



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS INHUMAS
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

MICHELLE ARAUJO DA SILVA

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ENERGÉTICA DO REAPROVEITAMENTO DE
RESÍDUOS DE LÚPULO NA GERAÇÃO DE BIOENERGIA

INHUMAS
2025

MICHELLE ARAUJO DA SILVA

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ENERGÉTICA DO REAPROVEITAMENTO DE
RESÍDUOS DE LÚPULO NA GERAÇÃO DE BIOENERGIA

Trabalho de Conclusão de Curso, no formato de artigo científico, apresentado ao curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia de Alimentos, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Inhumas/IFG, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof Dr Fernando Pereira de Sá

Coorientadora: Prof. Dra Elisangela C. de Lima Borges.

INHUMAS

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Silva, Michelle Araujo da

S586 Avaliação da viabilidade energética do reaproveitamento de resíduos de lúpulo na geração de bioenergia [Manuscrito]. / Michelle Araujo da Silva – Inhumas: IFG, 2026.

35 f.: il.

Inclui bibliografia.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Pereira Sá.

Trabalho de Conclusão de Curso em Bacharelado em Ciência e Tecnologia de Alimentos – IFG/Câmpus Inhumas, 2025.

1. Resíduos. 2. Bionergia. 3. Lúpulo. 4. Sá, Fernando Pereira de (orient.). 5. Borges, Elisângela Cardoso de Lima (coorient.). I. Título.

CDD 633.61

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária

Maria Aparecida Rodrigues de Souza - CRB/1-1497

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Câmpus Inhumas – Biblioteca Atena



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Michelle Araujo da Silva

Matrícula: 20211030110316

Título do Trabalho: Avaliação da viabilidade energética do reaproveitamento de resíduos de lúpulo na geração de bioenergia

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Inhumas-GO, 26/01/2026.
Local Data

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS**

Michelle Araújo da Silva

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa da Monografia intitulada **AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ENERGÉTICA DO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE LÚPULO NA GERAÇÃO DE BIOENERGIA**, sob orientação de Fernando Pereira de Sa e coorientação de Elisangela Cardoso de Lima Borges, apresentada pela aluna **Michelle Araujo da Silva (20211030110316)** do Curso **Bacharelado em Ciência e Tecnologia de Alimentos (Câmpus Inhumas)**. Os trabalhos foram iniciados às **16:30** do dia **16/12/2025** pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Fernando Pereira de Sa** (Presidente)
- **Joao Baptista Chieppe Junior** (Examinador Interno)
- **Maria Carolina de Almeida** (Examinadora Interna)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo da Monografia, passou à arguição da candidata. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pela aluna, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota : 9,0

Observação / Apreciações:

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Fernando Pereira de Sa** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Joao Baptista Chieppe Junior**, em 18/12/2025 15:51:37 com chave 95193704dc4211f0a20a005056a537a4.
- **Maria Carolina de Almeida**, em 17/12/2025 21:38:48 com chave eb0260a8dba911f09838005056a537a4.
- **Fernando Pereira de Sa**, em 17/12/2025 19:21:28 com chave bbbf3f9adb9611f09cf3005056a537a4.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Ata de Projeto Final

Data da Emissão: 20/12/2025

Código de Autenticação: 72b6e2



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS	15
3.2 RESÍDUOS CERVEJEIROS	16
3.3 LÚPULO	18
3.4 PODER CALORÍFICO	19
4 METODOLOGIA	21
4.1 LÚPULO	21
4.1.1 COLETA DE RESÍDUOS DE LÚPULO	21
4.1.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE LÚPULO	21
4.1.3 ANÁLISE DE PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)	21
4.2 FORMULAÇÃO E PELETIZAÇÃO.....	22
4.2.1 SELEÇÃO DAS AMOSTRAS	22
4.2.2 HOMOGENEIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO	22
4.3 TESTES DE COMBUSTÃO	23
4.3.1 TESTES DE COMBUSTÃO DIRETA	23
4.4 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS	23
4.5 TRATAMENTO DOS DADOS	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO LÚPULO COMO MATRIZ LIGNOCELULÓSICA	25
5.2 PODER CALORÍFICO SUPERIOR DAS AMOSTRAS DE <i>PELLETS</i>	26
5.3 TEOR DE CINZAS E EFICIÊNCIA DE COMBUSTÃO	28
5.4 COMPORTAMENTO TÉRMICO E ESTABILIDADE DURANTE A COMBUSTÃO	29
5.5 SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DOS RESULTADOS	30
6 CONCLUSÃO	31
7 TRABALHOS FUTUROS	33
REFERÊNCIAS	34

AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ENERGÉTICA PARA O REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE LÚPULO NA GERAÇÃO DE BIOENERGIA

RESUMO

O estudo realizado no IFG câmpus Inhumas-GO no ano de 2025 avaliou o reaproveitamento de resíduos de lúpulo para geração de bioenergia por meio da peletização com sebo animal. Os resíduos de lúpulo, provenientes de microcervejarias, foram coletados, secos e caracterizados quanto à umidade, teor de cinzas e Poder Calorífico Superior (PCS). Foram preparadas cinco formulações de *pellets* com diferentes proporções de sebo animal (15%, 25%, 35%, 45% e 55%). Os resultados mostraram que a adição de sebo animal aumentou o PCS dos pellets, com a Amostra E (55% sebo) apresentando o maior PCS (31,035 MJ/kg). No entanto, a Amostra D (45% sebo) apresentou o melhor equilíbrio entre energia, estabilidade e baixa formação de cinzas. A peletização com sebo animal mostrou-se uma estratégia eficaz para produção de biocombustíveis sólidos, reduzindo o descarte de resíduos e promovendo a geração de energia renovável. Este trabalho representa uma etapa preliminar e fornecerá as bases para estudos futuros, que serão necessários para consolidar as conclusões e otimizar a produção de bioenergia a partir de resíduos agroindustriais, com foco na sustentabilidade do setor cervejeiro.

Palavras-chaves: Resíduos, lúpulo, *pellets*, poder calorífico, bioenergia.

ENERGY FEASIBILITY ASSESSMENT FOR THE REUSE OF HOP WASTE IN BIOENERGY GENERATION

ABSTRACT

The study held at IFG campus Inhumas-GO in the year 2025 evaluated the reuse of hop residues for bioenergy generation through pelletization with animal tallow. Hop residues obtained from microbreweries were collected, dried, and characterized in terms of moisture content, ash content, and Higher Heating Value (HHV). Five pellet formulations were prepared with different proportions of animal tallow (15%, 25%, 35%, 45%, and 55%). The results showed that the addition of tallow increased the HHV of the pellets, with Sample E (55% tallow) presenting the highest HHV (31.035 MJ/kg). However, Sample D (45% tallow) exhibited the best balance between energy yield, stability, and reduced ash formation. Pelletization with animal tallow proved to be an effective strategy for producing solid biofuels, reducing waste disposal while promoting renewable energy generation. This work represents a preliminary stage and provides the foundation for future studies aimed at consolidating the findings and optimizing bioenergy production from agro-industrial residues, with a particular focus on sustainability in the brewing sector.

Keywords: Waste, hops, pellets, calorific value, bioenergy.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ter me concedido a oportunidade de realizar este trabalho e por ter me guiado ao longo desta jornada.

Aos meus pais, Miguel Simplicio da Silva e Vera Lucia de Araujo, agradeço por todo o apoio, amor e dedicação que me foram dados ao longo da minha vida. Sem vocês, eu não teria alcançado este objetivo.

A minha pequena Ísis Araujo Moreira, que a cada dia me motiva a correr atrás dos meus sonhos e objetivos, meu maior incentivo e amor.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Pereira de Sá, agradeço pela orientação, paciência e apoio incondicional. Sua expertise e conhecimento foram fundamentais para a realização deste trabalho. Obrigado pelos anos de parceria!

Aos meus amigos agradeço pela amizade, pelo carinho, apoio e pela motivação. Vocês foram uma fonte de alegria ao longo desta jornada tornando-a mais leve e divertida.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, professores, amigos e colegas, agradeço pela colaboração e pelo apoio.

Muito obrigado!

Que cada busca pelo conhecimento e todo esforço, seja recompensado em forma de sonhos realizados !

Michelle Araujo da Silva

21/12/2025

1 INTRODUÇÃO

A expansão da indústria cervejeira, impulsionada pelo aumento do consumo de cervejas artesanais e pela criação de novas microcervejarias, têm resultado em uma produção crescente de resíduos sólidos orgânicos, com destaque para o lúpulo. Esse resíduo, que pode corresponder a até 85% da matéria-prima utilizada no processo cervejeiro (SALANTA *et al.*, 2023), é frequentemente descartado sem tratamento adequado, resultando no desperdício de matéria-prima e no aumento do impacto ambiental.

Além do lúpulo ser um resíduo sólido da produção cervejeira, contém altos teores de matéria orgânica e tem sido tradicionalmente utilizado na alimentação animal. No entanto, seu potencial para valorização energética permanece pouco explorado, apresenta-se como uma alternativa sustentável para a produção de bioenergia e a sua utilização traz redução do descarte inadequado de resíduos (COSTA *et al.*, 2021).

O aproveitamento sustentável desses resíduos vem ganhando destaque em pesquisas acadêmicas e no setor industrial, especialmente devido ao seu potencial para conversão em bioenergia. A necessidade de desenvolver tecnologias de aproveitamento de resíduos industriais é uma resposta direta à crescente demanda por soluções sustentáveis no setor energético. Este processo não apenas reduz o volume de resíduos sólidos, mas também permite a recuperação de energia, contribuindo para a autossuficiência energética das cervejarias e para a redução da dependência de combustíveis fósseis.

A adoção de tecnologias para reaproveitamento de resíduos não apenas reduz a geração de resíduos sólidos, mas também impulsiona a produção de energia renovável, promovendo maior autossuficiência energética no setor cervejeiro e diminuindo sua dependência de combustíveis fósseis. Do ponto de vista econômico, o reaproveitamento dos resíduos de lúpulo pode representar uma redução significativa nos custos operacionais das cervejarias (COSTA *et al.*, 2021). Rachwal *et al.* (2020) apontam que a valorização de resíduos industriais por meio da bioenergia cria uma oportunidade econômica para as pequenas e médias empresas, permitindo que elas se tornem mais competitivas no mercado (SALANTA *et al.*, 2023). A conversão de resíduos em biogás ou *pellets* energéticos gera uma fonte de energia renovável que pode ser utilizada nas próprias operações industriais, resultando em economias de escala e na redução da dependência de energia externa. Adicionalmente, a venda de bioenergia ou de *pellets* confeccionados a partir de resíduos de lúpulo podem gerar uma nova fonte de receita para essas empresas, criando um ciclo econômico sustentável.

Kopeć *et al.* (2021) discutem que a aplicação de resíduos de lúpulo em processos de compostagem e valorização industrial pode melhorar a eficiência energética de sistemas de geração de energia, além de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa. A compactação dos resíduos em *pellets* energéticos aumenta sua densidade e facilita seu uso em sistemas de combustão, ampliando o potencial de geração de calor e eletricidade de forma eficiente (SALANTA *et al.*, 2023).

A transformação de resíduos de lúpulo em biocombustíveis também oferece benefícios ambientais significativos. Segundo Călinoiu *et al.* (2019), o uso de resíduos orgânicos na produção de bioenergia não só reduz a poluição ambiental, mas também contribui para a conservação de recursos naturais e para a redução da pegada de carbono das indústrias (SAUCEDO *et al.*, 2024). Esse tipo de solução promove a sustentabilidade e atende às demandas globais por práticas mais limpas e eficientes na gestão de resíduos.

Além dos benefícios ambientais e econômicos, o reaproveitamento de resíduos de lúpulo também resulta em impactos sociais positivos. A implementação de tecnologias de bioenergia poderá gerar novas oportunidades de emprego, especialmente em comunidades rurais e industriais que dependam da produção de cerveja. Zahra *et al.* (2017) argumentam que a criação de novos postos de trabalho no setor de energia renovável pode estimular o desenvolvimento econômico local, especialmente em áreas que sofrem com a falta de infraestrutura energética. Deste modo, o aproveitamento de resíduos para geração de energia descentralizada oferece segurança energética para essas comunidades e promoverá o uso eficiente de recursos locais.

Diante do exposto, o presente projeto apresentou relevância ambiental, econômica, tecnológica e social do reaproveitamento de resíduos de lúpulo para a geração de energia. A transformação desses resíduos em uma fonte de energia renovável representa uma oportunidade para a indústria cervejeira ao adotar práticas sustentáveis, reduzir seus custos operacionais e contribuir para a preservação do meio ambiente. Além disso, o desenvolvimento de tecnologias de peletização abre novas fronteiras para a pesquisa científica e para a inovação no setor de bioenergia, por promover uma economia circular sustentável alinhada às políticas públicas de gestão de resíduos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade do reaproveitamento do resíduo de lúpulo para a geração de bioenergia, por meio do processo de peletização, com foco na sustentabilidade energética e na redução do impacto ambiental.

2.1.1 Objetivos específicos

- Caracterizar os resíduo de lúpulo utilizado no processo, avaliando suas propriedades físico-químicas e seu potencial para conversão energética;
- Confeccionar *pellets* a partir do resíduo cervejeiro, analisando sua eficiência como biocombustível;
- Avaliar o poder calorífico dos *pellets* confeccionados, comparando seu desempenho energético com outras fontes de biomassa.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/2010) estabeleceu diretrizes para a redução e reaproveitamento de resíduos orgânicos, incentivando práticas de economia circular. No setor cervejeiro, o aproveitamento de resíduos de lúpulo residuais para a geração de bioenergia se apresenta como uma alternativa sustentável, capaz de reduzir a destinação de resíduos para aterros sanitários e contribuir para a eficiência energética do setor. Ao adotar essa abordagem, as cervejarias podem melhorar sua imagem corporativa, demonstrando compromisso com a sustentabilidade e com a responsabilidade social.

Resíduos industriais são provenientes de processos industriais, sejam eles na forma sólida, líquida ou gasosa ou até mesmo com a combinação de todas essas fases. Tais materiais possuem características físicas, químicas ou microbiológicas que não se assemelham aos resíduos domésticos, como cinzas, lodos, óleos, materiais alcalinos ou ácidos, poeiras, borras, substâncias lixiviadas e resíduos gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição. Também não se assemelha aos bem como demais efluentes líquidos e emissões gasosas contaminantes atmosféricas (SARAIVA *et al.*, 2018).

As indústrias processadoras de matéria-prima, bem como as de subprodutos agroindustriais, geram grandes quantidades de resíduos. Eles são formados principalmente por resíduos sólidos como, cascas, caroços e bagaços, sendo eles provenientes do beneficiamento de diversas culturas (cana de açúcar, arroz, uva, cevada, entre outros). Em sua maioria, esses resíduos possuem alto valor nutritivo e são grandes fontes de proteínas, carboidratos, fibras e compostos bioativos. Esses materiais muitas vezes podem ser reaproveitados pela indústria farmacêutica, alimentícia e química. (SARAIVA *et al.*, 2018).

A agroindústria é responsável por cerca de 5,9% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro e participa da transformação dos produtos, do beneficiamento e no processamento de matérias primas provenientes da agropecuária, auxiliando na inclusão do meio rural e pequenos produtores na economia de mercado nacional e até mesmo internacional (EMBRAPA, 2020). A partir de pesquisas na área da agroindústria, é possível tanto melhorar a qualidade dos produtos analisando formas de reaproveitamento e biotransformação de seus resíduos gerados para diversas finalidades como a produção de ração animal, transformação em biofertilizantes sustentáveis, e até mesmo a geração de energia limpa (EMBRAPA, 2020).

Segundo Müller, (2022) o gerenciamento de resíduos sólidos industriais (RSI) é um desafio que exige cada vez mais atenção das organizações, seja no intuito de atender aos requisitos definidos pelas legislações atuais, ou nos investimentos significativos que a área ambiental demanda, e até mesmo em ações socioambientais nas comunidades em que se inserem. As dificuldades são ainda maiores quando as indústrias trabalham sozinhas nessa gestão, arcando com os custos legais, logísticos e de tratamento dos resíduos por elas gerados, que por sua vez possuem um grande custo, devida a alta produção e geração de grande volume de resíduos.

3.2 RESÍDUOS CERVEJEIROS

O Brasil é um dos maiores produtores de cerveja do mundo, gerando bilhões de litros anualmente (ABRACERVA, 2018). Esse crescimento leva a um aumento significativo de resíduos sólidos orgânicos, como o lúpulo e o bagaço de malte, que podem ser reaproveitados em processos energéticos para minimizar impactos ambientais.

A produção de cerveja é constituída por quatro principais ingredientes, a água, o malte, o lúpulo e a levedura. Ingredientes como lúpulo, malte e levedura possuem uma função diferente para cada tipo de cerveja produzida podendo agregar sabor, atenuação, amargor, dependendo da quantidade que é utilizada (LOHMANN, 2022). Os resíduos gerados nos processos agroindustriais cervejeiros representam perdas econômicas no processo produtivo, os resíduos sólidos são gerados principalmente nas etapas de filtragem, envase e tratamento da água, e se não receberem destinação adequada, podem proporcionar problemas ambientais, em razão da sua carga poluidora, alguns desses ingredientes não tem reaproveitamento após sua utilização, bem como o lúpulo, que é totalmente descartado.

Resíduos intrínsecos à produção da bebida dificilmente têm redução de sua quantidade gerada, como o bagaço de malte, o trub e a levedura residual. Dentre estes resíduos, o lúpulo, compostos ricos em proteínas e o malte, são responsáveis pela perda de aproximadamente 20 de cada 100 L de da água cervejeira utilizada no processo (MATHIAS; MELLO; SERVULO; 2014). Isto pelo fato de apresentarem alto teor de umidade, entre cerca de 80 e 90%, promovendo grande arraste de mosto e perda de extrato da cerveja, a depender da fase em que o resíduo é retirado, o que acaba acarretando a geração de significativas quantidades de efluentes (MATHIAS; MELLO; SERVULO; 2014).

O trub pode ser definido como a matéria morta composta pela decantação dos restos cervejeiros, que deve ser retirada da cerveja por causar aromas e sabores desagradáveis gerados ao longo do processo, e seu recomendado a extração de aromas (JESUS FILHO, 2022). Resultam da coagulação de proteínas com alta massa molar, porém podem conter mais substâncias que o acompanham no processo de decantação, como os compostos fenólicos encontrados no trub, que tem origem principalmente no lúpulo, o qual possui um conteúdo de substâncias bioativas relevantes (compostos fenólicos e ácidos amargos, como lupulona, cohumulona e humulona), que apresentam atividade antioxidantes e taninos e são polifenóis naturais de grande interesse (MATHIAS; MELO; SERVULO, 2014).

3.3 LÚPULO

Figura 1 - Flor de lúpulo e *pellet*.



Fonte: RURALTECTV.

Segundo Spósito *et al.* (2019) o lúpulo (*Humulus lupulus* L.) é uma planta pertencente à ordem Rosales e a família Cannabaceae, a qual possui apenas dois gêneros, *Cannabis* e *Humulus*. O gênero *Humulus* tem como característica ser constituído por plantas herbáceas, dioicas, anemófilas e trepadeiras dextrogiras, nativas de áreas de clima temperado do Hemisfério Norte. Apenas a espécie *H. lupulus* tem importância medicinal e industrial.

Os constituintes majoritários da flor de lúpulo são (%m/m): resinas totais (15-30%), proteínas (15%), celulose/lignina (43%), água (10%) e óleos essenciais (0,5-3%). Destaca-se que tais valores podem variar de acordo com a variedade do lúpulo, local e técnicas de cultivo (BENITEZ, *et al.*, 1997).

O lúpulo é amplamente utilizado na indústria cervejeira para conferir amargor e aroma à bebida. No entanto, seus resíduos pós-produção, frequentemente descartados sem aproveitamento, contêm compostos orgânicos com potencial para conversão energética, tornando-se uma alternativa viável para bioenergia. Além da produção cervejeira, os resíduos de lúpulos também podem ser provenientes de extração de óleos essenciais das flores por hidrodestilação. Nesses cones são produzidas resinas que são características do lúpulo e não são encontradas em nenhuma outra espécie de plantas (SPÓSITO, 2019).

O lúpulo e seus produtos são, em geral, conservados melhor a frio e longe de umidade, embora alguns tipos de extrato e de lúpulo pré isomerizados possam ser guardados em temperatura ambiente. A primeira porção adicionada é de lúpulo destinado ao amargor, a cerca de 60 minutos do final da fervura. A segunda adição, de lúpulos aromáticos, é feita entre vinte minutos após o início e o final da fervura, dependendo do perfil de aromas desejado. (AMBEV, 2018).

3.4 PODER CALORÍFICO

O poder calorífico, também denominado calor de combustão, corresponde à quantidade de energia liberada durante a combustão completa de um material e constitui um dos parâmetros essenciais para avaliar a aptidão energética de biomassas e resíduos sólidos. De acordo com a revisão conduzida por Esteves, Sen e Pereira (2023), o poder calorífico está diretamente relacionado à composição química da biomassa, especialmente à proporção de seus principais componentes estruturais — lignina, polissacarídeos (celulose e hemiceluloses) — e dos extrativos. A literatura destaca que esses constituintes apresentam valores energéticos bastante distintos: enquanto a lignina possui um poder calorífico superior elevado (entre 23,26 e 25,58 MJ/kg), os polissacarídeos apresentam valores mais baixos, próximos de 18,6 MJ/kg, e os extrativos podem atingir valores superiores a 30 MJ/kg, dependendo de sua natureza química.

O Poder Calorífico Superior (PCS), também denominado *higher heating value* (HHV), considera toda a energia liberada na combustão, incluindo o calor associado à condensação da água gerada. Esteves et al. (2023) ressaltam que o PCS é o principal parâmetro utilizado para caracterizar o potencial energético de biomassas, sendo influenciado pela quantidade de lignina, extrativos e pelo grau de oxidação dos componentes. Biomassas com maior teor de lignina e extrativos apresentam PCS mais elevados, enquanto o aumento da fração de polissacarídeos reduz o valor energético.

Resultados experimentais recentes corroboram essa tendência. O estudo de Bonfatti Júnior et al. (2025), avaliando componentes de *Eucalyptus*, mostrou que folhas — por apresentarem maiores teores de lignina e extrativos — registram os maiores PCS, enquanto cascas com maiores teores de cinzas exibiram menores valores. Os autores também identificaram correlações positivas significativas entre PCS e o teor de materiais voláteis, extrativos e lignina, além de correlação negativa entre PCS e cinzas, reforçando a influência direta da composição química e das propriedades imediatas sobre o valor energético do combustível.

Por sua vez, o Poder Calorífico Inferior (PCI) — ou *lower heating value* (LHV) — desconta a energia associada à vaporização da água, seja ela proveniente da umidade inicial do combustível ou da água gerada pela oxidação do hidrogênio durante a combustão. A obra *Biomass and Waste Conversion: Latest Advances and Prospects* destaca que essa diferença entre PCS e PCI torna-se mais expressiva à medida que aumentam a umidade e o teor de hidrogênio do material, resultando em menor energia efetivamente disponível em processos termoquímicos industriais.

4 METODOLOGIA

O estudo foi conduzido no Laboratório de Energia e Meio Ambiente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Inhumas, com o objetivo de avaliar o desempenho energético e térmico de *pellets* produzidos a partir de resíduos de lúpulo e sebo animal.

4.1 Lúpulo

4.1.1 Coleta de Resíduo de Lúpulo

Os resíduos de lúpulo utilizados no experimento foram coletados da microcervejaria Klaro, localizada em Goiânia-GO. O resíduo de lúpulo foi proveniente do final do processo de fervura do mosto e armazenado sob refrigeração até o momento da secagem e caracterização.

4.1.2 Caracterização do Resíduo de Lúpulo

A caracterização físico-química do resíduo de lúpulo foi realizada para avaliar suas propriedades como biomassa energética. O processo de caracterização incluiu:

- Secagem: O resíduo foi seco em estufa a 70°C por 24 horas para garantir a remoção da umidade excessiva. A massa inicial foi de 500 g, e após o processo de secagem e resfriamento, a massa final foi de 75 g.
- Umidade: A umidade foi determinada utilizando uma balança de infravermelho, marca Shimadzu, modelo SHI-MOC-63U, para garantir maior precisão.
- Teor de Cinzas: O teor de cinzas foi determinado conforme a ABNT NBR 8633 (LUTZ, 1985).

4.1.3 Análise de Poder Calorífico Superior (PCS)

O Poder Calorífico Superior (PCS) das amostras foi determinado utilizando uma bomba calorimétrica IKA, modelo C-200 (Figura 22), seguindo as normas da ABNT NBR 8633/1984. O PCS foi utilizado para estimar a eficiência energética dos *pellets* produzidos a partir dos resíduos de lúpulo.

Figura 2 - Bomba calorimétrica utilizada na análise de PCS.



Fonte: Própria.

4.2 Formulação e Peletização

4.2.1 Seleção das Amostras

Foram preparadas cinco formulações de *pellets* com diferentes proporções de sebo animal (A = 15%, B = 25%, C = 35%, D = 45%, e E = 55%), com base no peso da amostra. O objetivo foi avaliar o impacto da quantidade de sebo nas propriedades energéticas e térmicas dos *pellets*.

4.2.2 Homogeneização e Compactação

- Homogeneização: O sebo foi fundido a 65°C e adicionado ao lúpulo moído. A mistura foi realizada manualmente em um recipiente aquecido para evitar a segregação da gordura.

- Peletização: As amostras de lúpulo e sebo foram pesadas conforme cada tratamento (totalizando 6 g por amostra), e a mistura foi homogeneizada utilizando gral e pistilo. A compactação dos *pellets* foi realizada com o auxílio de duas seringas de plástico de 10 mL. Após a prensagem, os *pellets* passaram pelo processo de secagem.

- Secagem: As amostras de lúpulo e sebo foram secas até que atingissem uma umidade inferior a 20%, garantindo boas condições para a formação dos *pellets*.

4.3 Testes de Combustão

4.3.1 Testes de Combustão Direta

Os *pellets* produzidos foram submetidos ao processo de combustão para avaliar seu desempenho energético e estabilidade térmica. Os testes foram realizados em um sistema de combustão controlada, permitindo o registro da taxa de queima e a qualidade da chama gerada, de acordo com a Figura 3.

Figura 3 - *Pellet* em combustão.



Fonte: Própria.

- Monitoramento do Tempo de Combustão: O tempo de combustão foi registrado com o auxílio de um cronômetro, comparando o desempenho das diferentes formulações de *pellets*.

4.4 Método de Determinação do Teor de Cinzas

O teor de cinzas foi determinado conforme o método padrão da ABNT NBR 8633. As amostras de *pellets* foram pesadas e colocadas em um cadinho, aquecendo-as a 600°C em mufla por 3 horas até que todo o material orgânico fosse oxidado. O teor de combustão foi obtido pela diferença entre o peso inicial e o peso final da amostra, calculado com a equação:

$$\text{Combustão (\%)} = 100 - \text{Cinzas (\%)}$$

4.5 Tratamento dos Dados

Os dados coletados foram tabulados e analisados estatisticamente. A análise incluiu:

- Caracterização das amostras;
- Variação do poder calorífico médio conforme a formulação dos *pellets*;
- Comparação do tempo de combustão entre as diferentes formulações;
- Massa residual de cinzas após combustão, indicando a eficiência da queima.

Os resultados permitiram verificar a viabilidade do lúpulo como matéria-prima para biocombustíveis sólidos, consolidando uma abordagem sustentável para a valorização de resíduos orgânicos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do Lúpulo como Matriz Lignocelulósica

O resíduo de lúpulo, após secagem, apresentou umidade final inferior a 10%, valor adequado para aplicações energéticas, conforme diretrizes internacionais de biocombustíveis sólidos, como a ISO 17225-2, que estabelece limites semelhantes para *pellets* de madeira (Figura 4). A redução do teor de umidade contribui diretamente para o aumento da densidade energética do combustível sólido, uma vez que minimiza a fração de energia consumida na evaporação da água durante a combustão. Além disso, materiais com menor umidade apresentam maior estabilidade físico-química e menor suscetibilidade à degradação microbológica durante o armazenamento, favorecendo a eficiência do processo de conversão energética (Esteves *et al.*, 2023; Sá e Borges, 2025).

Figura 4 – *Pellet* de lúpulo confeccionado.



Fonte: Própria.

A função primária do lúpulo nas formulações foi atuar como matriz lignocelulósica, estrutura formada majoritariamente por celulose, hemicelulose e lignina. De acordo com Garcia *et al.* (2015), biomassas herbáceas apresentam aproximadamente 30–45% de celulose, 20–35% de hemicelulose e 10–25% de lignina. Essa composição permite elevada resistência mecânica após compressão e desempenha papel fundamental na peletização.

A lignina, em particular, apresenta comportamento termoplástico sob pressão e temperatura, agindo como ligante natural, fenômeno descrito por Garcia *et al.* (2015) ao estudar briquetes de diferentes biomassas. No presente estudo, essa característica possibilitou a incorporação homogênea do sebo bovino e conferiu resistência estrutural aos *pellets*, especialmente nas formulações com maiores teores de lipídios.

5.2 Poder Calorífico Superior das Amostras de *Pellets*

Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Poder Calorífico Superior e Umidade das Amostras

Amostra	PCS (MJ/kg)	Umidade (%)
A (15%)	23,64	9,22
B (25%)	25,243	9,85
C (35%)	27,286	8,29
D (45%)	29,263	5,94
E (55%)	31,035	6,96

Observa-se aumento contínuo no Poder Calorífico Superior (PCS) com a elevação da porcentagem de sebo bovino nas formulações avaliadas. Conforme discutido por Sathish et al. (2023), lipídios, especialmente triglicerídeos, apresentam elevado PCS, tipicamente entre 37 e 40 MJ/kg, em função do alto teor de carbono e hidrogênio e da baixa proporção de oxigênio em sua estrutura molecular. Em contraste, biomassas lignocelulósicas possuem maior fração de polissacarídeos oxigenados, o que limita seu desempenho energético, resultando em valores de PCS geralmente situados entre 17 e 20 MJ/kg.

Assim, a elevada fração lipídica do sebo bovino — cujo poder calorífico situa-se na faixa de 39 a 40 MJ/kg — contribui significativamente para o aumento praticamente linear do PCS observado nas misturas com lúpulo. Esse intervalo é consistente com os valores reportados para óleos, gorduras e triglicerídeos analisados por Esteves et al. (2023), que destacam a forte correlação entre composição elementar e densidade energética dos combustíveis sólidos e líquidos de origem biológica.

Por outro lado, o lúpulo apresenta PCS típico de biomassas lignocelulósicas de baixa densidade energética, em torno de 19 MJ/kg, comportamento semelhante ao observado para resíduos vegetais florestais e agroindustriais. Bonfatti Júnior *et al.* (2025), ao avaliarem componentes da biomassa de *Eucalyptus*, reportaram valores de PCS na faixa de 16 a 20 MJ/kg, associados à elevada proporção de holocelulose e à limitada fração de extrativos energéticos, reforçando a restrição estrutural dessas biomassas quanto ao potencial calorífico.

Resultados análogos foram observados por Sá e Borges (2025) ao caracterizarem biocompostos oriundos da biodigestão aeróbia de resíduos alimentares sem adição lipídica, cujos valores de PCS variaram entre 15,46 e 17,47 MJ/kg. Esses dados evidenciam que, mesmo após processos de estabilização e secagem, resíduos orgânicos predominantemente vegetais mantêm desempenho energético inferior quando comparados a misturas enriquecidas com frações lipídicas.

Nesse contexto, a Amostra E, contendo 55% de sebo bovino, apresentou o maior PCS (31,035 MJ/kg), superando não apenas as demais formulações avaliadas, mas também os pellets comerciais convencionais, cujos valores usualmente situam-se entre 17 e 19 MJ/kg para serragem, resíduos agroindustriais e biomassas compactadas. Esse resultado confirma que a incorporação controlada de resíduos lipídicos representa uma estratégia eficiente para a elevação da densidade energética de combustíveis sólidos derivados de biomassas vegetais, mantendo coerência com os fundamentos termoquímicos discutidos na literatura.

5.3 Teor de Cinzas e Eficiência de Combustão

A Tabela 2 apresenta o teor de cinzas e a combustão teórica.

Tabela 2 – Cinzas e Eficiência de Combustão

Amostra	Cinzas (%)	Combustão (%)
A (15%)	3,92	96,08
B (25%)	3,65	96,35
C (35%)	3,18	96,82
D (45%)	2,75	97,25
E (55%)	2,51	97,50

O teor de cinzas diminuiu proporcionalmente ao aumento do teor de sebo. Conforme Garcia *et al.* (2015), biomassas vegetais apresentam maior acúmulo de minerais e sílica, resultando em teores de cinzas entre 2–8%, enquanto gorduras animais geram resíduos inorgânicos mínimos.

As menores porcentagens de cinzas foram observadas nas amostras com maior teor lipídico (D e E), reforçando que a fração vegetal do *pellet* é a principal determinante da carga mineral residual. Cinzas reduzidas favorecem menor formação de escórias, menor desgaste de equipamentos e maior eficiência térmica.

5.4 Comportamento Térmico e Estabilidade Durante a Combustão

Os ensaios qualitativos de combustão mostraram diferenças importantes:

Amostra A (15% sebo): apresentou instabilidade estrutural. A baixa proporção de lipídios não conferiu coesão suficiente ao *pellet*, que se desintegrou antes mesmo da combustão.

As amostras B, C e D (25–45% sebo) apresentaram desempenho ótimo. Mantiveram integridade estrutural, queimaram de forma uniforme e apresentaram chama estável.

A Amostra E (55% de sebo), apesar de apresentar elevado Poder Calorífico Superior e menor teor de cinzas, exibiu fusão parcial durante a combustão, tornando-se pastosa ao longo da queima. Esse comportamento é compatível com o descrito por Sundar *et al.* (2022), que relataram que combustíveis ricos em lipídios podem sofrer amolecimento térmico e aglomeração em função do baixo ponto de fusão dos triglicerídeos presentes na matriz combustível.

5.5 Síntese e Otimização dos Resultados

A análise integrada de acordo com a Tabela 3 confirma que:

- A Amostra E maximiza propriedades energéticas, porém apresenta instabilidade térmica;
- A Amostra D alcança o melhor equilíbrio entre energia, baixa formação de cinzas e estabilidade durante a combustão.

Tabela 3 – Síntese dos Melhores Resultados

Maior PCS	Menor Cinzas	Maior Eficiência Teórica	Maior Estabilidade Mecânica	Melhor Balanço Geral
E (55%)	E (55%)	E (55%)	D (45%)	D (45%)

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos confirmam que o processo de peletização com gordura animal constitui uma estratégia tecnicamente eficaz para a produção de biocombustíveis sólidos de maior densidade energética. A adição de gordura animal mostrou-se o principal fator responsável pelo aumento do poder calorífico superior, pela melhoria da estabilidade da combustão e pela ampliação do tempo de queima das amostras avaliadas, evidenciando o papel decisivo da fração lipídica no desempenho energético dos pellets produzidos.

A incorporação do sebo bovino ao resíduo de lúpulo permitiu elevar significativamente o potencial energético do combustível sólido quando comparado a biomassas vegetais convencionais, mantendo teores reduzidos de cinzas e comportamento de combustão compatível com aplicações energéticas de pequena e média escala. Embora teores elevados de gordura tenham ocasionado fusão parcial durante a queima, os resultados indicam que proporções intermediárias representam um compromisso adequado entre elevado poder calorífico e estabilidade operacional do pellet.

Sob a perspectiva ambiental e de gestão de resíduos, este trabalho demonstra que resíduos orgânicos agroindustriais, frequentemente descartados ou subaproveitados, podem ser convertidos em produtos energéticos com valor agregado. A utilização conjunta de resíduos de microcervejarias e de gordura animal, ambos amplamente disponíveis e com destino final frequentemente problemático, contribui para a redução da quantidade de resíduos encaminhados a aterros sanitários e para a mitigação de impactos ambientais associados ao descarte inadequado.

Nesse contexto, os resultados obtidos dialogam diretamente com os princípios da economia circular e com as diretrizes de políticas públicas voltadas à gestão integrada de resíduos sólidos e à diversificação da matriz energética. A proposta apresentada configura-se como uma alternativa tecnológica descentralizada, capaz de ser adotada por microcervejarias e pequenos empreendimentos, promovendo a valorização energética de resíduos no próprio local de geração e reduzindo a dependência de fontes energéticas convencionais.

Portanto, o presente estudo não apenas comprova a viabilidade técnica dos pellets de lúpulo enriquecidos com gordura animal como biocombustível sólido, mas também evidencia seu potencial como ferramenta estratégica para a redução de resíduos, o aproveitamento energético local e o fortalecimento de práticas sustentáveis alinhadas às demandas ambientais, econômicas e regulatórias contemporâneas.

7 TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade do presente Trabalho de Conclusão de Curso, encontra-se em fase de preparação um artigo científico baseado nos resultados aqui obtidos, incorporando novas caracterizações das amostras e o aprofundamento da análise termoenergética dos pellets produzidos. Essas análises adicionais visam consolidar a compreensão do comportamento de combustão e do desempenho energético dos biocombustíveis sólidos desenvolvidos a partir de resíduos de lúpulo e gordura animal.

Entre as caracterizações já solicitadas e em fase de execução, destacam-se as análises térmicas por Termogravimetria (TG) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e a análise elementar de carbono (C) e enxofre (S). Esses ensaios permitirão correlacionar a composição química e estrutural das amostras com os eventos térmicos observados durante a combustão, fornecendo subsídios mais robustos para a interpretação do desempenho energético e da estabilidade térmica dos pellets.

Adicionalmente, propõe-se a realização de um estudo específico dos gases de combustão gerados durante a queima dos pellets, com foco na quantificação de espécies como CO_2 , CO , NO_x , SO_2 e O_2 residual. Essa abordagem possibilitará avaliar não apenas a eficiência da combustão, mas também o potencial impacto ambiental do biocombustível sólido, especialmente no que se refere às emissões atmosféricas associadas à presença de frações lipídicas e ao teor de enxofre das formulações.

Como desdobramentos complementares, estudos futuros poderão incluir ensaios de durabilidade mecânica, comportamento higroscópico, estabilidade durante o armazenamento e análises preliminares de viabilidade técnica e econômica do processo. A ampliação do escopo para outros resíduos agroindustriais e lipídicos também se apresenta como uma perspectiva relevante, fortalecendo a aplicação da proposta como alternativa descentralizada para a valorização energética de resíduos, em consonância com os princípios da economia circular e com as diretrizes de gestão sustentável de resíduos sólidos.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633:1984 Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1986. 13p.
- ABRACERVA – Associação Brasileira de Cervejas Artesanais. 2018. Disponível em: abracerva.com.br
- AMBEV. **Curso de Técnico Cervejeiro**. Apostila, 2018. Jacareí. 2015. 68p.
- BENITEZ, J., FORSTER, A., De Keukeleire, D., MOIR, M., SCHARPE, F., VERHAGEN, L., & WESTWOOD, K. (n.d.). **Hops and hop products**, Hans Carl, Nürnberg, Duitsland, 1997, pp. 185 ISBN 3-418-00756-2.
- Bonfatti Júnior, E. A. *et al.* (2025). Correlation between the heating value and the chemical characteristics of Eucalyptus biomass.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Lúpulo no Brasil : perspectivas e realidades. Alexander Creuz, Stéfano Gomes Kretzer. Brasília : **MAPA/SAF** 2022.175p.
- CĂLINOIU, L. F.; VODNAR, D. C. Sustainable use of byproducts from the brewing industry: **A review. Sustainability**, v. 11, n. 7, 2019.
- COSTA, A. P.; ROCHA, E. F.; OLIVEIRA, L. G. A matriz energética sustentável no Brasil: potencial e desafios. **Jornal de Pesquisa em Bioenergia**, v. 18, n. 2, p. 98-109, 2021.
- EMBRAPA, 2020. *Agroindústria - Portal Embrapa*. ([s.d.]). Embrapa.br. Recuperado 27 de abril de 2025, de <https://www.embrapa.br/grandes-contribuicoes-para-a-agricultura-brasileira/agroindustria>
- Esteves, B.; Sen, U.; Pereira, H. (2023). Influence of Chemical Composition on Heating Value of Biomass: A Review and Bibliometric Analysis. *Biomass and Waste Conversion: Latest Advances and Prospects (2022–2024)*.
- GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; ÁLVAREZ, A.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. **Study of biomass combustion wastes. Fuel**, v. 148, p. 152–159, 2015
- JESUS FILHO, Carlos Alberto de. **Potencial Tecnológico dos Resíduos de uma indústria cervejeira para produção de adubo orgânico tipo Bokashi: uma revisão**. 2022.
- KOPEĆ, M.; MIERZWA-HERSZTEK, M.; GONDEK, K.; WOLNY-KOŁADKA, K.; ZDANIEWICZ, M.; SUDER, A. The application potential of hop sediments from beer production for composting. **Sustainability**, v. 13, n. 11, 2021.
- LOHMANN, Andréia Menin. **Aproveitamento do lúpulo residual na obtenção de extratos de interesse para indústria cervejeira** / Andréia Menin Lohmann. – 2022.58 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2022.
- LUTZ, A. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos. **3. ed. Instituto Adolfo Lutz**: São Paulo, 1985. p. 27 - 28.
- MATHIAS, T. R. S.; MELLO, PPM de; SERVULO, E. F. C. Caracterização de resíduos cervejeiros. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. 2014. p. 1-8.
- MÜLLER, F. L. D., Becker Júnior, A. M., Moraes, J. A. R., & Machado, Ê. L. (2022). Revisão sistemática do gerenciamento coletivo de resíduos sólidos industriais com unidade de compostagem associada ao processamento do tabaco. **Engenharia sanitária e ambiental**, 27(5), 853–861. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220210128>

RACHWAŁ, K.; WAŚKO, A.; GUSTAW, K.; POLAK-BERECKA, M. Utilization of brewery wastes in food industry. **PeerJ**, v. 8, 2020.

SÁ, F. P. de; BORGES, E. C. de L. Termovalorização de resíduos sólidos orgânicos por processo aeróbio: combustível derivado de resíduos alimentares. *Latin American Journal of Energy Research*, v. 12, n. 4, p. 109–118, 2025.

Disponível em: <https://doi.org/10.21712/lajer.2025.v12.n4.p109-118>.

SALANȚA, L.; POP, O. L.; SALANȚA, O.; et al. Current strategies for the management of valuable compounds from hops waste for a circular economy. **Frontiers in Sustainability**, v. 4, 2023.

SAUCEDO, S. R.; LAU, T. W. Anaerobic digestion of food waste with the addition of biochar derived from microwave catalytic pyrolysis of solid digestate. **Energy Reports**, v. 6, 2024.

SARAIVA, B. R., Vital, A. C. P., Anjo, F. A., Cesaro, E. & Matumoto-Pintro, P. T. 2018. **Valorização de resíduos agroindustriais: fontes de nutrientes e compostos bioativos para a alimentação humana**. *Pubsaúde*, 1, a009. DOI:<https://dx.doi.org/10.31533/pubsaude1.a007>

SATHISH, T.; AĞBULUT, Ü.; KUMARI, V.; RATHINASABAPATHI, G.; KARTHIKUMAR, K.; JYOTHI, N. R.; KANDAVALLI, S. R.; VIJAY MUNI, T.; SARAVANAN, R. Energy recovery from waste animal fats and detailed testing on combustion, performance, and emission analysis of IC engine fueled with their blends enriched with metal oxide nanoparticles. **Energy**, v. 284, p. 129287, 2023.

SUNDAR, S.S.P.; VIJAYABALAN, P.; SATHYAMURTHY, R.; KAMALAKKANNAN, K.; KAMALAKKANNA, K. An experimental approach on the utilization of palm oil biodiesel with higher concentration of Al₂O₃ nanoadditive for performance enhancement and emission reduction. **Environmental Science and Pollution Control Series**, v. 29, n. 59, p. 89411-89425, 2022.

SPÓSITO, Marcel Bellato et al. A cultura do lúpulo. *Série Produtor Rural*, v. 68, 2019.

SAUCEDO, S. R.; LAU, T. W. Anaerobic digestion of food waste with the addition of biochar derived from microwave catalytic pyrolysis of solid digestate. **Energy Reports**, v. 6, 2024.

ZAHRA, S. A.; GEDAJLOVIC, E.; NEUBAUM, D. O.; SHULMAN, J. M. A typology of social entrepreneurs: Motives, search processes and ethical challenges. **Journal of Business Venturing**, v. 24, n. 5, p. 519-532, 2017.