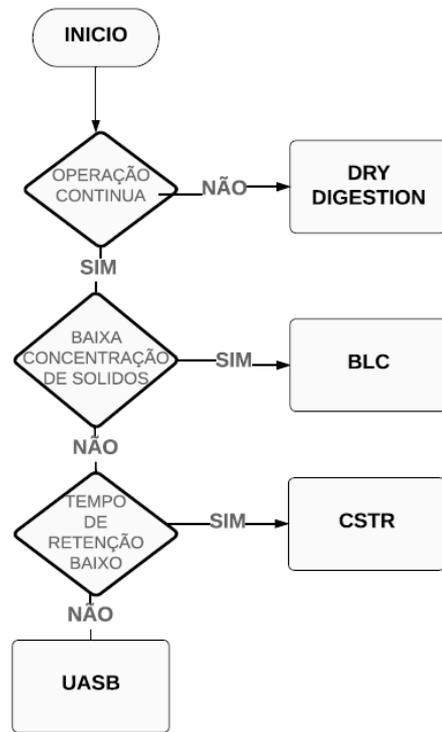


Figura 25: Heurísticas Subsistema de Reator.

Fonte: Elaborada pelo autor.

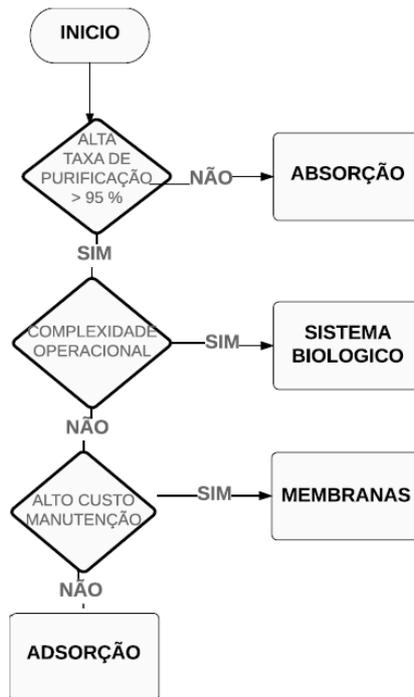


Figura 26: Heurísticas Subsistema Purificação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Deste modo, as tecnologias a serem adotadas em cada etapa do processo da rota B, são:

- Subsistema de acondicionamento: pré-tratamento alcalino.
- Subsistema de reator anaeróbico: CSTR.
- Subsistema de reator de gaseificação: leito fixo.
- Subsistema de limpeza e purificação: adsorção.

5.2.2.4 Fluxograma Base

Logo, na Figura 27 é apresentado o fluxograma base da proposta de Biodigestão Anaeróbia.

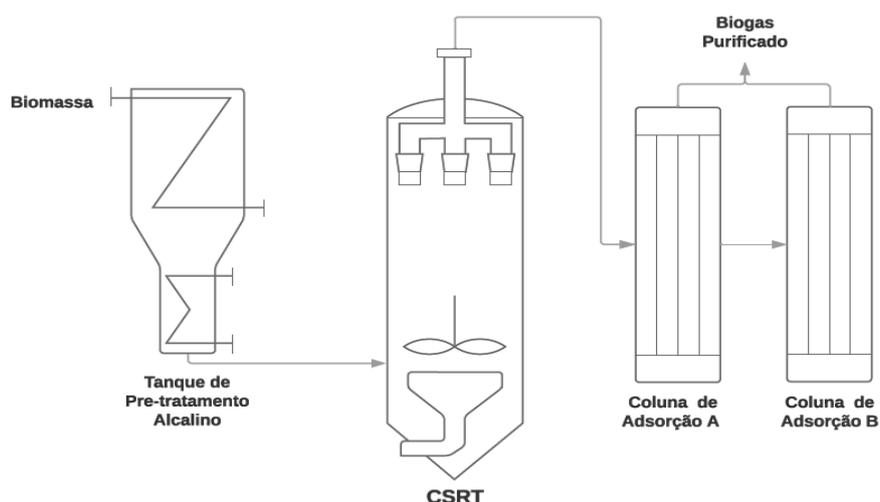


Figura 27: Representação do fluxograma base para o processo de biodigestão anaeróbia.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3 ANÁLISE ECONÔMICA

5.3.1 ROTA A: Gaseificação

5.3.1.1 Investimento Inicial

Para determinar o capital necessário para a implantação do sistema foram consultadas algumas empresas fornecedoras de equipamentos para produção de *pellets* e briquetes. Para o sistema proposto será necessária a aquisição de dois equipamentos correspondentes aos

primeiros subsistemas do fluxograma base: o secador e a peletizadora. A partir do levantamento de orçamentos, para o primeiro componente foi escolhido o secador rotativo da marca DINGLI, modelo 2912/3, devido à versatilidade do sistema de aquecimento (gás natural, biogás, vapor, biomassa ou combustíveis fósseis). A capacidade de produção de bagaço seco, com teor ajustável até 15% de umidade, é de 3,18 t/h. Na Figura 28, mostra-se o sistema secador definido.

Para o componente de compactação foi escolhida, a Peletizadora Chavantes Modelo de 50CV, com capacidade de produção de até 4t/h, apresentada na Figura 29. Considerando a capacidade de produção dos sistemas apresentados e para fins práticos de manutenção preventiva, optou-se pela aquisição de duas unidades de cada equipamento. Na Tabela 5 mostra-se o valor estimado do investimento inicial.



Figura 28: Secadora Dingli.

Fonte: Adaptado de Alibaba.



Figura 29: Peletizadora Chavantes 50CV.

Fonte: Adaptado de Chavantes Ind.

Tabela 5: Composição do investimento inicial do projeto da rota A.

Equipamento	Custo Unitário [USD]	Quantidade Requerida	Custo Total [USD]
Secador DINGLI	379.200,00	2	758.400,00
Peletizadora Chavantes	95.506,95	2	191.513,90
Investimento Inicial [USD]			949.413,90

Fonte: Elaboração Própria.

5.3.1.2 Receita Gerada

A receita principal do projeto provém da poupança gerada na substituição do cavaco de madeira pelo bagaço de cevada. O valor médio pago pelo cavaco de eucalipto é de 70,62 USD/t, no entanto, o valor de venda do bagaço de malte, como subproduto, é de 6,15 USD/t. É importante entender que o uso de bagaço para geração de vapor implica que uma parcela não será mais comercializada. Sendo assim a receita do projeto será a diferença entre a economia da compra de cavaco e o lucro antes obtido com a venda do resíduo.

Devido ao teor de umidade do bagaço, será considerada uma eficiência de utilização de bagaço de 0,80; isto significa que, para cada 1 kg de cavaco poupado será necessário 1,25 kg de bagaço. Isso representaria, em termos de uso de bagaço, que 50,41% do bagaço total gerado será empregado para aproveitamento energético na substituição do cavaco. Além dessa relação, outros pontos importantes a serem considerados na estimativa da economia gerada no projeto são a operação e manutenção do sistema. Para isso serão considerados gastos correspondentes a operação - uma equipe de 7 pessoas em regime de revezamento - estimando um custo mensal de 29.570 USD e manutenção preventiva mais troca mandatória anual valorado em 10% do investimento inicial, igual a 94.941,39 USD. Assim na Tabela 6 mostra-se uma estimativa da receita gerada anualmente.

Tabela 6: Geração de receita com a implementação do projeto da rota A.

Movimentos Financeiros	Subtotal (USD)
Economia na compra do cavaco	1.442.903,46
Bagaço usado para combustível	- 179.497,63
Operação dos equipamentos	- 354.838,88
Gastos de manutenção anual	- 94.941,39
Economia gerada	813.625,56

Fonte: Elaboração Própria.

5.3.1.3 Projeção do Fluxo de Caixa

Para a projeção do fluxo de caixa considera-se:

- A economia estimada na Tabela 6;

- Tempo de vida útil dos sistemas de secagem e peletizadora de 10 anos;
- Depreciação anual estimada como sendo a razão entre o investimento inicial e o período de vida útil dos sistemas adquiridos;
- Taxa mínima de atratividade 15% e Taxa de imposto de renda de 35%.

Desta forma, a projeção do fluxo de caixa livre no projeto pode ser observada nos dados da Tabela 7.

Tabela 7: Fluxo de caixa livre do projeto da rota A.

Movimentos Financeiros	Subtotal (USD)
Investimento Inicial	- 949.413,90
Economia Anual	813.625,56
Depreciação adicional	-94.941,39
Lucro previo a impostos	718.684,17
Valor do imposto de renda	-251.539,46
Lucro Liquido (c/ impostos)	467.144,71
Fluxo de Caixa Livre	562.086,10

Fonte: Elaboração Própria.

A partir da determinação do fluxo de caixa é possível visualizar a amortização do projeto proposto na Tabela 8.

Tabela 8: Fluxo de caixa e valores presentes do projeto da rota A.

PER	INV	FC	FCD	FCDA
0	- 949.413,90	- 949.413,90	- 949.413,90	- 949.413,90
1		562.086,10	488.770,5	- 460.643,4
2		562.086,10	425.017,8	- 35.625,5
3		562.086,10	369.580,7	333.955,2
4		562.086,10	321.374,6	655.329,8
5		562.086,10	279.456,1	934.785,9
6		562.086,10	243.005,3	1.177.791,2
7		562.086,10	211.309,0	1.389.100,2
8		562.086,10	183.746,9	1.572.847,2
9		562.086,10	159.780,0	1.732.627,1
10		562.086,10	138.939,1	1.871.566,2

PER – Período. INV – Investimento. FC – Fluxo de Caixa. FCD – Fluxo de Caixa Descontado.
FCDA – Fluxo de Caixa Descontado.

Fonte: Elaboração Própria.

5.3.1.4 Determinação de indicadores econômicos

Finalmente, com os dados levantados e utilizando as Equações 1 a 4, na Tabela 9 mostra-se os resultados obtidos para os parâmetros econômicos que determinam a viabilidade do projeto.

Tabela 9: Indicadores econômicos do projeto da rota A.

VPL (USD)	TIR (%)	PAYBACK (ANOS)	IL
1.871.566,19	58,62	2,10	2,97

Fonte: Elaboração Própria.

5.3.2 ROTA B: Biodigestão Anaeróbia

5.3.2.1 Investimento Inicial

Semelhante à análise realizada para a rota da gaseificação é necessário, primeiramente, determinar o capital requerido para a implantação do sistema. Este custo de investimento está diretamente relacionado com as dimensões e capacidade de processo da planta de geração de biogás. Assim antes é necessário estimar a capacidade de processo do sistema, para isso foi analisado a relação energética entre o biogás produzido a partir do bagaço de malte e o cavaco de madeira. Foram considerados as seguintes premissas:

- Média de poder calorífico inferior do cavaco (PCI_{cavaco}): 8,37 MJ/kg;
- Média de geração de biogás ($G_{biogás}$): 0,09 m³/kg de bagaço (DE MESA, 2010; GÉCZI *et al.*, 2021)
- Média de poder calorífico inferior de biogás ($PCI_{biogás}$): 17,95 MJ/Nm³ (ÇENGEL E BOLES, 2013, GONZÁLEZ, 2020), Supondo uma composição mínima de 50% Metano no Biogás.

Partindo desses dados é possível avaliar a quantidade de bagaço necessário para substituir o uso de cavaco, com base nas necessidades energéticas, a partir da relação dada pela Equação 9, a seguir:

$$m_{bagaço} = \frac{m_{cavaco} PCI_{cavaco}}{G_{biogás} PCI_{biogás}} \quad (9)$$

Os resultados apontaram que, para cada kg de massa de cavaco será necessário

aproximadamente 0,52 kg de bagaço para suprir a mesma demanda energética a partir do biogás gerado com bagaço. A partir dessa relação é possível determinar que isso representaria, em termos de uso de bagaço, que aproximadamente 20,92% do bagaço total gerado seria destinado para aproveitamento energético na substituição do cavaco. Assim a partir do consumo mensal de cavaco, dado na Figura 13, pode ser estimada a capacidade de processo que deve ter o sistema de produção de biogás. Na Tabela 10 observa-se os resultados da relação do consumo de cavaco *versus* demanda de bagaço.

Tabela 10: Demanda mensal de bagaço para produção de biogás.

Mês	Consumo Mensal de Cavaco [t]	Demanda Mensal de Bagaço [t]	Demanda Diária de Bagaço [t]	Produção Média de Biogás (m ³)
Janeiro	1.975,08	1.024,32	34,14	3072,95
Fevereiro	1.631,17	845,96	28,20	2537,87
Março	1.648,10	854,74	28,49	2564,22
Abril	1.618,26	839,26	27,98	2517,78
Mai	1.588,41	823,78	27,46	2471,35
Junho	1.269,08	658,17	21,94	1974,52
Julio	1.358,40	704,49	23,48	2113,47
Agosto	1.611,59	835,80	27,86	2507,41
Setembro	1.599,97	829,77	27,66	2489,32
Outubro	2.239,91	1.161,66	38,72	3484,99
Novembro	1.917,32	994,36	33,15	2983,09
Dezembro	1.974,84	1.024,19	34,14	3072,58

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados apresentados na Tabela 10 é possível observar que o sistema proposto deverá processar no mínimo 38,72 t de bagaço por dia, máxima demanda diária no mês de outubro. Para garantir a segurança e abastecimento do combustível para o processo considera-se uma margem de 10% adicional na capacidade de processo, sendo assim então a planta de biogás deverá ser capaz de processar aproximadamente 42,60 t de bagaço de malte por dia, em regime contínuo.

A partir deste dado, para o levantamento do capital necessário foram consultadas empresas fornecedoras de equipamentos e sistemas de geração de biogás. Além disso, foram realizadas comparações com estudos de caso de forma a se ter maior sensibilidade e critério a respeito dos custos de inversão. Como linha de análises e referências seguiu-se os estudos de De Mesa (2010), Koss (2019), Gonzalez (2020). Na Tabela 11 mostra-se o valor estimado do investimento inicial.

Tabela 11: Composição do investimento inicial do projeto da rota B.

Equipamento	Custo Unitário [USD]	Quantidade Requerida	Custo Total [USD]
SPTA	168.696,00	1	204.818,70
CSTR	562.320,00	1	682.729,00
STP	393.624,00	1	477.910,30
Investimento Inicial [USD]			1.365.458,00

SPTA – Sistema de Pre-tratamento Alcalino. CSTR - *Continuous Stirred Tank Reactor* . STP – Sistema de Tratamento e Purificação do Biogás.

Fonte: Elaboração Própria.

5.3.2.2 Receita Gerada

Na mesma linha metodológica que a rota da gaseificação, para este caso se considera também que a receita principal do projeto provém da poupança gerada pela substituição do cavaco de madeira, como fonte de energia, por biogás produzido a partir do bagaço de cevada. Igualmente no cálculo de receita deve ser considerada a parcela de bagaço que deixa de ser vendida para ser utilizada como matéria prima no processo.

Outros pontos importantes a serem considerados na estimativa da economia gerada no projeto são a operação (custos fixos), manutenção do sistema e provisão de insumos químicos (custos variáveis). Para os custos fixos serão considerados gastos correspondentes a operação - uma equipe de 7 pessoas em regime de revezamento –, estimando um custo mensal de 29.570 USD, respeito a manutenção em geral o mesmo será valorado de forma anual em 10% do investimento inicial, e por último para os custos variáveis (insumos químicos para o tratamento alcalino e insumos de laboratório) será considerado anualmente um valor aproximado de 12,22% do investimento inicial, conforme apontado por Gonzalez (2020). Assim na Tabela 12 mostra-se uma estimativa da receita gerada anualmente.

Tabela 12: Geração de receita com a implementação do projeto da rota B.

Movimentos Financeiros	Subtotal (USD)
Economia na compra do cavaco	1.442.903,46
Bagaço usado para o biogás	-65.163,76
Custos fixos	-166.814,31
Gastos de manutenção	-96.955,04
Custos variáveis	-140.013,30
Economia gerada	973.957,05

Fonte: Elaboração Própria.

5.3.2.3 Projeção do Fluxo de Caixa

Para a projeção do fluxo de caixa considera-se:

- A economia estimada na Tabela 12;
- Tempo de vida útil do sistema geral de 10 anos;
- Depreciação anual estimada como sendo a razão entre o investimento inicial e o período de vida útil dos sistemas adquiridos;
- Taxa mínima de atratividade 15% e taxa de imposto à renda 35%.

Desta forma, a projeção do fluxo de caixa livre do projeto pode ser observada na Tabela 13.

Tabela 13: Fluxo de caixa livre do projeto da rota B.

Movimentos Financeiros	Subtotal (USD)
Investimento Inicial	-1.365.458,00
Economia Anual	1.113.970,35
Depreciação adicional	-136.545,80
Lucro previo a impostos	977.424,55
Valor do imposto de renda	-342.098,59
Lucro Liquido (c/ impostos)	635.325,96
Fluxo de Caixa Livre	771.871,76

Fonte: Elaboração Própria.

A partir da determinação do fluxo de caixa é possível visualizar a amortização do projeto proposto na Tabela 14:

Tabela 14: Fluxo de caixa e valores presentes do projeto da rota B.

PER	INV	FC	FCD	FCDA
0	-1.365.458,00	-1.365.458,00	-1.365.458,00	-1.365.458,00
1		771.871,76	671192,8	-694265,2
2		771.871,76	583645,9	-110619,2
3		771.871,76	507518,2	396899,0
4		771.871,76	441320,2	838219,2
5		771.871,76	383756,7	1221975,8
6		771.871,76	333701,5	1555677,3
7		771.871,76	290175,2	1845852,5

8	771.871,76	252326,2	2098178,7
9	771.871,76	219414,1	2317592,9
10	771.871,76	190794,9	2508387,8

PER – Período. INV – Investimento. FC – Fluxo de Caixa. FCD – Fluxo de Caixa Descontado. FCDA – Fluxo de Caixa Descontado.

Fonte: Elaboração Própria.

5.3.2.4 Determinação de indicadores econômicos

A partir dos dados estimados e utilizando as Equações 1 a 4, na Tabela 15 mostra-se os resultados obtidos para os parâmetros econômicos que determinam a viabilidade do projeto de digestão anaeróbia.

Tabela 15: Indicadores económicos do projeto da rota B.

VPL (USD)	TIR (%)	PAYBACK (ANOS)	IL
2.508.387,76	55,86	2,22	2,84

Fonte: Elaboração Própria.

5.3.3 Comparação de Rotas Tecnológicas

A partir dos indicadores econômicos constata-se a viabilidade econômica para o investimento na implementação de ambos os projetos, isto devido a sua alta taxa interna de retorno, o curto tempo de retorno do investimento e o bom índice de lucratividade, como mostrado comparativamente na Tabela 16.

Tabela 16: Comparação entre indicadores económicos das rotas A e B.

Rota Tecnológica	VPL (USD)	TIR (%)	PAYBACK (ANOS)	IL
Gaseificação (A)	1.871.566,19	58,62	2,10	2,97
Biodigestão				
Anaerobia (B)	2.508.387,76	55,86	2,22	2,84

Fonte: Elaboração Própria.

Pelo VPL determinado é possível deduzir que o ganho do projeto equivale a mais de um ano inteiro de gastos em compra de cavaco, no caso da gaseificação o VPL equivale a 1,3 vezes o gasto na compra de cavaco já para a rota da biodigestão se alcança até 1,74 vezes o valor gasto em um ano de compra de cavaco. Não obstante, atendendo os resultados dos indicadores econômicos das rotas tecnológicas é possível constatar uma diferença considerável entre as duas

propostas. Para o VPL é possível observar uma vantagem de 636.821,57 USD da proposta da rota B sobre a rota A, sem embargo é importante destacar que a diferença entre os investimentos de ambas propostas é de 416.044,10 USD, sendo que a proposta de biodigestão é a que requer maior aporte de capital, 22% a mais que a proposta de gaseificação.

Assim, a partir dos demais indicadores é possível concluir que a proposta da gaseificação apresenta uma vantagem interessante sobre a proposta de biodigestão anaeróbia, partindo do menor nível de capital requerido para implementação do projeto, um índice maior de taxa interna de retorno e lucratividade, além de um tempo de retorno de investimento levemente inferior, o que converte a rota A na opção mais atrativa economicamente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Considerando a importância da indústria cervejeira desde o ponto de vista do impacto socioeconômico e ambiental devido ao nível de consumo de recursos naturais e a geração de resíduos, este trabalho visou contribuir com o princípio de sustentabilidade deste setor por meio da avaliação de alternativas de utilização do próprio resíduo do processo industrial como fonte de energia.

Da análise do estudo de caso constatou-se que esta indústria demanda uma quantidade importante de energia térmica para o processo cervejeiro, uma média de 631.935 MJ de energia por dia para a geração de vapor. Esta energia é obtida, em parte, a partir da queima diária de aproximadamente 75,50 t de cavaco de Eucalipto em uma caldeira com capacidade de geração de 22 t/h de vapor a 8 bar, além de outras três caldeiras que queimam *Fuel Oil* e Gasoil. Ao mesmo tempo em que ocorre esta demanda de energia, esta indústria gera em média 138,80 t de resíduos por dia, principalmente do tipo orgânico, dos quais cerca de 67,45% é o próprio bagaço dos grãos usados de cevada, isto significa que se gera cerca 2,5 vezes bagaço que o consumo de cavaco, ambos materiais lignocelulósicos. Assim, considerando o nível de uso de energia e a geração de resíduos, ambos os pontos fundamentais da sustentabilidade, neste trabalho se analisou a possibilidade de conjugação destas duas variáveis como alternativa de auto-abastecimento energético da indústria. A proposta do trabalho foi analisar duas rotas tecnológicas para o aproveitamento energético do bagaço de malte, a gaseificação e a biodigestão anaeróbia, visando à produção de combustíveis gasosos para queima na caldeira de biomassa.

A análise técnica partiu do mapeamento do potencial energético dos grãos usados de cevada a partir da determinação de grau de umidade, a análise imediata e poder calorífico, além do levantamento teórico da composição da biomassa. Determinou-se uma média de umidade de 77,59% para o bagaço de cevada, com teores de voláteis, carbono fixo e cinzas de 78,16%, 21,55% e 0,28%, respectivamente, valores favoráveis para tecnologias como a combustão e gaseificação. Respeito ao poder calorífico encontrou-se um valor de 20,55 MJ/kg para poder calorífico superior e 18,04 MJ/kg para o poder calorífico inferior. Todos estes resultados demonstraram o potencial energético da biomassa residual e cabe mencionar que os valores encontrados na análise experimental se encontram em consonância com os resultados determinados por vários autores citados na revisão, entre os principais Coronado (2020), Silva (2018) Rech & Zorzan (2017), Mahmood *et al.* (2013), Cordeiro (2011), entre outros.

Uma vez examinado o potencial energético dos grãos usados de cevada na etapa seguinte se realizou a síntese do projeto onde, conduzido pelas regras heurísticas

características de cada rota, se determinou um fluxograma base para cada proposta. Para o sistema de gaseificação se definiu quatro subsistemas compostos por uma etapa de secagem, pelletização, reator gaseificador e um purificador do gás de síntese, já para o sistema de biodigestão anaeróbia se estabeleceram três subsistemas conformados por um pré-tratamento alcalino da biomassa, o reator anaeróbico e o conjunto de limpeza e purificação do biogás.

Levantadas as configurações para cada proposta tecnológica, se procedeu a analisar a viabilidade econômica de cada uma delas. A análise econômica partiu da determinação do capital necessário para implementação de cada projeto, a estimativa de receita gerada, a construção do fluxo de caixa e a determinação dos indicadores de viabilidade econômica. Foram determinadas e analisadas o Valor Presente Líquido, a Taxa Interna de Retorno, o *Payback* e o Índice de Lucratividade, encontrando-se uma leve diferença entre os mesmos indicadores para cada proposta. No primeiro indicador encontrou-se que um VPL de 1.871.566,19 USD e 2.508.387,76 USD para as rotas de gaseificação e biodigestão, respectivamente, o que leva a pensar que a rota B apresenta muito maior ganho na implementação do projeto. Porém, cabe ressaltar que a biodigestão requerer uma inversão de 416.044,10 USD a mais que a rota A, o que representa um 22% de capital a mais que a proposta de gaseificação. Respeito a Taxa Interna de Retorno e Índice de Lucratividade a rota A apresenta uma vantagem de 3% a mais para o primeiro indicador e 0,13 pontos a mais para a lucratividade, em comparação com a rota B. Já para o *Payback*, indicador que mede o tempo de recuperação de capital, a diferença é mínima, com uma vantagem de dois meses adiantado para o projeto de gaseificação respeito à da biodigestão. Assim, da análise econômica conclui-se que, embora ambas as propostas demostram índices de viabilidade favoráveis, a proposta da gaseificação apresenta uma vantagem interessante sobre a proposta de biodigestão anaeróbia, o que a torna a opção mais atrativa economicamente.

Além desses parâmetros econômicos, é importante evidenciar que a substituição do cavaco de madeira pelo bagaço de cevada aporta à indústria um ganho em energia comprada (MJ de combustíveis) para geração de vapor de 58,40% ao ano, uma vez que a energia comprada seria composta só pelo gasto financeiro implicado em queimar *fuel-oil* e *gasoil* para gerar vapor, não mais o cavaco.

Finalmente, a partir dos resultados e considerações expostas é possível concluir que a integração destas tecnologias energéticas se apresenta como uma opção interessante para o fortalecimento da sustentabilidade do setor cervejeiro, mediante a gestão de resíduos e o uso racional de recursos naturais. Além dos benefícios econômicos pela redução dos custos de aquisição de combustíveis, a utilização dos resíduos de malte como fonte de energia, traz também consigo uma serie de vantagens desde ponto de vista socioambiental alinhadas com os Objetivos de

Sustentabilidade (ODS) para as indústrias., entre algumas cita-se:

- Diminuição do uso e a dependência dos combustíveis convencionais para geração de vapor;
- Redução dos níveis de emissões de gases de efeito estufa provenientes da atividade produtiva industrial.
- Subtrai indiretamente o impacto ambiental do mono-cultivo de biomassa destinado ao uso como combustível, geralmente espécies de eucalipto e pinus.
- Minimização do gasto energético ligado ao setor logístico e de transporte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALIYU, S., & BALA, M. (2011). Brewer's spent grain: a review of its potentials and applications. *African Journal of Biotechnology*, p. 324-331.
- BASU, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory*. Academic press - ELSEVIER.
- BARBOSA, Marcela Cordeiro. (2014). Qualidade do carvão vegetal produzido com material de diferentes posições axiais. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. FACULDADE DE TECNOLOGIA. DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, 29.
- BOREL, L. D., LIRA, T. S., RIBEIRO, J. A., ATAÍDE, C. H., & BARROZO, M. A. (2018). Pyrolysis of brewer's spent grain: Kinetic study and products identification. *Industrial Crops And Products*, v. 121, n. 2018, p.388-395, Elsevier BV.
- CASTRO, A. (2002). *Prospecção de Cadeias Produtivas e Gestão da Informação*. Scielo, 18.
- CELAYA, A., LADE, A., & GOLDFARB, J. (2015). Co-combustion of brewer's spent grains and Illinois No. 6 coal: Impact of blend ratio on pyrolysis and oxidation behavior. *Fuel Processing Technology*, p. 39-51.
- ÇENGEL, Y. U.; BOLES, M. A (2013). *Termodinámica. 7ma Edición. The McGraw-Hill*
- CERVBRASIL. (2016). Associação Brasileira da Indústria da Cerveja. Disponível em http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/. Acesso em 16/11/2020.
- CORDEIRO, L. (2011). Caracterização e viabilidade econômica do bagaço de malte oriundo de cervejarias para fins energéticos. João Pessoa. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Paraíba.
- CORONADO, M. (2020). Characterization and SEM-EDX Analysis of Brewer's Spent Grain from the Craft Brewery Industry. *Sustainability*, 7744.
- CUBILLOS, D. A., MEJÍA, P. J., GUTIERREZ, C. I., & DELGADILLO, O. L. (2018). Evaluación económica del aprovechamiento de residuos líquidos de la producción de cerveza. Santiago de Cali: Pontificia Universidad Javeriana.
- DAL-BÓ, V. (2016). Potencialidades para o Aproveitamento de Biomassa. São Mateus: Programa de Pós-graduação em Energia. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.
- DE LA MESA DE BIOGÁS, M. (2010). El sector del biogás agroindustrial en España. Ministerio de Medio ambiente y Medio Rural y Marino.

DE OLIVEIRA, I. A. (2020). GRUPO AMBEV: fatores determinantes para a análise dos indicadores de desempenho da companhia nos últimos 11 trimestres. Repositório de Trabalhos de Conclusão de Curso - UNIFACIG, 19.

DIAS, E. A. (2012). Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. INFOTECA-E: Embrapa Agroenergia-Documentos.

GUERI, M. D., SCHIRMER, W., GONÇALVES TORRES, L., & FURTADO, A. (2021). Pré-tratamentos de resíduos lignocelulósicos visando ao aumento da geração de metano nos processos de digestão anaeróbia: uma revisão. Revista GEAMA –Ciências Ambientais e Biotecnologia.

DIONIZIO, A. F. (2017). Aproveitamento energético de resíduos agroindustriais no Distrito Federal. Brasília: Faculdade de Tecnologia. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.

DO LAO LINHARES, L. (2018). Avaliação do potencial de aproveitamento do bagaço de malte cervejeiro para obtenção de Xarope de Glicose. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

EVARISTO, R., CENCI, I., GUIMARÃES, M., Metz, I., & MACEDO, J. (2017). Caracterização de resíduos da produção de cerveja artesanal com potencial aplicação para biocombustíveis.

FAO, O. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2011). Manual de Biogás.

FIGUEIREDO, OLIVEIRA, M. E., JÚNIO, D. L., PEREIRA, SILVA, A. K., CARNEIRO, A. d., y otros. (abril de 2018). POTENCIAL DA MADEIRA DE *Pterogyne nitens* Tul. (MADEIRA-NOVA) PARA PRODUÇÃO. Ciência Florestal, 28.

FREITAS, T., RIBEIRO, D., & BACELOS, M. (2016). Síntese de uma planta de resíduos de embalagens cartonadas. En A. C. FURTADO, G. RONCEROS, L. Da Silva, & V. DAL-BÓ, Aplicações da Engenharia de Processos em Sistemas de Energia. Curitiba: CRV.

FU, X., & HU, Y. (2016). Comparison of reactor configurations for biogas production from rapeseed straw. BioResources, 11(4), p. 9970-9985.

GARCIA PAZ, M. (2017). Los Residuos de cerveza como fuente de antioxidantes naturales. Catalunya: Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.

GAVALA, HN, KOPSINIS, H., SKIADAS, IV, STAMATELATOU, K., & LYBERATOS, G. (1999). Treatment of dairy wastewater using an upflow anaerobic sludge blanket reactor. Journal of agricultural engineering research, 73(1). p. 59-63.

GÉCZI, G. B. (2021). Examination of energy recovery of brewers' spent grain II: Biological

Process. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 268-270.

GÓMEZ BERNAL, E. N., & ROA PALACIOS, N. (2020). Desarrollo de una herramienta para el diseño de un sistema de remoción de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás empleando lana de acero. Tesis de Licenciatura. Fundación Universidad de América.

GONZÁLEZ, B. N. (2020). Biogas a partir de bagazo cervecero. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Mar del Plata.

HENRIQUES, R. M. (2004). Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica. Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

IANNICELLI, A. L. (2008). Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira. Dissertação de Mestrado. Universidade de Taubate.

IBGE. (2019). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Recuperado el 08 de 08 de 2020, de IBGE: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/25160-em-julho-ibge-preve-alta-de-5-8-na-safra-de-2019>

KANAUCHI, O., MITSUYAMA, K., & ARAKI, Y. (2001). Development of a functional germinated barley foodstuff from brewer's spent grain for the treatment of ulcerative colitis. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 59-62.

KOSS, F. E. (2019). Generación de biogás a partir de subproductos y efluentes líquidos de la industria de cerveza artesanal mediante digestión anaerobia. Proyecto Final Integrador de Ingeniería Ambiental. Instituto de Investigaciones e Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de San Martín.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R.; DO AMARAL, A. (2022). Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato (2 ed.). Concordia, Santa Catarina: Sbera: Embrapa Suínos e Aves.

LANAO SISÓ, E., & GIL MARTÍNEZ, A. (2013). Evaluación de las tecnologías de purificación de biogás. Trabajo Fin de Master. Universidad de Zaragoza.

MAC KAY RODRIGUEZ, A. F. (2021). Tecnología de mono-digestión anaerobia usando residuos orgánicos para la producción de biogás. . Escuela de Ingeniería Ambiental. Universidad César Vallejo.

MAHMOOD, A. S.N.; BRAMMER, J. G.; HORNUNGA, A., STEELE, A., POULSTON, S. (2013). The intermediate pyrolysis and catalytic steam reforming of Brewers spent grain. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* Vol.103. 328-342 .

- MALVERDI, K. B., DE SOUZA, P. A., & SHIMOSAKAI DE LIRA, T. (2016). Pirólise rápida da biomassa para obtenção de bio-óleo. En A. Meneguelo , L. Da Silva Arrieche, M. Silveira Bachelos, T. Shimosakai de Lira, & V. Dal-Bó, Aplicações de Engenharia de Processos em Sistemas de Energia (pág. 332). Curitiba: CRV.
- MARTINS, L. F., PANDOLFI, M. A., & COIMBRA, C. C. (2017). ANÁLISE DOS INDICADORES DO MERCADO CERVEJEIRO BRASILEIRO. Simpósio de Tecnologia da Faculdade de Tecnología de Taquaritinga, (pág. 13). Taquaritinga.
- MASSARDI, M., MASSINI, R., & DE JESUS SILVA, D. (2020). Caracterização química do bagaço de malte e avaliação do seu potencial para obtenção de produtos de valor agregado. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 83-91.
- MIRANDA, A. B. C. M. (2014). Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MORERO, B. d. (2014). Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Litoral.
- MORERO, B., GROPELLI, E., & CAMPANELLA, E. A. (2010). Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. *Ciencia y tecnología*, 187-202.
- MUSSATTO, S. (2014). Brewer's spent grain: a valuable feedstock for industrial applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1264-1275.
- MUSSATTO, S., DRAGONE, G., & ROBERTO, I. (2006). Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. *Journal of cereal science*, 1-14.
- NAKABAYASHI, R. (2015). Microgeração fotovoltaica no Brasil: viabilidade econômica, São Paulo: ABINEE. Brasil
- NOGUEIRA, M., & RENDEIRO, G. (2008). Gaseificação de Biomassa Sólida–Soluções Energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- NUNES SANTOS, M. (2016). Aproveitamento tecnológico da casca do cacau. São Mateus: Dissertação de Mestrado. p. 1-97. Universidade Federal do Espírito Santo.
- PEREIRA, F. A., CARNEIRO, A. d., VITAL, B. R., LUCIA, R. M., Junior, W. P., & BIANCHE, J. J. (2009). Propriedades físico-químicas de briquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio. *Floreta e Meio Ambiente*, 23-29.
- PERLINGEIRO, C. (2005). Engenharia de processos: Análise, simulação, otimização e síntese. São Paulo: Blucher.

QIN, F., JOHANSEN, A., & MUSSATTO, S. (2018). Evaluation of different pretreatment strategies for protein extraction from brewer's spent grains. *Industrial Crops and Products*, 443-453.

RECH, K. P., & ZORZAN, V. (2017). Aproveitamento de resíduos da indústria cervejeira na elaboração de cupcake. p. 34. Trabalho de Conclusão de Curso. Francisco Beltrão Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

RODRÍGUEZ, C. A. (2012). Producción de biogás a partir del bagazo cervecero. Memoria. Facultad de Ciencias Agronómicas - Universidad de Chile, 40.

SILVA, L. F. D. (2018). Viabilidade técnica da produção de briquetes a partir do bagaço de cevada. Trabalho de Conclusão de Curso. p. 49. Brasília: Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília.

SINDCERV. (2020). Sindicato Nacional da Indústria Cervejeira. Disponível em: <https://www.sindicerv.com.br/o-setor-em-numeros/>. Acesso em: 18/03/2021.

SOUZA, M. M. (2010). Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita florestal e do processamento de *Pinus taeda* L. Dissertação de Mestrado. p. 77. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

TODOCALDERAS. Definiciones Específicas (CALDERAS DE VAPOR). Disponível em: <<https://todocalderas.com.ar/articulos/definiciones-especificas-calderas-de-vapor>> Acesso em março. 2021.

TUMULURU, E. A. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, p. 683-707.

VARNERO, M. T., Carú, M., GALLEGUILLOS, K., ACHONDO, P. (2012). Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Información tecnológica*, 23(2), p. 31-40.

VERDE, A. D., PEREIRA, A. M., CUCOLO, M. C., ANDREAZZI, M. (2018). Destino sustentável de resíduos de cervejaria artesanal: um estudo de caso em uma granja de suínos. II Mostra Interna de Trabalhos de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. UNICESUMAR.

WILKINSON, S., SMART, K., & COOK, D. (2014). A comparison of dilute acid-and alkali-catalyzed hydrothermal pretreatments for bioethanol production from brewers' spent grains. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, p. 143-153.