

UNIVERSIDADE DE UBERABA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA MESTRADO
PROFISSIONAL

ANTONIO EDUARDO SANTOS MELO

CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE MALTE E DO BAGAÇO DE MALTE PARA
UTILIZAÇÃO EM UMA PLANTA DE TRATAMENTO TÉRMICO COM O
OBJETIVO DE GERAÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE

UBERABA - MG

2026

ANTONIO EDUARDO SANTOS MELO

**CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE MALTE E DO BAGAÇO DE MALTE PARA
UTILIZAÇÃO EM UMA PLANTA DE TRATAMENTO TÉRMICO COM O
OBJETIVO DE GERAÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima - Universidade de Uberaba - UNIUBE

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Campos de Assis - Universidade de Uberaba - UNIUBE

UBERABA - MG

2026

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

- M491c Melo, Antonio Eduardo Santos.
Caracterização do pó de malte e do bagaço de malte para utilização em uma planta de tratamento térmico com o objetivo de geração de gás de síntese / Antonio Eduardo Santos Melo. – Uberaba (MG), 2026.
84 f. : il., color.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.
Orientador: Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima.
Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Campos de Assis.
1. Resíduos como combustível. 2. Biomassa. 3. Malte. 4. Cerveja – Indústria. 5. Sustentabilidade. I. Lima, Euclides Antônio Pereira de. II. Assis, Leonardo Campos de. III. Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDD 662.6

ANTONIO EDUARDO SANTOS MELO

**CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE MALTE E DO BAGAÇO DE MALTE PARA
UTILIZAÇÃO EM UMA PLANTA DE TRATAMENTO TÉRMICO COM O
OBJETIVO DE GERAÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.

Aprovado em: 30/07/2026

BANCA EXAMINADORA



Prof(a). Dr(a). Euclides Antônio Pereira de Lima – Orientador(a)
Universidade de Uberaba



Prof(a). Dr(a). José Roberto Delalibera Finzer
Universidade de Uberaba



Prof(a). Dr(a). Valério Luiz Borges
Universidade Federal de Uberlândia

DEDICATÓRIA

Dedico essa conquista à toda minha família que tanto me apoiou e trilhou comigo esse caminho sempre me incentivando, compreendendo e acolhendo com palavras de superação.

Dedico este trabalho também aos meus pais e irmãs que sempre me incentivaram na busca do conhecimento e aos princípios de integridade tão presentes durante toda minha formação familiar, pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Aos professores presentes ao longo da minha vida acadêmica que sempre contribuíram com minha formação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima, por todo tempo e conhecimento dedicados para a conclusão desse trabalho.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Leonardo Campos de Assis, pelas orientações pertinentes e apoio para a melhoria deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Valério Luiz Borges e ao Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer, por todos os ensinamentos e direcionamentos com os quais pude aperfeiçoar meu conhecimento e melhorar a apresentação deste trabalho.

Ao Sr. Everaldo Miranda, Gerente Geral da Cervejaria Petrópolis S.A. unidade Uberaba, e ao Sr. Gilson Pereira dos Reis, Gerente do Sistema Integrado de Gestão da Calmecon Caldeiraria, Estruturas Metálicas e Construções Ltda, por todo apoio técnico e operacional os quais tornaram possível a conclusão deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), APQ-01203-23, à CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e à Universidade de Uberaba (Uniube) pela realização/execução deste trabalho.

Agradeço a Deus por ter me concedido fé e coragem para concluir esse trabalho e aos colegas e mestres que tanto me ajudaram para que tudo se tornasse realidade.

RESUMO

No setor cervejeiro, o bagaço de malte e o pó de malte são coprodutos orgânicos gerados em grande volume, destinados tradicionalmente à alimentação animal. Este trabalho objetivou caracterizar e avaliar a valorização energética dessas biomassas como combustíveis para gaseificação, um processo termoquímico que converte insumos carbonáceos em gás de síntese (*syngas*). A caracterização do bagaço de malte *in natura* evidenciou um elevado teor de umidade residual (~77,5%), originado na etapa de clarificação do mosto. Ensaio de secagem natural demonstraram-se ineficazes para a adequação operacional do material, evidenciando a necessidade de integração de um sistema de secagem acoplado para reduzir a umidade ao patamar de 15,0%. Propõe-se um arranjo em malha fechada (*closed-loop*), no qual uma fração do calor útil gerado no próprio reator retorna ao secador para o pré-tratamento da biomassa. A caracterização do pó de malte indicou propriedades análogas às da serragem de referência, com pontos de fulgor próximos (220 °C e 240 °C, respectivamente), validando sua aplicação no reator. A amostragem de efluentes atmosféricos na chaminé da planta piloto confirmou a conformidade das emissões de particulados e gases residuais. Do ponto de vista econômico, a comercialização direta do bagaço para ração animal (R\$ 5.005.200,00/ano) supera o ganho direto da substituição de cavaco (R\$ 3.419.410,00/ano). Contudo, a validação da gaseificação fundamenta-se nos externalismos positivos: eliminação do transporte rodoviário e consumo de diesel, mitigação de riscos sanitários por decomposição, viabilização de créditos de carbono e fortalecimento do posicionamento ESG no âmbito da Economia Circular.

Palavras-chave: Resíduos, Biomassa, Bagaço de malte, Produção de Cerveja, Gaseificação, Sustentabilidade, Economia Circular.

ABSTRACT

In the brewing sector, spent grain and malt dust are organic co-products generated in large volumes and traditionally destined for animal feed. This study aimed to characterize and evaluate the energy valorization of these biomasses as fuels for gasification, a thermochemical process that converts carbonaceous feedstocks into synthesis gas (*syngas*). The characterization of the *in natura* spent grain revealed a high residual moisture content (~77.5%), originating from the wort clarification stage. Natural drying tests proved ineffective for the operational conditioning of the material, demonstrating the need for the integration of a coupled drying system to reduce the moisture content to the 15.0% level. A closed-loop arrangement is proposed, in which a fraction of the useful heat generated in the reactor itself is returned to the dryer for biomass pretreatment. The characterization of malt dust indicated properties analogous to those of the reference sawdust, with similar flash points (220 °C and 240 °C, respectively), validating its application in the reactor. Atmospheric effluent sampling at the pilot plant stack confirmed compliance with particulate matter and residual gas emission standards. From an economic standpoint, the direct commercialization of spent grain for animal feed (R\$ 5,005,200.00/year) exceeds the direct gain from the replacement of wood chips (R\$ 3,419,410.00/year). However, the validation of gasification is supported by positive externalities: elimination of road transportation and diesel consumption, mitigation of health risks associated with decomposition, feasibility of carbon credits, and strengthening of ESG positioning within the framework of the Circular Economy.

Keywords: Waste, Biomass, Spent Grain, Beer Production, Gasification, Sustainability, Circular Economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Grão de cevada.....	5
Figura 2 - Plantação de cevada cervejeira BRS Quanranta	6
Figura 3 - Exemplo de equipamento de malteação.....	7
Figura 4 - Silos de armazenamento e malte.....	8
Figura 5 - Exemplo de sistema de limpeza do malte e aspiração do pó	8
Figura 6 - Moinho de rolos com sistema umidificador	9
Figura 7 - Tina de mostura	10
Figura 8 - Exemplo de rampa de temperatura do processo de mosturação	10
Figura 9 - Tina de filtração ou tina de clarificação de mosto	11
Figura 10 - Bagaço na tina de clarificação de mosto.....	12
Figura 11 - Tanque de armazenagem de bagaço	13
Figura 12 - Exemplo da cinética de secagem: Umidade Crítica e Umidade de Equilíbrio	18
Figura 13- Exemplo da cinética de secagem: Taxa de Secagem x Umidade	21
Figura 14 - Secador de tambor rotativo	23
Figura 15 - Secador flash.....	24
Figura 16 - Secador de esteiras.....	25
Figura 17 - Secador de leito fluidizado	26
Figura 18 - Secador de bandejas.....	27
Figura 19 - Secador solar.....	28
Figura 20 - Gráfico matriz energética mundial	30
Figura 21 - Pirólise de resíduos agroindustriais	32
Figura 22 - Gaseificação e suas fases	35
Figura 23 - Gaseificadores de Leito Fixo	39
Figura 24 - Gaseificadores de Leito Fluidizado	42
Figura 25 - Reator gaseificador	49
Figura 26 - Caçamba com rosca alimentadora	50
Figura 27 - Válvulas guilhotina e câmara de pressão	51
Figura 28 - Tubulação de saída do gás de síntese para.....	51
Figura 29 - Lavador de gases - Scrubber	52
Figura 30 - Reposição de água e.....	53
Figura 31 - Câmara de Combustão	53
Figura 32 - Ventilador de ar da câmara de combustão.....	54

Figura 33 - Compressor de ar e trocador de calor	54
Figura 34 - Chaminé do sistema para monitoramento.....	55
Figura 35 - Sonda para	55
Figura 36 - Equipamento de	56
Figura 37 - Analisador de gases in line	56
Figura 38 - Sistema supervisório	57
Figura 39 - Gráficos de processo	57
Figura 40 - Tela de monitoramento espelhada instalada na chaminé.....	58
Figura 41 – Detalhe da tela de monitoramento espelhada.....	58
Figura 42 - Bagaço de malte coletado no silo de resíduos	60
Figura 43 - Bagaço de malte espalhado para o processo de secagem natural	60
Figura 44 - Estufa de secagem (esquerda) e dessecador (direita).....	61
Figura 45 - Acondicionamento do bagaço de malte em sacos de rafia	63
Figura 46 - Bagaço de malte acondicionado em saco	63
Figura 47 - Casa de cinzas.....	64
Figura 48 - Caminhão carregado com o bagaço de malte	64
Figura 49 - Bomba calorimétrica IKA C-200 e.....	66
Figura 50 - Analisador Termogravimétrico TGA-2000 A	68
Figura 51 - Bagaço de malte seco triturado (a) e cinzas (b)	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do bagaço de malte. Valores em g/100g (p/p%).....	14
Tabela 2 - Exemplos de materiais e suas características analíticas (base seca)	15
Tabela 3 - Processos termoquímicos e seus produtos primários	29
Tabela 4 - Fornecimento total de energia primária global. Valores em EJ (Exajoule) onde 1 EJ = 1×10^{18} Joules.....	44
Tabela 5 - Participação das energias renováveis na OIE.....	45
Tabela 6 - Resultados da avaliação de umidade do bagaço de malte revolvido.....	62
Tabela 7 - Resultados das mostras durante o processo de secagem natural	62
Tabela 8 - Resultados analíticos do bagaço de malte	65
Tabela 9 - Resultados analíticos da serragem.....	66
Tabela 10 - Resultados analíticos do pó de malte (PCI e PCS).....	67
Tabela 11 - Resultados analíticos das biomassas (PCI e PCS)	67
Tabela 12 - Resultados termogravimétricos do bagaço de malte	68
Tabela 13 - Resultados termogravimétricos pó de malte	69

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CH₄ - Metano

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

CO₂ - Dióxido de carbono

CO - Monóxido de carbono

g/Nm³ - Gramas por normal metro cúbico

GJ/dia - Gigajoule por dia

H₂ - Hidrogênio

H₂O - Água

kcal/kg - Quilo calorias por quilo

kg - Quilogramas

kJ/kg - Quilojoule por quilograma

NBR - Norma Brasileira

n.d. - Não determinado

NO - Monóxido de nitrogênio

NO₂ - Dióxido de nitrogênio

N₂ - Nitrogênio

m/s - Metros por segundo

mg/kg - Miligramas por quilograma

MJ/kg - Megajoule por quilograma

mm - Milímetros

PCI - Poder Calorífico Inferior

PCS - Poder Calorífico Superior

pH - Potencial hidrogeniônico

SISNAMA - Sistema Nacional do Meio Ambiente

TIR - Taxa Interna de Retorno

ton/dia - Tonelada por dia

VPL - Valor Presente Líquido

% - Por cento

°C - Grau Celsius

Σ - Somatório

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS E JUSTICATIVAS	4
2.1	Objetivo Geral	4
2.2	Objetivos específicos	4
2.3	Justificativas	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1	Considerações sobre o processo cervejeiro.....	5
3.2	Processo de produção de malte na maltaria	5
3.3	Processo de produção de cerveja	7
3.4	Composição do bagaço de cevada malteada	13
3.5	Poder calorífico	14
3.6	Cogeração de energia a partir da biomassa	16
3.7	Umidade	16
3.7.1	Base Seca (X) e Base Úmida (X_{bu}).....	17
3.7.2	Umidade Crítica (X_c) e Umidade de Equilíbrio (X_e)	17
3.7.3	Disponibilidade energética da água	19
3.8	Tecnologias de secagem	19
3.8.1	Fundamentos do Processo de Secagem	20
3.8.2	Taxa de Secagem (R).....	20
3.8.3	Tipos de secadores.....	22
3.8.3.1	Secadores Rotativos (Tambor)	22
3.8.3.2	Secadores Pneumáticos (Flash).....	23
3.8.3.3	Secadores de esteiras (Túnel).....	24
3.8.3.4	Secadores de Leito Fluidizado	25
3.8.3.5	Secadores de Bandejas ou Estufas.....	26
3.8.3.6	Secadores Solares	27
3.8.3.7	Comparativo entre tecnologias	28
3.9	Processos Termoquímicos	29
3.9.1	Combustão	29

3.9.2	Liquefação.....	31
3.9.3	Pirólise.....	31
3.9.4	Gaseificação	33
3.10	Gases de síntese.....	37
3.11	Reatores de gaseificação de leito fixo.....	39
3.11.1	Gaseificadores de fluxo ascendente	39
3.11.2	Gaseificadores de fluxo descendente	40
3.11.3	Gaseificadores de fluxo cruzado	41
3.12	Reatores de gaseificação de leito fluidizado	41
3.13	Análises de viabilidade.....	43
3.14	Energias renováveis.....	44
3.15	Economia circular	46
4	METODOLOGIA	49
4.1	Planta piloto de gaseificação com leito fluidizado.....	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1	Biomassas.....	59
5.2	Bagaço de malte.....	60
5.3	Caracterização das biomassas	65
6	CONCLUSÕES	73
6.1	Integração do Sistema de Secagem e Circuito Térmico	73
6.2	Viabilidade financeira (Gaseificação x Modelo atual).....	73
6.3	Sugestões para trabalhos futuros	74
7	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

A busca por alternativas sustentáveis e inovadoras para os resíduos industriais é uma questão importante e as grandes empresas geradoras e as recicladoras desses resíduos têm, em conjunto, a tarefa de tratar e destinar corretamente esses materiais.

Quando se fala em cerveja tem-se uma gama de informações históricas e técnicas devido esta ser uma das bebidas mais produzidas e consumidas no mundo. A matéria-prima de maior volume, presente na composição dessa bebida, é denominada malte de cevada ou cevada malteada sendo material primordial para se obter as características fundamentais durante a produção. O processamento desta matéria prima utilizada para produção gera, por sua vez, uma quantidade considerável de resíduos conhecidos como pó de malte e bagaço de malte.

O pó de malte é um material orgânico proveniente do processo de beneficiamento e limpeza do malte para o início da etapa de mosturação que é a conversão do amido em açúcares, e o bagaço de malte é um material orgânico proveniente da etapa de filtração do mosto cervejeiro, subsequente a etapa de mosturação, correspondendo a uma parcela significativa de todos os resíduos gerados no processo. Tais resíduos são destinados em sua totalidade para utilização como ingrediente de elaboração de ração animal pelas empresas cervejeiras e recicladoras. Apesar das vantagens nutricionais contidas nos mesmos, seu uso pode apresentar problemas relacionados a dificuldade de armazenamento correto e ao alto teor de umidade. A contaminação destes materiais por microrganismos também é um problema real que pode trazer doenças como intoxicação por fungos e micotoxinas, acidose ruminal e botulismo.

Devido a riscos biológicos e a possibilidade de se transformar tais resíduos em outros produtos com um maior valor agregado, existe uma forma de se transformar esses resíduos em produtos alternativos.

O tratamento térmico, por exemplo, é uma opção via um processo conhecido como gaseificação que tem como seu produto final a obtenção de um gás de síntese. Tal técnica de tratamento de materiais orgânicos ou carboníferos é um processo que teve a sua origem nas últimas décadas do século XVII, na Inglaterra, (Silva; Batista; Nitta, 2017) onde foi percebido que poderia se produzir gás por meio do aquecimento de combustível em uma atmosfera isenta de oxigênio. Em síntese o processo de gaseificação clássico surgiu em meados de 1780 como opção para a obtenção de gás combustível no desenvolvimento do processo de preparação de carvão em coque para as siderúrgicas. Porém, no século passado, o desenvolvimento do

mercado de combustíveis derivados de materiais fósseis como o petróleo e seu tratamento para a obtenção de gasolina, querosene, diesel, que são economicamente mais viáveis, tornou os gaseificadores e seu processo algo não tão atrativo para as indústrias.

Entretanto, a alta demanda de energia, aliada ao aumento do custo e ao iminente esgotamento do petróleo, evidencia a necessidade de buscar novas fontes de energia renováveis e de desenvolver tecnologias para a transformação energética. Além das questões de consumo uma nova variável foi adicionada a essa necessidade que é a questão ambiental, colocando o estudo da gaseificação de uma forma atualizada, como uma opção energética, utilizando diferentes tipos de biomassa como fonte de combustível, com o intuito de manter um ciclo de carbono fechado. Esse novo estudo da gaseificação se apresenta como um processo termoquímico que converte materiais ricos em carbono, como carvão, biomassa ou resíduos, em um gás combustível.

O processo acontece pela obtenção de uma mistura de gases que ocorre por oxidação parcial em elevadas temperaturas e seu resultado é uma mistura gasosa denominada gás de síntese ou como é conhecida no jargão industrial *syngas*, que é o acrônimo de *synthesis gas* (Silva; Batista; Nitta, 2017). A utilização deste gás, por sua vez, pode fornecer como produto final energia ou trabalho sendo mais eficiente do que a queima direta da biomassa quando aplicada em ciclos combinados com uso de turbinas a gás e geradores de vapor em plantas de cogeração. Os Combustíveis gasosos gerados por esse processo apresentam diversas vantagens em relação aos sólidos, tais como melhor distribuições, controle de combustão eficiente, maior rendimento e menor necessidade de espaço para armazenamento.

A utilização da biomassa como matéria-prima na gaseificação é vantajosa, visto que este processo não agrava o efeito estufa, uma vez que a quantidade de gás carbônico gerada no processo é quantitativamente equivalente à absorvida em um ciclo fechado de carbono. Porém, ainda existem oportunidades de melhoria da tecnologia de gaseificação, principalmente na obtenção de uma melhor eficiência do processo e redução dos resíduos finais gerados em conjunto com uma variedade de matérias primas de baixo custo que permitem a geração de gás de síntese como, por exemplo, o bagaço.

O Brasil apresenta um grande potencial para o desenvolvimento de processos de gaseificação utilizando biomassa proveniente de resíduos gerados pelas indústrias que, além de ser uma tecnologia extremamente viável, ainda traz consigo as vantagens oriundas de questões

ambientais como foco. Dessa forma, o bagaço de malte pode ser utilizado como fonte de combustível para a geração de energia e essa ser aplicada nos processos industriais e sua utilização pode trazer uma redução no custo energético das empresas mostrando ser uma alternativa sustentável e econômica.

Este projeto tem como principal finalidade avaliar as formas de viabilizar-se a reutilização do pó de malte e do bagaço de malte como matérias-primas alternativas para produção de energia buscando interesse comercial e redução de custos operacionais atuais. Esses resultados também estão alinhados à importância do tratamento dos resíduos sólidos gerados pela indústria com foco no aproveitamento da capacidade energética do pó de malte e do bagaço de malte e sua alta disponibilidade podendo ser grandes contribuintes para a economia circular e geração de energia renovável.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a utilização do pó de malte e do bagaço de malte cervejeiro, que são comercializados amplamente somente como fonte de alimentação animal, para empregá-los como matérias-primas em um processo de conversão pela técnica de gaseificação sendo, esse gás obtido, utilizado na aplicação em processos como fonte combustível para geração de energia.

2.2 Objetivos específicos

- Utilização do pó de malte e do bagaço de malte em uma planta piloto de tratamento térmico por meio da tecnologia de gaseificação;
- Caracterização dos resíduos utilizados para obtenção de gás de síntese,
- Estudo do gás de síntese gerado na gaseificação dos resíduos propostos para geração de vapor;
- Monitoramento das emissões atmosféricas provenientes do tratamento térmico de resíduos.

2.3 Justificativas

O estudo justifica-se pelo fato de que o modelo atual de destinação do bagaço de malte limita-se predominantemente ao uso como ração animal. Esse cenário impõe gargalos operacionais e ambientais, como a rápida decomposição da biomassa, a emissão de gases odoríferos e o armazenamento complexo devido ao elevado teor de umidade. Nesse contexto, o tratamento térmico surge como uma rota viável de valorização energética desse resíduo. Além de mitigar os problemas de deterioração, essa alternativa possibilita a substituição de combustíveis fósseis no próprio processo produtivo, promovendo a economia circular, a sustentabilidade da planta cervejeira e a redução dos custos operacionais

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

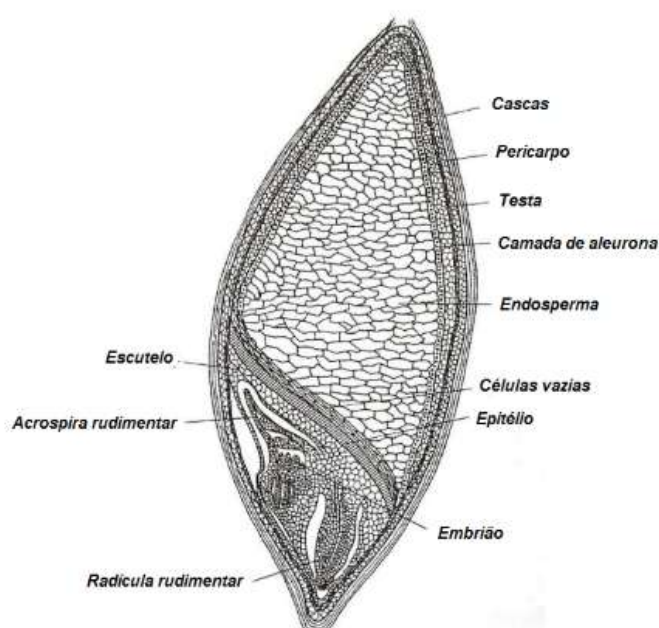
3.1 Considerações sobre o processo cervejeiro

Atualmente, o processo de fabricação nas indústrias cervejeiras segue etapas bastante padronizadas, empregando como matérias-primas fundamentais a água, o malte, o lúpulo e as leveduras. Adicionalmente, podem ser utilizados adjuntos cervejeiros com o propósito de conferir atributos sensoriais ou físico-químicos específicos ao produto final. Contudo, a incorporação desses insumos exige a observância rigorosa das diretrizes de estilo de cada cerveja, garantindo a conformidade e a qualidade do produto obtido.

3.2 Processo de produção de malte na maltaria

As variedades de cevada, quanto à produtividade, podem ser de duas ou seis fileiras que se distinguem, basicamente, pelo tamanho dos grãos e consequentemente a quantidade de substrato deles pois os ramos com menos grãos (duas fileiras) permitem um crescimento mais homogêneo destes devido ao espaço ser maior entre eles nas espigas das plantas o que é mais restrito para as plantas com mais grãos em suas espigas (seis fileiras). A Figura 1 apresenta o exemplo de um grão de cevada.

Figura 1 - Grão de cevada



Fonte: Adaptado de Kunze (2014)

O processo para a produção de cerveja na cervejaria é basicamente igual para qualquer tipo de produto englobando os variados estilos de cerveja pois, para todos os casos, a matéria-prima utilizada em maior quantidade é a cevada malteada processada em indústrias específicas chamadas maltarias e as técnicas utilizadas seguem um padrão pré-determinado. Existem outros grãos que também podem ser malteados para utilização no processo cervejeiro, como por exemplo o trigo, porém a maior parcela utilizada ainda é proveniente dos grãos de cevada.

Como ilustra a Figura 2, os grãos de cevada passam por um processo de malteação antes de serem processados na cervejaria. A malteação é conduzida sob condições controladas que simulam o ambiente natural, promovendo transformações físico-químicas que convertem a cevada *in natura* em cevada malteada, tornando-a apta para a fabricação de cerveja.

Figura 2 - Plantação de cevada cervejeira BRS Quanranta



Fonte: Portal Embrapa (2019)

Tais transformações acontecem devido a exposição dos grãos a tempos de umidificação, injeção de ar e revolvimento que são efetuados nos equipamentos da maltaria simulando condições presentes na natureza que possibilitam que os grãos de cevada tenham a tendência de iniciar a cadeia germinativa para o nascimento de novas plantas a partir de cada grão demonstrados nas Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de equipamento de malteação



Fonte: Malteria Oriental S. A. (2026)

Essa etapa é cessada quando as análises laboratoriais demonstram que o grão já passou pelos efeitos enzimáticos necessários de modificação para utilização e então, nesse momento, esses grãos já modificados passam por uma etapa de secagem e torra as quais irão finalizar as transformações enzimáticas e caracterizar os tipos de malte conforme intensidade de cores, aromas e sabores obtidos ao final da torrefação. Esses grãos prontos então são enviados para silos de estocagem na maltaria e posteriormente transportados para a cervejaria onde também ficarão estocados em silos aguardando sua utilização no processo de produção da cerveja.

3.3 Processo de produção de cerveja

O processo produtivo de cada estilo de cerveja exige uma combinação específica de grãos com características singulares, responsáveis por conferir ao produto final os atributos físico-químicos e sensoriais desejados.

A produção de uma batelada inicia-se com o transporte do malte, armazenado nos silos da cervejaria (Figura 4), por meio de correias transportadoras até o sistema de beneficiamento. Nessa etapa, as impurezas são segregadas por diferença de massa específica com o auxílio de peneiras vibratórias.

Figura 4 - Silos de armazenamento e malte



Fonte: Zeppelin Systems Latin America (2026)

Todo pó gerado no sistema é aspirado por aspiradores e ciclones que transportam esse particulado para os filtros de manga que retêm esse material e, por insuflação com utilização de ar direto nas mangas dos filtros, esse pó é expelido para um sistema de extração chamado de eclusa e direcionado ao silo de pó como resíduo (Figura 5).

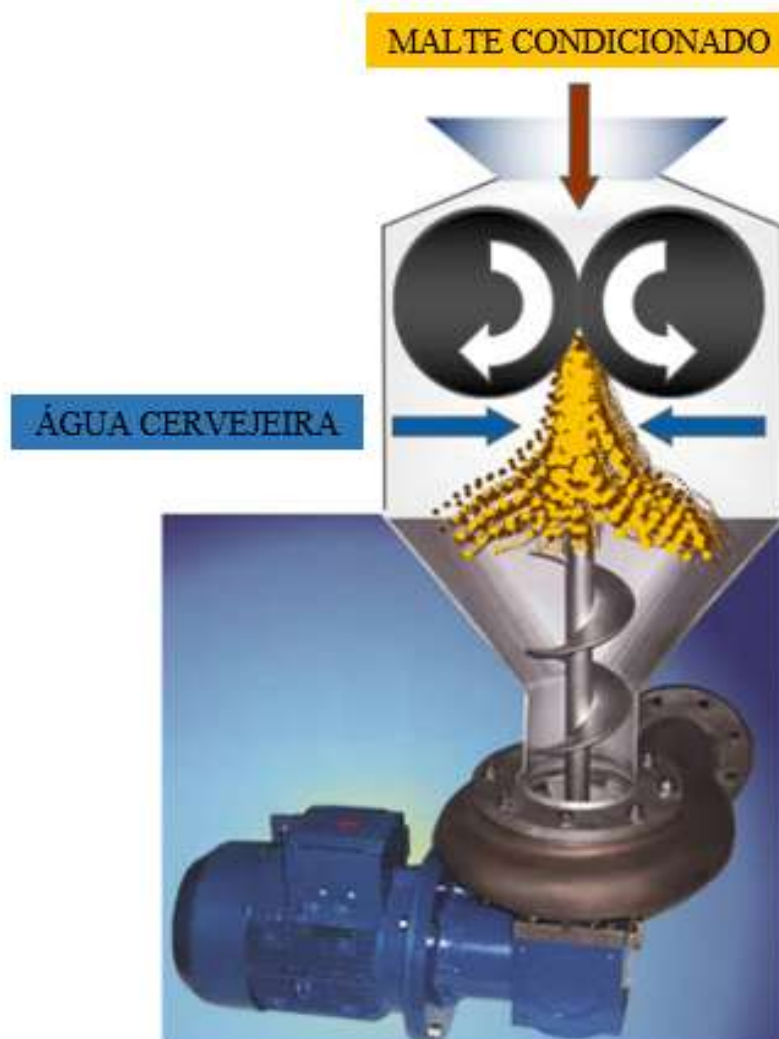
Figura 5 - Exemplo de sistema de limpeza do malte e aspiração do pó



Fonte: Zeppelin Systems Latin America (2026)

O malte limpo segue para as balanças e posteriormente para os moinhos de rolos, que pode ter ou não um sistema umidificador, o qual injeta água quente parcialmente aos grãos antes dos mesmos serem prensados pelos rolos dos moinhos garantindo assim uma maior eficiência e preservação das cascas dos grãos juntamente com a exposição do amido do malte conforme a Figura 6.

Figura 6 - Moinho de rolos com sistema umidificador



Fonte: Adaptado de Steinecker - Variomill and Powermill (2025)

Essa etapa é contínua, sendo assim a mistura de malte e água é simultaneamente moída e bombeada para um equipamento chamado tina de mostura apresentado na Figura 7, mantendo uma temperatura compatível específica com a água adicionada na moagem, garantindo que o procedimento ocorra de forma controlada e que ações enzimáticas de conversão já se iniciem. Além da temperatura outros fatores são primordiais para esse processo (pH por exemplo) e são controlados minuciosamente garantindo a qualidade. Esse líquido se chama mostura e é gerado aproximadamente 1,0 quilo de grãos moídos para cada 3,0 litros de água a temperaturas

específicas que variam entre 45,0 °C e 78,0 °C (Kunze, 2014).

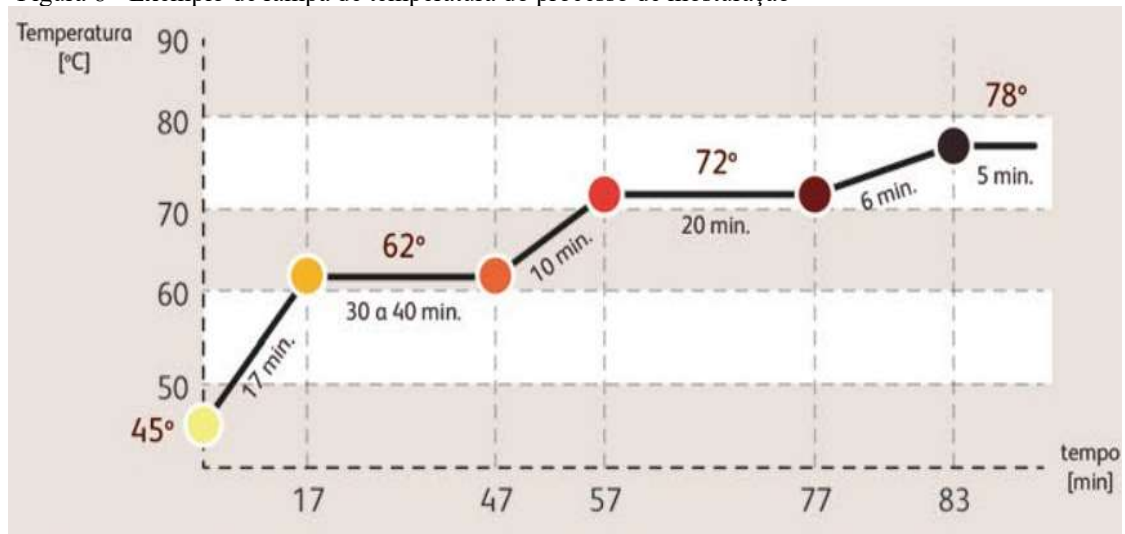
Figura 7 - Tina de mostura



Fonte: Steinecker - ShakesBeer (2025)

Essa mistura passa por uma etapa de aquecimento, na tina de mostura, denominada de mosturação que é composta por rampas de temperaturas e tempos de repouso que variam para cada tipo de cerveja (Figura 8).

Figura 8 - Exemplo de rampa de temperatura do processo de mosturação



Fonte: Adaptado de Agrária Malte (2025)

Essas temperaturas e tempos diferentes fazem com que uma série de enzimas atue nas cadeias de amido do grão de cevada malteada quebrando-as em cadeias de açúcares como

frutose, glicose, maltose, maltotriose e dextrinas. A levedura cervejeira consegue metabolizar os açúcares provenientes desse processo com exceção das dextrinas que são açúcares com cadeias mais complexas. Por fim, a temperatura é elevada por uma última vez nesse equipamento diminuindo a atividade enzimática a quase zero para que o líquido possa ser bombeado para o processo subsequente.

Ao final da mosturação, o mosto é bombeado para o equipamento responsável pela separação das fases sólida e líquida (Figura 9). Embora existam diferentes tecnologias para essa etapa, o método mais tradicional emprega a tina de filtração (ou clarificação). Esse equipamento possui um fundo falso perfurado, posicionado na parte inferior, que atua como um elemento filtrante para retenção dos sólidos.

Figura 9 - Tina de filtração ou tina de clarificação de mosto



Fonte: Steinecker - Pegasus C (2025)

Inicialmente, injeta-se água a cerca de 78,0 °C até preencher a base do equipamento, cobrindo as peneiras em cerca de um centímetro. Em seguida, promove-se a circulação dessa água para o aquecimento prévio da tina e eliminação de bolsões de ar que poderiam comprometer as etapas subsequentes. Interrompida a circulação, a mostura é bombeada tangencialmente ao nível de água, logo acima das peneiras, preenchendo a tina de forma suave. Concluída a transferência e o esvaziamento do digestor de mostura, mantém-se o sistema em repouso por alguns minutos para a sedimentação primária dos grãos. Na sequência, inicia-se a etapa de recirculação: a fase líquida atravessa o leito filtrante formado pelos sólidos retidos nas peneiras e retorna ao topo do equipamento, estabelecendo um sistema em *looping* que promove

a contínua clarificação do mosto pela própria torta de filtração.

Esse procedimento faz com que o a parte sólida que é o bagaço forme um leito filtrante e o líquido passando por esse se clarifique, por isso o nome tina de clarificação. Esse líquido, após apresentar a clarificação necessária, muda de etapa e o sistema muda o escoamento em *looping* para a filtração propriamente dito esvaziando a tina e enviado para a etapa subsequente sem a presença de resíduos de bagaço que ficaram retidos na etapa anterior. Juntamente com essa filtração ocorre o movimento das facas acopladas a braço mecânico, presente no equipamento, e estas realizam cortes na camada de bagaço para que o processo de extração ocorra com mais facilidade. O líquido filtrado então passa a se chamar mosto, que tem um sabor adocicado e maltado, e este é capturado por tubos coletores que o enviam para um tanque intermediário que, serve como reservatório, até que a próxima etapa comece (Reinold, 1997).

Após a extração do mosto o bagaço que permaneceu na tina de filtração ainda possui uma grande parcela residual de açúcares (Figura 10). Sendo assim ocorre uma etapa de aspersão de água sobre esse bagaço à aproximadamente 78 °C para que aconteça a extração do máximo possível desse residual e se obtenha o máximo rendimento na etapa de clarificação. Nessa etapa também ocorre o movimento das facas do equipamento, citado anteriormente, facilitando o escoamento.

Figura 10 - Bagaço na tina de clarificação de mosto

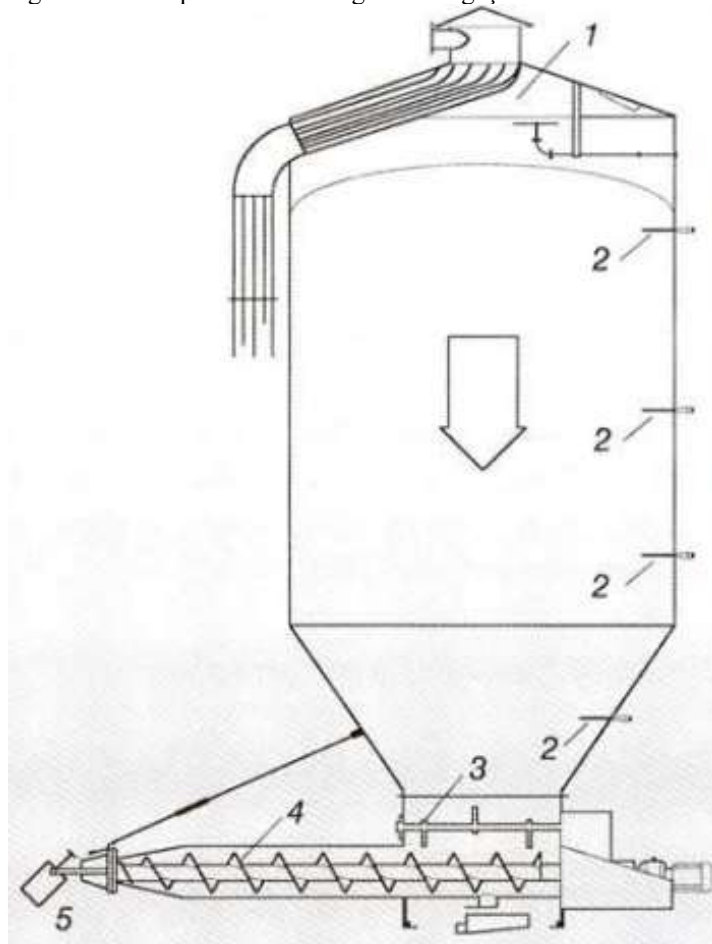


Fonte: Autor - Unidade produtora de cerveja (2025)

Ao final tem-se então, na tina de clarificação, o bagaço úmido já sem presença do mosto seguirá para o processo e retirada. Isso acontece por escotilhas presentes no fundo da tina que se abrem e o bagaço cai diretamente no sistema de descarga que, por efeito de uma bomba com rosca helicoidal e pulsos de ar, realiza o transporte desse resíduo para os tanques armazenadores

onde o bagaço aguardará seu carregamento em caminhões que farão o transporte para seu destino como ração animal (Figura 11). Na descarga do bagaço, cerca de 100 a 130 kg de resíduo contendo 70 a 80% de água são obtidos a partir de 100 kg de malte de cevada equivalendo a 21 a 22 kg de bagaço/hl de cerveja (Kunze, 2014).

Figura 11 - Tanque de armazenagem de bagaço



Fonte: Kunze (2014) 1 - Entrada de bagaço, 2 - Indicadores de volume, 3 - Sistema anti-formação de pontes (bloqueio de escoamento), 4 - Rosca helicoidal, 5 - Descarga de resíduos (bagaço)

3.4 Composição do bagaço de cevada malteada

O resíduo de cervejaria conhecido como bagaço de malte é o principal subproduto da indústria cervejeira, representando cerca de 85% do total de subprodutos gerados. Esse resíduo é um material lignocelulósico que contém cerca de 17% de celulose, 28% de polissacarídeos não celulósicos (principalmente arabinoxilanos), e 28% de lignina (Musatto; Dragone; Roberto, 2006). Essa biomassa está disponível em grandes quantidades ao longo do ano, mas sua principal aplicação tem sido limitada à alimentação animal. O bagaço de malte é composto

ainda por alguns outros itens, como pode ser observado na Tabela 1, e constituído também de uma parcela significativa de proteínas e um baixo percentual de lipídeos e cinzas, sendo considerado um subproduto industrial com baixo valor agregado (Reinold, 1997; Mussatto *et al.*, 2008).

Tabela 1 - Composição química do bagaço de malte. Valores em g/100g (p/p%).

Composição	Avaliação por autor			
	Kanauchi <i>et al.</i> 2001	Cavalheiro <i>et al.</i> 2004	Mussatto <i>et al.</i> 2006	Celus <i>et al.</i> 2006
Hemicelulose	21,8	29,6	28,4	22,5
Celulose	25,4	21,9	16,8	0,3
Amido	n.d.	n.d.	n.d.	1
Proteína	24	24,6	15,2	26,7
Lignina	11,9	21,7	27,8	n.d.
Lipídeos	10,6	n.d.	n.d.	n.d.
Cinzas	2,4	1,2	4,6	3,3
Fenólicos	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Fonte: Adaptado de Lynch, Steffen e Arendt (2016)

3.5 Poder calorífico

A medida padrão do teor energético de um combustível é o seu poder calorífico que depende da sua composição química, incluindo o teor de umidade, fator limitante da combustão devido à sua entalpia de evaporação. Tal poder calorífico é determinado pela quantidade de calor gerado pela unidade de massa ou de volume de um combustível submetido ao processo de combustão à pressão constante (Pera, 1990). Este pode ser expresso em poder calorífico superior (PCS) ou poder calorífico inferior (PCI), dependendo da forma como a água se encontra no gás gerado, ou seja, se esta água se encontra em estado líquido ou gasoso, respectivamente. Em outras palavras o poder calorífico superior (PCS) de biomassas é a energia libertada numa combustão completa, com a água dos produtos a condensar-se em líquido. Já o poder calorífico inferior (PCI) é a energia libertada quando toda a água resultante da combustão permanece no estado gasoso. O PCI é sempre inferior ao PCS, porque o PCS contabiliza o calor latente de vaporização da água que é libertado quando o vapor de água se condensa em líquido, o que não acontece no PCI. Na Tabela 2 estão relacionadas algumas biomassas e seu poder

calorífico.

Tabela 2 - Exemplos de materiais e suas características analíticas (base seca)

Análises	Parâmetro	Carvão mineral (CC)	Casca de arroz (CA)	Cavaco de eucalipto (CE)	Aparas de Couro (AC)
Análise Elementar (%)	C	33,71	41,01	49,23	44,38
	H	2,01	5,35	6,28	6,77
	O	8,15	32,78	40,17	22,62
	N	0,59	0,29	0,09	16,70
	S	1,45	0,09	n.d.	2,00
Análise Imediata (%)	Carbono fixo	22,34	12,81	12,40	12,62
	Cinza	54,49	20,48	4,23	7,53
	Material Volátil	23,17	66,71	83,37	79,85
	Umidade Higroscópica	4,11	4,31	5,06	17,30
Poder Calorífico Kcal/kg	PCS	3055	3750	4475	4505
	PCI	2950	3475	4150	4155

Fonte: Castro, Fontoura e Souza (2017)

Combustíveis que contenham umidade e hidrogênio, pois nos seus gases de combustão se encontra a água seja ela se apresentando em qualquer estado físico (vapor ou líquido), sofrerão influência no valor do poder calorífico. O PCS é obtido em laboratório, mediante o emprego de aparelho denominado calorímetro ou determinado analiticamente, desde que a composição elementar do combustível e a entalpia de combustão dos elementos ou compostos gasosos sejam conhecidas.

Os resíduos de biomassa apresentam teores de umidade bastante variáveis. As palhas de cereais, por exemplo, exibem baixos valores de umidade (cerca de 14%), enquanto o bagaço de azeitona e outros coprodutos agroindustriais registram níveis entre 40% e 80% (Dias; Azevedo, 2001). Então, como pode-se observar, o parâmetro de maior influência no poder calorífico dos combustíveis é o teor de umidade. A umidade aumenta a energia necessária à pré-ignição e diminui o calor liberado pela combustão (Silva *et al.*, 2001).

3.6 Cogeração de energia a partir da biomassa

A cogeração consiste na produção simultânea de energia térmica e mecânica a partir de uma única fonte primária. A energia mecânica pode ser aplicada diretamente sob a forma de trabalho (como no acionamento de moendas em usinas sucroenergéticas) ou convertida em energia elétrica por meio de um gerador. Por sua vez, a energia térmica é reaproveitada como fonte de calor nos processos industriais ou em instalações de grande porte, a exemplo de hospitais e centros comerciais (Canes, 2005).

O mercado potencial de cogeração é formado pelos segmentos industriais que utilizam grandes quantidades de vapor no processo industrial de acordo com os ramos de atividade conforme exemplos:

- Açúcar e álcool;
- Alimentos e bebidas;
- Papel e celulose;
- Têxtil;
- Químico;
- Petroquímico.

É importante observar que o processo de cogeração é, antes de tudo, uma ação de conservação de energia, uma vez que o rendimento do processo de geração do vapor é elevado a partir da produção combinada, dando-se um melhor aproveitamento ao conteúdo energético do combustível básico (Canes, 2005). Dentro do setor industrial, os segmentos de açúcar e álcool, papel e celulose e alimentos são os que mais utilizam a biomassa, pela grande disponibilidade de coprodutos (bagaço de cana, resíduos e casca de madeira, licor negro) correspondendo a 29% do consumo total de biomassa no país, o setor de alimentos, onde está incluído o setor sucroalcooleiro, utiliza bagaço como maior fonte (Canes, 2005).

3.7 Umidade

A umidade representa a quantidade de água contida em um material em um determinado instante e constitui uma variável fundamental nas operações de secagem. A remoção da umidade ocorre pela transferência simultânea de calor e massa, sendo influenciada pela forma como a água se encontra distribuída no interior do material. Dependendo de sua interação com

a matriz sólida, a água pode ser classificada como livre ou ligada, afetando significativamente a cinética de secagem e a energia necessária para sua remoção.

3.7.1 Base Seca (X) e Base Úmida (X_{bu})

Nos estudos de secagem de sólidos, a caracterização correta do conteúdo de água é o primeiro passo para o entendimento da cinética do processo. Diferentes definições de umidade são empregadas para descrever não apenas a quantidade, mas também a disponibilidade da água presente no material e sua interação com a estrutura sólida (Foust *et al.*, 1982; Tadini *et al.*, 2016). De forma qualitativa, a umidade pode ser expressa em relação à massa total do material ou em relação à massa do componente sólido seco. Existem dois conceitos de engenharia ligados e essas relações os quais podem ser utilizados para cálculos levando-se em conta a umidade em base seca ou base úmida. A umidade em base seca é definida como a razão entre a massa de água (m_{H_2O}) e a massa do sólido seco (m_s) conforme a Equação 1. É a forma preferencial em cálculos de engenharia, pois o denominador permanece constante durante todo o processo de secagem.

$$X = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \quad (1)$$

Conforme destacado por Tadini *et al.* (2016), este valor pode variar teoricamente entre 0 e infinito. Sua unidade é expressa em $kg_{\text{água}} \cdot kg_{\text{sólido_seco}}^{-1}$.

A umidade em base úmida da Equação 2 refere-se à massa de água em relação à massa total do sólido úmido (soma da massa de sólido seco e massa de água).

$$X_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_s + m_{H_2O}} \quad (2)$$

Esta medida é comumente utilizada em transações comerciais e especificações de produtos. Seu valor varia estritamente entre 0 e 1 (ou 0% a 100%) (Tadini *et al.*, 2016). Para facilitar os cálculos de balanço de massa, as seguintes relações de conversão entre bases das Equações 3 e 4 podem ser aplicadas:

$$\text{- De base úmida para seca: } X = \frac{X_{bu}}{1 - X_{bu}} \quad (3)$$

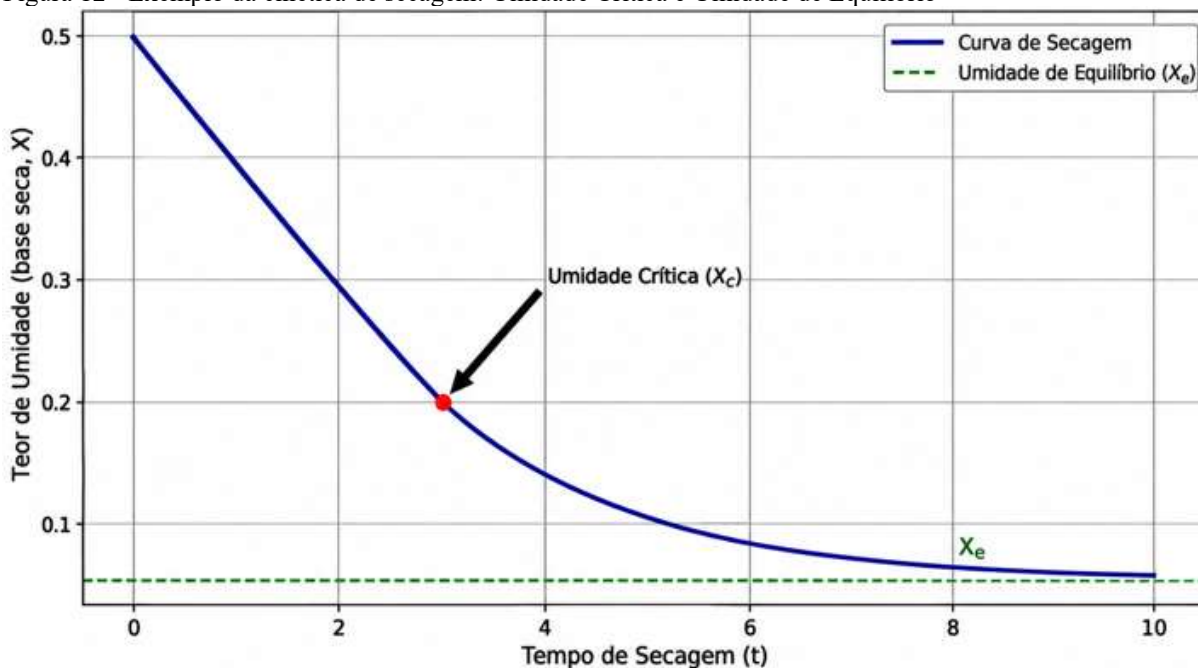
$$\text{- De base seca para úmida: } X_{bu} = \frac{X}{1 + X} \quad (4)$$

3.7.2 Umidade Crítica (X_c) e Umidade de Equilíbrio (X_e)

A secagem de materiais biológicos, como grãos e biomassa, é caracterizada por

diferentes fases que dependem da quantidade de água presente no material. Dois conceitos fundamentais para a compreensão da cinética de secagem, apresentados na Figura 12, são a Umidade Crítica (X_c) e a Umidade de Equilíbrio (X_e) (Geankoplis, 2003).

Figura 12 - Exemplo da cinética de secagem: Umidade Crítica e Umidade de Equilíbrio



Fonte: Autor (2026)

A Umidade Crítica representa o teor de umidade do material a partir do qual a taxa de secagem deixa de ser constante e começa a diminuir. Durante o período de taxa constante, a superfície do material está saturada de água, e a taxa de evaporação é controlada principalmente pela taxa de transferência de massa do vapor de água da superfície para o ar de secagem. A partir da umidade crítica, a superfície do material começa a secar, e a taxa de secagem passa a ser controlada pela difusão interna da água do interior para a superfície do material, tornando-se um processo mais lento (Perry; Green; Maloney, 1997).

A Umidade de Equilíbrio é descrita como o teor de umidade que o material atinge quando está em equilíbrio higroscópico com o ar de secagem, ou seja, quando não há mais troca líquida de água entre o material e o ambiente. Neste ponto, a pressão de vapor da água no material é igual à pressão parcial de vapor de água no ar circundante. A umidade de equilíbrio é um parâmetro crucial para determinar o ponto final da secagem, garantindo que o produto possa ser armazenado com segurança sem risco de deterioração por umidade excessiva ou ressecamento excessivo (Garcia *et al.*, 2004). Vê-se que o teor de umidade descreve uma reta decrescente sendo a umidade crítica o ponto exato onde inicia-se a redução da intensidade da secagem que se estende até o ponto da umidade de equilíbrio onde esse teor atinge valores próximos de zero.

3.7.3 Disponibilidade energética da água

A classificação da água quanto à sua disponibilidade energética é fundamental para prever a dificuldade de remoção, sendo assim temos três fatores distintos:

- Umidade Ligada: Água retida física ou quimicamente que exerce uma pressão de vapor menor do que a da água pura à mesma temperatura.
- Umidade Não Ligada: Água que exerce pressão de vapor igual à da água pura. É a água “mais fácil” de remover.
- Umidade Livre: Representa a água que excede o teor de equilíbrio com o ar ambiente. É a quantidade de água que pode ser efetivamente removida sob as condições dadas.

O entendimento das definições de umidade permite determinar não apenas quanto tempo certo material levará para secar, mas também qual o limite máximo de secagem possível para uma determinada condição operacional. A distinção entre água ligada e livre é crucial para o controle de qualidade, pois influencia diretamente à estabilidade microbiológica e química do produto (Foust *et al.*, 1982; Tadini *et al.*, 2016).

3.8 Tecnologias de secagem

A secagem de produtos perecíveis visa à conservação de matérias-primas por meio da redução da atividade de água. Essa redução é vital para inibir o desenvolvimento de microrganismos, como fungos, e prevenir a produção de micotoxinas, além de minimizar as reações enzimáticas que levam à degradação do produto durante o armazenamento prolongado (Silva, 2000). Sendo a secagem uma das operações unitárias mais críticas e fundamentais na etapa de pós-colheita de produtos agrícolas, esta desempenha um papel essencial na preservação da qualidade de grãos e na viabilização do aproveitamento de subprodutos agroindustriais.

Essa técnica não se limita apenas aos grãos (como soja, milho, arroz e café), mas estende-se ao processamento de biomassa e resíduos, a exemplo do bagaço de cana-de-açúcar e de frutas. A secagem desses subprodutos permite a sua utilização eficiente como fonte de energia (biomassa combustível), ração animal ou matéria-prima para a extração de compostos de alto valor agregado. Para atender a essa diversidade de materiais e demandas de produção, diversas tecnologias de secagem foram desenvolvidas e aprimoradas ao longo dos anos, cada uma apresentando características operacionais específicas que as tornam mais adequadas para determinados tipos de produtos e escalas de processamento (Elias, 2002).

3.8.1 Fundamentos do Processo de Secagem

A operação de secagem envolve fenômenos simultâneos de transferência de calor e de massa. O calor é transferido do ambiente (geralmente ar aquecido) para o produto, fornecendo a energia necessária para a vaporização da água. Simultaneamente, a água migra do interior do produto para a sua superfície e, em seguida, é transferida para o ar de secagem na forma de vapor. A eficiência dessa etapa depende de fatores intrínsecos ao material, como sua estrutura celular e composição química, e de fatores extrínsecos, como a temperatura, a umidade relativa e a velocidade do ar de secagem (Brooker; Bakker-Arkem; Hall, 1992).

Um conceito central na secagem de produtos biológicos é o equilíbrio higroscópico, então todo material biológico tende a entrar em equilíbrio com as condições do ar ambiente. Quando a pressão de vapor da água no interior do produto é maior que a pressão de vapor no ar circundante, ocorre a dessorção (secagem). O conhecimento das isotermas de sorção de cada produto é, portanto, indispensável para o dimensionamento correto dos secadores e para a determinação do ponto final da secagem, garantindo que o produto atinja a umidade segura para armazenamento sem sofrer danos térmicos (Garcia, 2004).

3.8.2 Taxa de Secagem (R)

Taxa de secagem, apresentada na Equação 5, representa a velocidade com que a umidade é removida por unidade de área de secagem:

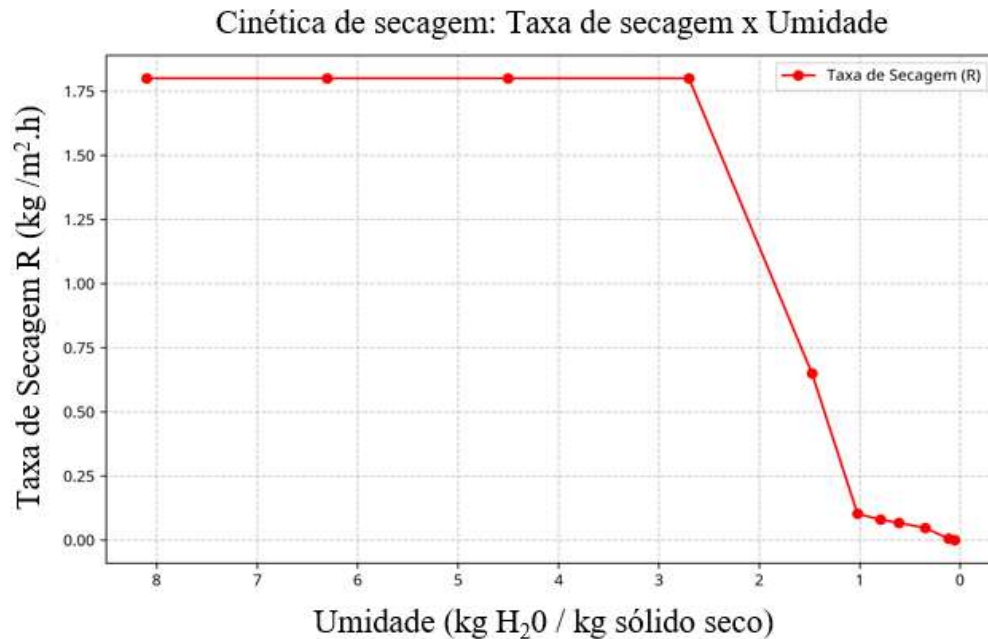
$$R = -\frac{M_s}{A} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (5)$$

Onde:

- R : Taxa de secagem ($kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)
- M_s : Massa de sólido seco (kg)
- A : Área da superfície de secagem (m^2)
- dX/dt : Taxa de secagem em relação ao tempo.

A Figura 13 mostra o comportamento da taxa de secagem em relação à umidade permitindo identificar os diferentes períodos de secagem.

Figura 13- Exemplo da cinética de secagem: Taxa de Secagem x Umidade



Fonte: Autor (2026)

Existem ainda períodos característicos que determinam as interações e, de acordo com Foust *et al.* (1982) e Tadini *et al.* (2016), a operação de secagem pode ser dividida em estágios:

- Período de Indução: Aquecimento inicial do sólido até atingir o equilíbrio térmico com o ar;
- Período de Taxa Constante: A superfície do sólido está saturada de água líquida. A taxa de evaporação é controlada pela transferência de calor e massa na interface ar-sólido;
- Ponto Crítico: Momento em que a umidade na superfície não é mais suficiente para manter a taxa constante;
- Período de Taxa Decrescente: O movimento da umidade do interior para a superfície torna-se o fator limitante.

Considerando que o período de taxa constante está relacionado ao mecanismo pelo qual a umidade se desloca das regiões internas até à superfície do sólido, os materiais podem ser classificados de acordo com o seu comportamento na operação de secagem. Os sólidos granulados ou cristalinos mantêm a umidade nos espaços entre as partículas ou em poros superficiais abertos. Dessa forma, o transporte da umidade ocorre com relativa facilidade, sendo provocado principalmente pela ação da tensão superficial, por meio do mecanismo de capilaridade. Portanto, para estes materiais o período de taxa constante da curva de secagem é

prolongado até teores de umidade mais baixos (Foust *et al.*, 1982).

Os sólidos orgânicos, em sua maioria amorfos, fibrosos ou gelatinosos, armazenam a umidade como parte integrante de sua estrutura ou no interior de fibras e poros. Dessa maneira, o deslocamento da umidade ocorre de forma mais lenta, acontecendo pela difusão do líquido através da estrutura sólida (mecanismo difusivo), o que resulta em curvas de secagem com períodos de taxa constante bastante reduzidos. Além disto, estes materiais têm sua estrutura afetada pela remoção da umidade. (Foust *et al.*, 1982).

É importante destacar que as características das curvas de secagem podem sofrer alterações conforme o tipo de material submetido à etapa, das condições operacionais de secagem (temperatura, umidade relativa e velocidade do ar) e da técnica empregada, como secagem natural, em leito fluidizado ou por atomização. A avaliação e compreensão das curvas de secagem de sólidos são fundamentais para a otimização dos processos industriais, assegurando uniformidade na qualidade do produto e reduzindo custos operacionais relacionados ao consumo de energia e ao tempo de processamento.

3.8.3 Tipos de secadores

A seleção da tecnologia de secagem mais apropriada é fundamental tanto para a eficiência energética do processo quanto para a preservação da qualidade do produto final. Embora o conceito de secagem pareça bastante limitado, ele engloba diferentes técnicas e estas apresentam características distintas umas das outras. Há vários métodos de secagem e tipos de secadores, podendo ser classificadas como naturais ou artificiais, ou ainda, quanto a forma de fornecimento de calor: convecção, condução e radiação (Tadini *et al.*, 2016).

A transferência de calor por convecção, ocorre quando o ar aquecido e seco flui sobre a superfície do material úmido, fazendo com que este seja aquecido e a umidade evapore (Mujumdar, 2014; Tadini *et al.*, 2016). No caso da secagem por condução o efeito acontece pelo contato do material úmido a uma superfície quente e assim a transferência de calor se dá por um gradiente de temperaturas entre uma região mais quente e uma região mais fria do material a ser seco, sendo a umidade removida gradualmente à medida que o calor se transfere para o material (Oliveira *et al.*, 2009; Tadini *et al.*, 2016).

A secagem também pode ser realizada por meio de transferência de calor via radiação térmica emitida na faixa do infravermelho do espectro eletromagnético (0,7 – 1000 μm) para promover o aquecimento do material (Oliveira *et al.*, 2009).

3.8.3.1 Secadores Rotativos (Tambor)

Os secadores rotativos, frequentemente referidos como secadores de tambor, são equipamentos robustos amplamente utilizados na indústria para o processamento de grandes volumes de materiais particulados. A Figura 14 mostra esse equipamento que consiste em um cilindro metálico ligeiramente inclinado em relação à horizontal, que gira lentamente em torno de seu eixo longitudinal. O material a ser seco é alimentado na extremidade superior e, devido à rotação e à inclinação do tambor, desloca-se gradativamente em direção à extremidade inferior de descarga (Mujumdar, 2014).

Figura 14 - Secador de tambor rotativo



Fonte: Grelbex Technologies (2026)

Internamente, o tambor é equipado com aletas ou elevadores que erguem o material e o deixam cair em cascata através de uma corrente de ar quente. Essa configuração promove um excelente contato entre o ar de secagem e as partículas, resultando em altas taxas de transferência de calor e massa. Os secadores rotativos são particularmente ideais para materiais com alta umidade inicial e que requerem secagem rápida, sendo a tecnologia de escolha para a secagem de bagaço de cana-de-açúcar e resíduos cítricos. A movimentação contínua evita a aglomeração do material úmido, garantindo um processamento eficiente mesmo em condições severas de operação (Moura, 2014).

3.8.3.2 Secadores Pneumáticos (Flash)

Os secadores pneumáticos, também conhecidos como secadores flash, operam com base no transporte pneumático do material úmido através de tubulações, utilizando uma corrente de ar

quente em alta velocidade. O material é introduzido no fluxo de ar, onde ocorre uma rápida dispersão das partículas. A secagem ocorre de forma quase instantânea (daí o termo flash), à medida que as partículas são transportadas ao longo do duto de secagem até um ciclone separador, conforme Figura 15, onde o produto seco é recuperado (Mujumdar, 2014).

Figura 15 - Secador flash



Fonte: Griffin Machinery (2026)

Esta tecnologia é altamente eficiente para a remoção da umidade superficial de materiais granulares finos, pós e fibras curtas. Devido ao curtíssimo tempo de residência do material no secador (geralmente de alguns segundos), os secadores pneumáticos permitem o uso de ar em temperaturas elevadas sem causar degradação térmica significativa ao produto, uma vez que a temperatura da partícula permanece próxima à temperatura de bulbo úmido do ar durante a evaporação. São sistemas eficientes para a secagem rápida de bagaço finamente particulado e farelos, oferecendo alta capacidade de processamento em instalações compactas (Kosasih, 2025).

3.8.3.3 Secadores de esteiras (Túnel)

Nos secadores de esteira, o material é disposto sobre uma correia perfurada que se desloca por meio de roletes, promovendo o transporte do produto ao longo do equipamento. O

ar aquecido, geralmente a temperaturas específicas, e atravessa o leito do material em velocidades que podem variar dependendo da curva de secagem. O escoamento do ar pode ser ajustado conforme as exigências do processo, operando em fluxo concorrente, contracorrente ou transversal, tanto ascendente quanto descendente em relação à camada de produto. Quando o ar percorre o leito perpendicularmente, a remoção de umidade ocorre de maneira mais eficiente devido ao maior contato entre o ar quente e o alimento (Figura 16).

Figura 16 - Secador de esteiras



Fonte: Nazzareno Recycling Technology (2021)

Esse tipo de secador também possibilita a recirculação do ar de secagem, permitindo que o ar úmido seja reaquecido nos trocadores de calor e reutilizado nas etapas seguintes. O aquecimento do ar pode ser realizado por diferentes fontes de energia, como eletricidade, gás e vapor. Entre as principais vantagens desse equipamento destacam-se a elevada capacidade produtiva em relação ao espaço ocupado e a baixa incidência de danos mecânicos ao produto, embora a uniformidade da secagem possa ser inferior quando comparada à de outros sistemas. Esses modelos de secador podem apresentar uma ou mais esteiras, dependendo da configuração requerida do layout da planta e das necessidades de secagem do produto (Barbosa-Cánovas; Vega-Mercado, 1996; Rokey, 2006).

3.8.3.4 Secadores de Leito Fluidizado

A tecnologia de leito fluidizado representada na Figura 17 é um dos métodos mais eficientes para a secagem de materiais particulados. O princípio de funcionamento baseia-se na

passagem de uma corrente de ar quente, de baixo para cima, através de uma placa distribuidora sobre a qual repousa uma camada do material a ser seco. Quando a velocidade do ar atinge um valor crítico (velocidade de mínima fluidização), as partículas são suspensas e começam a se comportar como um fluido em ebulição, fenômeno conhecido como fluidização (Biagi; Bertol, 2005).

Figura 17 - Secador de leito fluidizado



Fonte: Hitachi Zosen INOVA (2026)

A fluidização garante uma mistura vigorosa das partículas, resultando em taxas excepcionalmente altas de transferência de calor e massa e em uma distribuição de temperatura extremamente uniforme em todo o leito. Essa uniformidade previne o superaquecimento localizado, tornando os secadores de leito fluidizado ideais para a secagem de produtos sensíveis ao calor, como sementes de alto valor agregado, grãos uniformes e fertilizantes. Além disso, a tecnologia oferece alta eficiência energética e permite um controle rigoroso do teor de umidade final do produto (Martins; Franco; Oliveira, 2011).

3.8.3.5 Secadores de Bandejas ou Estufas

Os secadores de bandejas, ou estufas de secagem, operam com o material disposto em camadas finas sobre bandejas perfuradas ou sólidas, alocadas no interior de uma câmara fechada. O ar quente é forçado a escoar sobre ou através das bandejas por meio de ventiladores, promovendo a remoção da umidade. Trata-se de uma etapa em batelada, onde o material permanece estático durante toda a operação conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 - Secador de bandejas



Fonte: Doing Machine CO (2026)

Embora apresentem menor eficiência energética e maior demanda de mão de obra em comparação aos sistemas contínuos, os secadores de bandejas são indispensáveis em menores escalas de produção, em laboratórios de pesquisa e no processamento de produtos de altíssimo valor agregado que requerem manuseio cuidadoso. Eles permitem um controle preciso e flexível das condições de secagem (temperatura e fluxo de ar), sendo frequentemente utilizados para a secagem experimental de amostras de bagaço, ervas medicinais e lotes especiais de sementes (Afonso, 2001).

3.8.3.6 Secadores Solares

A secagem solar é a forma mais antiga de conservação de produtos agrícolas e, com o avanço das tecnologias de captação de energia, evoluiu para sistemas mais eficientes e controlados. Os secadores solares modernos utilizam coletores solares para aquecer o ar antes

que este entre em contato com o produto, que geralmente fica abrigado em uma câmara de secagem, protegido de intempéries, poeira e insetos. A seguir, na Figura 19, vê-se um exemplo desse sistema de secagem.

Figura 19 - Secador solar



Fonte: Coffee & Climate Toolbox (2026)

Esta tecnologia destaca-se como uma solução sustentável e de baixo custo energético, sendo particularmente atrativa para pequenas propriedades rurais e regiões com alta incidência de radiação solar. Embora o tempo de secagem seja superior ao dos métodos artificiais convencionais e dependa das condições climáticas, os secadores solares representam uma alternativa viável e ecologicamente correta para a secagem de grãos, frutas e biomassa fibrosa, reduzindo significativamente a dependência de combustíveis fósseis e a emissão de gases de efeito estufa (Elias, 2002).

3.8.3.7 Comparativo entre tecnologias

A secagem é uma etapa indispensável na cadeia produtiva agrícola e agroindustrial, garantindo a conservação e a valorização de grãos e subprodutos como o bagaço. A seleção da tecnologia de secagem apropriada é uma decisão complexa que deve considerar as características físico-químicas do material, o volume de produção, a disponibilidade de fontes de energia e os requisitos de qualidade do produto. Equipamentos como os secadores rotativos e pneumáticos destacam-se no processamento de grandes volumes e materiais com alta umidade, enquanto os secadores de leito fluidizado oferecem excelência em uniformidade e

eficiência térmica para partículas regulares. Para escalas menores e pesquisas, os secadores de bandejas continuam sendo a escolha padrão. Paralelamente, a secagem solar ressurge como uma alternativa fundamental no contexto da sustentabilidade e da transição energética.

3.9 Processos Termoquímicos

Os processos termoquímicos, listados na Tabela 3, são transformações que envolvem a liberação ou absorção de energia na forma de calor, sendo classificados como exotérmicos (liberam calor) ou endotérmicos (absorvem calor). A termoquímica, seu ramo de estudo, analisa essa troca de energia em reações químicas e mudanças de estado físico, sendo crucial para diversas aplicações industriais e estudos de materiais. Exemplos incluem a combustão, a gaseificação de biomassa, e tratamentos de superfícies metálicas como a nitretação.

Tabela 3 - Processos termoquímicos e seus produtos primários

Processo Termoquímico	Faixa de temperatura °C	Taxa de aquecimento	Pressão	Tempo de residência	Produto primário
Combustão	> 300	Lenta - Rápida	Atmosférica - Elevada	Segundos - Minutos	Calor
Pirólise Lenta	350 - 800	Lenta	Atmosférica	Horas - Dias	Carvão
Torrefação	200 - 300	Lenta	Atmosférica	Minutos - Horas	Biomassa friável estabilizada
Pirólise Rápida	400 - 600	Muito Rápida	Vácuo - Atmosférica	Segundos	Bio-óleo
Pirólise Flash	300 - 800	Rápida	Elevada	Minutos	Biocarbono / Carvão
Gaseificação	700 - 1500	Moderada - Muito Rápida	Atmosférica - Elevada	Segundos - Minutos	Gás de síntese / Gás de produtor

Fonte: Adaptado de Infurna, Caruso e Dintcheva (2023)

3.9.1 Combustão

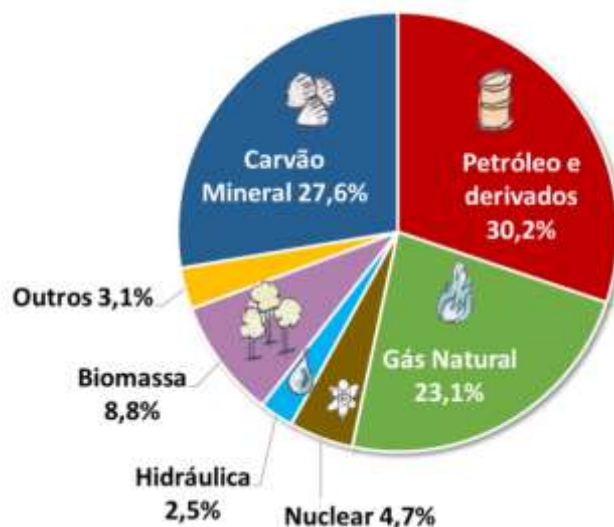
A combustão é uma reação exotérmica, na qual acontece a queima de um combustível, sendo historicamente o processo de mais antigo de geração de energia usado para cozinhar alimentos, fabricar armas e aquecer o ambiente. Esse processo termoquímico envolve uma série de reações entre o carbono e o hidrogênio, presentes no combustível, juntamente com o oxigênio do meio formando CO_2 e H_2O , acompanhada da liberação de energia sob a forma de calor proveniente da reação química presente no processo. A quantidade de calor liberada

durante a combustão completa, quando os produtos retornam à temperatura inicial dos reagentes, é denominada calor de combustão. Em processos conduzidos à pressão constante, essa energia liberada equivale à variação de entalpia (ΔH) da reação.

Existem fatores que influenciam na otimização do processo de queima e esses estão relacionados à composição do combustível e a quantidade de ar presentes na reação. No caso de combustíveis com teores de umidade acima de 20% a combustão pode ser comprometida pois a energia da reação será utilizada para a evaporação da água presente no material. Sendo o material um fator determinante para a qualidade da reação, quando se considera a biomassa e sua queima, quanto maior razão a em relação ao hidrogênio e carbono no combustível melhor será o seu poder calorífico pois outros átomos podem reagir com o O_2 diminuindo a eficiência do processo. Em contrapartida se o fornecimento do ar for muito maior do que sua razão em relação ao combustível, a reação poderá produzir menos calor pois os outros componentes além do oxigênio não passam totalmente inertes.

A reação de combustão é o processo energético mais utilizado no mundo para produção de energia elétrica e o grande percentual da eletricidade mundial é proveniente da queima de combustíveis sendo o gás natural e carvão mineral as principais fontes abastecedoras (Figura 20).

Figura 20 - Gráfico matriz energética mundial



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2022)

O calor liberado na combustão é utilizado em usinas termoeletricas ou para cogeração de energia e em usinas de cana de açúcar sendo um processo pouco eficaz visto que há muita dissipação de energia após a queima. Devido à impossibilidade de armazenamento do calor, que só pode ser utilizado durante a sua produção, outros processos foram estudados para a transformação da energia da biomassa em produtos energéticos.

3.9.2 Liquefação

A liquefação é um processo termoquímico que converte a biomassa em produtos líquidos sob elevadas pressões e temperaturas moderadas (Huber *et al.*, 2006). O mecanismo ideal de liquefação ocorre por meio da clivagem ou ionização dos principais componentes estruturais da biomassa — celulose, hemicelulose e lignina —, originando radicais livres e íons. Essas espécies intermediárias são subsequentemente estabilizadas por reativos como o hidrogênio ou o oxigênio, formando compostos de baixa massa molecular. Em reações conduzidas sob atmosfera redutora, o oxigênio contido na biomassa é removido predominantemente na forma de CO e CO₂, resultando na obtenção de hidrocarbonetos

Esses produtos possuem elevado poder calorífico e podem ser utilizados diretamente como combustíveis ou como matéria-prima na indústria química. Já nos processos oxidativos o oxigênio é incorporado à estrutura da biomassa, originando grupos funcionais polares como hidroxilas, carboxilas e carbonilas. Isso leva à formação de compostos como ácidos carboxílicos (mono e dicarboxílicos) e fenóis simples, que também têm aplicações industriais relevantes. Além dos hidrocarbonetos puros obtidos nos processos redutores a liquefação também pode gerar uma variedade de hidrocarbonetos oxigenados, como fenóis, catecóis e furanos, além de gases leves como o metano e etano, compostos de alta massa molecular como o alcatrão e resíduos sólidos como o coque. Apesar de eficiente, esse método é mais complexo e apresenta um custo de implantação superior ao da pirólise (Braga, 2012).

3.9.3 Pirólise

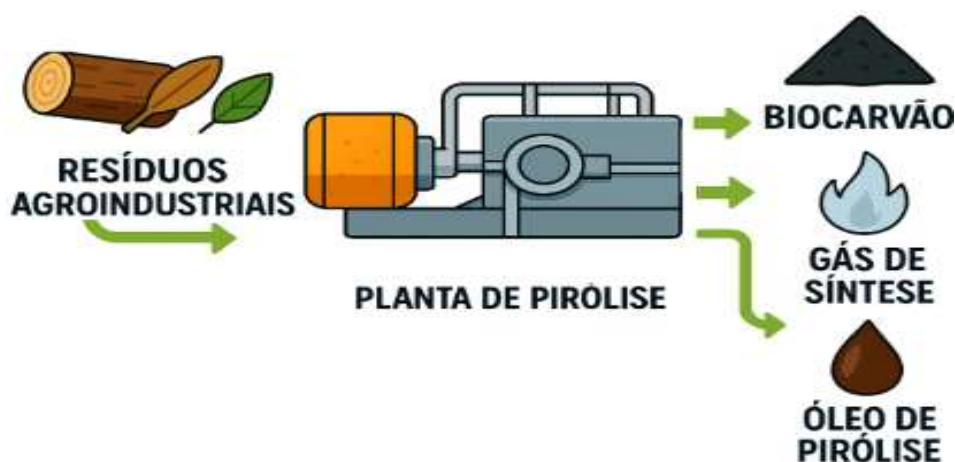
A pirólise é uma etapa termoquímica na qual a biomassa é transformada por meio da quebra de suas ligações químicas, sob temperaturas elevadas (por volta de 500 °C). Essa reação resulta na produção de biocombustíveis, cuja quantidade e tipo variam conforme as condições aplicadas em especial a temperatura, o tempo de reação, a taxa de aquecimento e a composição da biomassa utilizada. De forma geral, temperaturas mais altas e tempos de residência prolongados favorecem a geração de gases.

Por outro lado, temperaturas mais baixas combinadas com tempos de residência longos tendem a produzir mais resíduos sólidos, como o carvão vegetal. Para maximizar a produção de bio-óleo (produto líquido), são utilizadas temperaturas intermediárias e tempos de reação mais curtos. O processo envolve múltiplas reações químicas, além de transferência de calor e massa, resultando numa mistura complexa de produtos.

A natureza da biomassa também influencia significativamente os produtos finais pois

biomassas com alto teor de lignina favorecem a produção de carvão vegetal, com cerca de 50% de rendimento. Já aquelas com maior concentração de celulose e hemicelulose, componentes responsáveis pela liberação de compostos voláteis, tendem a gerar mais bio-óleo. A pirólise pode ocorrer com ausência total de oxigênio ou com uma pequena quantidade dele. Em algumas aplicações, introduz-se ar em proporções inferiores à estequiométrica, o que provoca a combustão parcial de parte da biomassa. O calor gerado por essa combustão ajuda a manter a temperatura constante no reator, permitindo que as reações de pirólise ocorram de forma eficiente.

Figura 21 - Pirólise de resíduos agroindustriais



Fonte: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (2025)

A etapa de pirólise pode ser classificada em dois tipos principais, conforme a velocidade da reação: pirólise lenta (também conhecida como carbonização) e pirólise rápida. Na pirólise rápida utiliza-se uma taxa de aquecimento muito elevada com o objetivo de maximizar a formação de gases e/ou líquidos diferentemente da pirólise lenta, onde o aquecimento ocorre de forma mais gradual. Em ambas modalidades se observa que, quanto maior a temperatura de pirólise, maior a produção de gases enquanto as outras frações (líquida e sólida) tendem a diminuir. Tanto a carbonização quanto a pirólise rápida são reconhecidas como formas típicas da operação de pirólise.

É fundamental compreender que a pirólise é um processo de decomposição térmica, onde se intensificam ligações entre átomos de carbono, originando carbono fixo (produto sólido) e ligações entre carbono e oxigênio resultando em bio-óleo. Esse bio-óleo contém compostos como fenóis, furanos, cetonas, éteres e ácidos carboxílicos em contrapartida os gases gerados (gás de pirólise) são compostos principalmente por dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), vapor d'água (H_2O) e hidrocarbonetos leves.

Os produtos derivados da pirólise, incluindo carvão fino, gases e compostos voláteis como bio-óleo e extratos ácidos, possuem alto poder calorífico e têm sido amplamente utilizados, tanto na indústria química quanto na produção de energia. A Figura 21 demonstra os subprodutos gerados.

A carbonização é considerada a forma convencional ou tradicional (pirólise lenta), enquanto a pirólise rápida é vista como uma tecnologia mais moderna e avançada. Existe ainda a pirólise flash que, por suas características, é classificada como um tipo de gaseificação, e não como pirólise propriamente dita (Cortez *et al.*, 2008). No geral, tempo de residência e temperatura são os dois parâmetros operacionais mais importantes da pirólise, influenciando diretamente tanto o rendimento quanto a distribuição dos produtos gerados.

3.9.4 Gaseificação

A gaseificação é uma tecnologia conhecida desde o século XVIII sendo que em 1839 foi construído o primeiro gaseificador em escala industrial. Durante muitos anos, os gases obtidos a partir da gaseificação de carvão e madeira foram amplamente usados para iluminação pública, principalmente em cidades europeias como Londres, além de servirem como combustível para as indústrias que começavam a se expandir. Somente em 1881 esse gás passou a ser usado em motores de combustão interna.

Com o advento do petróleo barato e abundante, o interesse e os investimentos em gaseificação diminuíram, dando lugar ao uso massivo dos combustíveis fósseis. No entanto, durante a Segunda Guerra Mundial, diante da escassez de petróleo, a gaseificação voltou a ganhar destaque, sendo usada para abastecer mais de um milhão de veículos na Europa. Terminada a guerra, essa tecnologia foi novamente deixada de lado e apenas durante as crises do petróleo nas décadas de 1970 e 1980 que os estudos em fontes alternativas de energia voltaram a ganhar força.

Desde então, a gaseificação da biomassa passou a ser vista como uma solução promissora para a descentralização da geração de energia com potencial para reduzir a dependência de fontes fósseis. A gaseificação é um processo termoquímico que converte materiais ricos em carbono, sólidos ou líquidos, em um gás combustível conhecido como gás de síntese (ou *syngas*).

O agente responsável por essa conversão pode ser ar, vapor d'água, oxigênio, dióxido de carbono ou uma mistura desses. O gás resultante é uma combinação de monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), metano (CH₄), pequenas quantidades de outros hidrocarbonetos leves,

além de CO₂, vapor d'água e nitrogênio (N₂) (Pereira *et al.*, 2012). Além do gás de síntese, o processo também gera alcatrão, cinzas e ácidos pirolenhosos. Dentre esses subprodutos, o alcatrão representa um dos maiores desafios, pois interfere na qualidade do gás e pode comprometer o funcionamento do reator.

A gaseificação é uma oxidação parcial controlada do carbono presente no combustível e isso significa que o oxigênio fornecido ao sistema está em quantidade inferior à necessária para uma combustão completa, o que permite a formação de um gás com componentes altamente combustíveis, como o CO e o H₂. A composição final do gás depende de vários fatores operacionais, como o tamanho das partículas da biomassa, a pressão, a temperatura, o tempo de residência e a taxa de aquecimento (Silva *et al.*, 2004).

Diversas razões práticas justificam a adoção da gaseificação na conversão energética de biomassa, sobretudo em escala local. Essa tecnologia reduz a área e o volume ocupados pelos resíduos, mitigando a dependência de combustíveis importados e fortalecendo a segurança energética. Em diversos cenários, a gaseificação apresenta viabilidade superior à combustão direta da biomassa e ao uso de fontes fósseis. Exemplo dessa vantagem é a geração descentralizada de eletricidade em pequena escala, operacionalizada via motores de combustão interna movidos a gás de síntese, o que dispensa a necessidade de ciclos a vapor intermediários (Silva *et al.*, 2004; Sánchez, 2003).

De acordo com Sánchez (2003), as vantagens da gaseificação são:

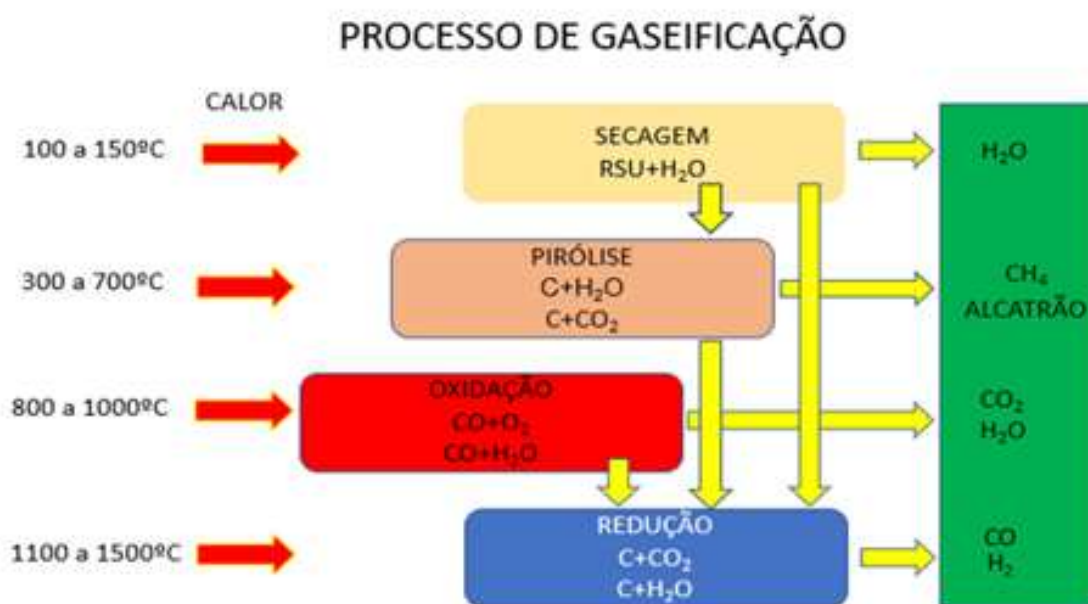
- Alta eficiência térmica, que pode variar entre 60% e 90%, dependendo do tipo de reator utilizado no processo;
- A energia obtida pela queima dos gases gerados é considerada limpa, especialmente quando comparada à queima de combustíveis fósseis;
- Além disso, é possível ajustar a demanda energética conforme necessário, e a velocidade da gaseificação pode ser facilmente acompanhada e controlada.

Existem algumas limitações quanto a matéria-prima usada como combustível pois esta precisa estar livre de impurezas, como terra ou outros resíduos, já que esses contaminantes podem prejudicar o funcionamento da gaseificação. Existe ainda o risco de fusão das cinzas, o que pode afetar negativamente o desempenho do reator e o fato do alcatrão gerado durante o processo que pode restringir as aplicações do gás produzido, caso não seja completamente queimado dentro do reator.

A gaseificação da biomassa é uma etapa termoquímica complexa, envolvendo diversas reações químicas responsáveis pela formação do gás de síntese. É um processo eficiente, alcançando e taxas de conversão de carbono entre 98% e 99%. As reações ocorrem em diferentes zonas dentro do reator (Figura 22), divididas da seguinte forma:

- Secagem (até 150°C): processo endotérmico no qual ocorre a evaporação da água presente na biomassa;
- Pirólise (temperatura inferior a 700°C): também é um processo endotérmico, que gera bio-óleo, alcatrão, carvão (resíduo sólido de carbono) e gases como H₂, CO e N₂;
- Combustão (entre 700°C e 2000°C): trata-se de uma reação exotérmica, onde o carbono da biomassa reage com o oxigênio, liberando calor;
- Redução (entre 800°C e 1200°C): é uma etapa endotérmica responsável pela formação dos gases combustíveis.

Figura 22 - Gaseificação e suas fases



Fonte: Lima *et al.* (2024)

Assim, pode-se definir a gaseificação como um processo multifásico, onde cada etapa depende da etapa anterior conforme apresentado na Figura 22.

A qualidade do gás de síntese obtido durante o processo de gaseificação está diretamente ligada à tecnologia do reator utilizada e da matéria prima fornecida para processamento. A granulometria por exemplo, que é o tamanho das partículas da biomassa utilizadas no gaseificador, pode causar interferência já que cada tipo de reator possui um tamanho ideal de partícula que impacta tanto no desempenho do reator quanto a composição do gás gerado.

Quanto menores as partículas, maior será a área superficial de reação o que favorece a eficiência e o rendimento do processo (Rapagnà; Di Celso, 2008). Entretanto partículas muito grandes podem causar bloqueios internos no reator dificultando o fluxo da biomassa, enquanto partículas muito pequenas obstruem a passagem de ar criando caminhos preferenciais que reduzem a eficiência da gaseificação. Por isso, é fundamental encontrar um equilíbrio ideal no tamanho das partículas.

Outro fator determinante para a qualidade do processo é a temperatura de operação pois seus resultados de controle afetam diretamente:

- A conversão do carbono;
- A produção de alcatrão e de carvão residual;
- O poder calorífico do gás;
- A eficiência da combustão do gás gerado.

Quando o processo ocorre em temperaturas mais baixas (entre 800 e 1000°C), o gás formado contém uma variedade de componentes, como CO₂, CO, H₂, vapor d'água, CH₄, olefinas, benzeno, alcatrão e impurezas inorgânicas. Por outro lado, em temperaturas mais elevadas (de 1200 a 1400°C), a composição do gás tende a ser mais simples, predominando CO, CO₂, H₂O e H₂. Existem outros fatores que influenciam a gaseificação e esses estão diretamente ligados a situações relativas à qualidade da matéria prima a ser processada e os controles e condições do processo.

O tempo de residência, que se refere ao período médio que as partículas permanecem dentro do reator, também é crucial para o processo para que todas as reações químicas da gaseificação ocorram de maneira eficaz (Zhou *et al.*, 2009) e esse tempo varia conforme o tipo de reator. Por exemplo, nos leitos fluidizados, o tempo de residência costuma ser menor do que nos leitos fixos, pois há melhor distribuição térmica. Nos leitos fixos, a temperatura pode ser irregular, o que prejudica a reação. Para mitigar isso, muitas plantas-piloto instalam ventiladores ou sopradores no interior do reator, com o objetivo de agitar a biomassa e reduzir o tempo de residência (Wang *et al.*, 2008).

Outro fator importante é pressão interna do gaseificador, pois essa pode influenciar a composição do gás produzido e favorecer a formação de certos componentes, especialmente o metano (CH₄). De acordo com Assumpção (1981), reatores que operam sob pressão elevada alcançam temperaturas maiores, enquanto aqueles que funcionam à pressão atmosférica são geralmente mais simples de operar e ajustar.

3.10 Gases de síntese

A demanda global por energia segue em expansão, impulsionada pelo rápido avanço da industrialização e da urbanização. Embora grande parte da população mundial ainda dependa de combustíveis fósseis, seu consumo contínuo acarreta sérios impactos ambientais devido à emissão expressiva de gases de efeito estufa e outros poluentes. Nesse cenário, o gás de síntese obtido a partir do processamento termoquímico da biomassa surge como uma alternativa viável para o fornecimento sustentável de energia térmica e mecânica. Contudo, a presença de contaminantes como alcatrão, fuligem, material carbonoso, cinzas e gases residuais pode comprometer a eficiência de sua aplicação (Havilah *et al.*, 2022; Rahim *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2021).

Por esse motivo, os processos de controle de produção e purificação adicional desse gás são importantes para reduzir impurezas e melhorar sua qualidade. A quantificação dos principais componentes do gás de síntese é comumente realizada por cromatografia gasosa, utilizando detectores de condutividade térmica ou ionização por chama, que são técnicas analíticas bastante relevantes atualmente.

Tal análise cromatográfica é uma técnica empregada para análises qualitativas e quantitativas de múltiplos componentes em uma mesma amostra. Quanto a utilização, devido ao seu alto poder calorífico, o gás de síntese pode ser empregado para geração de eletricidade, em turbinas a gás, em células de combustível, ou na produção de biocombustíveis e produtos químicos como metanol e gasolina (Gao *et al.*, 2018). Seu rendimento e composição química dependem de diversos fatores, incluindo as propriedades físicas da biomassa como estrutura, condutividade, umidade, tamanho das partículas, temperatura e taxa de aquecimento do processo, tipo de processo no reator, modo de alimentação e a relação entre vapor e biomassa (Matsakas *et al.*, 2017).

A proporção entre hidrogênio e monóxido de carbono varia conforme a composição da matéria-prima e os agentes de gaseificação usados, e por essa razão uma baixa relação H_2/CO (<1) indica que o biogás precisa passar por processamento antes de ser classificado como gás de síntese. Portanto, para uma geração sustentável de energia, é ideal que o gás de síntese tenha uma razão $H_2/CO \geq 1$ porque quanto maior essa razão, menores são os custos para obter hidrogênio a partir do gás. Além disso gases com maior teor de hidrogênio, produzidos de fontes renováveis, apresentam maior poder calorífico inferior (PCI) e sua combustão libera principalmente água e calor, sendo considerados combustíveis limpos (Alnouss; McKay; Al-Ansari, 2020a).

A escolha da matéria-prima para processos termoquímicos depende da disponibilidade, custo e finalidade do gás de síntese. Para materiais sólidos como biomassa, é necessário um investimento significativo para ajustar o processo de gaseificação e purificação do gás antes de sua utilização para gerar produtos de maior valor agregado (Alnouss; Mckay; Al-Ansari, 2020b). Nos últimos anos, houve um esforço crescente de indústrias e pesquisadores para o aproveitamento energético sustentável dos resíduos sólidos urbanos. Entretanto, ainda são escassos os estudos sobre a caracterização do gás de síntese produzido em escala laboratorial ou piloto a partir da gaseificação de diferentes tipos de resíduos sólidos.

A caracterização simultânea dos resíduos e do gás é importante, pois contribui para o uso seguro e eficiente do gás em larga escala, seja em aplicações domésticas ou industriais. Assim, conhecer a composição química e as propriedades do gás de síntese obtido a partir de diversos resíduos é fundamental.

Em termos de aplicação esses gases e sua composição são importantes para se analisar qual a finalidade mais adequada de utilização nos processos produtivos. Em termos gerais, sua formação básica é composta principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), cujas proporções variam conforme diversos fatores, entre eles a matéria-prima utilizada, a temperatura e pressão de gaseificação, além da relação molar entre oxigênio e vapor d'água (O₂/H₂O). Ainda como informação complementar é importante saber que:

- O gás de síntese com alto valor energético é gerado a partir de biomassa que apresenta elevadas quantidades de celulose e hemicelulose em relação à lignina;
- O aumento da pressão no processo de gaseificação favorece a produção de metano (CH₄), enquanto reduz a formação de hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO), independentemente da temperatura;
- A elevação da temperatura na gaseificação provoca aumento nos níveis de H₂ e CO, ao passo que diminui a concentração de CH₄;
- A variação na proporção de oxigênio para vapor de água indica um aumento da umidade do agente gaseificante e promove um crescimento significativo nos teores de H₂ e CH₄ no gás gerado.

Outra informação importante é que um dos critérios para um gás de síntese de alta qualidade é que esse apresente baixo teor de alcatrão, entre 0,1 e 1,2 g/Nm, e concentração de CO₂ na faixa de 8 a 10% em volume além de altos níveis de razão H₂/CO igual ou superior a 1.

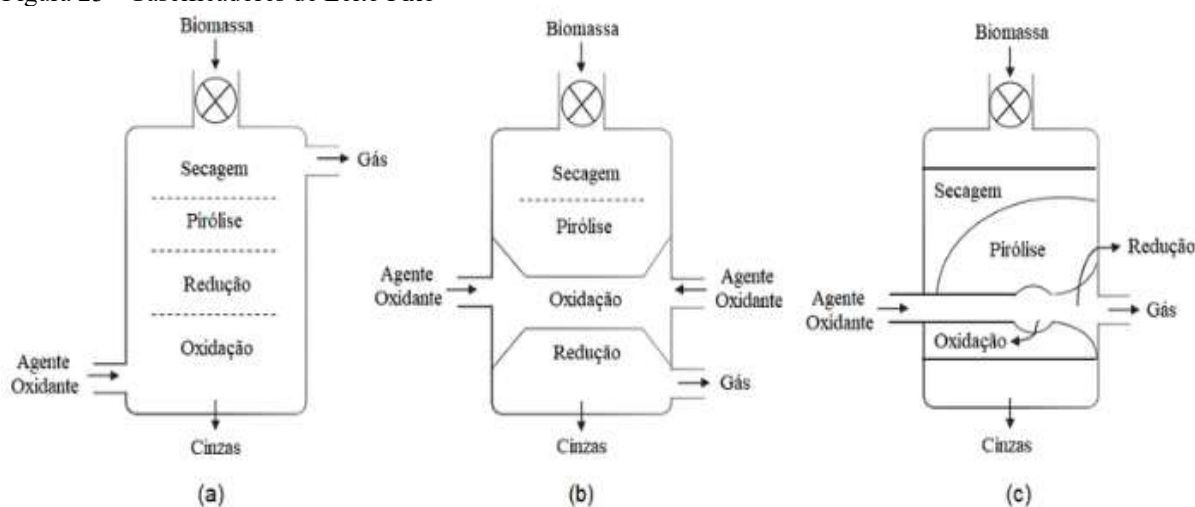
A qualidade desse gás pode ser confirmada pela estabilidade da chama e da temperatura de combustão observadas (Havilah *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2018).

Embora o gás de síntese produzido pela gaseificação possa ser usado diretamente em turbinas a gás para geração de eletricidade, ele precisa atender a determinados padrões de qualidade. Isso inclui parâmetros como poder calorífico, concentrações dos principais componentes presentes no gás, que variam conforme o tipo de material, suas impurezas e as condições do processo, para evitar problemas operacionais nos equipamentos.

3.11 Reatores de gaseificação de leito fixo

Os reatores de leito fixo correspondem à maioria dos sistemas de gaseificação em funcionamento atualmente, sendo responsáveis por aproximadamente 77,5% dos gaseificadores instalados no mundo (Coelho *et al.*, 2002). Os principais modelos desse tipo de reator são ilustrados na Figura 24, onde também estão indicadas as diferentes zonas de reação envolvidas no processo sendo eles de fluxo ascendente (a), descendente (b) e cruzado (c).

Figura 23 - Gaseificadores de Leito Fixo



Fonte: Monteiro (2019)

3.11.1 Gaseificadores de fluxo ascendente

Os gaseificadores de fluxo ascendente funcionam com a alimentação do combustível pela parte superior do reator, sendo esse material transportado para baixo pela ação da gravidade à medida que é consumido. Esse tipo de gaseificador é considerado o mais antigo e de construção mais simples entre os existentes. O ar é introduzido pela base do reator, fazendo com que os gases formados se movam no sentido oposto ao do combustível, ou seja, de forma

ascendente. Essa configuração, também chamada de contracorrente, é uma opção viável e eficiente para a gaseificação de biomassas com alto teor de umidade, já que o reator não exige características muito específicas quanto ao tamanho das partículas ou ao nível de umidade do material.

Um dos principais benefícios desse modelo é sua elevada eficiência térmica, pois os gases quentes gerados na zona de combustão ajudam a aquecer o combustível que está entrando no sistema. No entanto, um dos maiores desafios desse tipo de reator é a elevada produção de alcatrão, o que pode ser um problema dependendo da aplicação do gás gerado. Esse aspecto torna-se menos relevante quando o gás combustível é utilizado diretamente para queima em caldeiras. Os teores de alcatrão podem variar entre 20 e 100 g/Nm³, enquanto a concentração de particulados (como fuligem) costuma estar entre 0,1 e 0,2 g/Nm³.

A temperatura dos gases na saída do sistema gira em torno de 400°C (Dias *et al.*, 2011), a biomassa utilizada nesse tipo de reator deve ter um tamanho de partícula entre 10 e 100 mm e umidade de até 40%. A quantidade de cinzas gerada costuma ser inferior a 2%, e a temperatura de fusão dessas cinzas fica em torno de 1000 °C embora esses valores possam variar de acordo com as propriedades da biomassa empregada. Além disso, esse tipo de gaseificador é compatível com uma ampla gama de combustíveis, que vão desde resíduos da agroindústria até resíduos sólidos urbanos.

3.11.2 Gaseificadores de fluxo descendente

Os gaseificadores de fluxo descendente tornaram-se os mais populares no mundo, especialmente por seu uso extensivo em veículos durante a Segunda Guerra Mundial. Nessa configuração de reator, as zonas de combustão e redução estão dispostas de maneira oposta à dos gaseificadores de fluxo ascendente. Esses sistemas são projetados com foco na diminuição da formação de alcatrão e material particulado e os compostos voláteis gerados na zona de pirólise são conduzidos para a zona de combustão, onde passam por processos de craqueamento e transformação. O alcatrão, ao ser exposto a essas altas temperaturas, é quebrado em compostos de menor massa molecular e coque, o que resulta em uma corrente de gás relativamente limpa, com concentrações de alcatrão entre 0,1 e 1,2 g/Nm³.

Contudo, esses reatores tendem a gerar volumes maiores de cinzas e fuligem, já que os gases são extraídos diretamente da zona de redução, sem passar por outras etapas de limpeza. O teor de cinzas costuma ser inferior a 6%, e a temperatura de fusão dessas cinzas gira em torno de 1000 °C. A temperatura dos gases na saída do reator é aproximadamente 700°C, pois não há

recuperação de calor proveniente das zonas superiores de secagem e pirólise. Para uma operação eficiente desse gaseificador se requer da secagem da biomassa até um teor de humidade inferior a 20% (Cortez *et al.*, 2008).

3.11.3 Gaseificadores de fluxo cruzado

Nos gaseificadores de fluxo cruzado, o gás gerado na câmara de gaseificação é retirado lateralmente, na mesma altura em que ocorre a injeção de ar no leito. Ao redor do ponto de entrada do ar forma-se uma zona de combustão altamente quente, devido à maior concentração de ar comparada aos outros tipos de reatores. As zonas de secagem e pirólise localizam-se na parte superior do equipamento. O gás produzido nesse tipo de reator possui características intermediárias entre os sistemas ascendente e descendente.

Entre suas vantagens estão a rápida adaptação a mudanças de carga, a estrutura simples e o peso reduzido em comparação a outros modelos. No entanto, esses gaseificadores são bastante sensíveis às propriedades da biomassa, como teor de umidade, tamanho das partículas e composição química. Por isso, são mais adequados para operar com carvão vegetal limpo e seco. Uma desvantagem importante desses reatores é o custo adicional com os sistemas de resfriamento e purificação do gás, necessários devido às altas temperaturas geradas na zona de combustão. Além disso, a liberação dos gases ocorre de forma muito rápida, o que contribui para a elevada produção de cinzas e fuligem.

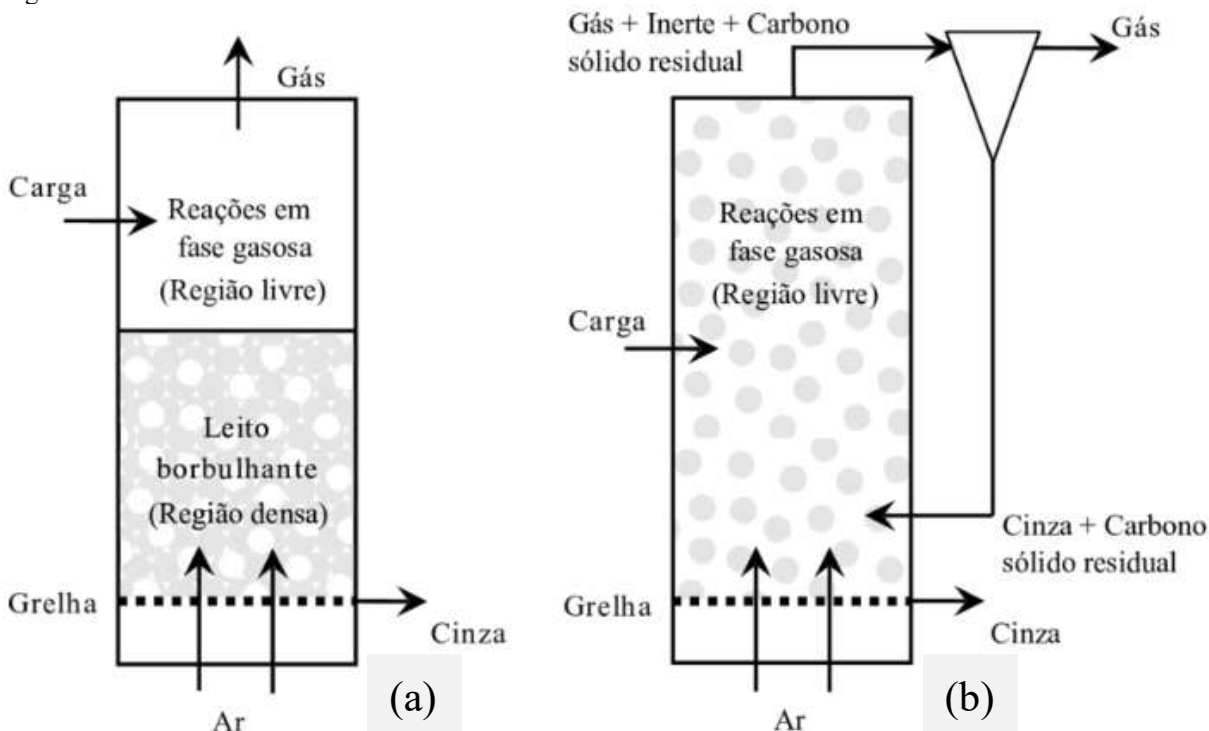
Por conta dessas limitações, o uso de gaseificadores de fluxo cruzado é mais comum em ambientes de pesquisa e testes laboratoriais (Dias *et al.*, 2011; Sánchez, 2003).

3.12 Reatores de gaseificação de leito fluidizado

Os gaseificadores de leito fluidizado representam cerca de 20% dos gaseificadores em uso e são divididos em dois principais tipos, leito borbulhante e leito circulante. No caso dos gaseificadores de leito borbulhante, Figura 24 (a), as partículas de combustível que são arrastadas pelos gases não retornam ao leito e a operação ocorre com velocidades mais baixas, em torno de 1 m/s, e biomassa é alimentada diretamente na região do leito. Já nos gaseificadores de leito fluidizado circulante, Figura 24 (b), as partículas carregadas pelos gases são separadas por um ciclone e reinseridas no leito, criando um circuito contínuo de circulação. Isso aumenta o tempo de permanência das partículas no sistema, favorecendo uma conversão mais eficiente do carbono. Esses reatores trabalham com velocidades de gás mais elevadas, geralmente entre

7 e 10 m/s, o que proporciona uma mistura mais eficiente entre o ar e o combustível (Coelho *et al.*, 2002; Andrade, 2007).

Figura 24 - Gaseificadores de Leito Fluidizado



Fonte: Rodrigues (2015)

Nos sistemas de leito fluidizado em geral, há uma excelente transferência de calor e boa uniformidade de temperatura dentro da câmara de reação. Isso ocorre graças à presença do agente gaseificante em conjunto com partículas inertes, como areia, sílica ou alumina, que promovem um ambiente de reação homogêneo ao entrarem em contato com o combustível. Apesar dessas vantagens o teor de alcatrão gerado é relativamente alto, cerca de 15 g/Nm³, pois os compostos formados na zona de pirólise não são completamente convertidos, dado que esses reatores operam com temperaturas mais baixas. Já a quantidade de material particulado no gás produzido varia entre 30 e 35 g/Nm³.

Um ponto positivo é que esses reatores conseguem operar com biomassas de alta umidade, chegando até 65%, embora exijam que a granulometria do combustível esteja entre 5 e 10 mm. O teor de cinzas costuma ser muito baixo, inferior a 0,5%, e a temperatura dos gases na saída do reator varia entre 500 e 900°C (Dias *et al.*, 2011). Os primeiros modelos de reatores de leito fluidizado foram desenvolvidos antes da Segunda Guerra Mundial, inicialmente voltados para a gaseificação de carvão mineral em instalações de grande porte. Com o tempo, esse tipo de reator foi incorporado pela indústria petroquímica e química sendo utilizado em

processos como o craqueamento catalítico de hidrocarbonetos pesados, secagem de materiais e diversas outras aplicações industriais.

Esses reatores apresentam alta eficiência energética, graças às elevadas taxas de produção e à intensa troca térmica. No entanto, sua operação é mais complexa do que a de outros tipos de gaseificadores, razão pela qual seu uso é mais comum em plantas industriais de grande escala (Coelho *et al.*, 2002).

3.13 Análises de viabilidade

De uma forma geral os projetos precisam apresentar algum tipo de retorno, sejam eles em termos econômicos ou qualitativos, visando a viabilidade e descrição dos valores que poderão ser dispendidos para que o mesmo se torne realidade. Para tanto Um dos principais objetivos da gestão financeira é, sem dúvida, gerar valor para os acionistas da empresa. É comum que as empresas utilizem a análise econômico-financeira para avaliar projetos de investimento, com o propósito de verificar antecipadamente se um empreendimento será capaz de recuperar o capital investido. Essa avaliação é realizada por meio de técnicas que consideram os fluxos de caixa livres relevantes, para determinar se o projeto deve ser aceito ou, quando há várias opções, para escolher a melhor alternativa.

Existem diferentes métodos para conduzir essas análises, sendo que as abordagens mais utilizadas combinam procedimentos que levam em conta a variação do valor da moeda ao longo do tempo, além de aspectos relacionados ao risco e retorno do capital investido, e conceitos de avaliação que auxiliam na seleção de investimentos alinhados com os objetivos da empresa. Como o principal objetivo de uma empresa é maximizar o retorno financeiro positivo acionistas, buscam-se realizar investimentos em um ambiente com o máximo de segurança possível (Gitman, 2010). A finalidade da análise de viabilidade é buscar avaliações econômico-financeiras decidir se é vantajoso para a empresa investir em determinado projeto tendo como ponto focal identificar oportunidades realmente agregam valor.

As técnicas mais comuns para avaliação de empresas geralmente consideram as receitas geradas pelas vendas de produtos, bem como seus custos e lucros. Neste trabalho, essas mesmas técnicas serão aplicadas, mas especificamente para a análise de investimentos em equipamentos. Nesse contexto, a palavras equipamentos, não se refere apenas aos próprios aparelhos, mas também a todos os elementos relacionados ao projeto, incluindo serviços de instalação, materiais e demais despesas envolvidas.

A principal diferença é que, ao avaliar equipamentos ou novos sistemas, não se trabalha

diretamente com o faturamento (investimento inicial). Em vez disso, a comparação costuma ser feita entre os custos operacionais de um sistema antigo e as despesas previstas para um novo projeto ou sistema que se pretende implementar, levando em conta os benefícios que este possa oferecer. As técnicas mais utilizadas para essa análise são: *payback* simples, valor presente líquido (VPL), *payback* descontado e taxa interna de retorno (TIR).

3.14 Energias renováveis

Nas últimas décadas, as fontes de energia renovável ganharam destaque, impulsionadas especialmente pelas crescentes preocupações com a sustentabilidade ambiental. Como resultado, essas fontes vêm gradualmente substituindo as energias não renováveis, como o carvão, o gás natural e o óleo combustível. Essas preocupações se intensificaram diante do aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂), decorrentes principalmente da queima de combustíveis fósseis. Esse cenário é agravado pelo aumento contínuo da demanda e da oferta energética, o que torna ainda mais urgente a transição para fontes limpas, capazes de mitigar os impactos ambientais, reduzir resíduos e gases de efeito estufa, além de diversificar a matriz energética e garantir a sustentabilidade no longo prazo (Haralambopoulos; Polatidis, 2003).

Apesar desse avanço, os combustíveis fósseis ainda dominam a matriz energética global como pode-se observar na Tabela 4.

Tabela 4 - Fornecimento total de energia primária global. Valores em EJ (Exajoule) onde 1 EJ = 1 x 10¹⁸ Joules

	Total	Carvão	Óleo	Gás	Nuclear	Renováveis	Renováveis (%)
2005	481	125	168	30,2	30,2	58,3	12%
2010	537	153	173	30,1	30,1	66,3	12%
2015	569	161	182	28,1	28,1	75,1	13%
2020	585	157	172	29,2	29,2	88,0	15%

Fonte: Adaptado de World Bioenergy Association (2022)

As informações apresentadas indicam que, embora a geração de energia a partir de fontes renováveis tenha aumentado em termos absolutos até o ano de 2015, esse crescimento não se refletiu proporcionalmente na matriz energética total. Em 2020, a composição global do fornecimento de energia primária ainda era amplamente dominada pelos combustíveis fósseis, que representavam 80% do total sendo 27% provenientes do carvão, 29% do petróleo e 24% do

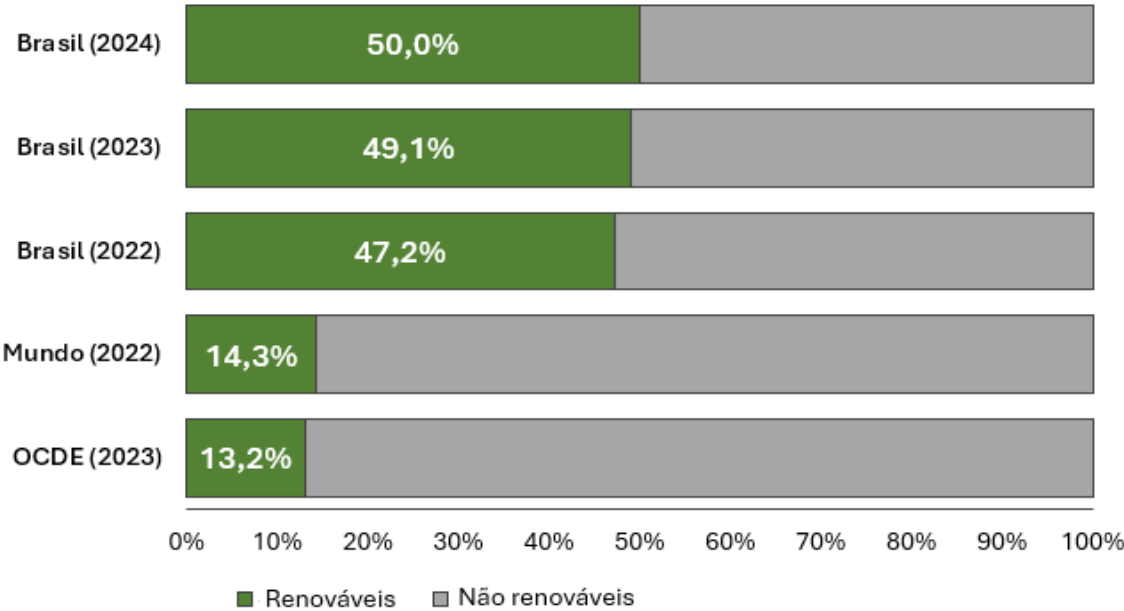
gás natural.

As energias renováveis são originadas de fontes naturais abundantes, cuja disponibilidade não se esgota com o uso, desde que sua exploração seja feita de maneira adequada e responsável. Exemplos clássicos incluem a energia solar (fotovoltaica), eólica (dos ventos), hídrica (das águas), maremotriz (das marés), geotérmica (do calor interno da Terra) e a bioenergia proveniente da biomassa (Silveira *et al.*, 2013).

Essas fontes desempenham um papel essencial, com aplicações que vão desde o uso residencial até os setores industriais e de transporte, influenciando diretamente as estratégias energéticas e políticas de cada país. Diante da necessidade urgente de preservar o equilíbrio ambiental e assegurar a continuidade da vida no planeta, torna-se imprescindível priorizar fontes energéticas seguras, limpas e renováveis (Ilbahar *et al.*, 2019).

No Brasil, segundo o relatório da Empresa de Pesquisa Econômica base 2024 apresentado na Tabela 5, a participação de fontes renováveis na matriz energética foi marcada pelo aumento da oferta interna de biomassa, eólica e solar, associado à queda de petróleo e derivados proporcionando o patamar de 50% de renovação, marco histórico desde o ano de 1990 (BEN - Balanço Energético Nacional, Relatório de Síntese base 2024).

Tabela 5 - Participação das energias renováveis na OIE



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2024)

Em 2024, a Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil apresentou expansão em relação ao ano anterior, impulsionada principalmente pelo avanço do gás natural e das fontes eólica e solar. Contudo, como as taxas de crescimento da OIE e do Consumo Final de Energia ficaram

abaixo da variação do Produto Interno Bruto (PIB), observou-se uma redução na intensidade energética da economia brasileira.

Dentre as fontes renováveis, a biomassa ganha destaque, principalmente no contexto brasileiro. O Brasil possui uma oferta significativa dessa fonte energética, tanto em volume quanto em baixo custo, o que representa uma grande oportunidade para o país. O setor agropecuário contribui positivamente com a geração de biomassa por meio dos resíduos agrícolas e dos dejetos provenientes da criação de animais, ampliando o potencial de produção de energia limpa.

Além disso, a biomassa também abrange uma ampla gama de outros materiais orgânicos com capacidade de conversão energética, como resíduos florestais e urbanos, madeira, troncos e caules, grãos, óleos vegetais e até mesmo o lodo resultante do tratamento biológico de efluentes. Por isso, é frequentemente chamada de “energia verde” ou “bioenergia”.

No entanto, para que o aproveitamento da biomassa especialmente em processos como o uso de reatores não resulte em novos impactos ambientais, como a emissão de gases poluentes, sua utilização deve seguir regulamentações específicas. No Brasil, essa atividade é normatizada por meio de resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão integrante do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA). O CONAMA tem a função de estabelecer diretrizes, normas e padrões para assegurar o uso sustentável dos recursos naturais e garantir a proteção ambiental.

A resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002 trata em suma que o “princípio da precaução é o fundamento do desenvolvimento sustentável e que os sistemas de tratamento térmico de resíduos são fontes potenciais de risco ambiental e de emissão de poluentes perigosos, podendo constituir agressão à saúde e ao meio ambiente se não forem corretamente instalados, operados e mantidos.

Considerando que, entre estes poluentes destacam-se, pela sua periculosidade, os poluentes orgânicos persistentes, e que deve ser buscada a redução das emissões totais dos poluentes mencionados, com a finalidade de sua contínua minimização e, onde viável, sua eliminação definitiva”. Sendo assim, a regulamentação estabelece formas de monitoramento e padrões de toxicidade, planos de teste de queima, planos de contingência e emergência além do plano de desativação da unidade de tratamento térmico no caso de encerramento das atividades.

3.15 Economia circular

A economia está profundamente conectada aos sistemas naturais que a sustentam por

meio de uma relação interdependente entre as atividades produtivas e o meio ambiente. O funcionamento econômico depende intensamente dos recursos naturais e dos serviços oferecidos pelos ecossistemas para manter setores diversos como a agricultura, pesca, energia, turismo, silvicultura, entre outros. Por outro lado, o ambiente natural frequentemente sofre os impactos negativos de um modelo de desenvolvimento voltado principalmente para o crescimento econômico, o qual nem sempre respeita os limites de disponibilidade dos recursos naturais, que são finitos (Döhring *et al.*, 2023).

Os modelos econômicos tradicionais, especialmente os baseados na lógica da economia linear, operam com um fluxo de produção que vai desde a extração dos recursos até o descarte dos produtos, após seu uso. Nessa lógica, os produtos têm uma vida útil limitada e, ao chegarem ao fim do seu ciclo, são frequentemente descartados de maneira inadequada, muitas vezes em aterros sanitários ou por incineração, gerando desperdício e impactos ambientais significativos.

Nesse cenário, surgem estratégias voltadas para o desenvolvimento sustentável, a preservação ambiental, a produção mais limpa, o consumo responsável e a reutilização de resíduos. Essas práticas vêm sendo incorporadas progressivamente a uma abordagem mais ampla e integrada: a economia circular. Esse modelo propõe uma lógica de produção em ciclo fechado, priorizando o uso eficiente dos recursos, a redução da poluição e a minimização de resíduos ao longo dos processos produtivos.

A economia circular abrange dimensões econômicas, ambientais e sociais, ao propor a reorganização dos sistemas produtivos com foco na conservação e no reaproveitamento de materiais (Scheepens; Vogtländer; Brezet, 2015). O consumo de matérias-primas é reduzido, priorizando-se o uso de subprodutos, resíduos e materiais recicláveis, que passam a ocupar o papel de insumos primários, diminuindo os danos ambientais associados à produção (Pinjing *et al.*, 2013).

Sob a perspectiva econômica, a economia circular amplia a competitividade ao otimizar a alocação de recursos e elevar a produtividade. Sob a ótica ambiental, o modelo mitiga impactos negativos mediante a reestruturação dos sistemas industriais com base em critérios ecológicos, oferecendo uma nova abordagem para a implementação de práticas sustentáveis com menor consumo de insumos materiais e energéticos.

Contudo, essa transição exige mais do que a simples adoção conceitual; requer o engajamento ativo de agentes inovadores. Pela complexidade inerente à sustentabilidade, sua efetiva consolidação demanda transformações profundas em produtos, processos e modelos de gestão, além de ajustes em políticas públicas e ferramentas decisórias. Dessa forma, a economia circular busca restabelecer o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico, a preservação

ambiental e a equidade social (Ghisellini; Cialani; Ulgiati, 2016).

Tal conceito circular vem se consolidando como uma das principais propostas para enfrentar os desafios da sustentabilidade. Ele busca conciliar o crescimento econômico com a escassez de matérias-primas e energia, ao mesmo tempo em que propõe novos modelos de negócios mais sustentáveis (Murray; Skene; Haynes, 2017). Seus princípios vêm sendo adotados por empresas e organizações como diretrizes para inovação, geração de valor e diferenciação competitiva, mesmo em contextos de crise econômica ou restrições orçamentárias.

Atualmente, observa-se que, nesse estágio inicial de adoção da economia circular, empresas do setor energético estão focando em práticas como o uso de biomassa e o reaproveitamento de utilidades e resíduos. Essas ações se inserem em um modelo produtivo alternativo, capaz de aliar inovação tecnológica à sustentabilidade, promovendo maior competitividade. No entanto, é essencial a atuação conjunta entre o setor público e os líderes empresariais, assegurando a viabilidade e continuidade dessas transformações.

4 METODOLOGIA

4.1 Planta piloto de gaseificação com leito fluidizado

A planta piloto para realização dos testes pertence a empresa Calmecon situada na cidade de Mirassol e é provida de um sistema de gaseificação semiautomático em operação a qual permite o processamento alguns produtos efetivamente para a obtenção do gás de síntese.

O processo se inicia dando-se carga no reator gaseificador com madeira e óleo diesel para se realizar a ignição (*warm up*) que nada mais é que a queima desse material dentro da câmara do equipamento para que se haja um início de chama. Na parte interna do reator, disposto na Figura 25, existem 4 ciclones dispostos em série para captar o máximo de resíduos provenientes da queima da biomassa no reator antes da etapa subsequente que é a saída de gases.

Figura 25 - Reator gaseificador



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

O processo prossegue com a etapa de alimentação da câmara do reator, na qual a biomassa é introduzida pela parte superior, por meio de uma caçamba equipada com rosca dosadora, garantindo a continuidade do fluxo, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 - Caçamba com rosca alimentadora



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

A admissão do material no reator ocorre por meio de um sistema de válvulas guilhotina localizado imediatamente abaixo da rosca dosadora. Composto por duas válvulas dispostas em série, esse conjunto atua como uma câmara de eclusa (*lock hopper*) para compensar o diferencial entre a pressão atmosférica e a pressão interna do equipamento. O ciclo operacional inicia-se com a abertura da primeira válvula para a entrada da biomassa; após o seu fechamento completo, a segunda válvula é acionada, permitindo a transferência do material ao reator de gaseificação sem perda de estanqueidade

O movimento se repete de forma inversa quando já não existe material na câmara entre as duas guilhotinas para que aconteça uma nova carga a ser processada. Isso é um fator de suma importância pois, como se trata de um sistema pressurizado, toda segurança envolvida na operação depende diretamente dessa sequência de abertura e fechamento das válvulas evitando fuga de pressão ou de chamas para o túnel da rosca alimentadora. A Figura 27 demonstra esse sistema.

Figura 27 - Válvulas guilhotina e câmara de pressão



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

À medida que o processo evolui e as temperaturas operacionais de gaseificação são atingidas, o gás de síntese propriamente dito é direcionado por uma tubulação (Figura 28) à etapa subsequente do sistema.

Figura 28 - Tubulação de saída do gás de síntese para o lavador de gases



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

Essa nova etapa consiste no sistema de lavagem de gases (*scrubber*), projetado para a

remoção de contaminantes e particulados oriundos do processo de gaseificação (Figura 29).

Figura 29 - Lavador de gases - *Scrubber*



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

Esse sistema é disposto de uma torre evaporativa e um tanque de reposição de água, de forma que a água utilizada na lavagem dos gases seja utilizada no seu nível máximo e somente seja repostada quando da real necessidade no processo evitando gastos desnecessários (Figura 30).

Figura 30 - Reposição de água e condensador evaporativo



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

A água de lavagem saturada é reintroduzida gradualmente no reator durante a etapa de reposição de água nova no sistema. Essa fração efluente é gaseificada em circuito fechado, o que elimina custos adicionais com o tratamento em torres e reduz os impactos ambientais associados ao descarte.

Após a remoção dos contaminantes retidos no sistema de lavagem de gases o gás de síntese purificado é encaminhado à câmara de combustão, onde é submetido à combustão para a geração de energia térmica, que futuramente poderá ser aproveitada (Figura 31).

Figura 31 - Câmara de Combustão



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

Na entrada da câmara de combustão, mantém-se uma chama piloto permanentemente acesa para assegurar a ignição contínua do gás de síntese e evitar a emissão de insumos não queimados. O ar de combustão é fornecido por um ventilador que capta o ar atmosférico e o

injeta no equipamento (Figura 32), permitindo o ajuste da mistura estequiométrica. A vazão de ar injetada é controlada e monitorada por meio do sistema supervisor da planta piloto.

Figura 32 - Ventilador de ar da câmara de combustão.



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

A planta piloto caracteriza-se por um elevado grau de integração térmica, aproveitando os fluxos de calor gerados no próprio processo para otimizar sua eficiência energética. Como exemplificado na Figura 33, o ar captado pelo compressor passa por um trocador de calor instalado na câmara de combustão.

Figura 33 - Compressor de ar e trocador de calor da câmara de combustão



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

Dessa maneira, o fluxo de ar é pré-aquecido utilizando a energia térmica residual da própria câmara antes de ser admitido no reator, o que previne perdas de temperatura e favorece a estabilidade operacional do sistema.

Os efluentes gasosos resultantes da combustão do gás de síntese são direcionados à chaminé do sistema (Figura 34), ponto em que se realiza o monitoramento e a quantificação das emissões de material particulado e gases residuais pós-processo.

Figura 34 - Chaminé do sistema para monitoramento atmosférico



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

Tanto o material particulado quanto os gases residuais são quantificados na chaminé antes do seu lançamento na atmosfera, o que assegura o controle ambiental e previne impactos indesejáveis.

Figura 35 - Sonda para medição de gases residuais



Fonte: Autor – Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

A amostragem dos gases é realizada por meio de uma sonda dotada de um tubo de pitot, para controle da velocidade de saída de gases (Figura 35), a qual é devidamente instalada perpendicularmente no ponto de coleta previamente definido, conforme a ABNT NBR 17163/2024. A sonda de amostragem é parte constituinte do coletor isocinético de poluentes atmosféricos (CIPA), equipamento que possui ainda um porta filtro, para suportar o filtro de fibra de vidro necessário para coleta de material particulado, possui também um conjunto de *impingers* para retenção de gases necessário para análise de composição. A Figura 36 apresenta o amostrador ISOTEC – TE 751, utilizado para as amostragens atmosféricas.

Figura 36 - Equipamento de monitoramento dos gases



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

Adicionalmente, o sistema conta com um analisador de gases *in line* (Figura 37) encarregado de monitorar a composição do gás de síntese produzido no reator. A esse equipamento acopla-se um dispositivo para a amostragem e o armazenamento do efluente gasoso, viabilizando análises laboratoriais complementares.

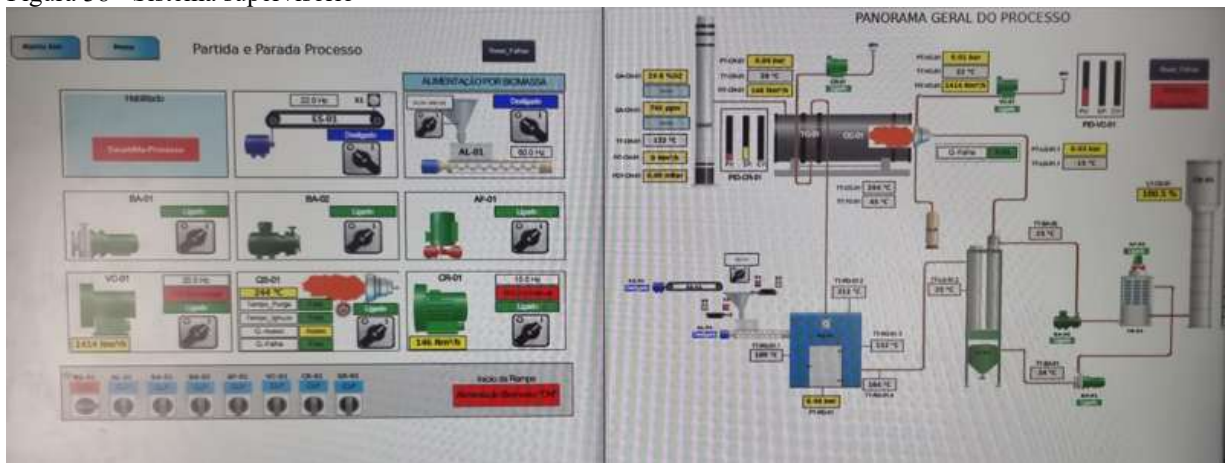
Figura 37 - Analisador de gases *in line*



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

O reator de gaseificação conta, ainda, com um sistema supervisório dedicado (Figura 38), projetado para assegurar o controle efetivo do processo e a segurança operacional da unidade. Essa interface computacional realiza o monitoramento contínuo das variáveis críticas como temperatura, pressão e vazão de insumos, registrando os eventos em tempo real, gerenciando alarme de desvios e permitindo ajustes dinâmicos nos parâmetros operacionais durante toda a execução da reação.

Figura 38 - Sistema supervisório



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

Adicionalmente, o sistema dispõe do recurso de monitoramento gráfico (Figura 39), no qual é possível acompanhar o histórico de dados e a evolução operacional do equipamento em tempo real.

Figura 39 - Gráficos de processo



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

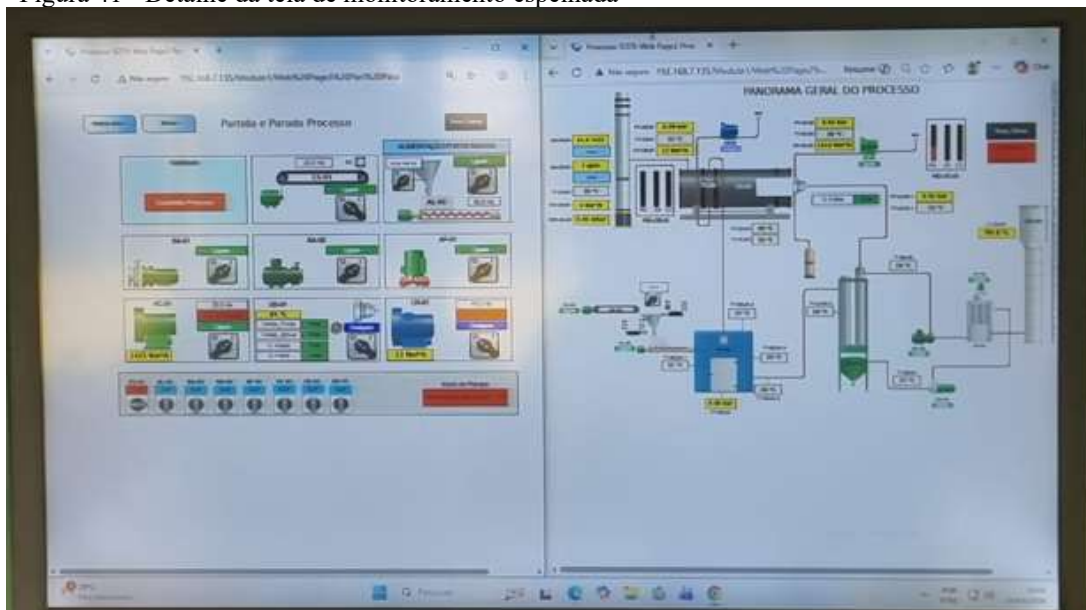
O acompanhamento operacional é realizado por meio de uma interface auxiliar, disposta no posto de monitoramento da chaminé. Trata-se de uma tela espelhada a partir do sistema supervisório principal, cuja finalidade é otimizar a visualização do processo e orientar a equipe quanto aos instantes exatos para a amostragem e a medição de emissões, com base na estabilização dos dados em tempo real. A Figura 40 apresenta a tela espelhada, instalada na chaminé, e a Figura 41 o detalhe do espelhamento do supervisório.

Figura 40 - Tela de monitoramento espelhada instalada na chaminé



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

Figura 41 - Detalhe da tela de monitoramento espelhada



Fonte: Autor - Planta Piloto na Empresa Calmecon (2026)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Biomassas

Estudou-se as características do processamento das biomassas, pó de malte e bagaço de malte, geradas do processo cervejeiro de uma unidade de produção situada na cidade de Uberaba, Minas Gerais. Essa unidade tem a capacidade de fornecimento de até 25 toneladas de pó de malte por semana com uma umidade entre 6,0 e 7,0% e 258 toneladas de bagaço de malte por dia com uma umidade entre 77,5% e 79,5%. Essas biomassas são provenientes do processo de produção e, atualmente, todo volume desses resíduos é comercializado como ração animal que é distribuído por uma empresa terceira conforme solicitação dos criadores credenciados.

Primeiramente, para avaliar a utilização do bagaço de malte como biomassa, realizou-se um processo de secagem natural com o objetivo de alcançar valores mais baixos de umidade possíveis podendo assim propor técnicas para a sua utilização.

A secagem foi feita em uma área específica e preparada para a realização da técnica utilizada, espalhando-se o material para evaporação da água pelo calor do ambiente por convecção natural. Para o pó de malte não houve necessidade desse pré-processamento devido a sua baixa umidade.

Durante a secagem realizou-se algumas tomadas de amostras em dez pontos diferentes da camada de bagaço a cada dois dias para uma leitura completa. As análises foram determinadas por meio de equipamentos para medição de umidade das biomassas para se encontrar os valores e percentuais. No caso do pó de malte não havia necessidade de secagem, porém por questões do preço elevado de venda do material não houve possibilidade para teste na planta piloto. Ambas propostas tinham a finalidade de estudo da utilização dessas biomassas em um reator termoquímico gaseificador de leito fluidizado no qual, por meio do processamento das mesmas como combustível, buscamos obter a produção de um gás de síntese para ser utilizado como fonte energética em equipamentos específicos.

O objetivo inicial deste trabalho consistiu na determinação do comportamento térmico e ambiental da queima de biomassa cervejeira, avaliando a dinâmica dos parâmetros operacionais, os perfis composicionais das matérias-primas de entrada e a geração de efluentes pós-tratamento. A partir dessa compreensão sistêmica, buscou-se estimar a viabilidade técnica e o potencial de aproveitamento de diferentes frações de massa lignocelulósica na própria unidade fabril, visando à autogeração de energia, à otimização da eficiência global do processo e à consolidação da economia circular.

5.2 Bagaço de malte

Verifica-se que o teor médio de umidade do bagaço de malte, ao término da etapa de filtração do mosto e previamente ao seu carregamento (Figura 42), situa-se na faixa entre 77,5% e 79,5%.

Figura 42 - Bagaço de malte coletado no silo de resíduos



Fonte: Autor - Pátio de estoque de biomassa na unidade produtora de cerveja (2026)

O bagaço de malte foi espalhado em pátio coberto e seco (Figura 43) ele foi revolvido a cada 2 dias, por um período de aproximadamente dez dias com auxílio de uma pá carregadeira, para garantir-se a homogeneidade. Nesse período as condições de bulbo seco alcançaram um valor médio de 29 °C e a umidade relativa do ar um valor médio de 60%.

Figura 43 - Bagaço de malte espalhado para o processo de secagem natural



Fonte: Autor - Pátio de estoque de biomassa na unidade produtora de cerveja (2026)

Após os dois primeiros dias, realizou-se uma medição preliminar (Figura 44) a fim de avaliar a redução de umidade proveniente da secagem e determinar a obtenção de massa

constante. O procedimento foi conduzido em estufa a $105,0 \pm 2,0$ °C durante 180 minutos, seguido por 30 minutos em dessecador para o resfriamento da amostra até $20,0 \pm 2,0$ °C, prevenindo a reabsorção de umidade ambiente.

Figura 44 - Estufa de secagem (esquerda) e dessecador (direita)



Fonte: Autor - Equipamento do laboratório da unidade produtora de cerveja (2026)

Mediu-se a umidade das 6 amostras dispostas nos recipientes (cadinhos) por diferença de peso da amostra úmida (antes da estufa) e amostra seca (depois da estufa) utilizando-se o método que segue:

P1 = peso do cadinho vazio

P2 = peso do cadinho + amostra úmida (antes da estufa)

P3 = peso do cadinho + amostra seca (após a estufa)

Sendo:

$P2 - P3 = \text{água que evaporou} = X$

$P2 - P1 = \text{peso inicial da amostra} = Y$

Utilizando esses valores, obteve-se o percentual de umidade das amostras por meio da Equação 6:

$$Xbu \% = \frac{X}{Y} \times 100 \quad (6)$$

Dessa forma, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 6, referentes à evolução da secagem da biomassa.

Tabela 6 - Resultados da avaliação de umidade do bagaço de malte revolvido

AMOSTRAS	CADINHO VAZIO	AMOSTRA ÚMIDA	AMOSTRA SECA	P2 - P3 = X	P2 - P1 = Y	X/Y x 100 = % DE UMIDADE
1	21,7398	26,7515	23,0666	3,6849	5,0117	73,5259
2	28,9866	33,9873	30,2894	3,6979	5,0007	73,9476
3	30,7312	35,7487	32,0858	3,6629	5,0175	73,0025
4	28,4731	33,4888	29,8711	3,6177	5,0157	72,1275
5	28,1060	33,1637	29,4692	3,6945	5,0577	73,0470
6	30,8706	35,9250	32,1980	3,7270	5,0544	73,7377
MÉDIA - 2º DIA DE SECAGEM	28,1512	33,1775	29,4967	3,6808	5,0263	73,2314

Fonte: Autor - Dados das análises do material no laboratório da unidade produtora de cerveja (2026)

A análise dos resultados preliminares indicou que a média das amostras coletadas durante a secagem natural não apresentou redução significativa no teor de umidade do bagaço revolvido até o segundo dia de ensaio. A partir de então, as medições subsequentes foram efetuadas a cada dois dias de revolvimento, permitindo avaliar a efetividade da secagem natural aplicada ao processo. Assim, os dados obtidos no 4º, 6º, 8º e 10º dias encontram-se dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados das mostras durante o processo de secagem natural

DIA DE SECAGEM	CADINHO VAZIO	AMOSTRA ÚMIDA	AMOSTRA SECA	P2 - P3 = X	P2 - P1 = Y	X/Y x 100 = % DE UMIDADE
4º	28,7398	33,3519	30,8915	2,4604	4,6121	53,3466
6º	29,4586	33,6865	31,7529	1,9336	4,2279	45,7343
8º	30,4385	34,7837	32,9958	1,7879	4,3452	41,1466
10º	29,4731	32,4088	31,3011	1,1077	2,9357	37,7321

Fonte: Autor - Dados das análises do material no laboratório da unidade produtora de cerveja (2026)

Ao final dos procedimentos de revolvimento, que ocorreram nestes dez dias juntamente com a tomada de amostras, o material foi embalado em sacos de ráfia de aproximadamente uma tonelada cada com o auxílio de duas pás carregadeiras para serem transportados até a unidade onde se situa o gaseificador (Figura 45).

Figura 45 - Acondicionamento do bagaço de malte em sacos de ráfia



Fonte: Autor - Pátio de estoque de biomassa na unidade produtora de cerveja (2026)

Ao final do décimo dia o material foi acondicionado em sacos de ráfia (Figura 46).

Figura 46 - Bagaço de malte acondicionado em saco de ráfia



Fonte: Autor - Unidade produtora de cerveja (2026)

Esses sacos foram armazenados em uma casa de cinzas (Figura 47) único local disponível para garantir teoricamente que não haveria absorção de umidade pelo bagaço de malte.

Figura 47 - Casa de cinzas



Fonte: Autor - Casa de cinzas na unidade produtora de cerveja (2026)

Após essa etapa, o material foi transportado para a empresa Calmecon (Figura 48), sede do gaseificador piloto, a fim de realizar os testes operacionais com o teor de umidade atingido na última medição.

Figura 48 - Caminhão carregado com o bagaço de malte



Fonte: Autor - Carregamento do material na unidade produtora de cerveja (2026)

Na Calmecon, após avaliação da equipe técnica, verificou-se uma grande parcela de unidade no material acima dos 19,0% medidos na fábrica o que impossibilitou a utilização do

bagaço de malte pois iria impactar no funcionamento correto do gaseificador. Essa umidade pode ter ocorrido durante o transporte do material ou por ineficiência do processo de secagem natural. Vale lembrar que o bagaço de malte se deteriora com o tempo e que apresenta a formação de gases que produzem um odor forte. Dessa forma, decidiu-se abortar a utilização do mesmo devido a esses fatores.

5.3 Caracterização das biomassas

Foram realizadas análises em laboratório externo para caracterizar as biomassas disponíveis e compreender suas dinâmicas. A serragem, por já ser um material testado e aprovado no funcionamento do equipamento, foi utilizada como parâmetro de referência.

O bagaço de malte teve suas análises realizadas também nesse laboratório externo para comparação técnica da sua aplicabilidade por apresentar características, após sua secagem, satisfatórias para o processo de gaseificação

Pôde-se avaliar alguns pontos relativos ao bagaço de malte teoricamente, em comparação a serragem, de acordo com os laudos técnicos apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Resultados analíticos do bagaço de malte

Parâmetro	CAS	Resultado Analítico	Unidade de Medida
% de Sólidos	---	99,03	%
Carbono ²	---	53,52	%
Cloro (Cl)	---	787,30	mg/kg
Enxofre (S) ²	7704-34-9	2,45	%
Hidrogênio ²	1333-74-0	6,36	%
Nitrogênio ²	---	1,63	%
Poder Calorífico Superior (PCS)	---	5564,0	kcal/kg

Fonte: EP Engenharia do Processo Ltda (2026)

Conforme demonstrado nas Tabelas 8 e 9, as análises efetuadas em laboratório externo indicam ampla proximidade entre a caracterização do bagaço de malte e a da serragem. A principal discrepância reside nos níveis de enxofre, substancialmente inferiores no material de referência. Embora o teor de cloro também apresente variação, este parâmetro não possui relevância estatística ou operacional para o processo avaliado, não impactando as conclusões finais.

Tabela 9 - Resultados analíticos da serragem

Parâmetro	CAS	Resultado Analítico	Unidade de Medida
% de Sólidos	---	90,76	%
Carbono ²	---	47,42	%
Cloro (Cl)	---	< 450,00	mg/kg
Enxofre (S) ²	7704-34-9	0,21	%
Hidrogênio ²	1333-74-0	7,10	%
Nitrogênio ²	---	2,00	%
Poder Calorífico Superior (PCS)	---	4245,0	kcal/kg

Fonte: EP Engenharia do Processo Ltda (2026)

Analisou-se, ainda, uma terceira biomassa proveniente do processo de beneficiamento antes da produção que é o pó de malte obtido pela aspiração e limpeza dos grãos de cevada malteada. Para a realização da análise do PCI dessa biomassa, realizou-se a medição do poder calorífico por meio da bomba calorimétrica IKA C-200 e um banho termostático TE-184 (Figura 49). Segundo a metodologia adotada (Mbié, 2024), o PCI de uma amostra é obtido a partir da média de, no mínimo, duas determinações em calorímetro.

Figura 49 - Bomba calorimétrica IKA C-200 e banho termostático



Fonte: Adaptado de Mbié (2024)

O pó de malte (Tabela 10) apresentou valores de PCS muito semelhantes aos da serragem (Tabela 9), demonstrando seu potencial como combustível para o reator de gaseificação.

Tabela 10 - Resultados analíticos do pó de malte (PCI e PCS)

Pó de Malte	Peso amostra (kg)	Média PCI (kJ/kg)	Média PCI (Kcal/kg)	Média PCI (kJ/kg)	Média PCS (Kcal/kg)
Amostra 1	1,192	17258	4125	18659	4459
Amostra 2	1,119	17386	4155	18795	4492
Média	1,156	17322	4140	18727	4476

Fonte: Autor – Adaptado de UFU (2025)

Mediante a correlação aplicada aos dados de PCS das três biomassas, calculou-se o Poder Calorífico Inferior (PCI) para cada amostra, conforme sintetizado na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados analíticos das biomassas (PCI e PCS)

Amostra	Média PCI (kJ/kg)	Média PCI (Kcal/kg)	Média PCS (kJ/kg)	Média PCS (Kcal/kg)
Bagaço de malte	21036	5027	22741	5435
Serragem	16429	3927	17762	4245
Pó de malte	17322	4140	18726	4476

Fonte: Autor - Adaptado de UFU (2025)

Os valores de PCI apresentados na Tabela 11, foram obtidos utilizando-se o fator de conversão de 0,925 que é um coeficiente médio para esse tipo de biomassa possibilitando-se estimar o Poder Calorífico Inferior (PCI) a partir do Poder Calorífico Superior (PCS) de combustíveis. Para calcular os resultados usamos a Equação 7:

$$PCS = \frac{PCI}{0,925} \quad (7)$$

Sob a perspectiva do teor de umidade, os testes evidenciaram que essa variável representa um gargalo operacional no caso do bagaço de malte *in natura*, logo após sua descarga do processo produtivo. Dessa forma, para viabilizar as análises subsequentes, submeteu-se uma alíquota do bagaço à secagem em estufa. Esse procedimento permitiu atingir níveis reduzidos de umidade, viabilizando a comparação direta de suas propriedades energéticas com as demais biomassas (serragem e pó de malte), que apresentam baixa umidade higroscópica natural.

A partir desse material realizou-se a análise para determinação dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas, bem como a determinação do teor de carbono fixo das amostras de resíduos do bagaço de malte (Figura 50) seguiu o protocolo da ABNT NBR 8112/1986. Realizou-se a análise termogravimétrica cujo objetivo é verificar a degradação térmica da amostra, ou seja, a perda de massa em função da temperatura foi feita de acordo com a norma

ASTM E1131/2014 (Mbié, 2024).

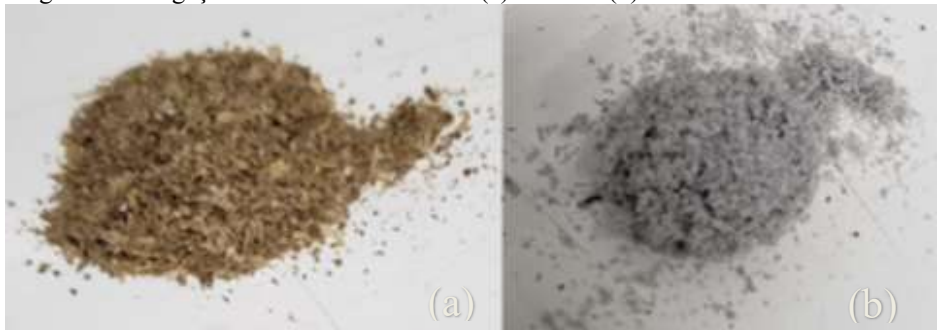
Figura 50 - Analisador Termogravimétrico TGA-2000 A



Fonte: Adaptado de Mbié (2024)

A Figura 51 mostra o resultado do bagaço seco triturado (a) e o residual de cinzas resultantes (b).

Figura 51 - Bagaço de malte seco triturado (a) e cinzas (b)



Fonte: UFU (2025)

Após o processamento térmico do bagaço de malte seco foram obtidos os resultados da Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados termogravimétricos do bagaço de malte

Amostra	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
Bagaço de malte	6,49	72,17	3,05	24,78

Fonte: UFU (2026)

Com isso foi possível comparar os resultados termogravimétricos do bagaço de malte (Tabela 12) e do pó de malte (Tabela 13):

Tabela 13 - Resultados termogravimétricos pó de malte

Pó de Malte					
Peso (g)		Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
Amostra 1	5,99	6,36	75,52	3,47	21,01
Amostra 2	5,68	6,42	75,75	3,48	20,76
Média	5,83	6,39	75,64	3,47	20,89

Fonte: UFU (2026)

Os resultados termogravimétricos apresentaram expressiva similaridade entre as duas biomassas evidenciando a viabilidade técnica para utilização conjunta. No entanto, para o bagaço de malte, o elevado teor de umidade ratifica a necessidade de implantação de um sistema de pré-secagem como etapa condicionante para a sua valorização energética.

Para efeito comparativo, analisou-se a composição do gás de síntese obtido na gaseificação da serragem. Como o comportamento desse material de referência se assemelha ao do pó de malte, esses dados forneceram a fundamentação requerida para a modelagem teórica da performance do bagaço de malte no reator de gaseificação, cujo PCI 4467 kJ/kg, de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14 - Análise do *syngas* proveniente da serragem

Análise do <i>Syngas</i>	Antes do lavador sem filtro	
	Área	%
Metano	2408906,7	2,816
Etileno	149984,55	0,013
Eteno	1067228,7	0,517
Etano	299457,9	0,137
Propadieno	10291,3	0,004
Propino	0	0,000
Propeno	196282,65	0,030
Propano	30696,1	0,019
Iso-Butano	0	0,000
<i>n</i> -Butano	0	0,000
Hidrogênio	1040,85	10,070
Oxigênio	10129,1	1,236
Nitrogênio	497596,3	54,200
Monóxido de Carbono	181328,25	21,840
Dióxido de Carbono	81941,35	9,120
PCI (kJ/kg)	4467	

Fonte: UFU (2026)

Com esses dados obtidos determinou-se os parâmetros reais de aplicação da tecnologia de gaseificação na indústria com uso do *syngas* em um circuito para a produção de vapor para ser utilizado no processo na unidade produtora de cerveja. Os dados filtrados são apresentados na Tabela 15 considerando-se um processo de secagem do bagaço até 15,0 % de umidade, percentual suficiente para o reator funcionar e garantir armazenagem segura de bagaço seco, sendo calor líquido positivo pois o *syngas* será usado em parte para o processo de secagem e o restante para outros fins disponíveis.

Tabela 15 - Tabela consolidada (exemplo) para avaliação do calor e vapor disponíveis. Cálculo para CDR a 15,0 % de umidade e vapor saturado de 180 °C

Bagaço de malte [ton/dia]	204
Umidade [%]	77,5
Resíduo CDR [ton/dia]	52,8
PCI CDR [kJ/kg]	21036,0
Calor total CDR [GJ/dia]	943,8
<i>Syngas</i> [ton/dia]	137,2
PCI <i>Syngas</i> [kJ/kg]	4467
Calor total <i>Syngas</i> [GJ/dia]	613,1
Eficiência [%]	65,0
Calor secador [GJ/dia]	409,8
Vapor saturado [ton/dia]	80,5

Fonte: UFU (2026)

Ressalta-se que a vazão de 204 toneladas por dia atribuída ao bagaço de malte na Tabela 15 assume caráter meramente ilustrativo, servindo de base para a estimativa do calor gerado e da produção de vapor saturado correspondentes. Conforme fundamentado previamente, essa escala operacional oscilará em função do *mix* de produção fabril, variando em razão direta da quantidade e da tipologia de malte processadas em cada batelada.

Por meio de todas as informações anteriores complementadas pelo número de fabricações dia, quantidade de bagaço gerado e umidade do material na saída do processo, foram obtidos os dados de produção de calor e vapor saturado partindo-se de um cálculo onde considerou-se a obtenção de uma umidade de 15,0% no material a ser processado no sistema, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 - Dados de bagaço gerado por dia em relação ao volume de líquido produzido. Cálculo para CDR a 15,0 % de umidade e vapor saturado de 180 °C

Número de fabricações [dia]	8	10	12
Bagaço de malte [ton/dia]	204	215	258
Umidade [%]	77,5	77,5	77,5
Resíduo CDR [ton/dia]	52,8	55,6	66,8
PCI CDR [kJ/kg]	21036,0	21036,0	21036,0
Calor total CDR [GJ/dia]	943,8	994,7	1193,7
Syngas [ton/dia]	137,2	144,6	173,6
PCI Syngas [kJ/kg]	4467	4467	4467
Calor total Syngas [GJ/dia]	613,1	646,1	775,3
Eficiência [%]	65,0	65,0	65,0
Calor secador [GJ/dia]	409,8	431,9	518,3
Vapor saturado [ton/dia]	80,5	84,8	101,8

Fonte: Autor adaptado de UFU (2026)

Para finalização sobre a comparação entre o modelo atual e o modelo proposto, algumas outras informações sobre a produção da unidade geradora de bagaço de malte foram coletadas. Com esses dados pôde-se realizar o desenvolvimento completo da análise energética do trabalho e essas fazem parte da avaliação para viabilidade da proposta:

- Quantidade média de energia consumida na fábrica: 104.395 KWh/dia;
- Quantidade de vapor consumido: 250 toneladas;
- Combustível utilizado na caldeira e quantidade consumida: Cavaco de eucalipto com

- 30% de umidade; 250 kg/m³ de densidade; 2.600 kcal/kg de PCU; consumo de 250 m³ por dia;
- Dados técnicos do equipamento: Caldeira LHC - 30 Alfa Laval - Grelha ventilada basculante;
 - Preço de venda do bagaço de malte úmido: R\$ 97,00 reais por tonelada;
 - Preço de compra do cavaco: R\$ 420,00 reais por tonelada. Como cada tonelada equivale a aproximadamente 3 m³ de cavaco então 1 m³ de cavaco corresponde ao valor de R\$ 140,00.

Como pode-se analisar na Tabela 16, aplicando o valor médio de geração de bagaço por dia que é de 215 toneladas, isso irá gerar 646,1 GJ de calor/dia. Como sabe-se, devido à alta umidade do bagaço, é necessária uma etapa de pré-secagem dessa biomassa antes da utilização. Com isso tem-se um valor de sobra de 214,4 GJ de calor/dia e esse número já é o resultado final descontando-se os 431,9 GJ de calor/dia que é a quantidade necessária de calor para secagem do bagaço de malte de 77,5% para os 15,0% de umidade funcionando em um ciclo fechado. Transformando esse calor sobressalente pode obter-se uma quantidade de vapor saturado de 84,8 ton./dia resultante do processo de tratamento térmico e produção de *syngas* a partir do bagaço de malte.

A fábrica consome 250 m³ de cavaco de eucalipto e gera 250 ton./dia de vapor e, com a utilização desse vapor saturado de 84,8 ton./dia produzido pela gaseificação, tem-se uma economia média de 28,27 m³ de cavaco de eucalipto por dia o que seriam relativos a uma economia anual de R\$ 3.419.410,00 aproximadamente. Lembrando que esses valores podem ainda ser maiores caso a produção chegue ao seu patamar superior de bagaço de malte disponível para processamento e consequentemente uma maior disponibilidade de vapor saturado residual.

Em analogia ao modelo atual da destinação desse bagaço de malte, que é vendido a um valor de R\$ 97,00 reais a tonelada de bagaço úmido, essas mesmas 215 toneladas de bagaço gerariam uma receita anual de R\$ 5.005.200,00.

Outro ponto importante ainda sobre a tecnologia de gaseificação é que existem outros resíduos na unidade que podem ser processados além das biomassas sugeridas e atualmente também são vendidos, como papelão e plástico, sendo esses viáveis para contribuir com o processo após determinação de seu retorno energético e possíveis economias ainda em relação a utilização do cavaco contribuindo com todo o sistema.

6 CONCLUSÕES

6.1 Integração do Sistema de Secagem e Circuito Térmico

O estudo da aplicação do bagaço de malte cervejeiro na tecnologia de gaseificação partiu da premissa de viabilizar uma rota nobre de transição energética para este subproduto, buscando superar sua destinação convencional de baixo valor agregado. A investigação experimental e calorimétrica ratificou o elevado potencial energético da biomassa, cujas propriedades físico-químicas em base seca e comportamento termogravimétrico (TGA) demonstraram ampla convergência com a matriz de referência (serragem) e com o pó de malte. Nesse contexto, a elucidação do comportamento operacional do material constitui um avanço técnico fundamental para a modelagem do reator e para o correto equacionamento do balanço de massa e energia do processo.

Contudo, os ensaios analíticos demonstraram a inviabilidade do processamento direto do bagaço de malte *in natura* no reator gaseificador sem uma etapa prévia de desidratação, em virtude do seu elevado teor de umidade residual (aproximadamente 77,5%). Dessa forma, a aplicação do bagaço de malte como insumo energético condiciona-se ao projeto e à integração de um sistema de secagem acoplado, dimensionado para promover a redução do teor de umidade a patamares operacionais adequados (~15,0%), empregando uma fração do calor útil gerado na própria unidade de gaseificação.

Sob essa configuração, a biomassa é processada no reator, enquanto parte da energia térmica gerada no sistema retorna ao secador para o pré-tratamento do bagaço de malte, adequando sua umidade às especificações de projeto. Esse arranjo constitui um circuito fechado de secagem e recuperação energética (*closed-loop*), conforme parametrizado na Tabela 17.

A concepção desse secador deve basear-se em equipamentos destinados ao processamento contínuo de biomassas de elevada umidade inicial e cinética de secagem rápida, à semelhança dos sistemas aplicados ao bagaço de cana-de-açúcar e a resíduos cítricos. É indispensável que o equipamento disponha de um mecanismo de movimentação e revolvimento contínuo, a fim de evitar a aglomeração da massa úmida e assegurar a eficiência da transferência de massa e calor, mesmo sob condições operacionais severas.

6.2 Viabilidade financeira (Gaseificação x Modelo atual)

A avaliação financeira comparativa entre os cenários indica que o modelo atual de comercialização do bagaço *in natura* somente para alimentação animal auferiria uma receita anual

de R\$ 5.005.200,00. Em contrapartida, a implementação da rota de gaseificação proporciona uma redução de custos operacionais estimada em R\$ 3.419.410,00, decorrente da substituição direta do consumo de cavaco de madeira na geração de energia térmica. Sob a análise restrita ao balanço financeiro direto entre receita de venda e despesa evitada de combustível, o modelo comercial atual apresenta maior rentabilidade imediata.

Contudo, a viabilidade global da transição tecnológica deve considerar os externalismos positivos e as diretrizes da Economia Circular. A autogeração de energia limpa no próprio sítio fabril reduz a carga térmica requerida das caldeiras convencionais e promove a valorização local do subproduto. Adicionalmente, a eliminação do transporte rodoviário, tanto do cavaco de madeira até a planta quanto do bagaço de malte até as propriedades rurais, mitiga o consumo de óleo diesel e as emissões associadas de gases de efeito estufa (GEE) e material particulado pela frota logística.

A substituição de insumos e a descarbonização da cadeia de suprimentos viabilizam, ainda, a quantificação e potencial certificação de créditos de carbono no mercado voluntário ou regulado. Do ponto de vista sanitário e socioambiental, o consumo interno imediato do bagaço extingue os riscos contaminações biológicas e odores associados à decomposição da biomassa estocada *in natura*. Por fim, a incorporação da tecnologia de gaseificação fortalece o posicionamento institucional e a governança socioambiental (ESG) da organização, consolidando seu compromisso com a transição energética e a minimização de passivos ambientais.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

Diante das conclusões obtidas e das oportunidades de otimização identificadas ao longo deste estudo, recomendam-se as seguintes linhas de pesquisa e desenvolvimento para o aprofundamento do tema:

- **Dimensionamento e Modelagem Fenomenológica do Secador:** Desenvolver o projeto conceitual, dimensionamento térmico e fluidodinâmico (incluindo simulação via CFD - *Computational Fluid Dynamics*) do secador contínuo proposto, avaliando a cinética de secagem do bagaço de malte e o impacto da recirculação de gases quentes no rendimento térmico do sistema em malha fechada (*closed-loop*).
- **Análise de Inserção e Formação de Alcatrão (*Tar*):** Investigar experimentalmente a formação de alcatrão e compostos condensáveis no *syngas* gerado na gaseificação da

mistura (co-gaseificação) de bagaço de malte seco e pó de malte, avaliando a eficiência do sistema de *scrubber* de lavagem e a necessidade de *cracking* catalítico.

- **Avaliação Financeira Completa (CAPEX/OPEX) e Análise de Sensibilidade:** Realizar uma análise de viabilidade econômica aprofundada, considerando os investimentos em capital (CAPEX) para aquisição do gaseificador, secador e periféricos, bem como os custos operacionais (OPEX), correlacionando-os com cenários de variação no preço do cavaco de madeira, custo da energia elétrica e precificação de créditos de carbono.
- **Estudo de Co-gaseificação e Blendagem de Biomassas:** Avaliar o comportamento da gaseificação em escala piloto utilizando diferentes proporções de mistura (*blends*) entre bagaço de malte, pó de malte e serragem, mapeando a temperatura de fusão das cinzas e o potencial de formação de incrustações (*slagging/fouling*) no reator.
- **Valoração Metodológica de Créditos de Carbono:** Desenvolver um inventário detalhado de Pegada de Carbono (Avaliação do Ciclo de Vida - ACV) comparando a rota atual de transporte/destinação para ração animal com a rota de autogeração energética, quantificando com precisão os créditos de carbono passíveis de certificação no mercado voluntário.
- **Caracterização Físico-Química e Aplicação das Cinzas:** Analisar a composição elementar e mineralógica das cinzas geradas na gaseificação das biomassas cervejeiras para avaliar sua viabilidade de incorporação como remineralizador de solo (fertilizante/*biochar*) ou como adição mineral em materiais de construção civil, promovendo o fechamento do ciclo de vida dos materiais e a eliminação do descarte de passivos ambientais (**Aterro Zero**).

7 REFERÊNCIAS

- AFONSO, Adriano Divino Lima. **Secagem e armazenamento de grãos**. Viçosa: CPT, 2001.
- AGRÁRIA MALTE. **Guia Prático de Produção para Cervejarias**. Guarapuava, 2025. https://www.agraria.com.br/extranet_2016/uploads/AgromalteArquivo/guia_pratico_producao_de_cervejas_cervejarias_1596195085250.pdf. Acesso em: 5 set. 2025.
- ALNOUSS, Ahmed; MCKAY, Gordon.; AL-ANSARI, Tareq. **A comparison of steam and oxygen fed biomass gasification through a techno-economic-environmental study**. Energy Conversion and Management, v. 208, n. February, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112612>. Acesso em: 05 ago. 2025.
- ALNOUSS, Ahmed; MCKAY, Gordon.; AL-ANSARI, Tareq. **Production of syngas via gasification using optimum blends of biomass**. Journal of Cleaner Production, v. 242, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118499>. Acesso em: 05 ago. 2025.
- ANDRADE, Rubenildo Vieira de. **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1720>. Acesso em: 03 jul. 2025.
- ASSUMPÇÃO, Ruy Morganti Valente. **Gaseificação de madeira e carvão vegetal**. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais /CETEC. Belo Horizonte, 1981.
- BARBOSA-CÁNOVAS, Gustavo Valdez; VEGA-MERCADO, Humberto. **Dehydration of Foods**. New York, NY: International Thomson Publishing, 1996.
- BIAGI, João Domingos; BERTOL, Ricardo. **Secagem de grãos**. Campinas: UNICAMP, 2005.
- BRAGA, Renata Martins. **Pirólise rápida catalítica do capim elefante utilizando materiais mesoporosos e óxidos metálicos para deoxigenação do bio-óleo**. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/13017>. Acesso em: 12 jul. 2025.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 20 set. 2025.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-o-relatorio-sintese-do-balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 20 set. 2025.

BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Portal EMBRAPA**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/47793295/cevada-cultivares-da-embrapa-presentes-em-70-da-area-de-cultivo>. Acesso em: 29 set. 2025.

BROOKER, Donald B.; BAKKER-ARKEMA, Fred W.; HALL, Carl W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

CANES, Suzy Elizabeth Pinheiro. **Potencial Energético - Uma abordagem da geração de energia elétrica utilizando casca de arroz e resíduos da madeira através de estudo de caso**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/26735?show=full>. Acesso em: 12 jul. 2025.

CASTRO, Evelin Monique Saibro de; FONTOURA, Luiz Antonio Mazzini; SOUZA, Guilherme de. **Avaliação do uso de biomassas do Rio Grande do Sul para a geração de energia via co-combustão com carvão mineral**. 57º Congresso Brasileiro de Química, Gramado, 2017. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2017/trabalhos/9/12274-25254.html>. Acesso em 8 jun. 2026.

COELHO, Suani Teixeira; MARTINS, Osvaldo Stella; SANTOS, Sandra Maria Apolinário dos. **Estado da arte da gaseificação**. Centro Nacional de Referência da Biomassa. São Paulo, 2002.

COFEE & CLIMATE TOOLBOX. **Secador solar**. 2026. Disponível em: <https://www.toolbox.coffee/en-br/tools/401>. Acesso em: 23 mai. 2026.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares. **Biomassa para energia**. Editora Unicamp. Campinas, 2008.

DIAS, José; AZEVEDO, João Luís Toste. **Process report for the AL/2000/220 project Biomass Residue Utilization As Fossil Fuel Substitute For Power Generation and District Heating In The Mediterranean Region**. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2001.

DIAS, Marina Oliveira de Souza; MODESTO, Marcelo; ENSINAS, Adriano Viana; NEBRA Silvia Azucena; MACIEL FILHO, Rubens; ROSSELL, Carlos Eduardo Vaz. **Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems**. Energy, v. 36, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.024>. Acesso em: 12 jul. 2025.

DOING MACHINE. **Secador de bandeijas**. 2026. Disponível em: <https://www.doing-machine.com/pt/tray-dryer>. Acesso em: 23 mai. 2026.

DÖHRING, Björn; HRISTOV, Atanas; THUM-THYSEN, Anna; CARVELLO, Cristiano. **Reflections on the Role of Natural Capital for Economic Activity**. European Economy Discussion Papers. Discussion Paper 180, 2023. https://economy-finance.ec.europa.eu/system/files/2023-02/dp180_en.pdf. **cogeneration systems**. Energy, v. 36, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.024>. Acesso em: 12 jul. 2025.

ELIAS, Moacir Cardoso. **Tecnologias para armazenamento e conservação de grãos, em médias e pequenas escalas**. 3. ed. Pelotas: Editora Universitária/UFPel, 2002.

FOUST, Alan Shivers.; WENZEL, Leonard A.; CLUMP, Curtis W.; MAUS, Louis.; ANDERSEN, Laird Bryce. Tradução de Horácio Macedo. **Princípios das operações unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

GAO, Ningbo; WANG, Xiao; QUAN, Cui; WU, Chunfei. **Study of oily sludge pyrolysis combined with fine particle removal using a ceramic membrane in a fixed-bed reactor**. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, v. 128, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.03.002>. Acesso em: 17 jul. 2025.

GARCIA, Diones Cleri; BARROS, Ana Cristina da Silva Abreu; PESKE, Silmar Teodoro; MENEZES, Nilson Lemos de. **A secagem de sementes**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000200045>. Acesso em: 11 set. 2025.

GEANKOPLIS, Christie John. **Transport Processes and Separation Process Principles**. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. **A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems**. Journal of Cleaner Production, v. 114, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>. Acesso em: 12 jul. 2025.

GITMAN, Lawrence Jeffrey. **Princípios de administração financeira**. Pearson Education, 12ª edição. São Paulo, 2010.

GRELBEX TECHNOLOGIES. **Secador de tambor rotativo**. 2026. Disponível em : <https://www.directindustry.com/pt/prod/grelbex/product-4570192-2599686.html>. Acesso em 23 mai. 2026.

GRIFFIN MACHINERY. **Secador flash**. 2026. Disponível em: <https://www.griffinmachinery.com/pt-br/secador-spin-flash/>. Acesso em 23 mai. 2026.

HARALAMBOPOULOS, Anastasios Dias; POLATIDIS, Heracles. **Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision-making framework**. Renewable Energy. 2003. v. 28. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00072-1](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00072-1). Acesso em: 09 ago. 2025.

HAVILAH, Pulla Rose; SHARMA, Amit Kumar; GOVINDASAMY, Gopalakrishnan; MATSAKAS, Leonidas; PATEL, Alok. **Biomass Gasification in Downdraft Gasifiers: A Technical Review on Production, Up-Gradation and Application of Synthesis Gas**. Energies, v. 15, n. 11, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15113938>. Acesso em: 14 set. 2025.

HITACHI Zosen INOVA AG. **Secador de leite fluidizado**. 2026. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/hitachi-zosen-inova-ag/product-90437-2524719.html>. Acesso em: 23 mai. 2026.

HUBER, George Willis; IBORRA, Sara; CORMA, Avelino. **Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts, and Engineering**. Chemical Reviews, v. 106, n. 9, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/cr068360d>. Acesso em 18 out. 2025.

ILBAHAR, Esra; ÇEBİ, Selçuk; KAHRAMAN, Cengiz. **A state-of-the-art review on multi-attribute renewable energy decision making**. Energy Strategy Reviews, v. 25, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.04.014>. Acesso em 18 out. 2025.

INFURNA, Giulia; CARUSO, Gabriele; DINTCHEVA, Nadka Tzankova. **Sustainable containing biochar particles: A review**. National Library of Medicine. Polymers (Basel). 2023 Jan 9;15(2):343. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15020343>. Acesso em: 2 ago. 2025.

KOSASIH, Engkos Achmad. **Progress and Challenges of grain drying technologies in Indonesia**. SNTTM, 2025.

KUNZE, Wolfgang. **Brewing and Malting Technology**. Editora VLB. Berlin, Alemanha, 2014.

LIMA, Luiz Mário Queiroz; LIMA, José Alcides Queiroz; COSTA FILHO, Abel de Oliveira; SANTOS, Ailton Luiz dos; PEREIRA, Castro Pereira. **Sistema de tratamento e valorização de RSU via gaseificação**. Revista FT - Engenharias, Volume 28 – Edição 130/JAN 2024 / 31/01/2024.

Disponível em: <https://revistaft.com.br/sistema-de-tratamento-e-valorizacao-de-rsu-via-gaseificacao/>. Acesso em: 10 set. 2025.

LYNCH, Kieran Michael.; STEFFEN, Eric J.; ARENDT, Elke Karin. **Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health**. Journal of the Institute of Brewing, v. 122, n. 4, p. 553–568, 2016. DOI: 10.1002/jib.363.

MALTERIA ORIENTAL S. A. **Processo de Malteação**. Montevideu, 2026. Disponível em: <https://www.malteriaoriental.com.uy/pb/planta-industrial/#produccion-malta>. Acesso em: 30 mai. 2026.

MARTINS, Ricardo Ramos; FRANCO, João Batista da Rosa; OLIVEIRA, Paulo Armando Victor de. **Tecnologia de secagem de grãos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011.

MATSAKAS, Leonidas; GAO, Qiuju; JANSSEN, Stina; ROVA, Urika; CHRISTAKOPOULOS, Paul. **Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals**. Electronic Journal of Biotechnology, v. 26, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2017.01.004>. Acesso em 05 out. 2025.

MONTEIRO, Vitor Alberto Lemes. **Modelagem Termodinâmica de Gás de Síntese de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos com Simulações de Ciclos de Potência a Gás e Vapor**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-24-Gaseificadores-de-leito-fixo-a-Ascendente-b-Descendente-c-de_fig1_339363883. Acesso em: 18 set. 2025

MOURA, Briggida Dantas de; MORAES FILHO, Francisco Canindé; OLIVEIRA, Edson Leandro de; OLIVEIRA, Jackson Araújo de. **Estudo da secagem do bagaço de maracujá em secador rotatório: Aplicação de modelos semi-empíricos**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Mossoró, v. 9, n.1, p.50-58, 2014.

MUJUMDAR, Arun Sadashiv. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

MURRAY, Alan; SKENE, Keith; HAYNES, Kathryn. **The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context**. Journal of Business Ethics, v. 140, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>. Acesso em 15 ago. 2025.

MUSSATTO, Solange Ines; DRAGONE, Giuliano; TEIXEIRA, José António; ROBERTO, Inês Conceição. **Total reuse of brewer's spent grain in chemical and biotechnological**

processes for the production of addedvalue compounds. Bioenergy: Challenges and Opportunities. International Conference and Exhibition on Bioenergy. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2008.

MUSSATTO, Solange Ines; DRAGONE, Giuliano, ROBERTO, Inês Conceição. **Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications.** Journal of Cereal Science, v. 43, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>. Acesso em 12 ago. 2025.

NAZZARENO RECYCLING TECHNOLOGY. **Secador de esteiras.** 2021. Disponível em: <https://www.nazzareno.it/pt/produtos/basic-solution/secadores-de-esteira>. Acesso em: 23 mai. 2026.

OLIVEIRA, Wanderley Pereira de; FREITAS, Luis Alexandre Pedro de; FREIRE, João Tavares. **Secagem de produtos farmacêuticos. Em: Fenômenos de Transporte em Sistemas Particulados: Fundamentos e Aplicações.** Universidade Federal de São Carlos. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química, 2009.

PERA, Hildo. **Geradores de vapor: um compêndio sobre a conversão de Energia com vistas à preservação da Ecologia.** Editora Fama, 2ª edição. São Paulo, 1990.

PEREIRA, Emanuele Graciosa; SILVA, Jadir Nogueira da; OLIVEIRA, Jofran Luiz de; MACHADO, Cássio S. **Sustainable energy: A review of gasification technologies.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, 2012.

PERRY, Robert Howard; GREEN, Donald William; MALONEY, James O'Hara. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1997.

PINJING, He; FAN, Lü; HUA, Zhang; LIMING, Shao. **Recent Developments in the Area of Waste as a Resource, with Particular Reference to the Circular Economy as a Guiding Principle.** Waste as a Resource, v. 37, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/9781849737883-00144>. Acesso em 21 jul. 2025.

RAHIM, Muhammad Roslan; TRISASONGKO, Annisa Palupi; JAAFAR, Muhammad Roslan Rahim, Annisa Palupi Trisasongko, Mohammad Nazri Mohd; OTHMAN, Norazila, RAMLI, Yanti; MALIK, Muhammad Syahiran Abdul; SAID, Mazlan. **Review: Development of Gasification Technology and Its Application.** Universiti Teknologi Malaysia. Jurnal Teknologi, v. 84, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v84.17709>. Acesso em 21 jul. 2025.

RAPAGNÀ, Sergio; DI CELSO, Giuseppe Mazziotti. **Devolatilization of wood particles in a hot fluidized bed: Product yields and conversion rates.** Biomass Bioenergy, v. 32, 2008.

REINOLD, Matthias Rembert. **Manual Prático de Cervejaria**. Editora Aden, São Paulo, 1997.

RODRIGUES, Rodolfo. **Modelagem cinética e de equilíbrio combinadas para simulação de processos de gaseificação**. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/303960217_Combined_kinetic_and_equilibrium_modeling_to_simulation_of_gasification_processes_in_Portuguese. Acesso em: 26 set. 2025.

ROKEY, Galen J. **Pet food production**. Process description. p. 1–20, 2006.

SÁNCHEZ, Caio Glauco. **Tecnologia da Gaseificação**. Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, 2003.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Como o biocarvão pode ajudar em ações contra as mudanças climáticas**. Curitiba, 2025. Disponível em: <https://www.senaipr.org.br/tecnologiaeinovacao/blog/como-o-biocarvao-pode-ajudar-em-acoes-contras-as-mudancas-climaticas-1-36287-494349.shtml>. Acesso em: 18 set. 2025.

SCHEEPENS, Arno E.; VOGTLÄNDER, Joost Guillaume; BREZET, Johannes Cornelius. **Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: making water tourism more sustainable**. Journal Cleaner Production, v. 114, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.075>. Acesso em 23 set. 2025.

SILVA, Kleber Machado da; BAPTISTA, Marcelo Bruce; NITTA, Sílvia Tomoe. **Estudo do Processo de Geração de Gás de Síntese a Partir da Gaseificação da Biomassa**. Artigo publicado na revista eletrônica científica Connection Line da UNIVAG. Várzea Grande, 2017.

SILVA, Jadir Nogueira da; SOBRINHO, José Cardoso; SAIKI, Emílio T. **Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos**. Engenharia Agrícola, v. 24, 2004.

SILVA, Juarez de Souza e. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Aprenda Fácil, Viçosa, 2000. 502p.

SILVA, Juarez de Souza e; PRECCI, Roberto Lopes; SOBRINHO, José Cardoso; SILVA, Jadir Nogueira da. **Capítulo 4: Fontes de Energia para Secagem. Secagem e Armazenagem de Café - Tecnologia e Custos**. Universidade Federal de Viçosa, 2001.

SILVEIRA, José Luz; TUNA, Celso Eduardo; LAMAS, Wendell de Queiroz. **The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 20, 2013.

STEINECKER GMBH. **Steinecker Pegasus C.** Freising, 2025. https://www.steinecker.com/media/downloads/pegasus_en.pdf. Acesso em: 10 set. 2025.

STEINECKER GMBH. **Steinecker ShakesBeer.** Freising, 2025. <https://www.steinecker.com/en/products/mashing.php>. Acesso em: 10 set. 2025.

STEINECKER GMBH. **Steinecker Variomill and Powermill.** Freising, 2025. https://www.steinecker.com/media/downloads/variomill_powermill_en.pdf. Acesso em: 10 set. 2025.

TADINI, Carmen Cecilia; TELIS, Vânia Regina Nicoletti; MEIRELLES, Antonio José de Almeida; PESSOA FILHO, Pedro de Alcantra. **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos.** Ed. LTC, v. 2, Rio de Janeiro, 2016.

WANG, Lijun; WELLER, Curtis Lee; JONES, David Dean; HANNA, Milford A. **Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production.** Biomass and Bioenergy, v. 32, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.007>. Acesso em 21 jul. 2025.

WORD BIOENERGY ASSOCIATION. **Global Bioenergy Statistics.** 2022. Disponível em: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/221223%20WBA%20GBS%202022.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2025.

YANG, Yan; LIEW, Rock Keey; TAMOTHRAN, Arularasu Muthaliar; FOONG, Shin Ying; YEK, Peter Nai Yuh; CHIA, Poh Wai; TRAN, Thuan Van; PENG, Wanxi; LAM, Su Shiung. **Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review.** Environmental Chemistry Letters, v. 19, n. 3, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01177-5>. Acesso em: 7 ago. 2025.

ZEPPELIN SYSTEMS LATIN AMERICA. **Grãos de Malte e Cervejaria.** São Bernardo do Campo, 2026. Disponível em: <https://www.zeppelin-la.com/graos-malte-e-cervejaria>. Acesso em: 30 mai. 2026.

ZHANG, Lu, WU, Wei.; ZHANG, Yongjie, ZHOU, Xianchao. **Clean synthesis gas production from municipal solid waste via catalytic gasification and reforming technology.** Catalysis Today, v. 318, 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.02.050>. Acesso em: 7 ago. 2025.

ZHOU, Jinsong; CHEN, Qing; ZHAO, Hui; CAO, Xiaowei; MEI, Qinfeng; LUO, Zhongyang; CEN, Kefa. **Biomass-oxygen gasification in a high-temperature entrained-flow gasifier.** *Biotechnology Advances*, n. 27, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.04.011>. Acesso em 21 jul. 2025.