

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE LODO DO
TRATAMENTO PRIMÁRIO DE EFLUENTE AVÍCOLA E SERRAGEM**

SHEILA SIMONE KUNH

CASCAVEL - PR

MAIO - 2022

SHEILA SIMONE KUNH

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE LODO DO
TRATAMENTO PRIMÁRIO DE EFLUENTE AVÍCOLA E SERRAGEM**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientadora:

Profa. Dra. Maria Hermínia Ferreira Tavares

Coorientadores:

Prof. Dr. Edson Antônio da Silva

Prof. Dr. Ricardo Sonsim de Oliveira

CASCADEL - PR

MAIO - 2022

Kunh, Sheila Simone

Viabilidade técnica e econômica da produção de briquetes de lodo do tratamento primário de efluente avícola e serragem / Sheila Simone Kunh; orientadora Maria Hermínia Ferreira Tavares; coorientador Edson Antônio da Silva; Ricardo Sonsim de Oliveira. -- Cascavel, 2022.

119 p.

Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2022.

1. Avicultura. 2. Briquete. 3. Energia. 4. Viabilidade econômica. I. Tavares, Maria Hermínia Ferreira, orient. II. Ricardo Sonsim de Oliveira, Edson Antônio da Silva; , coorient. III. Título.

SHEILA SIMONE KUNH**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE LODO DO TRATAMENTO PRIMÁRIO DE EFLUENTES AVÍCOLA E SERRAGEM**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, linha de pesquisa Saneamento Ambiental, APROVADA pela seguinte banca examinadora:



Orientadora - Maria Hermínia Ferreira Tavares

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Prof. Eduardo Lucas Konrad Burin
Departamento de Engenharias
e Exatas
SIAPE 1195230
UFPR - Setor Palotina

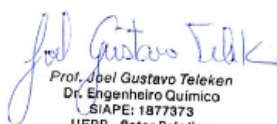
Eduardo Lucas Konrad Burin

Universidade Federal do Paraná (UFPR)



Edson Antonio da Silva

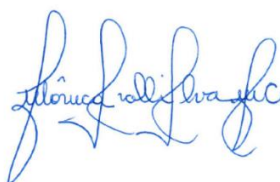
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Prof. Joel Gustavo Teleken
Dr. Engenheiro Químico
SIAPE: 1877373
UFPR - Setor Palotina

Joel Gustavo Teleken

Universidade Federal do Paraná (UFPR)



Monica Sarolli Silva de Mendonça Costa

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 24 de maio de 2022.

BIOGRAFIA

Sheila Simone Kunh, filha de Nélio José Kunh e Lira Kunh, nasceu em 27/03/1981, na cidade de Assis Chateaubrind, PR. Aos 14 anos morou em Campo Mourão, PR e formou-se no ano de 1999 em técnico em Alimentos pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET de Campo Mourão. Em 2004 graduou-se em Engenharia de Produção Agroindustrial pela Faculdade Estadual de Ciências e Letras de Campo Mourão – atual UNESPAR. Possui especialização em MBA – Gestão Empresarial pela UNIPAR da cidade de Toledo, PR com o trabalho: Planejamento da Integração da Produção na Indústria Avícola, concluída em 2007. Ingressou como mestranda no primeiro semestre de 2015 no Programa de Pós-Graduação Stricto Senso em Tecnologias de Bioprodutos Agroindustriais, sob orientação do Professor Dr. Helton José Alves, com a pesquisa sobre produção de biodiesel a partir de blendas de óleo de soja e óleo de lodo proveniente de efluente de abatedouro avícola, na UFPR campus de Palotina, PR. No período de 2005 a 2016 trabalhou na C.Vale – Cooperativa Agroindustrial como Encarregada de Produção, sendo responsável pelo resfriamento, espostejamento e congelamento das carcaças de frango de corte. Realizou trabalhos na gestão de processos, gestão de pessoas, gestão de indicadores e qualidade. Ingressou no curso de doutorado em 2018 no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, sendo orientada pela Professora Dra. Maria Hermínia Ferreira Tavares e coorientada pelos Professores Dr. Edson Antônio da Silva e Dr. Ricardo Sonsim de Oliveira. Possui formação em Practitioner em Programação Neurolinguística, Hipnose Prática e Clínica.

“O óbvio precisa ser dito...”

Fernando Costa

“Quanto mais conheço a mente humana,
mais glorifico a Deus que inventou tudo
isso...”

Pe. Fábio Batistella

A Jesus, meu mestre; Agmar, meu esposo;
Letícia e Gabriel, meus filhos,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha gratidão primeiramente a Deus por poder acordar todas as manhãs com as energias renovadas para viver o melhor que a vida tem para nos oferecer. Quero agradecer imensamente pelas pessoas que foram verdadeiros “anjos” sem asas que Deus colocou no meu caminho durante toda essa jornada do Doutorado;

Gratidão pela vida e pela oportunidade de estudar;

Gratidão a meus pais Nélio e Lira por me darem a vida e me ensinarem os caminhos corretos e justos, graças a vocês me tornei a pessoa que sou hoje;

Gratidão a meu esposo Agmar, que nesse período teve que exercitar diariamente a paciência comigo, gratidão por me apoiar, me guiar, me incentivar, me ajudar, me empurrar muitas vezes: sem você nada disso seria possível;

Gratidão aos meus amados filhos, Letícia e Gabriel, pelo apoio, amor e compreensão nos momentos de minha ausência;

Gratidão à minha orientadora, professora Dra. Maria Hermínia Ferreira Tavares, pelos ensinamentos, pelo apoio, pela preocupação comigo e com minha família, agradeço muito pela oportunidade de ter conhecido e convivido com um ser de luz, que além de uma excelente profissional, é um ser humano com um coração generoso e gigante, Deus a abençoe grandemente;

Gratidão aos coorientadores, professores Dr. Edson Antônio da Silva e Dr. Ricardo Sonsim de Oliveira, pela orientação, ensinamentos, sugestões e apoio no desenvolvimento do trabalho;

Gratidão à UTFPR de Medianeira, PR pelo apoio e a disponibilidade para realizar as análises disponíveis nessa instituição;

Gratidão a todos os colegas, alunos, técnicos, colaboradores e professores da UNIOESTE de Cascavel e Toledo pela ajuda e companheirismo em todos os momentos;

Gratidão à CAPES, pelo incentivo as pesquisas pela concessão da bolsa de estudos.

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE LODO DO TRATAMENTO PRIMÁRIO DE EFLUENTE AVÍCOLA E SERRAGEM

Kunh, Sheila Simone. **Viabilidade técnica e econômica da produção de briquetes de lodo do tratamento primário de efluente avícola e serragem**. Orientadora: Maria Hermínia Ferreira Tavares. Coorientadores: Edson Antônio da Silva e Ricardo Sonsim de Oliveira. 2022. 119f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2022.

RESUMO GERAL

Este trabalho foi realizado com objetivo de analisar as viabilidades técnica e econômica da reciclagem de resíduos sólidos de uma agroindústria do centro-oeste paranaense por meio da densificação da biomassa. Foram selecionados os resíduos: lodo proveniente do tratamento primário de efluente avícola e serragem de madeira. O trabalho foi dividido em dois artigos, sendo o primeiro com uma abordagem para viabilidade técnica da produção dos briquetes como fonte de energia térmica, mitigando os riscos da destinação atual e reduzindo os custos operacionais de sua destinação. Para conhecer as características oxidantes dos briquetes e sua resistência mecânica, foram avaliados poder calorífico superior, teor de cinzas, materiais voláteis, carbono fixo e resistência à compressão axial. Foram realizadas análises termogravimétrica e calorimetria exploratória diferencial. Tratamentos estatísticos foram realizados para verificar os fatores mais significativos para a produção dos briquetes, as melhores proporções das matérias-primas e avaliar se há interferência da umidade e da farinha cola utilizada como aglutinante. O briquete que melhor atendeu os requisitos avaliados apresentou a mistura de 15% de lodo e 85% de serragem, com resistência mecânica de 23,82 MPa, poder calorífico de 17,20 MJ/kg e densidade de 1374,15 kgm⁻³. No segundo artigo realizou-se a análise de viabilidade econômica e financeira da instalação e operação de uma usina para a produção dos briquetes a partir do lodo proveniente do tratamento primário de efluente avícola e serragem de madeira. Foram avaliados o investimento inicial, os custos de produção e indicadores econômicos que comprovaram a viabilidade econômica, tendo como Taxa Interna de Retorno de 38,98%, sendo superior à taxa média de atratividade mínima de 10%, com Payback time de 2,98 anos e ponto de equilíbrio de 41,10%.

Palavras-chave: avicultura; briquete; energia; resíduos sólidos; sustentabilidade; viabilidade econômica.

TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF THE PRODUCTION OF SLUDGE BRIQUETTES FROM THE PRIMARY TREATMENT OF POULTRY EFFLUENT AND SAWDUST

Kunh, Sheila Simone. **Technical and economic feasibility of the production of sludge briquettes from the primary treatment of poultry effluent and sawdust**. Advisor: Maria Hermínia Ferreira Tavares. Coauthors: Edson Antônio da Silva & Ricardo Sonsim de Oliveira. 2022. 119f. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering) - Graduate Program in Agricultural Engineering, Western Paraná State University, Cascavel, PR, 2022.

ABSTRACT

This work was carried out with the objective of analyzing the technical feasibility for recycling solid waste from an agro-industry in the West of Paraná through the densification of biomass. The following residues were selected: sludge from the primary treatment of effluents and wood sawdust. The work was divided into two scientific papers: the first investigating the technical feasibility for the production of briquettes as a source of thermal energy, mitigating the risks of current disposal and reducing the operational costs of its destination. To assess the oxidizing characteristics of the briquettes and their mechanical strength, higher calorific value, ash content, volatile materials, fixed carbon, and axial compression strength were evaluated. Thermogravimetric analyzes and differential scanning calorimetry were performed. Statistical treatments were carried out to verify the most significant factors for the production of briquettes, the best proportions of raw materials and to assess whether there is interference from moisture and glue flour used as binder. The briquette that best met the evaluated requirements was a mixture of 15% sludge and 85% sawdust and presented mechanical strength of 23.82 MPa, calorific value of 17.20 MJ/kg and density of 1374.15 kgm⁻³. The second paper analyzes the economic and financial feasibility of installing and operating a plant for the production of briquettes from sludge from the primary treatment of effluents and wood sawdust. The initial investment, production costs and economic indicators that proved the economic viability were evaluated, with an Internal Rate of Return of 38.98%, which is higher than the average minimum attractiveness rate of 10%, with a Payback time of 2.98 years and break-even point of 41.10%.

Keywords: briquette; economic viability; poultry; energy; solid waste; sustainability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 ALTERNATIVAS DE COMBUSTÍVEIS NÃO FÓSSEIS FABRICADAS A PARTIR DE RESÍDUOS	20
3.2 PRINCIPAIS PARÂMETROS AVALIADOS NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES	21
3.2.1 Pré-tratamento da matéria-prima para produção de briquetes	21
3.2.2 Processo de produção de briquetes	29
3.2.3 Principais parâmetros de entrada para produção de briquetes	30
3.2.3.1 Efeito da temperatura na produção de briquetes	33
3.2.3.2 Efeito da proporção da matéria-prima utilizada na produção de briquetes ..	33
3.2.3.3 Efeito dos agentes aglutinantes na produção de briquetes.....	34
3.2.3.4 Efeito do tempo de prensagem na produção de briquetes.....	35
3.2.3.5 Efeito da umidade da matéria-prima na produção de briquetes	35
3.2.3.6 Efeito da pressão na produção de briquetes	36
3.2.3.7 Efeito do tamanho da partícula na produção de briquetes.....	37
3.3 PRINCIPAIS PARÂMETROS DE RESPOSTA PARA OS BRIQUETES	38
3.3.1 Poder calorífico	38
3.3.2 Carbono fixo e matéria volátil	42
3.3.3 Umidade (briquete)	42
3.3.4 Cinzas	43
3.4 Propriedades físicas e mecânicas.....	43
3.4.1 Expansão longitudinal	44
3.4.2 Geração de finos	44
3.4.2 Absorção de água.....	47
3.4.3 Durabilidade.....	47
3.4.4 Densidade aparente	47
3.4.5 Resistência à compressão	49
4 REFERÊNCIAS	50
5 ARTIGO 1: PRODUÇÃO DE BRIQUETES A PARTIR DE UMA MISTURA DE BIOMASSAS: LODO DE ABATEDOURO DE AVES E SERRAGEM	58
5.1 INTRODUÇÃO.....	59
5.2 MATERIAL E MÉTODOS	61
5.2.1 <i>Design</i> Experimental.....	61

5.2.2	Material de estudo: lodo centrifugado	62
5.2.3	Coleta das matérias primas (lodo centrifugado, serragem e farinha cola).....	62
5.2.4	Ensaio granulométrico do lodo centrifugado e serragem	63
5.2.5	Produção dos briquetes e estudo estatístico	63
5.2.6	Densificação dos briquetes	64
5.2.7	Determinação das Propriedades físico-químicas do lodo centrifugado e da serragem	64
5.2.8	Determinação de metais nas matérias primas e cinza dos briquetes produzidos	64
5.2.9	Propriedades térmicas do.....	65
	lodo centrifugado, serragem e briquete.....	65
5.2.9.1	Poder calorífico superior (PCS).....	65
5.2.9.2	Estudo termogravimétrico (TGA).....	65
5.2.9.3	Calorimetria de varredura diferencial (DSC).....	65
5.2.9.4	Análise de gases	65
5.2.10	Propriedades mecânicas do briquete.....	66
5.2.10.1	Densidade.....	66
5.2.10.2	Resistência à compressão axial.....	66
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
5.3.1	Caracterização dos materiais	66
5.3.2	Distribuição granulométrica	68
5.3.3	Planejamento estatístico dos briquetes	68
5.3.3.1	Primeiro ensaio (proporção lodo e serragem)	69
5.3.3.2	Segundo ensaio (umidade e aglutinante)	70
5.3.4	Determinação de metais no Lodo centrifugado, serragem e cinzas do briquete por absorção atômica	72
5.3.5	Análise das propriedades Térmicas.....	73
5.3.5.1	Análise termogravimétrica (TGA) do lodo centrifugado, serragem e briquete	73
5.3.5.2	Análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC)	75
5.3.5.3	Espectroscopia no infravermelho (FTIR) e análise de gases (EGA) do lodo, serragem e briquete.....	76
5.4	CONCLUSÃO	79
5.5	AGRADECIMENTOS.....	80
5.6	REFERÊNCIAS	80
6	ARTIGO 2: ANÁLISE ECONÔMICA DE BRIQUETES PRODUZIDOS A PARTIR DA MISTURA DE LODO DE ABATE DE AVES E SERRAGEM: UM ESTUDO DE CASO.....	88

6.1 INTRODUÇÃO.....	89
6.2 MATERIAL E MÉTODOS	90
6.2.1 Tecnologia para Produção de Briquetes.....	91
6.2.2 Viabilidade técnica do briquete produzido com lodo e serragem.....	92
6.2.3 Viabilidade Econômica para implantação de uma usina de briquetagem.....	93
6.2.4 Investimento inicial para a usina de briquetagem.....	94
6.2.5 Custos de Produção dos briquetes	95
6.2.5.1 Custos com mão-de-obra.....	95
6.2.5.2 Custos com manutenção.....	96
6.2.5.3 Custos com energia elétrica	96
6.2.5.4 Impostos	97
6.2.5.5 Secagem da biomassa	97
6.2.5.6 Matéria prima	98
6.2.5.7 Embalagens	98
6.2.6 Indicadores Econômicos	98
6.2.6.1 Fluxo de Caixa Descontado (Valor Presente Líquido – VPL)	98
6.2.6.2 Taxa mínima de atratividade	99
6.2.6.3 Taxa interna de retorno (TIR).....	99
6.2.6.4 Payback time	100
6.2.6.5 Ponto de equilíbrio (Break Even Point – BEP).....	100
6.2.6.6 Análise de sensibilidade	101
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
6.3.1 Viabilidade técnica do briquete	102
6.3.2 Viabilidade Econômica	104
6.3.2.1 Estimativa de investimento em capital	104
6.3.2.2 Custos com mão-de-obra direta.....	106
6.3.2.3 Custo com matéria prima	106
6.3.2.4 Custo com embalagens.....	106
6.3.2.5 Custos com energia elétrica	107
6.3.2.6 Custos com secagem das matérias primas	107
6.3.2.7 Despesas gerais	108
6.3.3 Estimativa de receitas e indicadores econômicos para implantação de uma usina de briquetagem	109
6.3.3.1 Ponto de equilíbrio.....	110
6.3.3.2 Fluxo de caixa descontado (VPL)	110
6.3.3.3 Taxa interna de retorno do investimento (TIR)	111
6.3.3.4 Tempo de pagamento (Payback time)	111
6.3.3.5 Análise de sensibilidade	112

6.4 CONCLUSÕES.....	112
6.5 AGRADECIMENTOS.....	113
6.6 REFERÊNCIAS.....	113
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Diferentes tipos de matérias primas para produção de briquetes e os pré-tratamentos utilizados.....	22
Tabela 2 Principais parâmetros avaliados nos trabalhos acadêmicos	31
Tabela 3 Parâmetros avaliados nos trabalhos acadêmicos em relação as normas EN 14961-2 e DIN 51731	40
Tabela 4 Propriedades físicas e mecânicas, densidade e resistência à compressão avaliados em trabalhos acadêmicos	45
Tabela 5 Valores médios das propriedades físicas e químicas	67
Tabela 6 Resistência mecânica e poder calorífico para diferentes proporções de lodo centrifugado e serragem	69
Tabela 7 Resistência mecânica e poder calorífico para diferentes proporções de umidade e aglutinante na produção dos briquetes.....	71
Tabela 8 Determinação de metais no lodo centrifugado de abatedouro de aves, serragem e cinzas dos briquetes por espectroscopia de absorção atômica (AAS)	73
Tabela 9 Estimativa de produção de resíduos no tratamento de efluente avícola: adaptado de Ferreira et al. (2018)	91
Tabela 10 Caracterização dos materiais: lodo centrifugado e serragem.....	102
Tabela 11 Dimensionamento de uma Usina para produção de briquetes.....	105
Tabela 12 Componentes dos custos diretos (D) e seus respectivos valores	105
Tabela 13 Investimento inicial na instalação do parque industrial	106
Tabela 14 Custos com mão-de-obra direta	106
Tabela 15 Custo com Matérias Primas.....	106
Tabela 16 Custos com embalagens.....	107
Tabela 17 Custos com energia elétrica	107
Tabela 18 Custos com secagem das matérias primas.....	108
Tabela 19 Custos anuais da fábrica.....	108
Tabela 20 Custo evitado com a destinação para os aterros	109
Tabela 21 Custo evitado com a substituição de cavaco por briquetes.....	109
Tabela 22 Projeção de fluxo de caixa para 10 anos	110
Tabela 23 Cenários pessimista, moderado e otimista.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Design experimental	61
Figura 2 (a) serragem; (b) lodo centrifugado; (c) farinha cola	64
Figura 3 Perfis termogravimétricos (.....) e termogravimétricos derivados (—).....	74
Figura 4 Curvas de DSC do briquete e suas matérias-primas, sendo (a) lodo, (b) serragem e (c) briquete.....	75
Figura 5 Espectro EGA-FTIR tridimensional de gases da decomposição térmica da serragem (a) e espectro ampliado nas temperaturas de 370 e 470 °C (b) (condições de análise: taxa de aquecimento de 20 °C.min ⁻¹ ; fluxo de O ₂ de 20 mL.min ⁻¹).	77
Figura 6 Espectro EGA-FTIR tridimensional de gases da decomposição térmica do lodo de abatedouro (a) e espectro ampliado nas temperaturas de 330, 410 e 540 °C (b) (condições de análise: taxa de aquecimento de 20 °C min ⁻¹ ; fluxo de O ₂ de 20 mL min ⁻¹).	78
Figura 7 Espectro EGA-FTIR tridimensional de gases da decomposição térmica do briquete produzido (a) e espectro ampliado nas temperaturas de 380, 480 e 510 °C (b) (condições de análise: taxa de aquecimento de 20 °C min ⁻¹ ; fluxo de O ₂ de 20 mL min ⁻¹).	79
Figura 8 Tratamento de efluente do abate de aves.....	90
Figura 9 Esquema genérico de produção de briquetes.....	92
Figura 10 Mapa de localização da fábrica de briquetes	94
Figura 11 Principais equipamentos para uma fábrica de briquetes	95
Figura 12 Ponto de equilíbrio entre prejuízo e lucro.....	101
Figura 13 Diagrama da sensibilidade do projeto ao risco	102
Figura 14 Payback time.....	111

1 INTRODUÇÃO

O mundo vem passando por importantes transformações sociais causadas pelos impactos da globalização e potencializadas pelo crescimento das nações em desenvolvimento há bastante tempo. O crescimento econômico e social é fundamentalmente pautado no consumo e baseado na demanda de grandes quantidades de energia (BREYER et al., 2017).

A maior parte da energia requerida para suportar o crescimento das nações é a energia obtida a partir da queima de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo. Pesquisas em países exportadores de petróleo bruto estimam que o uso de combustíveis fósseis tem um efeito significativo na degradação ambiental de longo prazo. Nessa perspectiva, as atuais políticas de transição energética não são suficientes para atender às demandas de sustentabilidade ambiental (ONIFADE et al., 2021).

Embora essas formas não renováveis de energia acelerem e contribuam para a evolução tecnológica da humanidade, têm a desvantagem de gerar níveis elevados de poluição ambiental (SARI et al., 2019).

A utilização de energias renováveis apresenta-se como uma aliada ao desenvolvimento sustentável. Para isso há a necessidade de uma agenda baseado em tecnologias que possibilitem a eficiência energética (QUIJERA et al., 2011). A busca pelas fontes de energia renovável deve ser pautada na eficiência energética para que sua viabilidade econômica seja fator crítico de sucesso na seleção das técnicas de produção.

De fato, o desenvolvimento sustentável é uma pauta de muitas nações, na busca pela substituição dos hidrocarbonetos por fontes de energias sustentáveis para suportar o crescimento industrial e doméstico (HERNANDEZ et al., 2015; ANGGONO et al., 2018; PANDEY, 2019; ALARENAN et al., 2020; WU; LEE, 2020).

Os países importadores de combustíveis fósseis estão cada vez mais interessados em reduzir sua dependência dessa matriz energética (MUSA et al., 2018). Nesse contexto, indústrias e consumidores devem buscar formas de suprir essa demanda por alternativas renováveis (KARNER et al., 2017).

Uma das fontes de energia renovável mais conhecida e usada é a biomassa. Ela é a única fonte renovável com carbono fixo, essencial para atender a diversos requisitos de combustíveis e bens de consumo (JI et al., 2018).

A biomassa é uma fonte mais limpa que o carvão mineral, podendo ser obtida a partir de insumos de origem orgânica, como madeira, culturas anuais e resíduos agrícolas. Sua utilização está alinhada com as estratégias energéticas dos países do primeiro mundo que estão trabalhando na inclusão de projetos para incorporar biomassa de primeira e segunda geração em produção de energia renovável (CAMPUZANO DUQUE et al., 2016).

A biomassa é o único recurso renovável que pode ser convertido diretamente em combustível por meio de processos de combustão (TCHAPDA; PISUPATI, 2014). Tornou-se

um importante recurso energético graças ao seu baixo custo de produção (LUDEVESE-PASCUAL et al., 2016; AMARASEKARA et al., 2017; MANZOOR et al., 2017) e a suas características química, física e, mais importante, propriedades caloríficas. Pode, assim, constituir uma alternativa viável ao carvão mineral para geração de energia industrial e térmica (BALASUBRAMANI et al., 2016).

Uma mudança no perfil de geração de energia para incineração de biomassa pode ajudar a reduzir as emissões gerais de gases do efeito estufa (KAYO et al., 2016; MARTINEZ et al., 2020; MURPHY et al., 2016). No entanto, a biomassa in natura geralmente não é recomendada como fonte de energia devido às suas características, como: baixa densidade aparente, alto teor de umidade e baixa densidade energética, causando altos custos de transporte, armazenamento e manuseio. Para a viabilidade técnica de sua utilização são necessárias adaptações na cadeia de fornecimento, a fim de facilitar a seleção, homogeneização e armazenamento de biomassa, para garantir a disponibilidade de quantidades suficientes para sustentar o processo de produção (BALASUBRAMANI et al., 2016; BUSOV, 2018; ROBLES et al., 2018; ROJAS et al., 2018).

Neste interstício, regulamentações precisariam ser desenvolvidas para nortear os diversos setores produtivos na reciclagem da biomassa disponível como uma opção de novas fontes de energia renovável (GO et al., 2019; AHMAD et al., 2020; JAIN; KALAMDHAD, 2020; JALGAONKAR et al., 2020; VERMA; KUMAR, 2020).

A densificação da biomassa é um método eficiente de garantir características desejáveis para os biocombustíveis sólidos, como maior densidade aparente e energética, dureza e resistência. A densificação da biomassa pode ser feita na forma de briquetes, pellets, cubos ou discos (WONGSIRIAMNUAY; TIPPAYAWONG, 2015; PATIL, 2019). Resíduos da agricultura, silvicultura, têxtil e os setores de alimentos podem ser usados para fabricar briquetes de biocombustíveis (HANSTED et al., 2016; ROMALLOSA; KRAFT, 2017; VARGAS; PÉREZ, 2018; GUO; ZHANG, 2020; MAKELA et al., 2016; NINO et al., 2020).

Os briquetes são combustíveis cuja conversão de energia ocorre por meio da queima direta e são utilizados para aquecimento e cocção, no uso doméstico ou industrial, com principal aplicação em câmaras de leito fixo, devido à sua estrutura física (KHLIFI, et al., 2020; OKWU; SAMUEL, 2018).

A utilização de biomassa densificada na forma de combustível sólido tem ganhado relevância em países em desenvolvimento e desenvolvidos (PANWAR et al., 2011; HOANG; NGUYEN, 2021).

No Brasil, os briquetes são usados como substitutos da lenha em padarias, pizzarias, estabelecimentos alimentícios e fábricas com forno a lenha, como as de tijolos vermelhos (MARREIRO et al., 2021). No entanto, o uso de briquetes de biomassa para fins energéticos no país ainda não está totalmente difundido, uma vez que este setor depende de um mercado

para os briquetes, tecnologias adequadas e disponibilidade de resíduos (MARTINEZ et al., 2019).

As adequadas seleção e configuração das variáveis de processamento são fundamentais para a otimização da briquetagem. Navalta et al. (2019) afirmam que parâmetros como pressão, temperatura, granulometria, tipo de aglutinante e características da biomassa escolhida têm grande influência na resistência à compressão, densidade e potencial energético dos briquetes.

Esta tese está dividida em 3 seções, sendo que a primeira sessão contém o referencial teórico que deu base para o desenvolvimento do trabalho. Na segunda sessão, visa-se fornecer orientações sobre como projetar experimentos para otimizar as características energéticas, de combustão dos briquetes e também as propriedades físico-mecânicas, e na terceira e última sessão um estudo de caso sobre a viabilidade econômica da implantação de uma usina para produção desses briquetes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral contribuir para a melhoria da sustentabilidade nas indústrias avícolas brasileiras, com a avaliação da viabilidade técnica e econômica do briquete produzido a partir de lodo do tratamento primário de efluente avícola consorciado com serragem de madeira para queima em caldeiras.

2.2 Objetivos específicos

- a) Verificar se o lodo centrifugado consorciado com a serragem tem potencial de uso como fonte de energia térmica por meio da densificação em briquetes;
- b) Avaliar a aderência das respostas de saída resistência mecânica e poder calorífico, da fabricação de briquetes em relação à norma internacional ISO 17225-7:2021;
- c) Calcular a viabilidade econômica da implantação de uma usina para fabricação de briquetes a partir dos resíduos, lodo centrifugado e serragem;
- d) Corroborar com a sustentabilidade do segmento avícola, encontrando alternativas técnica e economicamente viáveis para destinação de parte de seus resíduos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Alternativas de combustíveis não fósseis fabricadas a partir de resíduos

Os briquetes são geralmente produzidos pela combinação e compactação de biomassa lignocelulósica. Tais matérias-primas são de origem vegetal e sua composição primária é lignina, hemicelulose e celulose, na forma de matéria-prima orgânica (ARIAS; LÓPEZ, 2015). Esses incluem cavacos e aparas de madeira, diferentes tipos de resíduos agrícolas, têxteis, restos de alimentos (RODRÍGUEZ et al., 2017; HOYOS et al., 2019), resíduos da produção de madeira, resíduos de biomassa industrial e resíduos de biomassa urbana (SAWADOGO et al., 2018) e carvão (RIUJI et al., 2016).

A briquetagem resulta em um produto que tem uma densidade maior do que seus materiais constituintes. O processo também é conhecido como densificação e oferece uma relação espaço-peso superior à da madeira cortada ou cavacos, tornando o transporte e a armazenagem mais eficientes.

A briquetagem também reduz o teor de umidade do material para menos de 12%; no entanto, a biomassa deve passar por alguns processos de pré-tratamento, que podem variar de acordo com as características naturais do material e a disponibilidade de tecnologia, podendo ser a secagem feita ao sol ou em condições ambientes. Os pré-tratamentos térmicos de carbonização e torrefação são empregados para melhorar as características energéticas do combustível, uma vez que o processo resulta no aumento da quantidade de carbono fixo da biomassa (HELWANI et al., 2020).

O coeficiente de condutividade térmica dos briquetes é maior do que a da madeira: como o material compactado contém menos ar que retarda a combustão, o potencial de aquecimento depende de aspectos como forma, teor de umidade, densidade, poder calorífico e coeficiente de condutividade térmica (MARTÍN, 2014).

Dadas as suas características físicas, químicas, propriedades térmicas, facilidade de combustão, baixa umidade e alta densidade, os briquetes de biomassa representam uma forma atrativa de biocombustível para aplicações de aquecimento e geração de eletricidade (GANGIL, 2015; YANK et al., 2016; TOMELERI et al., 2017). A seleção das matérias-primas utilizadas na fabricação dos briquetes pode impactar diretamente nas suas propriedades mecânicas (NHUCHHEN; AFZAL, 2017; ARANSIOLA et al., 2019). Diferentes aglutinantes permitem a produção de briquetes de diversas formas e tamanhos, e com graus variados de resistência, compressão, densidade, porosidade e outras características físicas. Os briquetes normalmente são de formatos variados, mas a maioria são cilíndricos com diâmetros que variam de 2 a 20 cm e comprimentos entre 15 e 50 cm.

Entre as vantagens da densificação, há um destaque para a minimização do resíduo de cinzas (DAVYDENKO et al., 2014; D'AGUA et al., 2015; BERASTEGUI et al., 2017; GENDEK et al., 2018).

3.2 Principais parâmetros avaliados na produção de briquetes

Para que a densificação da biomassa possa ser promissora, é importante o atendimento aos principais parâmetros de viabilidade técnica. As características térmicas e energéticas, como poder calorífico e teor de cinzas, devem ser otimizadas para uma boa conversão no processo de reciclagem (LELA et al., 2016). Os principais parâmetros avaliados no requisito durabilidade e resistência do material são identificados por meio da mensuração de sua densidade, durabilidade, resistência à compressão e resistência à água.

As respostas aos parâmetros estão diretamente ligadas aos vários fatores do processo produtivo, incluindo a matéria-prima utilizada, a temperatura e a pressão do processo (FAIZAL et al., 2016). Encontrados os parâmetros ideais para otimização energética da biomassa, é fundamental a padronização dos parâmetros (TUMULURU et al., 2011).

3.2.1 Pré-tratamento da matéria-prima para produção de briquetes

A produção do briquetes é comumente associada a biocombustíveis de segunda geração: a maior parte dos trabalhos publicados são com base em matérias-primas lignocelulósicas, de resíduos agrícolas e florestais, como caule, casca, folhas, palha, madeira e serragem, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 Diferentes tipos de matérias-primas para produção de briquetes e os pré-tratamentos utilizados

Referências	Matéria-prima	Pré-tratamento	Máquina de briquetagem	Variáveis do Equipamento de Briquetagem	Resultados e Conclusões dos Estudos
GRANADA et al. (2020)	Resíduos de mandioca	Secagem, moagem e peneiramento	Pressão hidráulica	Pressão	Os briquetes produzidos sem aquecimento ou aglutinante obtiveram bons resultados: densidade de $918 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, resistência à compressão de 1,29 MPa, durabilidade de 94,1%, expansão de 8,68 e densidade energética de $15,7 \text{ GJ}\cdot\text{m}^{-3}$
KPALO et al. (2020)	Espigas de milho (CC) e casca de tronco de dendê (OPTB)	Secagem, moagem e peneiramento	Prensa de pistão hidráulico	Temperatura e pressão	Foram obtidos: umidade de 9,24-10,00%, densidade de $0,38\text{-}0,40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, resistência à água de 87,60-92,00%, resistência mecânica de 98,28-99,08%, resistência à compressão de 18,47 a 21,75 MPa e poder calorífico de $16,54 \text{ e } 16,91 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

KHLIFI et al. (2020)	Resíduos sólidos da produção de azeite de azeitona (OMSW)	Secagem, moagem e peneiramento	Pressão hidráulica	Temperatura e pressão	Briquetes com densidade unitária: 2,04-3,03 g·cm ⁻³ e densidade aparente: 0,84-1,20 g·cm ⁻³ . Com 15% de aglutinante, obteve-se maior resistência à compressão (4581 kN), PCS (16,92 MJ·kg ⁻¹) e menor Umidade (6,72%)
CHUNGCHA ROEN; SRISANG (2020)	Cascas de castanha de caju (CC) e cascas de noz de areca (NA)	Torrefação (CC), secagem (NA), moagem e peneiramento	Acionado por motor de parafuso compactado	Velocidade do parafuso comprimido	Valores médios: 18,9-21 MJ·kg ⁻¹ de poder calorífico, dureza 103-123 HB (medida de dureza), porosidade 52-65%, MV 71,2-73,2%. A mistura "A" é adequada para a produção de briquetes, com velocidade de 90 rpm
KUMAR e CHANDRAS HEKAR (2020)	<i>Lantana camara</i> e <i>Prosopis juliflora</i>	Secagem, quebra, moagem, pulverização e peneiramento	Máquina industrial. Pistão e aríete	Não especificado	Os briquetes atingiram uma densidade de 1200 kg·m ⁻³ , uma densidade energética de 23,05GJ·m ⁻³ . Umidade ideal de 10-12%
HELWANI et al. (2020)	Palmeira	Corte, limpeza, carbonização e peneiramento	Pressão hidráulica	Pressão	Por meio da otimização, obteve-se PCS de 306,704 MJ·kg ⁻¹ e resistência à compressão de 10,0608 kg·cm ⁻² , com os parâmetros de 120 mesh, ≈47% aglutinante e ≈9,32 Mpa

MORALES-MÁXIMO et al. (2020)	Resíduos de madeira de <i>Pinus</i> spp.	Recolhe e peneira *	Dispositivo mecânico manual	Não especificado	A biomassa tinha densidade aparente de 160 e 170 kg·m ⁻³ , MV de 65,3-95,01% e CF de 4,49-34,3%. Os briquetes tinham Umidade de 11,52-13,26%, PCS de 17,0-18,3 MJ·kg ⁻¹ e densidade de 930-1240 kg·m ⁻³
WAHEED; AKOGUN (2020)	Casca de milho (CH) e casca de mandioca (CP)	Secagem, moagem, torrefação e umidificação	Máquina de prensa de pistão hidráulico	Pressão	Os briquetes torrados a 300 °C com uma mistura de 10/90 (CH/CP) apresentaram boas características combustíveis. Estes apresentaram aumento de briquetes sem tratamento térmico de 18,19; 2,98 e 32,25% em densidade, durabilidade e resistência à compressão, respectivamente.
GWENZI et al. (2020)	Pó de carvão (C), serragem (S) e plásticos pós-consumo (P)	Lavar, secar, moer e peneirar	Pressão Manual	Não especificado	Foram obtidos PCS de 26,5 a 33,8 MJ·kg ⁻¹ . Resistência ao impacto/taxa de quebra ≥ 90% em todos os briquetes e densidade de 1100 a 1300 kg·m ⁻³ . No entanto, apresentou baixa resistência à compressão, abaixo de 1 Mpa

MARTINEZ et al. (2019)	Resíduos de arbustos de café e madeira de <i>pinus</i>	Secagem, moagem e peneiramento	Prensa de pistão hidráulico	Temperatura e pressão	O resíduo de café misturado com 75% da madeira de <i>pinus</i> produziu densidade aparente de 1107-1163 kg·m ⁻³ , densidade energética de 19,13-19,89 GJ·m ⁻³ , resistência à tração de 415-569 kgf e umidade de equilíbrio de 9 -11% em peso
MAIA et al. (2017)	Folhas de bananeira e pseudocaule e casca de arroz	Picar, moer, peneirar, prensar e secar	Pressão hidráulica	Pressão	Os briquetes de casca de arroz apresentaram a maior resistência à compressão (19,8 MPa) e a maior PCS (18,1 MJ·kg ⁻¹), porém apresentaram alto valor de CA (25,4%)
MASULLO et al. (2018)	Bagaço de açúcar e palha	Secagem, moagem e peneiramento	Prensa Hidráulica Manual	Carga medida em toneladas	Briquetes com maior quantidade de bagaço de cana apresentaram maior resistência à compressão, menor geração de finos, teor de umidade de 11 a 12%. O uso da palha só é viável quando associado ao bagaço de cana

BAZARGAN et al. (2017)	Biochars de casca de palmiste (PKSB)	Desinformado	Máquina de aríete cilíndrico de compressão	Velocidade e pressão de compactação	Poder calorífico médio de $31,29 \pm 1,44 \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Resistente ao impacto, preservando 95% do seu peso inicial. Desempenho ruim para resistência à água. Dependendo das condições de processamento, a resistência à tração $> 800 \text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ pode ser alcançada
JÚNIOR et al. (2017)	<i>Phyllostachys aurea</i>	Secagem, moagem, peneiramento e umidificação	Prensa de laboratório	Temperatura e pressão	A biomassa, os briquetes produzidos a partir dela e o carvão foram avaliados. Os briquetes apresentaram maior densidade energética ($21,47 \text{GJ} \cdot \text{m}^{-3}$) do que o carvão ($11,38 \text{GJ} \cdot \text{m}^{-3}$), mas ambos têm potencial para aplicações energéticas
GARRIDO et al. (2017)	Serragem (S) e tronco de tamareira (PT), resíduos plásticos	Moagem e peneiramento	Prensa de pistão hidráulica de laboratório	Temperatura e pressão	Embora os briquetes S70-W30 (70%(S) e 30%(PT), produzidos a $130 \text{ }^\circ\text{C}$ tenham maior densidade ($\approx 1190 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) e durabilidade (100%), quase todos os briquetes PT produzidos em temperatura ambiente apresentaram alta densidade e durabilidade, com PT90-ASR10

OLIVEIRA et al. (2017)	Resíduos finos de carvão vegetal e lodo de esgoto sanitário	Secagem, moagem e peneiramento	Extrusora de parafuso cônico	Pressão	A mistura 50:50 de carvão e lodo foi ideal para produção de energia com PCS de $17,47 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, resistência à ruptura de $41,19 \text{ MPa}$ e densidade aparente de $913 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
NWABUE et al. (2017)	Resíduos plásticos, serragem, casca de milho e carvão sub-betuminoso carbonizado	Secagem, corte, carbonização, moagem e peneiramento	Pressão hidráulica	Carga de até 10 toneladas	A PCS para briquetes com 0 e 90% de coque foi de $13,8$ e $21,45 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente. A matéria-prima 100% coque produz PCS de $23,86 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. A maior MV ($31,74\%$) e resistência à compressão ($4,61 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$) foram obtidas no briquete com 100% de biomassa e 0% de coque
PADILLA et al. (2016)	Fibra de coco (FC) e palha de cana (PC)	Secagem, moagem e peneiramento	Prensa Hidráulica Manual	Pressão	Os briquetes de PC e FC podem ser fabricados sem aquecimento ou adição de aglutinante. A maior quantidade de FC foi favorável para a resistência à compressão ($0,37 \text{ MPa}$), PCS ($18,24 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), carbono fixo ($22,28\%$)
ARAÚJO et al. (2016)	Madeira de <i>Eucalyptus spp.</i> e <i>Eucalyptus grandis</i>	Secagem, corte, torrefação, moagem e peneiramento	Prensa de pistão hidráulico	Temperatura, tempo de prensagem e pressão	Valores para <i>E. spp.</i> e <i>E. grandis</i> , respectivamente. Densidade aparente: $1,14$ e $1,06 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; densidade de energia (Tratamento a $200 \text{ }^\circ\text{C}$): $24,79$ e $21,70 \text{ GJ}\cdot\text{m}^{-3}$;

e 9,6%; higroscopia inferior:
E. grandis a 200 °C e
 10 MPa; maior resistência à
 compressão: relativa

OLIVEIRA MAIA et al. (2014)	Resíduos de folhas de bananeira	Fresamento e dimensiona- mento	Pressão hidráulica	Pressão	O tempo de compactação de 0,6 e 1 s foi desprezível para a densidade, com valores de 999 e 1000 kg·m ⁻³ , respectivamente. Maior resistência à compressão (5,3 MPa) foi alcançada com 1 s. O cálculo da densidade de energia foi baseado na densidade de 999 kg·m ⁻³
THORESON et al. (2014)	Palha de milho	Secagem, corte e moagem	Prensa de pistão de laboratório (êmbolo)	Pressão	Dados os diferentes experimentos, com diferentes interações das variáveis de entrada, observa-se melhor densidade seca e densidade aparente de 470 e 190 kg·m ⁻³ , respectivamente
RASLAVIČIUS (2012)	Resíduos de corte lenhoso (madeira) (WCW)	Secar e peneirar	Prensa hidráulica automática de pistão	Força de aperto e temperatura	A proporção em massa de 10:90 de glicerol bruto e WCW é adequada para formar briquetes. Sua densidade é de 798 kg·m ⁻³ , durabilidade de 86,7%; 0,91 kN de resistência ao estresse, PCS de 17,1 MJ·kg ⁻¹

É possível identificar na Tabela 1 trabalhos descrevendo a mistura de matérias-primas como artifício para superar as características naturais da biomassa (IFTICAR et al., 2019, TUMULURU; FILLERUP, 2020), pois in natura as principais biomassas disponíveis apresentam baixa densidade, alta umidade, baixa densidade energética, tamanho e formas irregulares. Essas características dificultam sua utilização como biocombustível de forma direta, além de tornar seu manejo, armazenamento e transporte ineficientes e onerosos (FELFLI et al., 2011, KALIYAN; MOREY, 2009).

A Tabela 1 mostra também os pré-tratamentos utilizados na matéria-prima antes da produção dos briquetes, a fim de aumentar a eficiência do processo produtivo. Exemplos de pré-tratamento são carbonização e torrefação, ambos com o objetivo de aumentar a quantidade de carbono fixo da biomassa (HELWANI et al., 2020). Comumente, o pré-tratamento térmico tem como principal objetivo a redução da umidade da matéria-prima, podendo ser realizado de forma natural ao sol ou em temperatura ambiente (NWABUE et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2017; KPALO et al., 2020). Além da redução da umidade, processos como a torrefação também apresentam incrementos na qualidade física dos briquetes, quanto à durabilidade, densidade e resistência à compressão (WAHEED; AKOGUN, 2020). No entanto, o pré-tratamento térmico pode requerer um gasto extra de energia, pois em alguns processos o aquecimento pode variar de 180 a 500 °C (ARAÚJO et al., 2016; NWABUE et al., 2017).

Ainda é comum para algumas matérias-primas o procedimento de moagem ou trituração da biomassa em moinhos de martelos ou facas (MARTINEZ et al., 2019; GRANADA et al., 2020) antes da classificação granulométrica por meio de peneiras. A redução e a homogeneização das partículas permitem uma melhor compactação da matéria-prima, influenciando suas características físicas e mecânicas (FRANCIK et al., 2020).

3.2.2 Processo de produção de briquetes

A produção de briquetes pode ser realizada em processos automatizados de grande escala (RASLAVIČIUS, 2012; KUMAR; CHANDRASHEKAR, 2020), ou manualmente por meio de prensas hidráulicas ou dispositivos mecânicos manuais (GADO et al., 2013; ARANSIOLA et al., 2019; MORALES-MÁXIMO et al., 2020).

Segundo Tumuluru et al. (2011), a produção de briquetes usualmente é realizada empregando prensas hidráulicas, mecânicas ou de rolos. Ainda existem modelos de prensas de parafuso, pistão mecânico e pistão hidráulico, sendo esses equipamentos de operação manual ou automatizada (KPALO et al., 2020). Além dessas tecnologias, é possível encontrar briquetes de biomassa produzidos com o uso de cubador, aglomerador e tabletizador (TUMULURU et al., 2011).

Prensas mecânicas frequentemente exercem uma força de compressão maior do que prensas hidráulicas, conferindo aos briquetes maior densidade unitária. Entretanto, os briquetes produzidos em equipamentos hidráulicos admitem teores de umidade superiores a 15% e possuem densidades unitárias que variam de 800 a 1000 kg·m⁻³ (TUMULURU et al., 2011).

Nos países emergentes como Brasil, Índia e países africanos, a tecnologia mais utilizada são as extrusoras, ou de parafuso, principalmente em linhas de pequena escala. A tecnologia de extrusão é adequada para produção de briquetes destinados à carbonização, gaseificação e torrefação (FELFLI et al., 2011, ANTWI-BOASIAKO; ACHEAMPONG, 2016).

As prensas de pistão em geral consomem menos energia no processo produtivo e apresentam um custo de manutenção inferior, pelo fato de causarem menos desgaste nas peças de contato; entretanto, as prensas de rosca entregam briquetes de qualidade superior (GROVER; MISHRA 1996; LEI et al., 2013).

3.2.3 Principais parâmetros de entrada para produção de briquetes

Os principais parâmetros avaliados nos trabalhos acadêmicos são: pressão, temperatura, umidade, granulometria, aglutinante, tempo de compactação, tempo de resfriamento, % de biomassa e velocidade de compactação, conforme apresentado na Tabela 2.

A briquetagem consiste em síntese na densificação de partículas soltas de material sólido em um combustível de alta densidade (PANWAR et al., 2011; LEI et al., 2013). Para obter êxito na produção, é necessário que parâmetros operacionais, como pressão, temperatura e tempo de compactação sejam definidos. Quanto à matéria-prima preferencialmente deve ser classificada de acordo com seu tamanho e distribuição, sendo um dos parâmetros mais importantes para viabilidade econômica da produção (MARTINEZ et al., 2019; FRANCIK et al., 2020). Essa variável pode influenciar a energia gasta durante a briquetagem, bem como favorecer a resistência dos briquetes (KRIZAN et al., 2015; CHALOUPKOVÁ et al., 2018).

Outra característica que deve ser controlada é o teor de umidade da matéria-prima, tendo em vista que este parâmetro deve ter um valor que permita uma densificação suave, sem comprometer as propriedades físicas e térmicas dos briquetes (GROVER; MISHRA 1996).

Para algumas matérias-primas a presença de aglutinante é um fator relevante para a adesão das partículas, podendo ser aditivada ao processo ou por meio de sua própria estrutura com adição de calor e pressão durante a produção (CHUNG, 1991; NAVALTA et al., 2019).

Tabela 2 Principais parâmetros avaliados nos trabalhos acadêmicos

Pesquisadores	Temperatura	Tempo de compactação	Tempo de resfriamento	Pressão	Granulometria	% Biomassa	Tipo de Biomassa	Velocidade de compactação	Conteúdo de umidade
GRANADA et al. (2020)		X		X	X				X
KPALO et al. (2020)	X			X	X	X			X
KHLIFI et al. (2020)	X	X		X	X				
CHUNGCHAROEN e SRISANG (2020)					X	X		X	X
KUMAR e CHANDRASHEKAR (2020)					X		X		X
HELWANI et al. (2020)		X		X	X				
MORALES-MÁXIMO et al. (2020)					X				
WAHEED e AKOGUN (2020)		X		X	X	X			
GWENZI et al. (2020)					X	X			
MARTINEZ et al. (2019)	X	X	X	X	X	X	X		X
MAIA et al. (2017)		X		X	X		X		X
MASULLO et al. (2018)		X			X	X			X
BAZARGAN et al. (2017)		X		X				X	
JÚNIOR et al. (2017)	X	X	X	X	X				X
GARRIDO et al. (2017)	X	X		X	X	X			
OLIVEIRA et al. (2017)				X	X	X			X

NWABUE et al. (2017)					X	X			X
PADILLA et al. (2016)		X		X	X	X			X
ARAÚJO et al. (2016)	X	X	X	X	X		X		X
OLIVEIRA MAIA et al. (2014)		X		X	X				X
THORESON et al. (2014)				X	X				X
RASLAVIČIUS (2012)	X			X	X				X
Ocorrência	7	13	3	16	21	10	4	2	15
Porcentagem	32%	59%	14%	73%	95%	45%	18%	9%	68%

3.2.3.1 Efeito da temperatura na produção de briquetes

O efeito da temperatura na produção dos briquetes manifesta-se na alteração de suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Garrido et al. (2017) exploraram a temperatura com aquecimentos a 120 e 130 °C e verificaram que esse aumento na temperatura de briquetagem proporcionou durabilidade de 100% e densidade em torno de 1,2 a 1,4 vezes maiores que os obtidos em temperatura ambiente.

Khilifi et al. (2020) utilizaram em seus estudos temperaturas mais baixas, obtendo boas propriedades físicas, com alta densidade unitária e aparente. No entanto, para esse resultado é demandada pressão mais alta e baixa granulometria, os quais, de acordo com Okot, Bilsborrow e Phan (2019), são parâmetros que viabilizam a redução da temperatura de briquetagem.

O aumento da temperatura em casos de biomassa com baixa umidade causa um efeito de endurecimento dos briquetes e torna-os mais densos (NUREK et al., 2019).

A temperatura de briquetagem, no entanto, não deve ultrapassar 300 °C, para evitar o risco de decomposição dos componentes da matéria-prima, pois dependendo da biomassa a decomposição já inicia a partir de 120°C (GROVER; MISHRA 1996; GARRIDO et al., 2017).

3.2.3.2 Efeito da proporção da matéria-prima utilizada na produção de briquetes

A mistura de biomassas na produção de briquetes é fundamentada na busca pela relação adequada entre qualidade, disponibilidade de insumos e custo X benefício (MUAZU; STEGEMANN, 2015; TUMULURU; FILLERUP, 2020). A associação de diferentes matérias-primas permite o reaproveitamento energético em situações em que há excesso de resíduos. Os resíduos podem ter características físicas distintas, como densidade, granulometria e umidade (TUMULURU; FILLERUP, 2020). O mesmo acontece com as características químicas e composição da celulose, hemicelulose e lignina da biomassa (TUMULURU et al., 2011; IFTICHAH et al., 2019).

Kpalo et al. (2020) variaram a composição dos briquetes de espiga de milho e casca de tronco de dendê nas seguintes proporções: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100, com objetivo de avaliar suas interações nas diferentes frações. O critério de seleção das biomassas utilizado por Iftikhar et al. (2019) foi utilizar matérias-primas de maior poder calorífico para avaliar sua contribuição após as interações; no entanto, Masullo et al. (2018) selecionaram suas matérias-primas pelas características físico-mecânicas. Eles chegaram à conclusão de que a proporção 75:25 de bagaço e palha de cana foi a interação mais promissora para produção dos briquetes.

Em seu estudo, Martinez et al. (2019) utilizaram 100% da biomassa da madeira de *pinus*, obtendo o maior poder calorífico (20,7 MJ·kg⁻¹). Nesse mesmo estudo, os briquetes

compostos por 75% de *pinus* e 25% de outros resíduos resultaram em excelentes propriedades de umidade de equilíbrio (9-11% em peso), resistência à tração (415-569 kgf), densidade aparente (1107-1163 kgm⁻³) e densidade de energética (19.133-19.899 MJm⁻³).

3.2.3.3 Efeito dos agentes aglutinantes na produção de briquetes

A utilização de aglutinantes para a produção de combustíveis sólidos, como pellets e briquetes, confere-lhes melhores propriedades físicas e otimiza os processos operacionais (IFTICHAH et al., 2019). O calor gerado com a temperatura de briquetagem é capaz de ativar os aglutinantes naturais da biomassa, como lipídios, lignina, amido e proteína, ou os aglutinantes adicionados à biomassa, por meio de forças de atração entre as partículas (KALIYAN; MOREY, 2009; NAVALTA et al., 2019).

A ligação entre partículas de matérias-primas sob pressão se dá pela formação de pontes sólidas, onde sua formação ocorre por reações químicas, endurecimento de aglutinantes, solidificação de compostos fundidos ou pela cristalização de alguns componentes, como lignina e proteínas (KALIYAN; MOREY, 2010).

Habitualmente, em processos de fabricação que empregam altas pressões e temperaturas, não há necessidade de aditivos aglutinantes, sendo esta técnica mais associada a compressões de baixa pressão (KALIYAN; MOREY, 2010; KPALO et al., 2020).

Existe uma ampla gama de possibilidade a respeito dos materiais viáveis como aglutinantes de combustíveis sólidos, como: melaço, amido de milho e mandioca, glicerol bruto e polpa de papel (MORALES-MÁXIMO et al., 2020; WAHEED; AKOGUN, 2020; KPALO et al., 2020; HELWANI et al., 2020; GWENZI et al., 2020).

O aglutinante mais frequentemente utilizado entre os trabalhos revisados foi o amido (BAZARGAN et al., 2017; MORALES-MÁXIMO et al., 2020). Bazargan, Rough e McKay (2017) também usaram amido e observaram em seus resultados que a adição de 3 ou 5% de amido, altera o aspecto de resistência dos briquetes, desde que a pressão utilizada para compactar os briquetes seja de 60 ou 40 MPa, respectivamente.

Kpalo et al. (2020) observaram que, para a formação de pontes sólidas, é necessário o aumento do teor de lignina, carboidratos hidrossolúveis, densidade aparente e quantidade de proteínas. Neste contexto, optaram por utilizar a polpa de papel como agente aglutinante e obtiveram como resultado maior adesão entre as partículas (OLIVEIRA et al., 2017; MORALES-MÁXIMO et al., 2020; WAHEED; AKOGUN, 2020).

Helwani et al. (2020), na produção de briquetes sob baixa pressão de até 12 Mpa, aplicaram glicerol bruto como aglutinante em três níveis (20, 30 e 40%), e concluíram que entre os três níveis testados, a maior resistência à compressão e o maior poder calorífico foram obtidos com 40% de aglutinante.

Raslavičius (2012) também utilizou glicerol bruto, que é um subproduto na produção de biodiesel, com adição entre o intervalo de 0, 10 e 20%, permitindo o reaproveitamento deste aglutinante, concluindo que o valor de 10% proporcionou maiores benefícios físicos, melhorando as características para o transporte e o manejo dos briquetes, com resultados relevantes na redução da geração de cinzas.

3.2.3.4 Efeito do tempo de prensagem na produção de briquetes

O efeito do tempo de prensagem diz respeito ao tempo em que a biomassa permanecerá no molde do equipamento utilizado durante a compactação, sendo que este quando associado a outras variáveis, como a utilização de agente aglutinante e as condições de compactação, pressão e temperatura, determinam a densidade e resistência à compressão dos briquetes (OLIVEIRA MAIA et al., 2014; KPALO et al., 2020; GRANADA et al., 2020; BAZARGAN et al., 2017).

Por outro lado, Bazargan, Rough e Mckay (2017) observaram que o tempo de retenção no molde da briquetadeira não teve influência significativa na resistência à tração, uma vez que, sob maiores pressões, esse efeito é desprezível. Para Oliveira Maia et al. (2014), o tempo de compressão teve pouca influência nas propriedades físicas dos briquetes. Alguns trabalhos analisaram o efeito de longos tempos de prensagem, a fim de obter briquetes mais estáveis, a exemplo do trabalho de Araújo et al. (2016), que aplicou um tempo de prensagem de 420 s (7 min) e 360 s (6 min) para evitar trincas nos briquetes.

É importante ressaltar que o tempo de retenção impacta diretamente na taxa de produção do equipamento: para Granada et al. (2020), o tempo de 120 s associado à pressão de pressão de 204 MPa proporcionou os melhores resultados de densidades e poder calorífico, durabilidade e resistência à compressão, apresentando diferenças significativas quando a pressão foi menor (102 MPa).

Oliveira et al. (2017), Maia et al. (2017) e Maradiaga et al. (2017) relatam que as condições de operação, como pressão e tempo de compactação, são escolhidas de acordo com a configuração e a disponibilidade do equipamento de briquetagem.

3.2.3.5 Efeito da umidade da matéria-prima na produção de briquetes

A umidade promove conexões de forças de Van Der Waals, que são forças de atração que atuam em moléculas como um aglutinante: esse fenômeno ocorre em sua maioria nos materiais compostos de produtos orgânicos, que, em quantidades ideais, promovem um aumento da área de contato entre as partículas de biomassa (GROVER; MISHRA, 1996; KALIYAN; MOREY, 2010; NUREK et al., 2019).

A umidade auxilia ainda na densificação mais suave da biomassa, reduzindo os riscos de trincas e quebra dos briquetes (GROVER; MISHRA, 1996; KUMAR; CHANDRASHEKAR, 2020). Naturalmente, a biomassa in natura possui, via de regra, altos teores de umidade, dificultando seu uso como fonte de energia. Alguns resíduos, como madeira cortada e lodo de esgoto, podem ter um teor de umidade de aproximadamente 40% (RASLAVIČIUS, 2012; OLIVEIRA et al., 2017). Assim, é comum o pré-tratamento da matéria-prima para secagem (MARTINEZ et al., 2019; JÚNIOR et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2017).

Alguns autores relatam que o teor de umidade ideal para briquetagem varia de 10 a 12% (MARTINEZ et al., 2019; KUMAR; CHANDRASHEKAR, 2020). Outros afirmam que a biomassa deve ter entre 8 e 15% (MASULLO et al., 2018). Araújo et al. (2016), Oliveira et al. (2017), Nwabue, Unah e Itumoh (2017), Chungcharoen, Kumar e Chandrashekar (2020) e Srisang (2020) produziram briquetes com diferentes matérias-primas, mas sem misturá-las, com teor de umidade da biomassa variando de 8 a 12%.

Para a produção de briquetes em máquinas de rolos, recomenda-se que a biomassa tenha de 10 a 20% de umidade (KALIYAN; MOREY, 2009). Em máquinas extrusoras, segundo Tumuluru et al. (2011) e Grover e Mishra (2020), este parâmetro é mais crítico, variando de 4 a 10%. Já nas prensas de pistão, há uma tolerância entre 10 e 15%. Um valor superior a 15% pode ser permitido em prensas hidráulicas de pistão (GROVER; MISHRA 1996).

Thoreson et al. (2014) realizaram um experimento de interação de três níveis de umidade e, em seus resultados, foi possível constatar que os briquetes produzidos com maior teor de umidade sofreram influência negativa na densidade média de partículas secas e na elasticidade. Oliveira et al. (2017) utilizaram finos de carvão vegetal com umidade de 4 e 14,11% para lodo de esgoto: a umidade não foi suficiente para realizar a briquetagem, sendo necessária a adição de 8% de umidade e 10% de aglutinante.

3.2.3.6 Efeito da pressão na produção de briquetes

A pressão é um dos fatores mais importantes no processo de densificação da biomassa: para Kpalo et al. (2020), a pressão é considerada alta quando é igual ou superior a 100 MPa, intermediária para valores entre 5 e 100 MPa e é considerada baixa quando é inferior a 5 Mpa. Neste contexto, é importante destacar que pressões mais baixas acarretam custos operacionais menores com energia e com manutenção (HELWANI et al., 2020).

Em geral, a maioria dos trabalhos aplica pressões classificadas como intermediárias (5-100 MPa), permitindo adensamento com menor custo. Para Nunes, Andrade e Dias Júnior (2019), a pressão aplicada não altera as características do poder calorífico do material, porém tem grande influência nas propriedades físico mecânicas dos briquetes; já outros autores, como Helwani et al. (2020), afirmam que a pressão tem influência no poder calorífico dos briquetes, pois permite que a matéria-prima entre em contato com o aglutinante.

A pressão também influencia na resistência à compressão, pois atua em nível molecular sobre os constituintes naturais da biomassa, como lipídios, lignina, amido e proteína (NAVALTA et al., 2019; CANÇÃO et al., 2019).

Araújo et al. (2016) trabalharam com pressões nos níveis de 7, 10 e 14 Mpa e com resultados considerados adequados para resistência a compressão do briquete. Já no estudo de Helwani et al. (2020), tanto a resistência à compressão quanto o poder calorífico foram influenciados pela pressão de prensagem. O objetivo do trabalho foi a otimização de algumas variáveis de entrada e chegaram a uma pressão de 9,3 MPa.

Martinez et al. (2019) e Kpalo et al. (2020) indicaram as pressões de 7 e 8,27 Mpa, respectivamente, como ideais para a produção de seus briquetes. Utilizando altas pressões em três níveis, 100, 125 e 150 MPa, Khlifi et al. (2020) e Granada et al. (2020) concluíram que, para briquetes com proporção de 85% de biomassa e 15% de aglutinante, a pressão de 150 MPa garantiu maior resistência à compressão.

Bazargan, Rough e Mckay (2017), utilizando a pressão de compactação para valores intermediários de 40 e 60 Mpa, produziram briquetes com resistência adequada.

Garrido et al. (2017) atingiram as maiores densidade e durabilidade quando a densificação ocorreu em meio ao aquecimento e com pressões de 22 e 44 MPa.

3.2.3.7 Efeito do tamanho da partícula na produção de briquetes

Parâmetros como uniformidade e distribuição de partículas das matérias-primas afetam diretamente as propriedades físicas e mecânicas dos briquetes (MARTINEZ et al., 2019, FRANCIK et al., 2020). Sabe-se que, quanto maior o tamanho das partículas, maior a energia necessária para adensar a biomassa (MANI et al., 2006; KRIZAN et al., 2015). Uma distribuição homogênea das partículas durante a densificação aumenta a área de contato, permitindo alcançar maior resistência mecânica e menor abrasão durante o manejo e o transporte dos briquetes (GUO et al., 2012; CHALOUPKOVÁ et al., 2018; SETTE JR. et al., 2018)

Ao trabalhar com partículas menores também há um aumento da área de contato diminuindo a distância entre elas, promovendo uma forte ligação das forças mecânicas, forças químicas, ligação em ponte sólida e força de Van Der Waals, o que conseqüentemente influencia no comportamento mecânico (ZHANG; GUO, 2014; FEBBI et al., 2015; NATI et al., 2010; PANG et al., 2019; SETTER et al., 2020).

Nas pesquisas de Thoreson et al. (2014), Chungcharoen et al. (2020) e Helwani et al. (2020), foram avaliadas as influências de diferentes tamanhos de partículas nas características finais de biocombustíveis: os melhores resultados foram alcançados com tamanhos de partículas de: 4,76, 0,125 e 40-42 mm, respectivamente.

Chungcharoen e Srisang (2020) observaram que, ao reduzir o tamanho das partículas, houve diferença significativa no aumento da dureza dos briquetes. Helwani et al. (2020) avaliaram os três níveis (60, 80 e 100 mesh) de granulometria, sendo que o tamanho de partícula de 0,149 mm alcançou maior resistência à compressão, em função de uma forte relação entre granulometria, pressão de prensagem e composição da matéria-prima do briquete.

Os estudos de Padilla et al. (2016), Oliveira Maia et al. (2017) e Kumar e Chandrashekar (2020) obtiveram resultados satisfatórios com partículas de biomassa entre 0,8 e 6 mm.

Diante do exposto, é evidente que, embora haja uma predisposição de partículas menores promoverem ligações mais fortes, existem fatores que causam desvios nesse padrão, ou seja, a granulometria para a densificação pode variar de acordo com o tipo de matéria-prima utilizada e o processo de produção (THORESON et al., 2014; CHALOUPOKOVÁ et al., 2018; KRIZAN et al., 2015).

3.3 Principais parâmetros de resposta para os briquetes

Após o processo de produção do briquete, é importante conhecer suas características térmicas e energéticas por meio de parâmetros, como o poder calorífico e teor de cinzas (LELA et al., 2016). Com a mesma importância dada aos parâmetros de entrada, as características físicas de saída podem determinar a durabilidade e resistência do material densificado, por meio do conhecimento de sua densidade, durabilidade, resistência à compressão e resistência à água (FAIZAL et al., 2016; TUMULURU et al., 2011).

As normas de padronização para biocombustíveis sólidos utilizadas nessa revisão foram EN Plus (2015), EN 14961-2 e DIN 51731. As normas referiram-se às características da biomassa densificada na forma de pellets; no entanto, vários estudos as utilizam como padrão de referência para briquetes, como foi feito por Chungcharoen e Srisang (2020), Khlifi et al. (2020), Kpalo et al. (2020) e Niño et al. (2020).

3.3.1 Poder calorífico

Conforme indicado por Martinez et al. (2019), a matéria-prima e os briquetes finais devem ter alto teor de energia e carbono fixo e baixo teor de cinzas e matéria volátil. O Poder Calorífico dos combustíveis é definido como a quantidade de energia interna contida no combustível, sendo que quanto mais alto for o poder calorífico, maior será a energia contida. Essa energia liberada pode ser medida de duas maneiras: poder calorífico superior (PCS) ou poder calorífico inferior (PCI). Para Nogueira e Lora (2003) e Cortez et al. (2008), o PCS pode ser cerca de 10 a 20% maior que o PCI, pois o PCS avalia o calor latente de condensação do

vapor de água presente nos produtos em combustão. O poder calorífico pode ser obtido por meio da combustão sob condições padrão de temperatura e pressão de um combustível, sendo quantificado em calor gerado pela combustão por meio de uma bomba calorimétrica adiabática (ANTMEN et al., 2019; KHLIFI et al., 2020) ou de forma empírica, como por exemplo utilizando a equação de Tillman (1978), baseado na composição elementar da amostra (teor de carbono). Dessa forma, os resultados de poder calorífico, densidade energética e carbono fixo encontrados na pesquisa são apresentados na Tabela 03.

Com base nas normas de padronização DIN 51731 dos 20 trabalhos apresentados na Tabela 03, apenas a pesquisa de Raslavičius (2012) ficou exatamente no parâmetro mínimo de poder calorífico; porém, se comparado com as normas EN Plus (2015), e EN 14961-2, a quantidade de trabalhos passa a ser 06 (RASLAVIČIUS, 2012; OLIVEIRA MAIA et al., 2014; MAIA et al., 2017; KPALO et al., 2020; KHLIFI et al., 2020; MORALES-MÁXIMO et al., 2020), por ser uma norma mais restritiva nesse parâmetro.

O poder calorífico também é utilizado para calcular a densidade energética dos briquetes, que indica quanta energia existe por unidade de volume do combustível, afetando diretamente sua eficiência (MARTINEZ et al., 2019). Essa variável é dada pelo produto do poder calorífico pela densidade do combustível, de modo que quanto maiores forem essas duas variáveis, maior será a densidade energética (KUMAR; CHANDRASHEKAR, 2020).

Tabela 3 Parâmetros avaliados nos trabalhos acadêmicos em relação às normas EN 14961-2 e DIN 51731

Pesquisadores	Poder calorífico (MJ/kg)		Conteúdo de cinzas (%)	Teor de Umidade (%)	Material Volátil (%)	Carbono Fixo (%)	Densidade de Energia (GJ·m ⁻³)	Pré-tratamento térmico	Princípio da unidade de briquetagem
	Superior	Inferior							
GRANADA et al. (2020)							15,7		Hidráulico
KPALO et al. (2020)	17,78			9,24					Hidráulico
KHLIFI et al. (2020)	16,92		6,72	9,88	61,86	18,75			Hidráulico
CHUNGCHAROEN e SRISANG (2020)	21,78		2,4	3,1	70	20,62		Torrefação do SNC (300 °C)	Parafuso acionado por motor
KUMAR e CHANDRASHEKAR (2020)	19,6	17,8	0,7	2,5	73,2	18,6	23,3		NS
HELWANI et al. (2020)	30,67		0,45	5,5	19,73	71,4		Carbonização (400°C e 2 h)	Hidráulico
MORALES-MÁXIMO et al. (2020)	18,3			11,52					Mecânico manual
WAHEED AKOGUN (2020)	19,31		3,3	3,6	40,1	36,8		Torrefação de CH e CP (200, 250 e 300 °C)	Hidráulico
GWENZI et al. (2020)	33,8								Mecânico manual
MARTINEZ et al. (2019)				9,5			19,9		Hidráulico
MARTINEZ et al. (2019)	18,1		9,85	6,68	69,4	18,7	17,52		Hidráulico

3.3.2 Carbono fixo e matéria volátil

Uma variável importante para a combustão de briquetes é o teor de matéria volátil, que é proporcional à energia liberada durante a combustão e inversamente proporcional ao teor de carbono fixo (FERNANDES et al., 2013; MAIA et al., 2017; MARTINEZ et al., 2019). A matéria volátil representa a fração de gases combustíveis e não combustíveis, com exceção da umidade, que é liberada quando o combustível é aquecido a altas temperaturas (ARAÚJO et al., 2016; FERNANDES et al., 2013). O briquete produzido com fins de uso doméstico deve apresentar uma queima que ocorra lentamente (MARTINEZ et al., 2019): quanto maior o carbono fixo, mais lenta é a combustão (ARAÚJO et al., 2016; MARTINEZ et al., 2019).

A biomassa, em geral, possui cerca de 65 a 85% em peso de matéria volátil, enquanto a biomassa lenhosa possui 76 a 86% em peso (MARTINEZ et al., 2019). Os trabalhos de Nwabue, Unah e Itumoh (2017) e Helwani et al. (2020) apresentaram material volátil de 19,73 e 17,23%, bem abaixo dos resultados encontrados em outras pesquisas: esse resultado foi possível em função do pré-tratamento das matérias-primas, pois sabe-se que tratamentos térmicos das matérias-primas são capazes de promover um aumento no teor de carbono fixo presente no combustível (HELWANI et al., 2020).

Segundo Fernandes et al. (2013), o teor de carbono fixo está em torno de 7 a 20%, porém, na Tabela 03 é possível observar valores bem maiores em trabalhos com tratamento térmico das matérias-primas.

3.3.3 Umidade (briquete)

O teor de umidade do briquete impacta em sua densidade e resistência, pois o excesso de umidade pode acarretar problemas de manejo e armazenagem (CANÇÃO et al., 2019). De acordo com a norma EN Plus (2015), o teor de umidade dos briquetes deve ser $\leq 10\%$.

Na Tabela 03 é possível observar que a maioria dos trabalhos atenderam as exigências da norma. Dois estudos não atenderam ao padrão: um obteve valor de 10,40% de umidade, sendo um resultado muito próximo desse padrão. Um fato comum entre os dois trabalhos que não atenderam a exigência de umidade da EN Plus (2015) é que ambos foram realizados em máquinas manuais, sendo acionadas hidráulicamente para pesquisa de Masullo et al. (2018) e mecânica para Morales-Máximo et al. (2020).

A norma ISO 17225-7:2021 descreve a padronização da qualidade de combustíveis sólidos e recomenda que para pellets de madeira o teor de umidade seja de 2,2 a 15,9%.

3.3.4 Cinzas

Conhecer o teor de cinzas de um combustível é essencial para avaliar sua qualidade, uma vez que, quando se trata de combustível, quanto menor o teor de cinzas, significa que há maior quantidade de material combustível para queima, já que esta é considerada um material inorgânico (DUCA et al., 2014). Na revisão apresentada na Tabela 03, a média do teor de cinzas foi de 6,29%, superando o valor máximo permitido nos parâmetros preconizados pelas normas EN Plus (2015), que é de 2%.

Na Tabela 03 também são apresentados alguns trabalhos que contribuíram para aumentar essa média geral, sendo eles: Khlifi et al. (2020), Maia et al. (2017), Nwabue et al. (2017) e Oliveira Maia et al. (2014). O trabalho de Nwabue et al. (2017) obteve o maior teor de cinzas da relação, com resultado de 27,93%, sendo que o fator que mais contribuiu para o alto teor de cinzas apresentado no trabalho tem relação direta com a composição do briquete, o qual, além da biomassa, tem coque, pó de calcário e laterita com grande quantidade de material não combustível.

No trabalho de Oliveira Maia et al. (2014), o teor de cinzas encontrado foi de 9,85%, já no trabalho de Maia et al. (2017) foi de 10,70%. Nesses trabalhos, as biomassas utilizadas foram folhas e caules de bananeira e casca de arroz e, normalmente, biomassas herbáceas apresentam teor de cinzas de aproximadamente 10% (IVANOVA et al., 2018).

Padilla et al. (2016) recomendam que um parâmetro adequado do teor de cinzas na produção de briquetes é um volume inferior a 4%, tendo em vista sua característica abrasiva, evitando dessa forma a corrosão do equipamento.

3.4 Propriedades físicas e mecânicas

A utilização da biomassa como matéria-prima para a produção de combustíveis densificados elimina áreas de estocagem de resíduos nas indústrias, facilitando o armazenamento, manuseio e transporte de combustíveis sólidos (TUMULURU et al., 2011; PRVULOVIC, et al., 2014; MUAZU; STEGEMANN, 2015). Além disso, a técnica de densificação beneficia propriedades, como resistência mecânica, resistência à tração e durabilidade (GARRIDO et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2017; BAZARGAN et al., 2017; OKOT et al., 2018; REJDAK et al., 2019).

Dentre as propriedades físicas e mecânicas exploradas nos trabalhos avaliados na Tabela 04, é possível observar que a densidade e a resistência à compressão foram estudadas com mais frequência como parâmetros de avaliação na classificação de um combustível sólido.

3.4.1 Expansão longitudinal

Segundo Masullo et al. (2018), a análise da expansão longitudinal tem por objetivo avaliar a higroscopicidade do briquete, mensurando o quanto ele tende a se expandir depois de se tornar mais denso e alcançar estabilidade dimensional.

O excesso de umidade ambiente é um fator que pode causar expansão da biomassa densificada enfraquecendo as ligações entre as partículas e diminuindo sua durabilidade (KALIYAN; MOREY, 2009). A estabilidade dimensional do briquete refere-se à sua resistência durante o transporte e o armazenamento (ARAÚJO et al., 2016).

Em seu trabalho, Antwi-Boasiako e Acheampong (2016) observaram, em um período de 21 dias, com temperatura média de 20°C e com umidade relativa de 95%, uma expansão abaixo de 20%, e concluíram que esse nível é considerado adequado para o transporte e o armazenamento dos briquetes.

É esperado que briquetes produzidos na presença de calor tenham menor expansão longitudinal. Em seu trabalho, Araújo et al. (2016) obtiveram uma expansão de 3%, enquanto os briquetes produzidos por Padilla et al. (2016) e Masullo et al. (2018), densificados sem aquecimento, atingiram valores superiores de 13,47 e 15%, respectivamente. Este comportamento justifica pelo amolecimento da lignina na presença de calor, atuando como um aglutinante entre as partículas (SETTER et al., 2020).

3.4.2 Geração de finos

Outra variável importante para avaliar a eficácia do processo de produção de briquetes é sua capacidade de se manterem íntegros, minimizando dessa forma a geração de finos. O teste para avaliar a geração de finos se chama friabilidade, sendo que quanto mais friável for o briquete, maior será sua desintegração (MASULLO et al., 2018). De acordo com a norma EN Plus (2015), os combustíveis devem ter uma geração de finos de até 1% (MASULLO et al., 2018). Na Tabela 04, nenhum dos estudos atendeu ao padrão da norma EN Plus (2015); no entanto, eles podem ser classificados como muito pouco friáveis, o que os torna briquetes resistentes (PADILLA et al., 2016).

Tabela 4 Propriedades físicas e mecânicas, densidade e resistência à compressão avaliados em trabalhos acadêmicos

Pesquisadores	Densidades ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$)		Resistên- cia à compres- são (MPa)	Resistên- cia ao impacto (%)	Resistência à água (%)	Resistên- cia à tração ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	Durabilida- de (%)	Geração de Finos (%)	Expansão Longitudi- nal (%)	Absorção de água (%)	Princípio da unidade de briquetagem
	Densidade [m/v]	Volume									
GRANADA et al. (2020)	918		1,29				94,1		8,68		Hidráulico
KPALO et al. (2020)	430		22,33	99,2	93,2						Hidráulico
KHLIFI et al. (2020)	3030	1200									Hidráulico
KUMAR; CHANDRASHE KAR (2020)	1250										NS
HELWANI et al. (2020)	1060		0,99								Hidráulico
MORALES- MÁXIMO et al. (2020)	1240										Mecânico manual
WAHEED; AKOGUN (2020)	590		1,23				99,3				Hidráulico
GWENZI et al. (2020)	1300		0,86	99						3	Mecânico manual
MARTINEZ et al. (2019)		1163									Hidráulico
MARTINEZ et al. (2019)		990	19,8								Hidráulico
MASULLO et al. (2018)		920	0,37					4	15		Hidráulico
BAZARGAN et al. (2017)				95	50	830					NS
JÚNIOR et al. (2017)		1170				2070	99,89				NS
GARRIDO et al. (2017)	1190						100				Hidráulico

OIVEIRA et al. (2017)		913	41,19								Extrusora de parafuso
NWABUE et al. (2017)	1524										Hidráulico
PADILLA et al. (2016)			0,37				6,62	13,47			Hidráulico
ARAÚJO et al. (2016)		1140	16						3	1	Hidráulico
OLIVEIRA MAIA et al. (2014)		1.000	5,3								Hidráulico
THORESON et al. (2014)	500	190									NS
RASLAVICIUS (2012)	861						95,6				Hidráulico
Média aritmética	1158	965	9,98	97,73	71,60	1.450,0	97,78	5,31	10,04	2,00	
PT mais A1		600 ≤ BD ≤ 750					≥98,00	<1,00			
PT mais A2		601 ≤ BD ≤ 750					≥97,50	<1,00			
PT mais A3		602 ≤ BD ≤ 750					≥97,50	<1,00			

3.4.2 Absorção de água

A absorção de água impacta diretamente na resistência dos briquetes, assim como as demais variáveis que afetam o armazenamento, transporte e poder calorífico (ARAÚJO et al., 2016). Para mitigar o risco da umidade excessiva, é comum em alguns processos produtivos a utilização do pré-tratamento térmico, como por exemplo a torrefação (ARAÚJO et al., 2016, GWENZI et al., 2020).

3.4.3 Durabilidade

De acordo com Júnior et al. (2017) e Waheed e Akogun (2020), medir a resistência dos briquetes a vibrações, quedas, abrasões e outras ações decorrentes de seu manuseio e transporte é um requisito importante para ser conhecido (WAHEED; AKOGUN, 2020, JÚNIOR et al., 2017).

A norma EN Plus (2015) diz que a durabilidade deve ser de pelo menos 97,5% para as classes A2 e A3, ou 98% para a classe A1. O estudo de Raslavičius (2012) observou que briquetes com maior durabilidade tendem a ser mais densos, o resultado de seu ensaio foi de 95,6%, um pouco abaixo do padronizado na EN Plus (2015).

Os testes para identificar a durabilidade dos briquetes são denominados de testes de tamboreamento e são realizados com um equipamento chamado de friabilômetro. Esse equipamento é similar ao utilizado pela indústria farmacêutica (TÁVORA, 2017). O friabilômetro constitui-se por um cilindro, onde são colocados os briquettes que serão testados. O cilindro gira em torno do próprio eixo a uma velocidade em rpm (rotações por minuto) e um tempo pré-definido. O número de voltas do cilindro corresponde ao número total de quedas que os materiais testados sofrerão. Ao final do ensaio, os briquetes são pesados e a durabilidade calcula-se pela diferença do percentual de perda de massa (DCTECH, 2017).

A densidade dos briquetes apresenta forte correlação logarítmica com a resistência à compressão (RASLAVIČIUS, 2012; WAHEED; AKOGUN, 2020; REJDAK et al., 2019).

3.4.4 Densidade aparente

Quanto maior a densidade aparente, maior a razão entre a energia produzida e o volume de material: esse parâmetro é medido pela razão entre a massa do briquete e seu volume (KPALO et al., 2020). Há também a densidade granular ou densidade real, que é medida no vácuo, ou seja, desconsiderando os vazios no material; já a densidade aparente é aquela determinada no ar e leva em consideração a porosidade entre as partículas do material (GILVARI et al., 2018).

A densidade aparente é uma das principais propriedades da avaliação da biomassa como combustível sólido, sendo que um fator determinante para resultados promissores é a tecnologia empregada no processo de densificação, como, por exemplo a briquetagem (MARTINEZ et al., 2019). A elevação da variável torna economicamente viável o uso da biomassa como combustível sólido, reduzindo os custos de transporte, armazenamento e manuseio, permitindo o aumento da relação energética e do volume (PRVULOVIC, et al., 2014; MUAZU; STEGEMANN, 2015; JÚNIOR et al., 2017; KPALO et al., 2020).

Na Tabela 04, a densidade aparente dos briquetes é comparada com o valor de referência da norma EN Plus (2015) e é baseada em testes realizados de acordo com a norma ISO 17828.

Todas as técnicas utilizadas para avaliar a densidade aparente têm como objetivo avaliar a relação entre massa e volume, levando em consideração a presença de poros ou vazios no material.

A primeira técnica encontrada consiste em descarregar os briquetes em um recipiente de volume conhecido e medir seu peso para determinar a relação massa/volume, semelhante ao que foi feito nos trabalhos de Thoreson et al. (2014) e Khlifi et al. (2020). Também é possível determinar a densidade aparente pelo método de imersão dos briquetes em mercúrio (ARAÚJO et al., 2016; MARTINEZ et al., 2019), ou ainda é possível utilizar paquímetros para medir as dimensões dos briquetes e, assim, calcular seu volume (OLIVEIRA et al., 2017; MAIA et al., 2017; MASULLO et al., 2018).

Dos trabalhos avaliados nessa pesquisa, a maior densidade aparente encontrada foi de 1200 kgm^{-3} , obtida em prensa hidráulica, à pressão de 150 MPa e aquecimento à temperatura de $38 \text{ }^\circ\text{C}$ (KHLIFI et al., 2020). Os outros três estudos que obtiveram resultados elevados, acima de 1.000 kgm^{-3} , utilizaram pressões de 8,27 a 14 MPa e temperatura de $120 \text{ }^\circ\text{C}$ (ARAÚJO et al., 2016; JÚNIOR et al., 2017; MARTINEZ et al., 2019). Dois desses trabalhos utilizaram máquinas com acionamento hidráulico, enquanto o outro não especificou essa informação. Martinez et al. (2019) atribuíram a maior densidade de seus briquetes à alta taxa de compactação durante a briquetagem.

Araújo et al. (2016) constataram em sua pesquisa que a torrefação da biomassa teve maior influência no aumento da densidade aparente dos briquetes, estando relacionada também com a menor higroscopicidade adquirida após o tratamento térmico. Comportamento semelhante foi identificado na pesquisa de Waheed e Akogun (2020), relatando uma correlação da torrefação no aumento da densidade dos briquetes. Outros autores, como Kpallo et al. (2020), Kumar e Chandrashekar (2020) e Thoreson et al. (2014) identificaram que, quanto maior a umidade da biomassa, menor era a densidade dos briquetes.

A escolha da técnica de densificação e a definição dos parâmetros aplicados pode aumentar a densidade da matéria-prima em 10 a 20 vezes (PANWAR et al., 2011). No trabalho de Masullo et al. (2018), foi utilizado biomassa da palha da cana-de-açúcar que inicialmente

tinha uma densidade de 280 kgm^{-3} e após o processo de produção chegou a uma densidade de 920 kgm^{-3} ; para obter esse resultado foram necessários 48 h de densificação. Comportamento semelhante foi identificado no trabalho de Maia et al. (2017), que utilizou como biomassa folhas de bananeira, com densidade aparente de 46 kgm^{-3} , atingindo o resultado de 990 kgm^{-3} após a densificação. Ambos os trabalhos utilizaram prensas hidráulicas. Os briquetes produzidos em máquinas acionadas por componentes hidráulicos atingiram altos valores de densidade aparente, ultrapassando inclusive os 750 kgm^{-3} limitados pela norma EN Plus (2015) (OLIVEIRA et al., 2017).

3.4.5 Resistência à compressão

Por meio da força compressiva é medida a carga máxima de tensão que o briquete tem capacidade de resistir, antes de uma rachadura ou de sua quebra. Ela é medida em megapascal (MPa), e cada 1 MPa corresponde a uma resistência aproximada de 10 kgfcm^{-2} . A carga de fratura é registrada em uma curva tensão-deformação: este ensaio visa reproduzir a tensão de compressão sofrida durante o transporte e o armazenamento em silos ou caixas, onde os briquetes são empilhados (KALIYAN; MOREY, 2009; MARTINEZ et al., 2019). Assim, entende-se que, quanto maior a resistência à compressão de um briquete, melhor sua qualidade para armazenamento e transporte.

A resistência à compressão é considerada uma das análises mais relevantes na identificação da viabilidade técnica de briquetes: na Tabela 04, é possível identificar variação entre 0,37 MPa e 41,19 MPa, com média em 9,98 MPa. A literatura recomenda uma resistência à compressão mínima de 2,56 MPa (OKOT et al., 2018).

Entre os trabalhos apresentados na Tabela 4, alguns resultados ficaram abaixo de 2,56 Mpa, com resultados de até 0,37 Mpa: esses trabalhos foram realizados com máquinas manuais com princípios de funcionamento hidráulico; o segundo menor valor, igual a 0,86 Mpa, com máquina manual e acionamento mecânico.

Estudos que utilizaram briquetes acionados hidráulicamente ultrapassaram os 2,56 MPa estipulados. O briquete que apresentou o maior valor foi de 41,19 Mpa, obtido em máquina extrusora de parafuso.

4 REFERÊNCIAS

- AHMAD, T.; BELWAL, T.; LI, L. Utilization of wastewater from edible oil industry, turning waste into valuable products: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 99, p. 21-33, 2020.
- ALARENAN, S.; GASIM, A.A.; HUNT, L.C. Modelling industrial energy demand in Saudi Arabia. **Energy Economics**, v. 85, p. 1-10, 2020.
- AMARASEKARA, A.; TANZIM, F.S.; ASMATULU, E. Briquetting and carbonization of naturally grown algae biomass for low-cost fuel and activated carbon production. **Fuel**, v. 208, p. 612-617, 2017.
- ANGGONO, W.; SUTRISNO; SUPRIANTO, F.D. Biomass Briquette Investigation from Pterocarpus Indicus Twigs Waste as an Alternative Renewable Energy. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 8, p. 1393-1400, 2018.
- ANTMEN, Z.F. Exploitation of peanut and hazelnut shells as agricultural industrial wastes for solid biofuel production. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 28, p. 2340-2347, 2019.
- ANTWI-BOASIAKO, C.; ACHEAMPONG, B. Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities. **Biomass & Bioenergy**, v. 85, p. 144-152, 2016.
- ARANSIOLA, E.; OYEWUSI, T.; OSUNBITAN, J. Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized corncob briquette. **Energy Reports**, v. 5, p. 909-918, 2019.
- ARAÚJO, S.; BOAS, M.A.V.; NEIVA, D.M.; CARNEIRO, A.D.C.; VITAL, B.; BREGUEZ, M.; PEREIRA, H. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures. **Biomass & Bioenergy**, v. 90, p. 181-186, 2016.
- ARIAS, T.; LÓPEZ, L. Propuesta tecnológica para el aprovechamiento energético del bagazo de cebada malteada de la cervecería Hatuey. **Revista Científica de Tecnología Química**, v. 35, p. 256-270, 2015.
- BALASUBRAMANI, P.; ANBUMALAR, V.; NAGARAJAN, M. Biomass briquette manufacturing system model for environment. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 686, p. 859-865, 2016.
- BAZARGAN, A.; ROUGH, S.L.; MCKAY, G. Fine tuning of process parameters for improving briquette production from palm kernel shell gasification waste. **Environmental Technology**, v. 39, p. 931-938, 2017.
- BERASTEGUI, C.; ORTEGA, J.; MENDOZA, J. Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tusa de maíz, bioaglomerante de yuca y carbón mineral del departamento de Córdoba. Ingeniare. **Revista Chilena de Ingeniería**, v. 25, p. 643-653, 2017.
- BREYER, C.; HEINONEN, S.; RUOTSALAINEN, J. New consciousness: A societal and energetic vision for rebalancing humankind within the limits of planet Earth. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 114, p. 7-15, 2017.
- BUSOV, V.B. Manipulation of Growth and Architectural Characteristics in Trees for Increased Woody Biomass Production. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1-8, 2018.
- CAMPUZANO-DUQUE, L.; RÍOS, L.; CARDEÑO-LÓPEZ, F. Caracterización composicional del fruto de 15 variedades de *Jatropha curcas* L. en el departamento del Tolima, Colombia. **Ciencia y Tecnología Agropecuaria**, v. 17, p. 379-390, 2016.

CHALOUPOKOVÁ, V.; IVANOVA, T.; EKRT, O.; KABUTEY, A.; HERÁK, D. Determination of Particle Size and Distribution through Image-Based Macroscopic Analysis of the Structure of Biomass Briquettes. **Energies**, v. 11, n. 2, p. 331, 2018.

CHUNG, F.H. Unified theory and guidelines on adhesion. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 42, p. 1319-1331, 1991.

CHUNGCHAROEN, T.; SRISANG, N. Preparation and characterization of fuel briquettes made from dual agricultural waste: Cashew nut shells and areca nuts. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120434, 2020.

CORTEZ, L.; LORA, E.; AYARZA, J. Biomassa no Brasil e no Mundo. In: CORTEZ, B.; LORA, S.; GÓMEZ, O. (Org.). **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2018. p.15-29.

D'AGUA, J.; PEREIRA, R.; MARINHO, F. Preparación y Caracterización Física del Biocombustible Sólido del Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes*). **Información Tecnológica**, v. 26, p. 53-62, 2015.

DAVYDENKO, A.; MOSTAFABEE, S.; KARASEV, A. Caracterización de briquetas de escoria espumante en el horno de arco eléctrico durante la producción de acero inoxidable. **Steel research international**, v. 86, p. 137-145, 2014.

DCTECH. **Friabilometro**: teste de friabilidade de comprimidos na indústria farmacêutica. Disponível em: <https://www.dctech.com.br/friabilometro-teste-de-friabilidade-de-comprimidos-na-industria-farmacaceutica/>. Acesso em: 25 maio 2022.

DUCA, D.; RIVA, G.; PEDRETTI, E.F.; TOSCANO, G. Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. **Fuel**, v. 135, p. 9-14, 2014.

ENPLUS. **ENplus For Wood Pellets EN plus Handbook Part 6**: Schedule of Fees. Brussels, Belgium: European Pellet Council (EPC), 2015.

FAIZAL, H.M.; RAHMAN, M.R.A.; LATIFF, Z. Review on densification of palm residues as a technique for biomass energy. **Jurnal Teknologi**, v. 78, p. 9-18, 2016.

FEBBI, P.; MENESATTI, P.; COSTA, C.; PARI, L.; CECCHINI, M. Automated determination of poplar chip size distribution based on combined image and multivariate analyses. **Biomass & Bioenergy**, v. 73, p. 1-10, 2015.

FELFLI, F.F.; MESA, P.J.M.; ROCHA, J.D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C.A.; PIPPO, W.A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass & Bioenergy**, v. 35, p. 236-242, 2011.

FERNANDES, E.R.K.; MARANGONI, C.; SOUZA, O.; SELLIN, N. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. **Energy Conversion and Management**, v. 75, p. 603-608, 2013.

FRANCIK, S.; KNAPCZYK, A.; KNAPCZYK, A.; FRANCIK, R. Decision Support System for the Production of Miscanthus and Willow Briquettes. **Energies**, v. 13, p. 1364, 2020.

GANGIL, S. Superiority of intrinsic biopolymeric constituents in briquettes of lignocellulosic crop residues over wood: A TG-diagnosis. **Renewable Energy**, v. 76, p. 478-483, 2015.

GARRIDO, M.A.; CONESA, J.A.; GARCIA, M.D. Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic Wastes. **Energies**, v. 10, p. 850, 2017.

GENDEK, M.; ANISZEWSKA, J.M.; VELEBIL, L. Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species. **Biomass & Bioenergy**, v. 117, p. 173-179, 2018.

GILBERT, P.; RYU, C.; SHARIFI, V.; SWITENBANK, J. Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous plants. **Fuel**, v. 88, p. 1491-1497, 2009.

GILVARI, H.; DE JONG, W.; SCHOTT, D.L. Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors—A review. **Biomass & Bioenergy**, v. 120, p. 117-134, 2018.

GRANADO, M.P.P.; SUHOGUSOFF, Y.V.M.; SANTOS, L.R.O.; YAMAJI, F.M.; DE CONTI, A.C. Effects of pressure densification on strength and properties of cassava waste briquettes. **Renewable Energy**, v. 167, p. 306-312, 2020.

GROVER, P.D.; MISHRA, S.K. Biomass Briquetting: Technology and Practices. In: FAO – Food and Agriculture Organization. **Document No. 46**. Regional Wood Energy Development Program in Asia, Field Bangkok, Thailand: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996. 46p.

GUO, Q.; CHEN, X.; LIU, H. Experimental research on shape and size distribution of biomass particle. **Fuel**, v. 94, p. 551-555, 2012.

GUO, X.L.; ZHANG, T.J. Utilization of municipal solid waste incineration fly ash to produce autoclaved and modified wall blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 1-13, 2020.

GWENZI, W.; NCUBE, R.S.; RUKUNI, T. Development, properties and potential applications of high-energy fuel briquettes incorporating coal dust, biowastes and post-consumer plastics. **SN Applied Sciences**, v. 2, p. 1-14, 2020.

HANSTED, A.; NAKASHIMA, G.; MARTINS, M. Caracterização Físico-Química da Biomassa de *Leucaena leucocephala* para Produção de Combustível Sólido. **Revista Virtual de Química**, v. 20, p. 1-12, 2016.

HELWANI, Z.; RAMLI, M.; RUSYANA, A.; MARLINA, M.; FATRA, W.; IDROES, G.M.; SUHENDRA, R.; ASHWIE, V.; MAHLIA, T.M.I.; IDROES, R. Alternative Briquette Material Made from Palm Stem Biomass Mediated by Glycerol Crude of Biodiesel Byproducts as a Natural Adhesive. **Processes**, v. 8, p. 777, 2020.

HERNANDEZ, J.J.; BALLESTEROS, R.; BARBA, J. Effect of the Addition of Biomass Gasification Gas on the PM Emission of a Diesel Engine. **Sae International Journal of Engines**, v. 8, p. 14-19, 2015.

HOANG, A.T.; NGUYEN, X.P. Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process. **Journal of Cleaner Production**, v. 305, 127161, 2021.

HOYOS, C.; GONZÁLEZ, Y.; MENDOZA, J. Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de la mezcla de dos biomásas residuales, un aglomerante a base de yuca y carbón mineral, propios del departamento de Córdoba. *Ingeniare*. **Revista Chilena de Ingeniería**, v. 27, p. 454-464, 2019.

IFTIKHAR, M.; ASGHAR, A.; RAMZAN, N.; SAJJADI, B.; CHEN, W.-Y. Biomass densification: Effect of cow dung on the physicochemical properties of wheat straw and rice husk based biomass pellets. **Biomass & Bioenergy**, v. 122, p. 1-16, 2019.

- IVANOVA, T.; MUNTEAN, A.; LHAVRLAND, B.; HUTLA, P. Quality assessment of solid biofuel made of sweet sorghum biomass. **BIO Web of Conferences**, v. 10, p. 02007, 2018.
- JAIN, M. S.; KALAMDHAD, A. S. Soil revitalization via waste utilization: Compost effects on soil organic properties, nutritional, sorption and physical properties. **Environmental Technology Innovation**, v. 18, p. 1-38, 2020.
- JALGAONKAR, K.; MAHAWAR, M.K.; BIBWE, B.; KANNAUJIA, P. Postharvest Profile, Processing and Waste Utilization of Dragon Fruit (*Hylocereus Spp.*): a Review. **Food Reviews International**, v. 38, n. 4, p. 1-27, 2020.
- JUNIOR, C.R.S.; LIMA, P.A.F.; LOPES, D.M.M.; BARBOSA, P.V.G.; CONEGLIAN, A.; ALMEIDA, R.D.A. Characterization of biomass, charcoal and briquette of *Phyllostachys aurea* Carr. ex A. & C. Rivière. **Scientia Forestalis**, v. 45, p. 619-628, 2017.
- KALIYAN, N.; MOREY, R.V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass & Bioenergy**, v. 33, p. 337-359, 2009.
- KALIYAN, N.; MOREY, R.V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 1082-1090, 2010.
- KARNER, K.; DISSAUER, C.; ENIGL, M. Environmental trade-offs between residential oilfired and wood pellet heating systems: Forecast scenarios for Austria until 2030. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 868-879, 2017.
- KAYO, C.; OJIMI, R.; IWAOKA, M. Greenhouse Gas Emission Reductions in a District Heating and Cooling System by Using Woody Biomass: a study in Shiwa, Iwate Prefecture. **Mokuzai Gakkaishi**, v. 62, p. 172-181, 2016.
- KHLIFI, S.; LAJILI, M.; BELGHITH, S.; MEZLINI, S.; TABEL, F.; JEGUIRIM, M. Briquettes production from olive mill waste under optimal temperature and pressure conditions: physico-chemical and mechanical characterizations. **Energies**, v. 13, p. 1214, 2020.
- KPALO, S.Y.; ZAINUDDIN, M.F.; MANAF, L.A.; ROSLAN, A.M. A Review of Technical and Economic Aspects of Biomass Briquetting. **Sustainability**, v. 12, p. 4609, 2020.
- KPALO, S.Y.; ZAINUDDIN, M.F.; MANAF, L.A.; ROSLAN, A.M. Production and Characterization of Hybrid Briquettes from Corncoobs and Oil Palm Trunk Bark under a Low Pressure Densification Technique. **Sustainability**, v. 12, p. 2468, 2020.
- KRIŽAN, P.; MATÚ, M.; SOOS, L.; BENIAK, J.; MATÚŠ, M. Behavior of Beech Sawdust during Densification into a Solid Biofuel. **Energies**, v. 8, p. 6382-6398, 2015.
- KUMAR, R.; CHANDRASHEKAR, N. Production and characterization of briquettes from invasive forest weeds: *Lantana camara* and *Prosopis juliflora*. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 17, p. 158-164, 2020.
- LEI, T.; WANG, Z.; LI, Z.; XU, J.; HE, X.; ZHU, J. A biomass briquetting fuel machine and its large-scale operation system. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 5, 013107, 2013.
- LELA, B.; BARIŠIĆ, M.; NIŽETIĆ, S. Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical-mechanical and thermal characteristics. **Waste Management**, v. 47, Part B, p. 236-245, 2016. Doi: doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.035.

MAIA, B.G.D.O.; OLIVEIRA, A.P.N. de; OLIVEIRA, T.M.N. de; MARANGONI, C.; SOUZA, O.; SELLIN, N. Characterization and production of banana crop and rice processing waste briquettes. *Environ. Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 37, p. 1266-1273, 2017.

MAKELA, M.; FULLANA, A.; YOSHIKAWA, K. Ash behavior during hydrothermal treatment for solid fuel applications. Part 1: Overview of different feedstock. *Energy Conversion and Management*, v. 121, p. 402-408, 2016.

MANI, S.; TABIL, L.G.; SOKHANSANJ, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass & Bioenergy*, v. 30, p. 648-654, 2006.

MANZOOR, A.; QAZI, J.I.; UL HAQ, I.; MUKHTAR, H.; RASOOL, A. Significantly enhanced biomass production of a novel biotherapeutic strain *Lactobacillus plantarum* (AS-14) by developing low cost media cultivation strategy. *Journal of Biological Engineering*, v. 11, p. 1-10, 2017.

MARREIRO, H.M.P.; PERUCHI, R.S.; LOPES, R.M.B.P.; ANDERSEN, S.L.F.; ELIZIÁRIO, S.A.; ROTELLA JUNIOR, P. Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. *Energies*, v. 14, p. 8320, 2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/en14248320>.

MARTÍN, F. Pélets y briquetas. *Ecología*, v. 2293, p. 54-62, 2014.

MARTINEZ, C.L.M.; SERMYAGINA, E.; CARNEIRO, A.D.C.O.; VAKKILAINEN, E.; CARDOSO, M. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. *Biomass & Bioenergy*, v. 123, p. 70-77, 2019.

MARTINEZ, J.F.G.; GOMEZ, L.M.T.; GUZMAN, M.F.S. Energy from biomass: alternative for the reduction of atmospheric emissions. *Revista Digital Lampsakos*, v. 2145, p. 70-78, 2020.

MASULLO, L.S.; ALESÍ, L.S.; QUADROS, T.M.C.; SILVA, D.; DE PÁDUA, F.A.; YAMAJI, F.M. Use of Blends Containing Different Proportions of Straw and Sugarcane Bagasse for the Production of Briquettes. *Revista Virtual de Química*, v. 10, p. 641-654, 2018.

MORALES-MAXIMO, M.; RUIZ-GARCIA, V.M.; LOPEZ-SOSA, L.B. Exploitation of Wood Waste of *Pinus* spp for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichataro, Michoacan, Mexico. *Applied Sciences-Basel*, v. 10, p. 1-20, 2020.

MUAZU, R.I.; STEGEMANN, J.A. Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. *Fuel Processing Technology*, v. 133, p. 137-145, 2015.

MURPHY, F.; SOSA, A.; MCDONNELL, K. Life cycle assessment of biomass-to-energy systems in Ireland modelled with biomass supply chain optimization based on greenhouse gas emission reduction. *Energy*, v. 109, p. 1040-1055, 2016.

MUSA, S. D.; TANG, Z. H.; IBRAHIM, A. O. China's energy status: A critical look at fossils and renewable options. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 2281-2290, 2018.

NATI, C.; SPINELLI, R.; FABBRI, P. Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. *Biomass & Bioenergy*, v. 34, p. 583-587, 2010.

NAVALTA, C.J.L.G.; BANAAG, K.G.C.; RABOY, V.A.O.; VÁ, A.W.; CABATINGAN, L.K.; JU, Y.-H. Solid fuel from Co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran. *Renewable Energy*, v. 147, p. 1941-1958, 2019.

NHUCHHEN, D.; AFZAL, M. HHV Predicting Correlations for Torrefied Biomass Using Proximate and Ultimate Analyses. *Bioengineering*, v. 4, p. 1-15, 2017.

NINO, A.; ARZOLA, N.; ARAQUE, O. Experimental Study on the Mechanical Properties of Biomass Briquettes from a Mixture of Rice Husk and Pine Sawdust. **Energies**, v. 13, p. 1-20, 2020.

NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. 2ed. Rio de Janeiro: Interciência. 200p, (2003).

NUNES, E.Z.; ANDRADE, A.M.; DIAS JÚNIOR, A.F. Production of briquettes using coconut and eucalyptus wastes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 11, p. 883-888, 2019.

NUREK, T.; GENDEK, A.; ROMAN, K.; DAŹBROWSKA, M. The effect of temperature and moisture on the chosen parameters of briquettes made of shredded logging residues. **Biomass & Bioenergy**, v. 130, p. 105368, 2019.

NWABUE, F.; UNAH, U.; ITUMOH, E. Production and characterization of smokeless bio-coal briquettes incorporating plastic waste materials. **Environmental Technology & Innovation**, v. 8, p. 233-245, 2017.

OBI, O.F. Evaluation of the effect of palm oil mill sludge on the properties of sawdust briquette. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1749-1758, 2015.

OKOT, D.K.; BILSBORROW, P.E.; PHAN, A.N. Briquetting characteristics of bean straw-maize cob blend. **Biomass & Bioenergy**, v. 126, p. 150-158, 2019.

OKWU, M.O.; SAMUEL, O.D. Adapted hyacinth briquetting machine for mass production of briquettes. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 40, n. 10, p. 2853-2866, 2018.

OLIVEIRA MAIA, B.G.; SOUZA, O.; MARANGONI, C.; HOTZA, D.; DE OLIVEIRA, A.P.N.; SELLIN, N. Production and characterization of fuel briquettes from banana leaves waste. **Chemical Engineering Transactions**, v. 37, p. 439-444, 2014.

OLIVEIRA, R.S.; PALÁCIO, S.M.; DA SILVA, E.A.; MARIANI, F.Q.; REINEHR, T.O. Briquettes production for use as power source for combustion using charcoal thin waste and sanitary sewage sludge. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 10778-10785, 2017.

ONIFADE, S.T.; ALOLA, A.A.; ERDOĞAN, S.; ACET, H. Environmental aspect of energy transition and urbanization in the OPEC member states. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 17158–17169, 2021.

PADILLA, E.R.D.; PIRES, I.C.S.A.; YAMAJI, F.M.; FANDIÑO, J.M.M. Production and Physical-Mechanical Characterization of Briquettes from Coconut Fiber and Sugarcane Straw. **Revista Virtual de Química**, v. 8, p. 1334-1346, 2016.

PANDEY, G. Biomass based bio-electro fuel cells based on carbon electrodes: an alternative source of renewable energy. **SN Applied Sciences**, v. 1, p. 1-10, 2019.

PANG, L.; YANG, Y.; WU, L.; WANG, F.; MENG, H. Effect of Particle Sizes on the Physical and Mechanical Properties of Briquettes. **Energies**, v. 12, p. 3618, 2019.

PANWAR, V.; PRASAD, B.; WASEWAR, K.L. Biomass Residue Briquetting and Characterization. **Journal of Energy Engineering**, v. 137, p. 108-114, 2011.

PATIL, G. The possibility study of briquetting agricultural wastes for alternative energy. **Indonesian Journal of Forestry Research**, v. 6, p. 133-139, 2019.

PRVULOVIC, S.; GLUVAKOV, Z.; TOLMAC, J.; TOLMAC, D.; MATIC, M.; BRKIC, M. Methods for Determination of Biomass Energy Pellet Quality. **Energy Fuels**, v. 28, p. 2013-2018, 2014.

QUIJERA, J.A.; ALRIOLS, M.G.; LABIDI, J. Integration of a solar thermal system in a dairy process. **Renewable Energy**, v. 36, p. 1843-1853, 2011.

RASLAVIČIUS, L. Characterization of the woody cutting waste briquettes containing absorbed glycerol. **Biomass & Bioenergy**, v. 45, p. 144-151, 2012.

REJDAK, M.; ROBAK, J.; CZARDYBON, A.; IGNASIAK, K.; FUDAŁA, P. Research on the Production of Composite Fuel on the Basis of Fine-Grained Coal Fractions and Biomass—The Impact of Process Parameters and the Type of Binder on the Quality of Briquettes Produced. **Minerals**, v. 10, n. 1, p. 31, 2019.

RIUJI, C.; MTORO, H.; SWEENEY, D. Char fuel production in developing countries – A review of urban biowaste carbonization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1514-1530, 2016.

ROBLES, E.; FERNANDEZ-RODRIGUEZ, J.; BARBOSA, A.M. Production of cellulose nanoparticles from blue agave waste treated with environmentally friendly processes. **Carbohydrate Polymers**, v. 183, p. 294-302, 2018.

RODRIGUEZ, W.; EVANGELISTA, A.; SETTE JR, C. Producción de briquetas con residuos de cáscara de piñón manso (*Jatropha curcas*) y bagazo de caña de azúcar. **Bosque**, v. 38, p. 527-533, 2017.

ROJAS, C.; CEA, M.; ROSAS-DIAZ, F. Physical, Chemical and Mechanical Characterization of a Prototype Insulating Material Based on Eucalyptus Bark Fiber. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, p. 2441-2446, 2018.

ROMALLOSA, A.R.D.; KRAFT, E. Feasibility of Biomass Briquette Production from Municipal Waste Streams by Integrating the Informal Sector in the Philippines. **Resources-Basel**, v. 6, p. 1-19, 2017.

SARI, G.L.; TRIHADININGRUM, Y.; NI'MATUZHROH. Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons in Crude Oil Contaminated Soil from Wonocolo Public Oilfields using Aerobic Composting with Yard Waste and Rumen Residue Amendments. **Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems-Jsdewes**, v. 7, p. 482-492, 2019.

SAWADOGO, M.; TANO, S.; SIDIBÉ, S. Cleaner production in Burkina Faso: Case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 1047-1056, 2018.

SETTE JR., C.R.; HANSTED, A.L.S.; NOVAES, E.; E LIMA, P.A.F.; RODRIGUES, A.C.; DE SOUZA SANTOS, D.R.; YAMAJI, F.M. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Industrial Crops and Products**, v. 122, p. 209-213, 2018.

SETTE JR., C.R.; CUNHA, T.Q.G. da; CONEGLIAN, A. Does the Presence of Bark in the Wood of FastGrowing Forest Species Significantly Change the Energy Potential? **Bioenergy Research**, v. 13, p. 222-228, 2020.

SETTER, C.; ATAÍDE, C.H.; MENDES, R.F.; OLIVEIRA, T.J.P. de. Influence of particle size on the physico-mechanical and energy properties of briquettes produced with coffee husks. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 8215-8223, 2020.

SETTER, C.; COSTA, K.L.S.; DE OLIVEIRA, T.J.P.; MENDES, R.F. The effects of kraft lignin on the physicochemical quality of briquettes produced with sugarcane bagasse and on the characteristics of the bio-oil obtained via slow pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v. 210, p. 106561, 2020.

SONG, X.; ZHANG, S.; WU, Y.; ZHONGYAO, C. Investigation of the properties of biobriquette fuel prepared from hydrothermally pretreated cotton stalk and wood sawdust. **Renewable energy**, v. 151, p. 184-191, 2020.

TÁVORA, L.E.J. Estudo do Parâmetro Friabilidade em Briquetes de Biomassa. 2017. 55f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, 2017.

TCHAPDA, A.H.; PISUPATI, S.V. A Review of Thermal Co-Conversion of Coal and Biomass/Waste. **Energies**, v. 7, p. 1098-1148, 2014.

THORESON, C.P.; WEBSTER, K.E.; DARR, M.J.; KAPLER, E.J. Investigation of Process Variables in the Densification of Corn Stover Briquettes. **Energies**, v. 7, p. 4019-4032, 2014.

TILLMAN, D. **Wood as an energy resource**. New York: Academic Press, 1978.

TOMELERI, J.; VALENTIM, L.; SILVA, J. da. Caracterização Química e Energética de Epicarpo Residual do Pinhão Manso (*Jatropha curcas* L.) e Briquete Produzido. **Revista Virtual de Química**, v. 9, p. 942-952, 2017.

TUMULURU, J.S.; FILLERUP, E. Briquetting characteristics of woody and herbaceous biomass blends: Impact on physical properties, chemical composition, and calorific value. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 14, p. 1105-1124, 2020.

TUMULURU, J.S.; WRIGHT, C.T.; HESS, R.; KENNEY, K.L. A review of biomass densification systems to develop uniform feed stock commodities for bioenergy application. **Biofuels Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

VARGAS, Y.; PÉREZ, L. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. **Revista Facultad de Ciencias Básicas**, v. 14, p. 59-72, 2018.

VERMA, N.; KUMAR, V. Utilization of bottle gourd vegetable peel waste biomass in cellulase production by *Trichoderma reesei* and *Neurospora crassa*. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 5, p. 1-10, 2020.

VERMA, V.; BRAM, S.; DE RUYCK, J. Small scale biomass heating systems: standards, quality labelling and market driving factors—an EU. **Biomass & Bioenergy**, v. 33, p. 1393-1402, 2009.

WAHEED, M.A.; AKOGUN, O.A. Quality enhancement of fuel briquette from cornhusk and cassava peel blends for cofiring in coal thermal plant. **International Journal of Energy Research**, v. 45, p. 1867-1878, 2020.

WU, L.X.; LEE, S.J. A Deep Learning-Based Strategy to the Energy Management-Advice for Time-of-Use Rate of Household Electricity Consumption. **Journal of Internet Technology**, v. 21, p. 305-311, 2020.

YANK, A.; NGADI, M.; KOK, R. Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications. **Biomass & Bioenergy**, v. 84, p. 22-30, 2016.

ZHANG, J.; GUO, Y. Physical properties of solid fuel briquettes made from *Caragana korshinskii* Kom. **Powder Technology**, v. 256, p. 293-299, 2014.

5 ARTIGO 1: PRODUÇÃO DE BRIQUETES A PARTIR DE UMA MISTURA DE BIOMASSAS: LODO DE ABATEDOURO DE AVES E SERRAGEM

RESUMO

Este estudo refere-se à produção de briquetes utilizando lodo centrifugado do tratamento de efluente de abatedouro avícola e serragem da indústria moveleira. O objetivo foi avaliar o desempenho dos briquetes como fonte de energia térmica, mitigando os riscos da destinação atual do lodo centrifugado e reduzindo os custos operacionais de sua destinação. Para conhecer as características oxidantes dos briquetes e sua resistência mecânica, foram avaliados poder calorífico superior, teor de cinzas, materiais voláteis, carbono fixo e resistência à compressão axial. Foram realizadas análises termogravimétricas, calorimetria exploratória diferencial e análise de gases. Tratamentos estatísticos foram aplicados para verificar os fatores mais significativos para a produção de briquetes, as melhores proporções das matérias-primas e avaliar se há interferência da umidade e da farinha de cola utilizada como aglutinante. As melhores condições da mistura lodo-serragem foram de 15 e 85%, respectivamente, com 6,0% de umidade. O melhor tratamento apresentou resistência mecânica de 23,82 MPa, poder calorífico superior de 17,20 MJkg⁻¹ e densidade de 1374,15 kgm⁻³.

Palavras-chave: combustível, energia, poder calorífico, resistência mecânica, setor avícola, tratamento de resíduos.

PRODUCTION OF BRIQUETTES FROM A MIXTURE OF BIOMASSES: SLUDGE FROM POULTRY SLAUGHTERHOUSE AND SAWDUST

ABSTRACT

This study refers to the development of briquettes using centrifuged sludge from the wastewater treatment of poultry and sawdust from furniture industry. The aim was to evaluate the performance of briquettes as a source of thermal energy, mitigating the risks of the current elimination of the centrifuged sludge and reducing the operational costs of its destination. To know the oxidizing characteristics of the briquettes and their mechanical resistance, superior calorific power, ash content, volatile materials, fixed carbon, and resistance to axial compression were evaluated. Thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry, and gas analysis were performed. Statistical treatments were carried out to verify the most significant factors to produce briquettes, the best proportions of the raw materials and to evaluate whether there is interference from moisture and glue flour used as binder. The best conditions of the sludge-sawdust mixture were 15 and 85%, respectively, with 6% moisture. The best-case treatment showed 23.82 MPa mechanical resistance, superior calorific value of 17.20 MJ/kg and density of 1374.15 kgm⁻³.

Keywords: calorific value, energy, fuel, mechanical resistance, poultry sector, waste treatment.

5.1 Introdução

As economias emergentes e em desenvolvimento são os principais impulsionadores do crescimento econômico global, segundo o Fundo Monetário Internacional (FMI). Esse movimento, no entanto, é responsável pela produção de grandes quantidades de resíduos de biomassa como subproduto dos setores agrícola, industrial e comercial (MATETE et al., 2008; WANG et al., 2012; HAYAT et al., 2017; LI et al., 2020; MATZEMBACHER et al., 2021).

O crescimento sustentável teve início com o advento da sustentabilidade empresarial, com repercussões na sociedade pela relação entre crescimento econômico e meio ambiente, exigindo que o processo produtivo se alinhasse às diretrizes governamentais e às demandas da sociedade.

O desenvolvimento sustentável atribui ao governo a responsabilidade de formular políticas e diretrizes que direcionem o setor produtivo para os objetivos de elevação e manutenção da produtividade, com adequadas cautelas social e ambiental.

A resposta do setor empresarial brasileiro a esse novo desafio passou por grandes mudanças nas últimas décadas. No início, o setor estava em conformidade com as diretrizes governamentais, mas, atualmente, cresce a adoção de iniciativas empresariais voluntárias, bem como a proposição de diretrizes, refletindo a melhoria do desempenho ambiental e social empresarial (BEZERRA et al., 2020).

Nesse contexto, o setor avícola brasileiro ocupa atualmente uma posição de liderança no crescimento do país e tem permitido ao Brasil ocupar o ranking de terceiro maior produtor mundial.

Segundo dados divulgados pela Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA), com uma exportação total de 4,231 milhões de toneladas de carne de frango em 2020, o Brasil é o número 1 no ranking dos principais exportadores. Embora o Brasil seja o maior exportador de carne de frango, seu principal comprador é o mercado interno, com 68% da produção destinada aos brasileiros.

A indústria de abate e processamento de aves é um segmento que demanda grandes quantidades de água em todas as etapas do processo produtivo, gerando efluentes com altas concentrações de matéria orgânica biodegradável (BUSTILLO-LECOMPTE; MEHRVAR, 2015), com lipídios, proteínas, sólidos em suspensão, óleo, graxa, nitrogênio e fósforo. Esses componentes variam de planta para planta, dependendo do processo industrial e do consumo de água.

De acordo com a legislação brasileira, o contratante que cria a poluição é responsável por seus resíduos e deve tratá-los de acordo com as exigências do meio ambiente. Isso significa que as indústrias produtoras de resíduos devem tratá-los antes da disposição final, assumindo a corresponsabilidade pelos agentes intermediários de tratamento (ALFAIA et al., 2017; SLOMSKI et al., 2020).

Apesar da relevância do segmento, as pesquisas para abordar seus impactos ambientais são insuficientes, gerando a falta de um substituto adequado para a destinação dos resíduos, dificultando a elaboração de projetos inovadores. Assim, o objetivo deste trabalho é pesquisar a produção de briquetes com a utilização de um dos principais resíduos gerados no tratamento físico e químico de efluentes de abatedouro de aves, o lodo centrifugado consorciado com a serragem de madeira.

Nesse contexto, a utilização de resíduos de biomassa como fonte energética contribui para a adoção de práticas sustentáveis, além de permitir a redução dos custos operacionais para a destinação desses resíduos (FERREIRA et al., 2018). A densificação, que contribui para a redução dos custos de armazenamento, transporte e emprego, é uma estratégia para melhorar a recuperação energética da biomassa (DROBÍKOVÁ et al., 2018).

A biomassa densificada, também chamada de briquete, pode ser configurada como um combustível cuja conversão de energia é feita por combustão direta, podendo ser utilizada para uso doméstico ou industrial, sendo melhor aproveitada em câmaras de leito fixo, devido à sua estrutura física (OKWU; SAMUEL, 2018; KHLIFI et al., 2020).

A aplicação desta forma de combustível sólido tem sido cada vez mais relevante em países em desenvolvimento e desenvolvidos (NGUYEN, 2021). Na Europa, países como Suécia, França, Áustria, Suíça e Alemanha utilizam sistemas de aquecimento de biomassa em pequena escala (GILBERT et al., 2008; VERMA et al., 2009). Segundo Marreiro et al. (2021), no Brasil, os briquetes são utilizados como substitutos da lenha; porém, o uso de briquetes de biomassa para fins energéticos ainda não está totalmente difundido (FELFLI et al., 2011; MARTINEZ et al., 2019).

Para a viabilidade técnica do processo de briquetagem, é fundamental selecionar e configurar corretamente as variáveis de processamento para otimizar o processo de densificação (MARREIRO et al., 2021). Navalta et al. (2019) indicam que parâmetros como pressão, temperatura, tamanho de partícula, tipo de aglutinante e características da biomassa selecionada exercem influência considerável na resistência à compressão, densidade e potencial energético dos briquetes. Trabalhos como Kpaló et al. (2020) realizaram levantamentos bibliográficos para avaliar a viabilidade econômica e técnica da produção de briquetes, analisando os tipos de biomassas e equipamentos, qualificação e treinamento para operação e os custos de capital empregado. Outros trabalhos de revisão também destacam o maquinário usado para produzir briquetes e algumas variáveis de produção (TUMULURU et al., 2011; FAIZAL et al., 2016).

Oladeji (2015) e Dinesha et al. (2019) apresentaram uma revisão abrangente da conversão de resíduos de biomassa agrícola e industrial em briquetes como combustíveis alternativos. Eles exploraram os efeitos dos parâmetros do processo, tipos de matérias-primas e tecnologias de processamento nas características de combustão.

O objetivo deste trabalho é analisar a produção de briquetes utilizando o lodo centrifugado do processamento de efluente de abatedouro de aves e serragem de *pinus* da indústria moveleira e utilizando a farinha cola como aglutinante, apresentando assim uma alternativa para a aplicação desses resíduos como fonte de energia térmica para combustão.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Design Experimental

O design experimental refere-se às principais fases de construção do estudo (Figura 1).



Figura 1 Design experimental.
Fonte: A autora

5.2.2 Material de estudo: lodo centrifugado

O material deste estudo é o lodo centrifugado, gerado durante o tratamento primário de efluente da atividade de industrialização avícola. Na indústria de abate e processamento de aves, o efluente gerado apresenta altos valores de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), presença de graxas, óleos dissolvidos e suspensos, além de carne, fragmentos ósseos, sangue e vísceras.

Normalmente o tratamento de efluente de abatedouros de aves é dividido em etapas primárias e secundárias. A etapa primária consiste em peneiramento, tanque de equalização, processos físico-químicos de coagulação/flotação, sendo que no local de estudo atualmente utiliza-se o cloreto férrico como agente coagulante, e é seguida pelo tratamento secundário, com lagoas de estabilização ou sistema de lodos ativados. Na fase primária, o processo de flotação retira os sólidos do efluente com aditivos e coagulantes, com insuflação de microbolhas de ar que sobem o material até a superfície e são removidas com auxílio de pás. O material suspenso removido é o lodo flutuado. As etapas subsequentes para centrifugação e separação de lodo são: efluente clarificado, óleo de lodo e lodo centrifugado. O efluente clarificado segue para tratamento secundário com lagoas de estabilização e sistema de lodos ativados. O óleo de lodo, dependendo do grau de acidez, pode ser vendido para usinas de produção de biodiesel, onde é incorporado ao óleo de soja. Kunh et al. (2020) demonstraram que o óleo de lodo obtido a partir do tratamento de efluente de abatedouro de aves pode ser adicionado em até 5% ao óleo de soja no processo de produção de biodiesel, o que é benéfico, pois proporciona uma destinação ambientalmente adequada. Essa adição contribui para a viabilidade econômica do biodiesel, pois o óleo de lodo é uma matéria-prima barata e não precisa ser pré-tratado para incorporação ao óleo de soja. O lodo centrifugado atualmente é destinado a aterros sanitários, sendo que a empresa geradora arca com os custos de transporte.

5.2.3 Coleta das matérias primas (lodo centrifugado, serragem e farinha cola)

Para o desenvolvimento desta pesquisa, o lodo foi coletado de uma estação de tratamento de efluente em um abatedouro de aves no Centro-Oeste do estado do Paraná (PR), Brasil, 500 m acima do nível do mar, na latitude de 24° 37 '5' ' Sul e longitude 53 ° 19 '18' 'Oeste. Após a coleta, a amostra de lodo foi congelada para manter suas características originais e levada em caixa térmica ao laboratório de Saneamento Ambiental da Unioeste, na cidade de Cascavel, para secagem.

A serragem, resíduo das indústrias moveleiras, foi cedida pela Madeireira Orion na cidade de Cafelândia (PR). A indústria produz apenas móveis de madeira de *pinus*.

O aglutinante foi um resíduo gerado na produção da farinha de trigo, comercializado sob o nome de farinha cola, fornecido pela Indústria de Alimentos Consolata LTDA (Cafelândia, PR). A farinha de cola é um subproduto não comestível que a empresa atualmente comercializa para as indústrias de cola.

O lodo centrifugado de abatedouro de aves e a serragem de *pinus* foram secos separadamente em estufa TECNAL TE - 394/I, a 105 °C para lodo e 60 °C para serragem, devido a seu autopoder de incineração, até massa constante. Posteriormente, o lodo foi submetido à moagem em moinho de facas TECNAL, modelo TE - 631/2.

5.2.4 Ensaio granulométrico do lodo centrifugado e serragem

Após a moagem (feito somente para o lodo, pois para a serragem não houve necessidade), foram realizados testes granulométricos do lodo e da serragem de *pinus*, para determinar o tamanho médio das partículas. A triagem foi realizada em triplicata, com 100 g da amostra, em equipamento vibratório BERTEL. O material foi submetido a uma vibração de nível 10, e para esta etapa foram utilizadas peneiras de 5, 8, 16, 32, 60 e 200 mesh. O tempo de ensaio para cada material foi de 5 minutos.

5.2.5 Produção dos briquetes e estudo estatístico

Após o teste de distribuição do tamanho das partículas, foi escolhido o material com maior concentração de partículas (mesh 32). Para produzir um briquete com melhor poder calorífico e resistência mais satisfatória à compressão axial, com a melhor proporção entre o lodo centrifugado de abatedouro de aves (L) e a serragem (S), bem como o melhor teor de umidade e agente aglutinante, dois testes foram realizados. No primeiro ensaio, foram avaliados cinco briquetes, em quatro repetições, nas quais as proporções L/S foram variáveis: 100% L 0% S, 85% L 15% S, 50% L 50% S, 15% L 85% S e 0% L 100% S.

Após a identificação da melhor proporção de L/S quanto ao poder calorífico e resistência à compressão axial, foi desenvolvido o segundo teste. Para maximizar as características de resistência e poder calorífico, outros nove briquetes foram testados em quatro repetições, nas quais as proporções de umidade (0, 6 e 12%) e aglutinante (0, 7,5 e 15%) variaram. As proporções de umidade e do agente aglutinante utilizadas nesta pesquisa foram de acordo com Oliveira et al. (2018).

Os dois ensaios experimentais foram conduzidos de acordo com as premissas do delineamento inteiramente casualizado. A normalidade dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk ($\alpha < 0,05$). Posteriormente, aplicou-se a análise de variância (Anova), seguida do teste de comparação múltiplo de médias de Tukey ($\alpha < 0,05$). Todos os resultados dos testes foram processados no software Statistic 8.

5.2.6 Densificação dos briquetes

Os materiais utilizados para as misturas foram: serragem de *pinus* (Figura 2a), lodo centrifugado (Figura 2b) e farinha cola (Figura 2c).



Figura 2 (a) serragem; (b) lodo centrifugado; (c) farinha cola.

Fonte: A autora

No processo de briquetagem, as amostras foram colocadas com o auxílio de um funil em um molde cilíndrico de aço inoxidável, com diâmetro interno de 25 mm, diâmetro externo de 50 mm e altura de 100 mm, até completar o volume de briquetagem.

O tempo de implementação da pressão foi de 60 segundos para cada teste, na pressão de 10 toneladas. As compactações das amostras foram realizadas à temperatura ambiente utilizando uma prensa hidráulica SCHULZ com capacidade de 30 toneladas.

5.2.7 Determinação das Propriedades físico-químicas do lodo centrifugado e da serragem

A caracterização das matérias-primas (lodo centrifugado e serragem) foi realizada no Laboratório de Saneamento Ambiental da UNIOESTE na cidade de Cascavel, Paraná, Brasil, por meio da determinação de umidade seguindo ASTM E871-82(2019), cinzas conforme norma ASTM E1755:01(2020), materiais voláteis de acordo com ASTM E872-82(2019) e carbono fixo de acordo com ASTM D-1762/64. O nitrogênio elementar (N) foi obtido no equipamento CHN Perkin-Elmer. As análises de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF) foram realizadas pelo laboratório da CIBIOGAS – Energias Renováveis na cidade de Foz do Iguaçu, PR, por meio do procedimento PE 001 seguindo ABNT NBR ISO/IEC 17025.

5.2.8 Determinação de metais nas matérias primas e cinza dos briquetes produzidos

As análises foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental e no Laboratório de análises agroambientais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Campus Cascavel, onde foram pesados 0,2 gramas da amostra e adicionados

4,0 ml de solução nitro perclórica em tubos de ensaio micro-Kjeldahl, que foram deixados para pré-digerir por 16 horas. As amostras foram digeridas em bloco digestor e a temperatura foi elevada lentamente a 180 °C por cerca de 2 horas, até que a matéria orgânica fosse degradada. Os extratos foram removidos do bloco digestor e resfriados à temperatura ambiente. O volume consistiu em 50,0 ml de água deionizada em um frasco volumétrico. Os extratos foram então submetidos à análise multielementar para determinação dos teores de Al, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, K, Mg, Na, Ni e Zn em espectrofotômetro de absorção atômica, Shimadzu, modelo AA-6300.

5.2.9 Propriedades térmicas do lodo centrifugado, serragem e briquete

5.2.9.1 Poder calorífico superior (PCS)

O PCS do briquete e de suas matérias-primas foi determinado utilizando uma bomba calorimétrica (calorímetro de queima), modelo E2K, de acordo com a norma ASTM D2015-66. Cerca de 0,5 g da amostra foi depositada no interior do cilindro de aço inox e esta foi colocada no calorímetro, fechada e submetida a uma pressão de 30 atm em atmosfera oxidante, com a queima da amostra. A quantidade de energia liberada foi determinada pelo equipamento.

5.2.9.2 Estudo termogravimétrico (TGA)

O estudo termogravimétrico foi realizado com o equipamento STA 6000 – PerkinElmer. Uma massa conhecida do briquete padrão foi colocada em um cadinho de platina e exposta à corrente de gás de arraste. A análise foi realizada em atmosfera de ar sintético, com vazão de 30 ml min⁻¹. Os termogramas foram obtidos entre 30 e 900 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹.

5.2.9.3 Calorimetria de varredura diferencial (DSC)

O estudo exploratório de calorimetria diferencial foi realizado para verificar quais eventos de entalpia ocorrem com o aquecimento da amostra. Para esta análise foi utilizado o equipamento STA6000 – PerkinElmer, com taxa de aquecimento de 20 °C min⁻¹, fluxo de O₂ de 20 ml min⁻¹, de 50 a 700 °C, dentro de um cadinho de platina utilizando 6,0 mg de amostra.

5.2.9.4 Análise de gases

Para a realização da análise dos gases gerados na queima do briquete e das matérias primas foram utilizados a EGA-FTIR (EGA – Evolved Gases Analysis) – Espectroscopia dos gases liberados pela análise termogravimétrica, o equipamento STA 6000 Perkin Elmer, razão de aquecimento de 20 °C. min⁻¹ fluxo de O₂ de 20 mL min⁻¹, de 50 a 700 °C, acoplado ao analisador de gases FTIR Frontier – Perkin Elmer, de 4000 a 650 cm⁻¹ de varredura e resolução de 4 cm⁻¹, com uma bomba de vácuo de fluxo de 50 mL min⁻¹, a célula de análise

a 330 °C e a linha de hifenação do FTIR a temperatura de 300 °C e um porta amostra de platina com 10 mg de amostra.

5.2.10 Propriedades mecânicas do briquete

5.2.10.1 Densidade

A densidade do briquete foi determinada pelo método ASTM D2395-17. O volume foi determinado medindo-se o diâmetro e a altura dos briquetes com paquímetro eletrônico, com sensibilidade de 0,01 mm. A massa de cada briquete foi determinada em balança analítica Shimadzu modelo ATX224, com sensibilidade de 0,1 mg. A densidade foi calculada usando o quociente massa-volume para cada briquete.

5.2.10.2 Resistência à compressão axial

Os valores de resistência à compressão axial foram determinados pela relação entre a área da superfície de cada briquete e sua resistência. O equipamento aplica uma força perpendicular ao comprimento do briquete com um pistão, com uma velocidade de teste pré-estabelecida e determina a força de resistência do material até a ruptura, gerada por uma carga. Foi utilizada uma máquina universal de ensaios, EMIC, modelo MEU 100, com capacidade de célula de carga de 5,0 ton. O resultado da força exercida no briquete foi determinado pelo software acoplado ao equipamento. O procedimento de ensaio foi realizado de acordo com a metodologia NBR 5739 – ensaio de compressão de corpo cilíndrico, pois não existem normas específicas para ensaios em briquetes (ABNT 1994).

5.3 Resultados e discussão

5.3.1 Caracterização dos materiais

A Tabela 5 apresenta algumas propriedades das matérias-primas utilizadas na produção dos briquetes.

O conteúdo de Material Volátil expressa a facilidade de combustão dos materiais e é determinado pela fração mássica do combustível que volatiliza durante o aquecimento da amostra padrão.

Os materiais voláteis são normalmente encontrados nas biomassas em proporções de 70-86%, representados por carbono, oxigênio e hidrogênio. Fagnani et al. (2019) obtiveram 82,35% de Material Volátil e Sena et al. (2007) 80,8%, ambos para o lodo centrifugado, o que são valores muito próximos da mesma matéria-prima (79,54% para lodo). Os resultados de

Material Volátil das matérias-primas analisadas no presente estudo são equivalentes aos níveis relatados na literatura (ONCHIEKU et al., 2012; STOLARSKI et al., 2013; ZANELLA et al., 2016; AVELAR et al., 2016; FAIZAL, 2017; BOROWSKI et al., 2017).

Tabela 5 Valores médios das propriedades físicas e químicas

Parâmetros	Lodo centrifugado		Serragem	
	Valores	Unidade	Valores	Unidade
Umidade ²	67,77 ± 0,08	%	2,14 ± 0,02	%
Material Volátil ³	79,54 ± 0,66	%	87,34 ± 0,32	%
Cinzas ³	9,06 ± 0,47	%	4,24 ± 0,48	%
Carbono Fixo ³	11,39 ± 0,70	%	8,41 ± 0,21	%
Nitrogênio ³	2,51 ± 0,21	%	N.A.	%
Sólidos Totais ²	327,70 ± 0,73	g.kg ⁻¹	N.A.	N.A.
Sólidos Voláteis ³	867,70 ± 0,71	g.kg ⁻¹	N.A.	N.A.
Sólidos Fixos ³	132,30 ± 0,45	g.kg ⁻¹	N.A.	N.A.
Poder calorífico Superior ³	21,66 ± 0,05	MJ.kg ⁻¹	19,50 ± 0,48	MJ.kg ⁻¹
Densidade ³	0,57 ± 0,01	g.mL ⁻¹	0,19 ± 0,01	g.mL ⁻¹
Densidade Energética ³	12,42 ± 0,24	MJ.m ⁻³	3,69 ± 0,06	MJ.m ⁻³

² base úmida; ³ base seca

As cinzas formadas por materiais minerais não combustíveis podem alterar o poder calorífico dos combustíveis sólidos, com crostas e corrosão nos equipamentos de combustão (TAMILVANAN, 2013; NDINDENG et al., 2015). Os critérios dos Padrões de Qualidade de acordo com a comunidade científica estipulam que o teor de cinzas residuais deve ser inferior a 10% em peso após a queima, pois o alto volume de cinzas é uma desvantagem. Na Tabela 5, ambas as matérias-primas têm teor de cinzas abaixo de 10% em peso, inferior ao relatado (TAMILVANAN, 2013).

A determinação do teor de carbono fixo foi de acordo com a literatura, sendo que Sena et al. (2007) e Fagnani et al. (2017) obtiveram resultados de 13,46 e 8,61%, respectivamente, para o mesmo lodo utilizado neste estudo, em que o teor de carbono fixo foi de 11,39%. Quanto maior o teor de carbono fixo do combustível, mais tempo ele permanece nos fornos em comparação com materiais com menor teor de carbono fixo.

A composição da biomassa interfere no poder calorífico: alto teor de carbono aumenta o poder calorífico, o que explica o maior poder calorífico do lodo de abate em relação à biomassa de serragem. Sena et al. (2007) obtiveram um resultado de 23,32 MJ/kg para o lodo centrifugado, valor semelhante ao encontrado neste estudo, que foi de 21,66 MJ/kg. Segundo

Wzorek (2012), para ser utilizada como combustível, a biomassa deve ter poder calorífico superior a 13 MJ/kg. Outros estudos relatam que um material sólido a ser utilizado em fornos como combustível deve ter um poder calorífico superior a 14 MJ/kg (KIJO-KLECZKOWSKA et al., 2016). A ISO 17225-7:2021 recomenda que o requisito mínimo de viabilidade técnica para o uso de combustível sólido seja de 14,5 MJ/kg, comprovando que as propriedades caloríficas encontradas no presente estudo (21,66 MJ/kg para lodo e 19,50 MJ/kg para serragem) são adequadas para produzir briquetes (AKOWUAH et al., 2012).

5.3.2 Distribuição granulométrica

De acordo com o teste de granulometria, o maior percentual de massa retida ficou concentrado nas peneiras de 32 mesh (0,50 mm), com 41,99% da massa de lodo e 44,24% da massa de serragem, 60 mesh (0,25 mm) com 29,92% de massa de lodo e 26,68% da massa de serragem e 16 mesh (1,0 mm) com 15,83% da massa de lodo e 26,53% da massa de serragem. A fração de material retido na peneira de 32 mesh foi escolhida para a fabricação de briquetes, visando uma granulometria mais uniforme e maior concentração de massa retida.

O tamanho do grão desempenha um papel importante na determinação da qualidade e durabilidade do briquete. Quanto menor o tamanho da partícula, menor a porosidade do produto e maior sua densidade, dificultando a queima devido ao menor número de espaços livres para difusão de calor, diminuindo o poder de combustão e aumentando o tempo de processo (GUO; WANG, 2012; BAZHIN et al., 2019).

5.3.3 Planejamento estatístico dos briquetes

O planejamento estatístico visou encontrar o briquete mais adequado em termos de viabilidade técnica, atendendo a combinação ideal entre resistência a choques mecânicos e poder calorífico, para garantir uma resistência tolerável ao transporte e ao armazenamento, e maior capacidade energética na queima.

A formulação do briquete (tipos de resíduo, aglutinantes e respectivas proporções) afeta as propriedades físicas do produto, como densidade, poder calorífico, durabilidade e resistência à compressão axial (YANG et al., 2016).

A mistura de diferentes tipos de biomassa favorece a qualidade dos briquetes, como mostram Muazu e Stegemann (2017), que utilizaram um experimento fatorial, analisando os efeitos da origem da biomassa, a proporção da mistura, uso de aditivo aglutinante e pressão de densificação. Os briquetes produzidos com misturas de materiais foram mais resistentes do que aqueles feitos com materiais puros, mostrando que a origem da biomassa afeta a densificação.

5.3.3.1 Primeiro ensaio (proporção lodo e serragem)

As diferentes proporções de L e S no briquete causaram influência significativa ($\alpha < 0,05$) sobre as variáveis resistência mecânica (MPa) e poder calorífico (MJ.kg^{-1}), conforme apresentado na Tabela 6. De modo geral, observou-se que maiores proporções de serragem proporcionam briquetes com maior resistência mecânica. Esse resultado está relacionado à composição lignocelulósica da serragem de madeira, visto que as ligações formadas na superfície da holocelulose e da lignina na biomassa não garantem um processo de densificação mais efetivo (AFRA et al., 2020). Por outro lado, as maiores proporções de lodo centrifugado de abatedouro de aves proporcionam briquetes com maior poder calorífico. Isso é explicado pela alta composição orgânica (material volátil) rica em hidrogênio e carbono, sobretudo de gordura no lodo centrifugado (FAGNANI et al., 2019).

Tabela 6 Resistência mecânica e poder calorífico para diferentes proporções de lodo centrifugado e serragem

Tratamentos	Resistência mecânica (MPa)	Poder calorífico (MJ kg^{-1})
100%L0%S	0,13 ± 0,04 d	21,66 ± 0,07 a
85%L15%S	1,57 ± 0,34 d	20,72 ± 0,04 b
50%L50%S	5,71 ± 0,32 c	19,84 ± 0,78 bc
15%L85%S	18,38 ± 3,08 b	19,04 ± 0,15 c
0%L100%S	27,59 ± 1,65 a	19,32 ± 0,42 c

Média ± desvio padrão, n = 4. Letras diferentes representam tratamentos estatisticamente diferentes (Tukey com $p < 0,05$).

Os briquetes 15%L85%S e 0%L100%S apresentaram 18,38 e 27,59 MPa de resistência mecânica, respectivamente, destacando-se como as composições mais resistentes à deformação. De acordo com Teixeira et al. (2010), para que os briquetes possam ser manipulados e armazenados sem a ocorrência de fragmentações significativas, devem apresentar resistência mecânica superior a 7 MPa. Desta forma, os briquetes 100%L0%S, 85%L15%S e 50%L50%S não atendem a esse requisito.

Todos os briquetes produzidos apresentaram poder calorífico superiores a 14 MJ.kg^{-1} , o que evidencia o potencial satisfatório para aproveitamento térmico dos resíduos utilizados. Segundo Wzorek (2012), o material sólido a ser utilizado como combustível deve apontar um poder calorífico superior a 13 MJ.kg^{-1} . De acordo com Kijo-Kleczkowska (2016), o material a ser usado como combustível em fornos rotativos para a indústria de cimento, deve apresentar poder calorífico superior a $11,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$, e acrescenta que outras indústrias determinam um valor mínimo de 14 MJ.kg^{-1} .

Os resultados de poder calorífico superaram o requisito mínimo ($\geq 14,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$) recomendado pela ISO 17225-7:2021. A partir desses resultados, concluiu-se que o briquete constituído por 15% de lodo e 85% de serragem (15% L 85% S) apresentou as características técnicas mais atrativas em termos de resistência mecânica e poder calorífico.

5.3.3.2 Segundo ensaio (umidade e aglutinante)

Após o primeiro ensaio dos briquetes foi identificado que o tratamento mais promissor para posterior otimização foi o 15L85S, tendo em vista que esse tratamento atende aos requisitos mínimos para viabilidade técnica nos quesitos de resistência mecânica e eficiência energética (KPALO et al., 2020b).

No segundo teste, foram avaliados os efeitos das variáveis umidade e aglutinante, considerando a resistência mecânica e o poder calorífico como respostas. A umidade é um fator importante no processo de compactação (MITCHELL et al., 2020; AFSAL et al., 2020; MAGNAGO et al., 2020) e, segundo Nunes, Andrade e Dias Júnior (2019), o teor de água ideal fica entre 5 e 10%, proporcionando briquetes mais resistentes do que os compactados com mais de 15% de água (MOREIRA et al., 2020). Baixos valores de densidade e poder calorífico estão relacionados a altos níveis de umidade (NUNES; ANDRADE; DIAS JÚNIOR, et al., 2019), interferindo na combustão da biomassa.

Uma boa densificação requer umidade adequada, favorecendo uma melhor interação das partículas, mas o excesso de umidade afeta o processo de aglomeração (LANDILLON et al., 2008; GENDEK et al., 2018) e piora as propriedades mecânicas dos aglomerados (GANESAN et al., 2008). O teor de umidade ideal está entre 8 e 12%, mas um teor de umidade mais alto, de até 12 a 20%, pode ser usado para melhorar a densificação (KALIYAN; MOREY 2009). O teor de umidade superior a 24% pode fazer com que os briquetes inchem e se desintegram imediatamente após a prensagem (MANI et al., 2006).

No caso de materiais sem aglutinantes naturais (lignina, resinas ou ceras), recomenda-se adicionar aglutinantes para aumentar as forças das partículas, resistência à abrasão e compressão e densidade de energia (TAMILVANAN, 2013). Os resultados para os briquetes desenvolvidos neste planejamento experimental obedeceram às proporções: todos os briquetes com proporção de 85:15% serragem e lodo centrifugado, sendo que no primeiro tratamento adicionou-se 0, 6 e 12% de umidade, e no segundo tratamento adicionou-se 0, 7,5 e 15,0% de aglutinante.

As diferentes proporções de aglutinante e umidade influenciaram significativamente ($\alpha < 0,05$) nas variáveis resistência mecânica (MPa) e poder calorífico (MJkg^{-1}), conforme apresentado na Tabela 7. A resistência mecânica variou de 3,2 MPa (briquete 6 com 7,5% de aglutinante e 12% de umidade) a 30,9 MPa (briquete 5 com 7,5% de aglutinante e 0% de umidade). Em relação ao poder calorífico, a variação entre os briquetes foi de 15,9 MJkg^{-1} (briquete 6) a 18,9 MJkg^{-1} (briquete 1 com 0% aglutinante e 0% de umidade). Como resultado, a resistência mecânica (coeficiente de variação de 50,9%) foi mais fortemente influenciada pela farinha de cola e umidade do que o poder calorífico (coeficiente de variação de 4,8%).

Tabela 7 Resistência mecânica e poder calorífico para diferentes proporções de umidade e aglutinante na produção dos briquetes

Tratamentos	Proporção Aglutinante:umidade	Resistência mecânica (MPa)	Poder calorífico (MJ kg ⁻¹)
Briquete 1	0:0	17,77 ± 1,69 e	18,94 ± 0,19 a
Briquete 2	0:6	23,82 ± 1,10 d	17,25 ± 0,09 d
Briquete 3	0:12	16,32 ± 1,04 e	18,17 ± 0,15 b
Briquete 4	7,5:0	27,14 ± 1,13 b	17,99 ± 0,13 bc
Briquete 5	7,5:6	30,89 ± 0,89 a	17,26 ± 0,12 d
Briquete 6	7,5:12	3,15 ± 0,33 f	15,85 ± 0,08 e
Briquete 7	15:0	27,59 ± 2,63 b	17,99 ± 0,06 bc
Briquete 8	15:6	24,53 ± 0,51 c	17,79 ± 0,33 c
Briquete 9	15:12	6,28 ± 0,54 g	17,21 ± 0,05 d

Média ± desvio padrão, n = 4. Letras diferentes representam tratamentos estatisticamente diferentes (Tukey com $p < 0,05$).

Observou-se que a inserção crescente de agente aglutinante até 15% aumentou a resistência mecânica dos briquetes, visto que os tratamentos com 0% de umidade, isto é, briquetes 1, 4 e 7, apresentaram resistências de 17,77 MPa, 27,14 MPa e 27,59 MPa, respectivamente. Isso ocorre porque o aglutinante provoca a formação de uma ponte, filme, matriz ou mesmo uma reação química que fortalece a ligação e adensamento entre as partículas sólidas do briquete (REZVANI et al., 2014). Entretanto, esses mesmos briquetes apresentaram uma sutil tendência de redução do poder calorífico com a inserção crescente de agente aglutinante (18,94 MJ kg⁻¹, 17,99 MJ kg⁻¹ e 17,99 MJ kg⁻¹ para os briquetes 1, 4 e 7, respectivamente); comportamento semelhante foi observado por Soleimani et al. (2017) e Wu et al. (2018).

Quando a umidade aumentou de 6 para 12%, os briquetes (3, 6 e 9) apresentaram redução acentuada de resistência mecânica. Até certo ponto, o teor de umidade da biomassa, aliado a temperatura e pressão da briquetagem, desempenha um papel fundamental na gelatinização de moléculas orgânicas como amido e proteínas, o que melhora a densificação do briquete. Porém, o teor de umidade excessivo dificulta a adesão entre as partículas sólidas do briquete (TUMULURU et al., 2011). Com relação ao poder calorífico, observou-se que o aumento da umidade nos briquetes causou uma tendência de redução dessa característica nos briquetes. Esse comportamento é típico, visto que a umidade nos combustíveis reduz o seu potencial de combustão por exigir maior energia para a evaporação da água durante a queima (AFSAL et al., 2020).

Embora o aglutinante e a umidade tenham causado efeito significativo sobre as propriedades dos briquetes, com exceção dos briquetes 6 e 9, todos os demais atendem as características técnicas desejáveis, isto é, resistência mecânica superior a 7 MPa e poder calorífico superior a 14 MJ. Kg⁻¹ (BISEN et al., 2020; CHUNGCHAROEN; SRISANG, 2020; KPALO et al., 2020).

Vale ressaltar ainda que os briquetes aditivados com aglutinante apresentam uma desvantagem em relação aos demais em função do custo de aquisição do insumo. Além disso, o processo de redução da umidade da biomassa também pode onerar a tecnologia.

Após a escolha do tratamento C0U6 as amostras foram submetidas a análise de densidade, com resultado de $1374,15 \text{ kg/m}^{-3}$ com desvio padrão de $\pm 23,48 \text{ kg/m}^{-3}$. No processo de densificação, geralmente se aumenta a densidade da biomassa (MANI et al., 2003; DENG et al., 2020).

Briquetes a base de cama de aviário e ervas daninha atingiram densidade de 1300 kg/m^{-3} com umidade de 9,22% (BISEN et al., 2020). Song et al. (2021) apresentaram em sua pesquisa que briquetes com serragem de *pinus* atingiram $1397,24 \text{ kg/m}^{-3}$ com umidade 6 – 11,5%.

Em sua pesquisa com produção de briquetes de abeto, Gendek et al. (2018) encontraram densidade de 1078 kg/m^{-3} com teor de umidade de aproximadamente 20%, e resistência à compressão de 9,69MPa. Para Pimenta et al. (2015), foram encontrados valores de densidade entre 660 e 710 kg/m^{-3} em briquetes fabricados a partir de carvão de cascas de coco utilizando amido e argila como aglutinante. A densidade dos briquetes comerciais no Brasil, segundo Martinez et al. (2019), varia de 1000 a 1248 kg/m^{-3} . Os resultados encontrados ficaram dentro dos valores citados.

5.3.4 Determinação de metais no Lodo centrifugado, serragem e cinzas do briquete por absorção atômica

Os principais poluentes encontrados no lodo são metais pesados, hidrocarbonetos poliaromáticos (PAHs), bifenilos policlorados (PCBs), policlorodibenzodioxinas e furanos (PCDD/F) (SENA et al., 2007).

A Tabela 8 apresenta os resultados dos testes de metal em lodo centrifugado, serragem e cinza de briquete (15%L, 85%S e 6% de umidade). Os altos teores de Fe estão relacionados ao uso de coagulantes inorgânicos e auxiliares de floculação com cloreto férrico, além de variáveis operacionais, como a presença de sangue no efluente bruto (SENA et al., 2007).

Tabela 8 Determinação de metais no lodo centrifugado de abatedouro de aves, serragem e cinzas dos briquetes por espectroscopia de absorção atômica (AAS)

Metais	LODO (mg.kg ⁻¹)	SERRAGEM (mg.kg ⁻¹)	BRIQUETE (mg.kg ⁻¹)
Cd	Não detectado	Não detectado	Não detectado
Al	798,85 ± 6,36	8,64 ± 1,02	Não detectado
Ca	605,50 ± 9,23	216,53 ± 2,11	28,41 ± 2,43
Co	3,69 ± 0,49	1,57 ± 0,50	Não detectado
Cu	18,21 ± 0,20	2,30 ± 0,53	8,11 ± 0,25
Fe	26787,41 ± 649,47	757,15 ± 0,99	4404,28 ± 1141,98
K	160,31 ± 5,33	562,74 ± 20,36	2547,09 ± 16,56
Mg	316,71 ± 0,98	40,43 ± 2,45	311,89 ± 129,95
Na	439,75 ± 10,11	731,26 ± 4,52	547,77 ± 65,49
Ni	Não detectado	Não detectado	Não detectado
Zn	98,12 ± 0,22	3,18 ± 0,03	67,27 ± 0,19

A principal forma atualmente de destinação do lodo centrifugado da indústria avícola é por meio da compostagem (FERREIRA et al., 2018): nesse processo, os microrganismos degradam a matéria orgânica em mistura com outros resíduos orgânicos (palha, serragem, resíduos de jardim, resíduos agrícolas, cama de frango, etc.) em processos exotérmicos. A regulamentação desta prática é definida pelo Ministério da Agricultura e Pecuária do Brasil por meio da Instrução Normativa 046, que determina os limites máximos toleráveis para metais pesados.

Asses et al. (2019) concluíram em seu trabalho com compostagem de lodo centrifugado que, em geral, o composto final é um material com quantidades de metais pesados dentro dos parâmetros internacionais da Comissão Europeia (EU, 2004). No entanto, é importante observar o custo intrínseco do destino, como a mão-de-obra envolvida e os custos logísticos.

5.3.5 Análise das propriedades Térmicas

5.3.5.1 Análise termogravimétrica (TGA) do lodo centrifugado, serragem e briquete

O teste do comportamento termogravimétrico (TGA) é importante para a definição dos parâmetros de combustão, permitindo um melhor entendimento das temperaturas inicial e final de degradação dos materiais (LUBWAMA et al., 2020). As curvas TG e DTG do lodo centrifugado, da serragem e do briquete produzido, obtidos sob atmosfera de ar sintética, são mostradas na Figura 3. A análise exibiu três eventos térmicos mais pronunciados para os materiais avaliados.

O primeiro evento térmico, variando de 70 a 150 °C para todas as amostras, está associado ao processo de desidratação (NAQVI et al., 2019; WANG et al., 2019); a perda de massa nesta faixa de temperatura foi de 4,58, 3,86 e 6,92% para o lodo centrifugado (Figura 3a), serragem (Figura 3b) e briquete (Figura 3c), respectivamente.

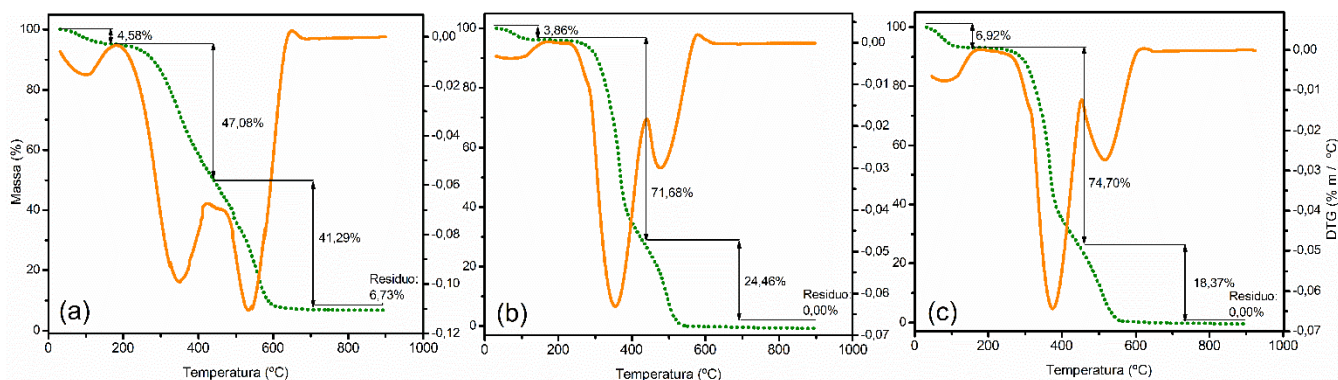


Figura 3 Perfis termogravimétricos (·····) e termogravimétricos derivados (—).

Fonte: A autora

O segundo evento térmico corresponde à liberação de materiais voláteis, ocorrendo em regiões de 220-450 °C para o lodo centrifugado e serragem, com perda de massa de 47,08 e 71,68%, respectivamente (Nota: a temperatura máxima de perda de massa, ou seja, o Tmax deste evento térmico foi de 349 °C para lodo centrifugado e 354 °C para serragem, sendo que a taxa máxima de perda de massa foi de 0,22 e 0,13 mg min⁻¹, respectivamente). Para o lodo centrifugado, este segundo evento corresponde à decomposição de carboidratos e lipídios (SUPAPORN; YEOM, 2016). Para a serragem, esse segundo evento térmico ocorre devido à degradação da hemicelulose e da celulose, enquanto a lignina pode continuar sua decomposição até quase 800 °C (YAO et al., 2016; WANG et al., 2019).

O terceiro evento térmico, relacionado à combustão do carbono fixo, foi observado na faixa de temperatura de 450-680 °C para o lodo centrifugado (Fig.4a), atingindo uma perda de massa de 71,81% nesta faixa de temperatura; este evento pode estar associado a materiais orgânicos biodegradáveis e não biodegradáveis presentes na estrutura do lodo centrifugado (NAQVI et al., 2019). Para a serragem, o terceiro evento térmico inicia em aproximadamente 450 °C e termina em torno de 600 °C, no qual a perda de massa observada para essa faixa de temperatura foi de 24,46%. Para ambos os materiais, a perda de massa relacionada ao carbono fixo pode ter ocorrido com a liberação de voláteis no terceiro evento térmico na curva DTG (BUYUKADA et al., 2017; WANG et al., 2019; ESPUELAS et al., 2020). Como esperado, eventos térmicos semelhantes foram observados para o briquete produzido (Figura 3c), onde foram observadas diferenças não notáveis no processo de combustão dos materiais precursores e do briquete produzido. Folgueras et al. (2013) e Wang et al. (2019) relataram comportamento semelhante em um estudo dos processos de combustão e pirólise de lodo de esgoto e serragem de madeira, respectivamente.

5.3.5.2 Análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A Figura 4 mostra as curvas de DSC para o briquete e suas matérias-primas em um fluxo de O₂ de 20 mL min⁻¹, de 50 a 700 °C, indicando os processos de decomposição, os eventos endotérmicos e exotérmicos.

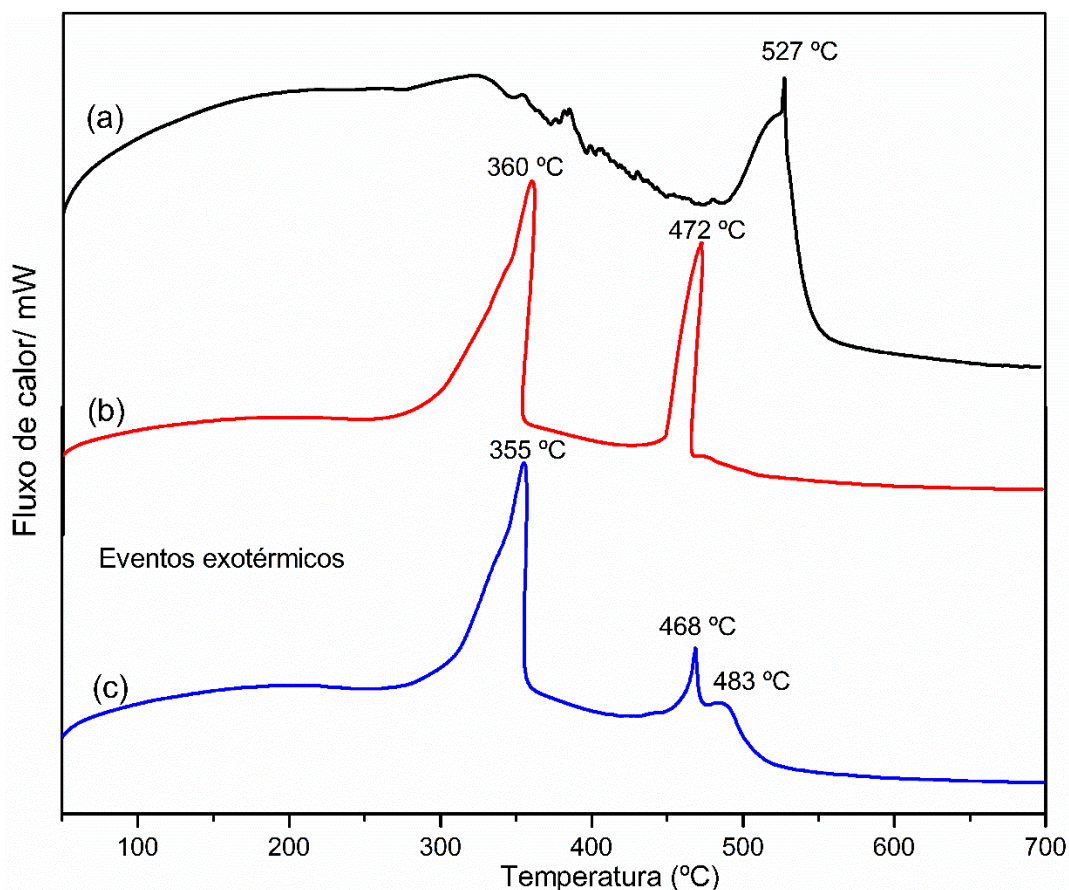


Figura 4 Curvas de DSC do briquete e suas matérias-primas, sendo (a) lodo, (b) serragem e (c) briquete.

Fonte: A autora

Na Figura 4 é possível identificar pelo menos um evento exotérmico no lodo, dois eventos exotérmicos na serragem e três eventos exotérmicos no briquete, onde como esperado o briquete apresentou uma combinação de perfis de materiais precursores. Os eventos exotérmicos observados para a serragem estão associados à decomposição de celulose, hemiceluloses e lignina (BRYŚ et al., 2016; MATTOS et al., 2015), enquanto o lodo centrifugado exibiu um evento exotérmico atribuído à decomposição de carbonos refratários, como anéis aromáticos, estruturas N-alquil de cadeia longa ou cadeias alifáticas saturadas, sendo reações exotérmicas (FRANCIOSO et al., 2010; SILVA et al., 2012). Vários trabalhos relataram comportamento semelhante para diferentes biomassas e lodo de esgoto (FRANCIOSO et al., 2010; SILVA et al., 2012; MISHRA; MOHANTY, 2018; BOUMANCHAR et al., 2019; VELUSAMY et al., 2021).

Os eventos exotérmicos estão relacionados com as reações de combustão e liberação de energia. Cada material possui uma característica específica e uma alta temperatura de ignição pode interferir na queima devido à estabilidade química do combustível. Apesar de ter energia total de combustão maior que a serragem e a mistura, com valor de 21,66 MJ/kg, o lodo centrifugado apresentou um pico exotérmico a 527 °C, ou seja, a maior temperatura observada nos materiais estudados. Ao avaliar o briquete produzido, o último pico exotérmico apresentado no briquete é de 483 °C: acima dessa temperatura, não haverá liberação de energia, pois toda a energia exotérmica associada à fase mais estável do sistema foi liberada por combustão (SHEN et al., 2015).

5.3.5.3 Espectroscopia no infravermelho (FTIR) e análise de gases (EGA) do lodo, serragem e briquete

Análises de espectroscopia no infravermelho associada à análise de gases evoluídos (EGA-FTIR) foram realizadas buscando identificar os produtos gasosos liberados pela decomposição térmica da serragem (Figura 5), do lodo de abatedouro de frango (Figura 6) e do briquete produzido a partir da mistura da serragem com o lodo de abatedouro (Figura 7). Esta técnica é importante na avaliação da liberação de gases poluentes do meio ambiente, como CO, NO e NOx durante a queima do material.

As Figuras 5a, 6a e 7a apresentam os espectros FTIR tridimensionais dos gases produzidos da degradação térmica da serragem, do lodo de efluente avícola, e do briquete formado pela mistura lodo/serragem (briquete com 15% lodo, 85% serragem e 6% umidade), respectivamente. A partir dos espectros tridimensionais obtidos foi possível identificar as faixas de temperatura onde ocorreram as decomposições dos materiais estudados. Após a identificação destas faixas de temperatura onde a decomposição térmica foi mais intensa, os espectros foram ampliados para a avaliação dos compostos produzidos; as Figuras 5b, 6b e 7b mostram os espectros ampliados da serragem, do lodo de abatedouro e do briquete produzido, e os grupos funcionais presentes na composição dos gases liberados durante a queima destes materiais (-OH; CO₂; C=O; C-H; N-H).

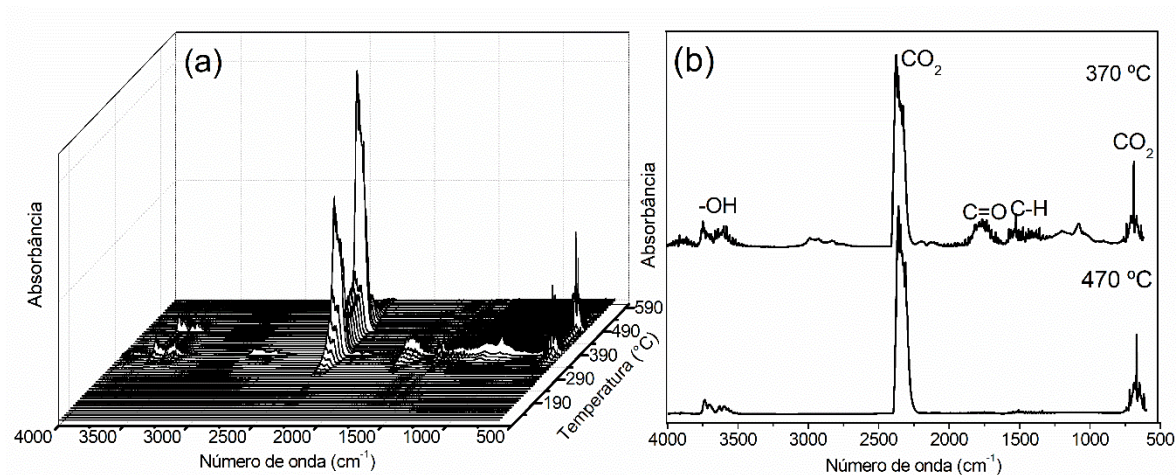


Figura 5 Espectro EGA-FTIR tridimensional de gases da decomposição térmica da serragem (a) e espectro ampliado nas temperaturas de 370 e 470 °C (b) (condições de análise: taxa de aquecimento de 20 °C.min⁻¹; fluxo de O₂ de 20 mL.min⁻¹).

Na Figura 5 é possível observar que a serragem apresentou dois eventos térmicos mais pronunciados nas temperaturas de 370 e 470 °C, enquanto o lodo (Figura 6) apresentou três eventos térmicos nas temperaturas de 330, 410 e 540 °C. A análise de EGA-FTIR do briquete produzido (Figura 7) mostrou eventos térmicos mais intensos em 380, 480 e 510 °C; as temperaturas obtidas para o briquete foram similares às obtidas para a serragem (370 e 470 °C) e para o lodo de abatedouro (330, 410 e 540 °C), o que está relacionado à homogeneidade dos materiais utilizados na fabricação do briquete (serragem/lodo) e suas composições. A similaridade entre os espectros da serragem e do briquete está relacionada ao alto teor de serragem no briquete; contudo, algumas modificações no espectro do briquete foram observadas e estão associadas à presença do lodo na mistura. Considerando a temperatura em que o último evento térmico do briquete produzido ocorreu (510 °C), é possível indicar que acima desta temperatura não haverá ou haverá baixa liberação de energia; assim, a faixa de temperatura indicada para a queima eficiente do briquete produzido é de aproximadamente 510 °C. As curvas exotérmicas obtidas por DSC para os materiais estudados (Figura 4) indicaram temperaturas similares às observadas pela análise EGA-FTIR destes materiais.

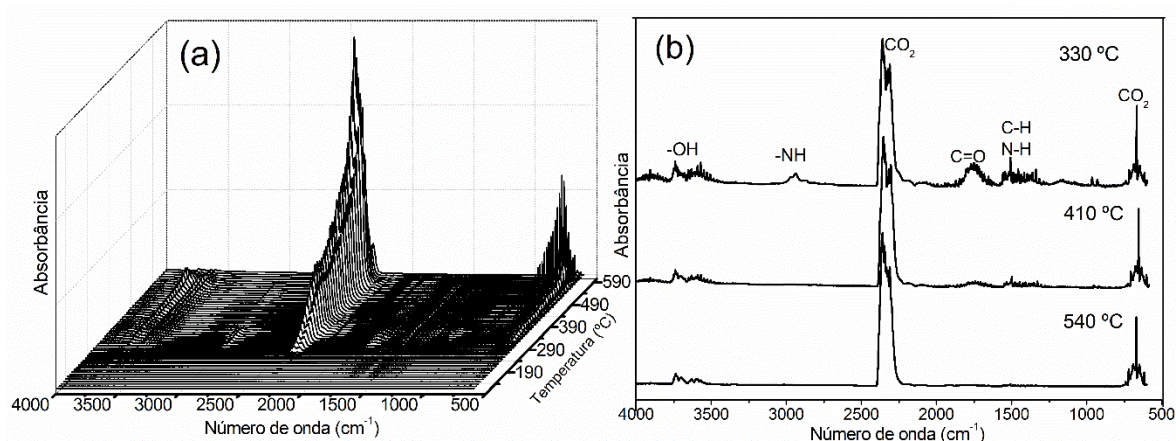


Figura 6 Espectro EGA-FTIR tridimensional de gases da decomposição térmica do lodo de abatedouro (a) e espectro ampliado nas temperaturas de 330, 410 e 540 °C (b) (condições de análise: taxa de aquecimento de 20 °C min⁻¹; fluxo de O₂ de 20 mL min⁻¹).

As Figuras 5b, 6b e 7b apresentam os espectros de absorção na região do infravermelho para a serragem, lodo de abatedouro e briquete, respectivamente. Nos espectros dos materiais estudados (Figuras 5b, 6b e 7b) é possível observar bandas de absorção na região de 4000 a 3500 cm⁻¹ associadas a estiramentos O-H em álcoois, fenóis e ácidos carboxílicos (JINDAROM et al., 2007; FANG et al., 2017). Bandas de alta intensidade foram observadas entre 2450 e 2250 cm⁻¹ e em 669 cm⁻¹ em todos os espectros, e estão relacionadas a presença de CO₂ nos gases liberados na queima dos materiais (FANG et al., 2017). Banda de absorção IR em 1750 cm⁻¹ são atribuídas a estiramentos C=O, e a estiramentos de ligações amidas (-CO-NH-) característicos de proteínas (LIN et al., 2016); banda em 1508 cm⁻¹ está associada a vibrações C-H (FANG et al., 2017; LENG et al., 2015; KACAN, 2016). Adicionalmente, banda de absorção em 2936 cm⁻¹ observada no espectro do lodo de abatedouro pode estar relacionada à presença de grupos -NH na estrutura do material (KACAN, 2016); banda em 1508 cm⁻¹ também pode ser atribuída a deformação angular de N-H (DOMÍNGUEZ et al., 2004). Nos espectros dos três materiais avaliados é possível notar que à medida em que a temperatura aumentou ocorreu o desaparecimento de bandas relacionadas a grupos C=O, C-H e -NH, o que é explicado pela intensa decomposição das estruturas contendo esses grupos funcionais, como fração lignocelulósica para a serragem e estruturas proteicas e lipídicas para o lodo; as decomposições dessas estruturas também foram intensas para o briquete produzido. Além disso, a redução da intensidade das bandas atribuídas a grupos -OH também foi observada; a predominância de bandas associadas ao CO₂ ocorreu em todos os espectros, de acordo com o aumento da temperatura.

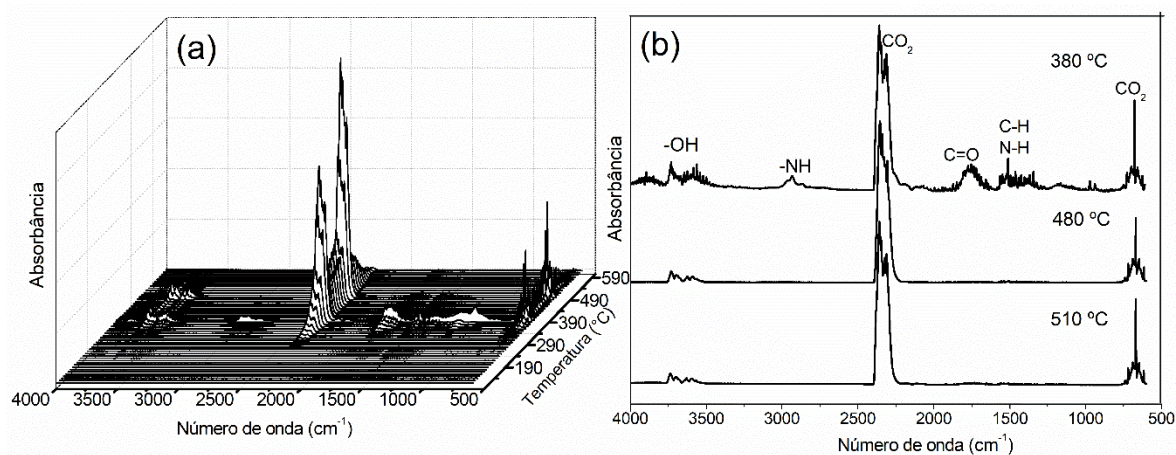


Figura 7 Espectro EGA-FTIR tridimensional de gases da decomposição térmica do briquete produzido (a) e espectro ampliado nas temperaturas de 380, 480 e 510 °C (b) (condições de análise: taxa de aquecimento de 20 °C min⁻¹; fluxo de O₂ de 20 mL min⁻¹).

Comparando os espectros obtidos para os três materiais (Figuras 5, 6 e 7) é possível notar que embora exista similaridade nos perfis espectrais, existem diferenças nas intensidades de algumas bandas. A serragem apresentou maior intensidade nas bandas de CO₂ quando comparada ao lodo, e intensidades muito próximas às observadas no espectro do briquete. Variações de temperatura dos eventos térmicos foram observadas ao comparar o espectro do briquete com os materiais precursores; no entanto, esta variação foi baixa, indicando a homogeneidade dos materiais utilizados na produção do briquete. A adição de lodo na serragem para a fabricação do briquete causou um aumento na temperatura de combustão do material, conforme indicado pelo último evento térmico intenso observado nas análises de EGA-FTIR da serragem (470 °C) e do briquete (510 °C); no entanto, essa elevação não foi muito pronunciada, indicando que o aproveitamento desse resíduo industrial (lodo centrífugado de abate de aves) para fins de produção energética é promissor.

5.4 Conclusão

De acordo com a caracterização da biomassa de serragem e lodo centrífugado de abatedouros de aves e o desempenho nos testes de resistência mecânica e poder calorífico, verificou-se o potencial do uso do lodo como fonte de energia em processos de co-combustão. Os resultados mais promissores foram encontrados com a incorporação de 15% em peso de lodo centrífugado de abatedouro de aves e 85% de serragem com 6% de umidade, na produção de briquetes.

Constatou-se também que o tratamento com melhores condições para atender o objetivo deste trabalho foi o C0U6, com 0% de aglutinante de farinha cola e 6% de umidade, para o qual os parâmetros de resistência mecânica atingiram 23,82 Mpa, um poder calorífico de 17,25 MJkg⁻¹ (≥14,5 MJkg⁻¹, recomendado pela ISO 17225-7:2021) e uma densidade de 1374,15 kg m⁻³. Na análise termogravimétrica de espectroscopia dos gases liberados durante a

combustão, identificou-se alguns possíveis compostos presentes nos gases gerados na queima do lodo, serragem e briquete promissor. Sabendo-se que análises qualitativas são subjetivas para afirmação se os compostos identificados são prejudiciais ou não ao homem e ao meio ambiente, sugere-se análises quantitativas para identificar a concentração desses compostos nessa fase gasosa.

A utilização do lodo como fonte de energia altera o status desse resíduo de passivo ambiental para ativo ambiental, tendo em vista que além de ser mais uma alternativa para a disposição do lodo, potencialmente poluidor, permitindo a redução de custos com a aquisição de biomassa na geração de energia térmica.

A viabilidade técnica do briquete pode ser confirmada por meio dos resultados; no entanto, mais estudos são necessários para comprovar a viabilidade econômica do uso de briquetes de lodo centrifugado de abatedouros de aves para produção de energia e analisar os gases gerados na combustão.

5.5 Agradecimentos

À Capes, pela bolsa concedida, ao CNPq, ao PGAGRI, à UNIOESTE de Cascavel e Toledo e a UTFPR de Medianeira, PR.

5.6 Referências

ABATI, R.; SAMPAIO, A.R.; MACIEL, R.M.A.; COLOMBO, F.C.; LIBARDONI, G.; BATTISTI, L.; LOZANO, E.R.; GHISI, N.C.; COSTA-MAIA, F.M.; POTRICH, M. Bees and pesticides: the research impact and scientometrics relations. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 32282-32298, 2021.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7217**. Disponível em: <http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/NBR-7.217-Determina%C3%A7%C3%A3o-da-composi%C3%A7%C3%A3o-granulom%C3%A9trica.pdf>. Acesso em 10 fev. 2021.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 4p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 3p.

ABPA - Associação Brasileira de Proteína Animal. Disponível em: <https://abpa-br.org/>. Acesso em 10 jan. 2021.

AFRA, E., ABYAZ, A., SARAHEYAN, A. The production of bagasse biofuel briquettes and the evaluation of natural binders (LNFC, NFC, and lignin) effects on their technical parameters. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123543, 2021.

AFSAL, A.; DAVID, R.B.V.; SUHAIL, N.; PARVATHY, U.; RAKHI, R.B. Experimental investigations on combustion characteristics of fuel briquettes made from vegetable market waste

and saw dust. **Materials Today: Proceedings**, n. 33, n. 2, p. 3826-3831, 2020. Doi: 10.1016/j.matpr.0.06.222.

AKOWUAH, J.O., KEMAUSUOR, F., MITCHUAL, S.J. Physico-chemical characteristics and market potential of sawdust charcoal briquette. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 3, p. 1-6, 2012.

ALFAIA, R.G.S.; COSTA, A.M.C.; CAMPOS, J.C. Municipal Solid Waste in Brazil: a Review. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 12, p. 1195-1209, 2017.

ASSES, N.; WALID, F.; MOKTAR, H.; BOUALLAGUI, H. Large scale composting of poultry slaughterhouse processing waste: Microbial removal and agricultural biofertilizer application. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 124, p. 1016, 2019.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D2015-66**. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1973.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D2395-17**. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017.

AVELAR, N.V.; REZENDE, A.A.P.; CARNEIRO, A. de C.O.; SILVA, C.M. Evaluation of briquettes made from textile industry solid waste. **Renewable Energy**, v. 91, p. 417-424, 2016.

BAJWA, D.S.; PETERSON, T.; SHARMA, N.; SHOJAEIARANI, J.; SREEKALA, G.B. A review of densified solid biomass for energy production. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 96, p. 296-305, 2018.

BAZHIN, P.; STOLIN, A.; MIKHEEV, M.; KOVALEV, I. Synthesis of a MoSi₂ –Based Powder Material Under the Influence of Pressure and Shearing. **Refractories and Industrial Ceramics**, v. 59, p. 555-557, 2019.

BEZERRA, M.C.C.; GOHR, C.F.; MORIOKA, S.N. Organizational capabilities towards corporate sustainability benefits: A systematic literature review and an integrative framework proposal. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, p. 119114, 2020.

BISEN, K.S.; SHARMA, P.; GUPTA, B.; BARENDAR, P. Development and experimental characterization of energy efficient poultry litter & plant weeds-based briquettes (PLPWBB) by comparing with rice husk briquettes. **Materials Today**, v. 46, p. 5428-5432, 2020.

BOROWSKI, G.; STEPNIIEWSKI, W.; WOJCIK-OLIVEIRA, K. Effect of starch binder on charcoal briquette properties. **International Agrophysics**, v. 31, p. 571-574, 2017.

BOUMANCHAR, I.; CHHITI, Y.; ALAOU, F.E.M.; ELKHOUEAKHI, M.; SAHIBED-DINE, A.; BENTISS, F.; JAMA, C.; BENSITEL, M. Investigation of (co)-combustion kinetics of biomass, coal and municipal solid wastes. **Waste Management**, v. 97, p. 10-18, 2019.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa 46**, 2011.

BRYŚ, A.; BRYŚ, J.; LIGEZA, O.; KALETA, A.; GÓRNICKI, K.; GLOWACKI, S.; KOCZOŃ, P. Wood biomass characterization by DSC or FT-IR spectroscopy. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 126, p. 27-35, 2016.

BUSTILLO-LECOMPTE, C.F.; MEHRVAR, M. Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: a review on trends and advances. **Journal of Environmental Management**, v. 161, p. 287-302, 2015.

- BUYUKADA, M. Uncertainty estimation by Bayesian approach in thermochemical conversion of walnut hull and lignite coal blends. **Bioresource Technology**, v. 232, p. 87-92, 2017.
- CHUNGCHAROEN, T.; SRISANG, N. Preparation and characterization of fuel briquettes made from dual agricultural waste: Cashew nut shells and areca nuts. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120434, 2020.
- DAMARTZIS, T.; VAMVUKA, D.; SFAKIOTAKIS, S.; ZABANIOTOU, A. Thermal degradation studies and kinetic modeling of cardoon (*Cynara cardunculus*) pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA). **Bioresource Technology**, v. 102, p. 6230-6238, 2011.
- DEMIRBAS, K.; SAHIN-DEMIRBAS, A. Compacting of biomass for energy densification. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 31, n. 12, p. 1063-1068, 2009.
- DENG, W.; HU, M.; MA, J.; SU, Y.; RUANB, R. Structural and functional relationships of activated char briquettes from pyrolysis of sewage sludge for methylene blue removal. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, p. 120907, 2020.
- DOMINGUEZ, A.; MENÉNDEZ, J.A.; INGUANZO, M.; PIS, J.J. Sewage sludge drying using microwave energy and characterization by IRTF. **Afinidad**, v. 61, n. 512, p. 280-285, 2004.
- DROBÍKOVÁ, K.; VALLOVÁ, S.; MOTYKA, O.; MAMULOVÁ, K.; PLACHÁ, D.; SEIDLEROVÁ, J. Effects of binder choice in converter and blast furnace sludge briquette preparation: environmental and practical implications. **Waste Management**, v. 79, p. 30-37, 2018.
- DINESHA, P.; KUMAR, S.; ROSEN, M. A Biomass Briquettes as an Alternative Fuel: A Comprehensive Review. **Energy Technology**, v. 7, p. 1801011, 2019.
- ESPUELAS, S.; MARCELINO, S.; ECHEVERRÍA, A.M.; CASTILLO, J.M.; SECO, A. Low energy spent coffee grounds briquetting with organic binders for biomass fuel manufacturing. **Fuel**, v. 278, p. 118310, 2020.
- EUROPEAN COMMISSION. **Heavy metals and organic compounds from wastes used as organic fertilisers**. Compost quality definition – Legislation and standards. Annex 2. July, 2004.
- FAGNANI, K.C.; ALVES, H.J.A.; CASTRO, L.E.N.; KUNH, S.S.; COLPINI, L.M.S. An alternative for the energetic exploitation of sludge generated in the physico-chemical effluent treatment from poultry slaughter and processing in Brazilian industries. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 2, 2019.
- FANG, S.; YU, Z.; MA, X.; LIN, Y.; CHEN, L.; FAN, Y.; LIAO, Y. Copyrolysis characters between combustible solid waste and paper mill sludge by TG-FTIR and Py-GC/MS. **Energy Conversion and Management**, v. 144, p. 114-122, 2017.
- FAIZAL, H.M.; RAHMAN, M.R.A.; LATIFF, Z. Review on densification of palm residues as a technique for biomass energy. **Jurnal Teknologi**, v. 78, p. 9-18, 2016.
- FAIZAL, M. Utilization biomass and coal mixture to produce alternative solid fuel for reducing emission of green house gas. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, v. 7, p. 950-956, 2017.
- FELFLI, F.F.; MESA, P.J.M.; ROCHA, J.D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C.A.; PIPPO, W.A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass & Bioenergy**, v. 35, p. 236-242, 2011.

FERREIRA, A.; SHEILA, K.S.; CREMONEZ, P.; DIETER, J.; TELEKEN, J.G.; SAMPAIO, S.C.; KUNH, P.D. Brazilian poultry activity waste: Destinations and energetic potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, Part 2, p. 3081-3089, 2018.

FOLGUERAS, M.B.; ALONSO, M.; DIAZ, R.M. Influence of sewage sludge treatment on pyrolysis and combustion of dry sludge. **Energy**, v. 55, p. 426-435, 2013.

FRANCIOSO, O.; RODRIGUEZ-ESTRADA, M.T.; MONTECCHIO, D.; SALOMONI, C.; CAPUTO, A.; PALENZONA, D. Chemical characterization of municipal wastewater sludges produced by two-phase anaerobic digestion for biogas production. **Journal of Hazardous Materials**, v. 175, p. 740-746, 2010.

GANESAN, V.; MUTHUKUMARAPPAN, K.; ROSENTRATER, K.A. Flow properties of DDGS with varying soluble and moisture contents using Jenike shear testing. **Powder Technology**, v. 187, p. 130-137, 2008.

GENDEK, M.; ANISZEWSKA, J.M.; VELEBIL, L. Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species. **Biomass & Bioenergy**, v. 117, p. 173-179, 2018.

GILBERT, P.; RYU, C.; SHARIFI, V.; SWITENBANK, J. Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous plants. **Fuel**, v. 88, p. 1491-1497, 2009.

HAYAT, K.; MENHAS, S.; BUNDSCHUH, J.; CHAUDHARY, H.J. Microbial biotechnology as an emerging industrial wastewater treatment process for arsenic mitigation: a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 427e438, 2017.

ISO - International Organization for Standardization. **ISO 17225-7**. Solid Biofuels—Fuel Specifications and Classes—Part 7: Graded Non-woody Briquettes. Geneva, Switzerland: ISO, 2021.

JIN, J.LI, Y.; ZHANG, J.; WU, S.; CAO, Y.; LIANG, P.; ZHANG, J.; WONG, M.H.; WANG, M.; SHAN, S.; CHRISTIE, P. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. **Journal of Hazardous Materials**, v. 320, p. 417-426, 2016.

JINDAROM, C.; MEEYOO, V.; KITIYANAN, B.; RIRKSOMBOON, T.; RANGSUNVIGIT, P. Surface characterization and dye adsorptive capacities of char obtained from pyrolysis/gasification of sewage sludge. **Chemical Engineering Journal**, v. 133, p. 239-246, 2007.

KALIYAN, N.; MOREY, R.V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass & Bioenergy**, v. 33, p. 337-359, 2009.

KACAN, E. Optimum BET surface areas for activated carbon produced from textile sewage sludges and its application as dye removal. **Journal of Environmental Management**, v. 166, p. 116-123, 2016.

KHLIFI, S.; LAJILI, M.; BELGHITH, S.; MEZLINI, S.; TABET, F.; JEGUIRIM, M. Briquettes production from olive mill waste under optimal temperature and pressure conditions: physico-chemical and mechanical characterizations. **Energies**, v. 13, p. 1214, 2020.

KIJO-KLECZKOWSKA, A.; ŚRODA, K.; KOSOWSKA-GOLACHOWSKA, M.; MUSIAŁ, T.WOLSKI, K. Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass. **Fuel**, v. 170, p. 141-160, 2016.

- KPALO, S.Y.; ZAINUDDIN, M.F.; MANAF, L.A.; ROSLAN, A.M. A Review of Technical and Economic Aspects of Biomass Briquetting. **Sustainability**, v. 12, p. 4609, 2020.
- KPALO, S.Y.; ZAINUDDIN, M.F.; MANAF, L.A.; ROSLAN, A.M. Evaluation of hybrid briquettes from corncob and oil palm trunk bark in a domestic cooking application for rural communities in Nigeria. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 124745, 2021.
- KUNH, S.S.; KUGELMEIER, C.L.; MANTOVAN, F.M.; LENZ, G.F.; SATTOLO, N.M.S.; MILINSK, M.C.; ALVES, H.J. Valorization of poultry slaughterhouse sludge oil: a strategy to reduce Brazil's dependency on soybean oil in the biodiesel industry. **Environmental Technology**, 2020.
- LANDILLON, V.; CASSAN, D.; MOREL, M.H.; CUQ, B. Flowability, cohesive, and granulation properties of wheat powders. **Journal of Food Engineering**, v. 86, p. 178-193, 2008.
- LENG, L.; YUAN, X.; HUANG, H.; WANG, H.; WU, Z.; FU, L.; PENG, X.; CHEN, X.; ZENG, G. Characterization and application of bio-chars from liquefaction of microalgae, lignocellulosic biomass and sewage sludge. **Fuel Processing Technology**, v. 129, p. 8-14, 2015.
- LI, D.; WANG, M.O.; LEE, C. The waste treatment and recycling efficiency of industrial waste processing based on two-stage data envelopment analysis with undesirable inputs. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118279, 2020.
- LIN, Y.; LIAO, Y.; YU, Z.; FANG, S.; LIN, Y.; FAN, Y.; MA, X. Co-pyrolysis kinetics of sewage sludge and oil shale thermal decomposition using TGA-FTIR analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 118, p. 345-352, 2016.
- LUBWAMA, M.; YIGA, V.A.; LUHAIRWE, F.; KIHEDU, J. Physical and combustion properties of agricultural residue biochar bio-composite briquettes as sustainable domestic energy sources. **Renewable Energy**, v. 148, p. 1002-1016, 2020.
- MAGNAGO, R.F.; COSTA, S.C.; ASSUNÇÃO, M.J.E.; SACIOTO, V.G.; PARMA, G.O.; CREMONA, G.O.; SILVEIRA, E.; GONÇALVES, A.C.; TUTIDA, A.Y.; BARCELOSE, R.L. Briquettes of citrus peel and rice husk. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 123820, 2020.
- MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. Towards sewage sludge-based biofuels via thermochemical conversion – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 2566-2582, 2012.
- MANI, S.; TABIL, L.G.; SOKHANSANJ, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass & Bioenergy**, v. 30, p. 648-654, 2006.
- MARREIRO, H.M.P.; PERUCHI, R.S.; LOPES, R.M.B.P.; ANDERSEN, S.L.F.; ELIZIÁRIO, S.A.; ROTELLA JUNIOR, P. Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. **Energies**, v. 14, p. 8320, 2021.
- MARTINEZ, C.L.M.; SERMYAGINA, E.; CARNEIRO, A.D.C.O.; VAKKILAINEN, E.; CARDOSO, M. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass & Bioenergy**, v. 123, p. 70-77, 2019.
- MATETE, N.; TROIS, C. Towards Zero Waste in emerging countries – A South African experience. **Waste Management**, v. 28, p. 1480-1492, 2008.
- MATTOS, B.D.; CADEMARTORI DE, P.H.G.; MAGALHÃES, W.L.E.; LAZZAROTTO, M.; GATTO, D.A. Thermal tools in the evaluation of decayed and weathered wood polymer

composites prepared by in situ polymerization. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 121, p. 1263-1271, 2015.

MATZEMBACHER, D.E.; IEIRA, L.M.; BARCELLOS, M.D. An analysis of multi-stakeholder initiatives to reduce food loss and waste in an emerging country – Brazil. **Industrial Marketing Management**, v. 93, p. 591-604, 2021.

MISHRA, R.K.; MOHANTY, K. Pyrolysis kinetics and thermal behavior of waste sawdust biomass using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology**, v. 251, p. 63-74, 2018.

MITCHELL, E.J.S.; GUDKA, B.; WHITTAKER, C.; SHIELD, I.; PRICE-ALLISON, A.; MAXWELL, D.; JONES, J.M.; WILLIAMS, A. The use of agricultural residues, wood briquettes and logs for small-scale domestic heating. **Fuel Processing Technology**, v. 210, p. 106552, 2020.

MOREIRA, B.R.A.; VIANA, R.S.; MAGALHÃES, A.C.; CHAGAS, C.; ZIED, J.C.; CUNHA, D.; DIAS, S.E.; RINKER, D.L. Production of *Pleurotus ostreatus* var. *Florida* on briquettes and recycling its spent substrate as briquettes for fuel grade biosolids. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123919, 2020.

MOREIRA, R.; ORSINI, R.; DOS, R.; VAZ, J.M.; PENTEADO, J.C.; SPINACE, E.V. Production of biochar, bio-oil and synthesis gas from cashew nutshell by production of biochar, bio-oil and synthesis gas from cashew nutshell by slow pyrolysis. **Waste Biomass Valorization**, v. 8, p. 217-224, 2016.

MUAZU, R.I.; STEGEMANN, J. Biosolids and Microalgae as alternative binders for biomass fuel briquetting. **Fuel**, v. 194, p. 339-347, 2017.

NAQVI, S.R.; HAMEED, Z.; TARIQ, R.; SYED, A.; ALI, T.I.; NIAZI, M.B.K.; NOOR, T.; HUSSAIN, A.; IQBAL, N.; SHAHBAZ, M. Synergistic effect on co-pyrolysis of rice husk and sewage sludge by thermal behavior, kinetics, thermodynamic parameters and artificial neural network. **Waste Management**, v. 85, p. 131-140, 2019.

NAVALTA, C.J.L.G.; BANAAG, K.G.C.; RABOY, V.A.O.; VÁ, A.W.; CABATINGAN, L.K.; JU, Y.-H. Solid fuel from Co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran. **Renewable Energy**, v. 147, p. 1941-1958, 2019.

NDINDENG, S.A.; MBASSI, J.E.G.; MBACHAM, W.F.; MANFUL, J.; GRAHAMACQUAAH, S.; MOREIRA, J.; DOSSOU, J.; FUTAKUCHI, K. Quality optimization in briquettes made from rice milling by-products. **Energy for Sustainable Development**, v. 29, p. 24-31, 2015.

NUNES, E.Z.; ANDRADE, A.M.; DIAS JÚNIOR, A.F. Production of briquettes using coconut and eucalyptus wastes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 11, p. 883-888, 2019.

OKWU, M.O.; SAMUEL, O.D. Adapted hyacinth briquetting machine for mass production of briquettes. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 40, n. 10, p. 2853-2866, 2018.

OLADEJI, J. Theoretical Aspects of Biomass Briquetting: A Review Study. **J. Energy Technol. Política** 5: 72–82. ISSN (Paper) 2224-3232. 2015.

OLIVEIRA, R.S.; PALÁCIO, S.M.; DA SILVA, E.A.; MARIANI, F.Q.; REINEHR, T.O. Briquettes production for use as power source for combustion using charcoal thin waste and sanitary sewage sludge. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 10778-10785, 2017.

ONCHIEKU, J.M.; CHIKAMAI, B.N.; RAO, M.S. Optimum parameters for the formulation of charcoal briquettes using bagasse and clay as binder. **European Journal of Sustainable Development Research**, v. 1, p. 477-492, 2012.

PANWAR, V.; PRASAD, B.; WASEWAR, K.L. Biomass Residue Briquetting and Characterization. **Journal of Energy Engineering**, v. 137, p. 108-114, 2011.

PIMENTA, A.S.; SANTOS, R.C.; OLIVEIRA, A.C.; CASTRO, R. Charcoal briquettes produced with recycled coconut pith. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 137-144, 2015.

REZVANI, Z.; CHEGINI, G.R.; ARABHOSSEINI, A.; KIANMEHR, M.H. Natural energy of Briquette, definitions, benefits and technologies. **Journal of automotive and applied mechanics**, v. 2, p. 1-12, ID: 73612455, 2014.

SENA, R.F.; CLAUDINO, A.; MORETTI, K.; BONFANTI, I.C.; MOREIRA, R.F.P.M.; JOSÉ, H.J. Biofuel application of biomass obtained from a meat industry wastewater plant through the flotation process—A case study. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 52, p. 557-569, 2007.

SHEN, J.; IGATHINATHANE, C.; YU, M.; POTHULA, A.K. Biomass pyrolysis and combustion integral and differential reaction heats with temperatures using thermogravimetric analysis/differential scanning calorimetry. **Bioresource Technology**, v. 185, p. 89-98, 2015.

SILVA, J.O.; FILHO, G.R.; MEIRELES, C.S.; RIBEIRO, S.D.; VIEIRA, J.G.; DILVA, C.V.; CERQUEIRA, D.A. Thermal analysis and FTIR studies of sewage sludge produced in treatment plants. The case of sludge in the city of Uberlândia-MG, Brazil. **Thermochemica Acta**, v. 528, p. 72-75, 2012.

SILVA, T.L.; RONIX, A.; PEZOTI, O.; SOUZA, L.S.; LEANDRO, P.K.T.; BEDIN, K.C.; BELTRAME, K.K.; CAZETTA, A.L.; ALMEIDA, V.C. Mesoporous activated carbon from industrial laundry sewage sludge: Adsorption studies of reactive dye Remazol Brilliant Blue R. **Chemical Engineering Journal**, v. 303, p. 467-476, 2016.

SLOMSKI, V.G.; SILVA LIMA, I.C.; SLOMSKI, V.; SLAVOV, T. Pathways to Urban Sustainability: An Investigation of the Economic Potential of Untreated Household Solid Waste (HSW) in the City of São Paulo. **Sustainability**, v. 12, p. 5249, 2020.

SOLEIMANI, M.; TABIL, X.L.; GREWAL, R.; TABIL, L.G. Carbohydrates as binders in biomass densification for biochemical and thermochemical processes. **Fuel**, v. 193, p. 134-141, 2017.

SONG, B.; COOKE-WILLIS, M.; THEOBALD, B.; HALL, P. Producing a high heating value and weather resistant solid fuel via briquetting of blended wood residues and thermoplastics. **Fuel**, v. 283, p. 119263, 2021.

STOLARSKI, M.J.; SZCZUKOWSKI, S.; TWORKOWSKI, J.; KRZYZANIAK, M.; GULCZYNSKI, P.; MILECZEK, M. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. **Renewable Energy**, v. 57, p. 20-26, 2013.

SUPAPORN, P.S.; YEOM, S.H. Optimization of a Two-step Biodiesel Production Process Comprised of Lipid Extraction from Blended Sewage Sludge and Subsequent Lipid Transesterification. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 21, p. 551-560, 2016.

SUVUNNAPOB, S.; AYUDHYA B.I.N.; KUSUKTHAM, B. A study of cotton dust mixed with wood dust for biobriquette fuel. **Engineering Journal**, v. 19, n. 4, p. 57-70, 2015.

TAMILVANAN, A. Preparation of biomass briquettes using various agro-residues and waste papers. **Journal of Biofuels**, v. 4, n. 2, p. 47-55, 2013.

TEIXEIRA, S.R.; PENA, A.F.V.; MIGUEL, A.G. Briquetting of charcoal from sugarcane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel. **Waste Management**, v. 30, p. 804-807, 2010.

TUMULURU, J.S.; WRIGHT, C.T.; HESS, R.; KENNEY, K.L. A review of biomass densification systems to develop uniform feed stock commodities for bioenergy application. **Biofuels Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

UJJINAPPA, S.; SREEPATHI, L.K. Evaluation of physico-mechanical-combustion characteristics of fuel briquettes made from blends of areca nut husk, simarouba seed shell and black liquor. **The International Journal of Renewable Energy Development**, v. 7, n. 2, p. 131-137, 2018.

VELUSAMY, S.; SUBBAIYAN, A.; THANGAM, R.S. Combustion characteristics of briquette fuels from sorghum panicle–pearl millets using cassava starch binder. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 21471-21485, 2021.

VERMA, V.; BRAM, S.; DE RUYCK, J. Small scale biomass heating systems: standards, quality labelling and market driving factors—an EU. **Biomass & Bioenergy**, v. 33, p. 1393-1402, 2009.

WANG, F.; HUISMAN, J.; MESKERS, C.E.M.; SCHLUEP, M.; STEVELS, A.; HAGELÜKEN, C. The Best-of-2-Worlds philosophy: Developing local dismantling and global infrastructure network for sustainable e-waste treatment in emerging economies. **Waste Management**, v. 32, p. 2134-2146, 2012.

WANG, T.; HOU, H.; YE, Y.; LI, J.; XU, Y. Combustion behavior of refuse-derived fuel produced from sewage sludge and rice husk/wood sawdust using thermogravimetric and mass spectrometric analyses. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 1-11, 2019.

WU, S.; ZHANG, S.; WANG, C.; MU, C.; HUANG, X. High-strength charcoal briquette preparation from hydrothermal pretreated biomass wastes. **Fuel Processing Technology**, v.171, p. 293-300, 2018.

YANG, H.; QIN, Y.; LIAO, Y.; CHEN, W. Shear behavior of recycled aggregate concrete after exposure to high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 374-381, 2016.

YAO, Z.; MA, X.; WU, Z.; YAO, T. TGA–FTIR Analysis of co-pyrolysis Characteristics of Hydrochar and Paper Sludge. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, n. 123, p. 40-48, 2016.

ZANELLA, K.; GONÇALVES, J.L.; TARANTO, O.P. Charcoal briquette production using orange bagasse and corn starch. **Chemical Engineering Transactions**, v. 49, p. 313-318, 2016.

6 ARTIGO 2: ANÁLISE ECONÔMICA DE BRIQUETES PRODUZIDOS A PARTIR DA MISTURA DE LODO DE ABATE DE AVES E SERRAGEM: UM ESTUDO DE CASO

RESUMO

Este estudo de caso tem como objetivo avaliar a viabilidade econômica e financeira da instalação e operação de uma usina para produção de briquetes a partir da mistura de lodo obtido por meio do tratamento de efluente de abatedouro de aves consorciado com serragem de madeira, utilizando-o como fonte de energia térmica na caldeira da própria fonte geradora do resíduo. A mistura mais promissora para a viabilidade técnica foi de 15% lodo com 85% de serragem e 6% de umidade. Foram avaliados o investimento inicial, os custos de produção e indicadores econômicos, que comprovaram a viabilidade econômica tendo como Taxa Interna de Retorno de 38,98%, sendo bem superior à taxa média de atratividade mínima de 10%, com Payback time de 2,98 anos e ponto de equilíbrio de 41,10%. Os briquetes geram uma economia por meio dos custos evitados com a destinação dos resíduos, bem como pela substituição de parte da biomassa tradicional utilizada como combustível no processo de geração de energia térmica da empresa. Na análise de sensibilidade, o projeto demonstrou baixo risco e, portanto, pode ajudar a empresa na redução de seus custos, bem como fortalecer o viés da governança corporativa que proporciona mais uma iniciativa na produção sustentável.

Palavras-chave: briquetes, energia, resíduos, viabilidade técnica, viabilidade econômica

ECONOMIC ANALYSIS OF BRIQUETS PRODUCED FROM THE MIXTURE OF POULTRY SLUDGE AND SAWDUST: A CASE STUDY

ABSTRACT

This case study aims to evaluate the economic and financial feasibility of installing and operating a plant for the production of briquettes from the sludge mixture obtained through the treatment of effluents from a poultry slaughterhouse intercropped with wood sawdust, using it as a source of thermal energy in the boiler of the source generating the residue. The most promising mixture for technical feasibility was 15% sludge with 85% sawdust and 6% moisture. The initial investment, production costs and economic indicators that proved the economic viability were evaluated, with an Internal Rate of Return of 38.98%, which is well above the average minimum attractiveness rate of 10%, with a Payback time of 2.98 years and break-even point of 41.10%. The briquettes generate savings through the avoided costs of disposing of waste, as well as the replacement of part of the traditional biomass used as fuel in the company's thermal energy generation process. In the sensitivity analysis, the project demonstrated low risk and, therefore, can help the company to reduce its costs, as well as strengthen the corporate governance bias that provides yet another initiative in sustainable production.

Keywords: briquettes, economic feasibility, energy, technical feasibility, waste.

6.1 Introdução

As projeções populacionais indicam crescimento acelerado e contínuo nas próximas décadas, aumentando a demanda por alimentos em geral. Segundo a ONU (2021), a população mundial em 2050 chegará perto de 10 bilhões. Esses números representam um crescimento de 24,36% de 2019 a 2050. Esse crescimento deve ocorrer principalmente nos países em desenvolvimento. A ONU projeta que o crescimento da população mundial pode trazer mais 2,5 bilhões de pessoas para áreas urbanizadas até 2050, com quase 90% do crescimento centrado na Ásia e na África. Esse processo de urbanização deve ocorrer em conjunto com o crescimento da renda per capita e mudanças no comportamento de consumo da população mundial.

Do lado da oferta, a expansão da fronteira agrícola é bastante restrita. De acordo com a FAO (2019), a disponibilidade de áreas agrícolas está centrada em poucos países; aproximadamente 90% das terras para expansão agrícola estão na América Latina e na África Subsaariana. Além disso, países como a China e os EUA deixaram de ter novas áreas para exploração agrícola.

Na América Latina, o Brasil se apresenta como um importante produtor mundial de alimentos e possui grande potencial para a ampliação da oferta. Diante das restrições globais à ampliação do uso dos recursos naturais, como a disponibilidade de terra e água, o Brasil se posiciona como um dos principais fornecedores para atender as demandas mundiais. Nesse contexto, a avicultura vem se consolidando como uma das atividades mais importantes para o fornecimento de alimentos proteicos no mundo. Associada ao posicionamento como fornecedor global está a necessidade de uma gestão eficaz dos resíduos gerados pela atividade, principalmente quanto à destinação dos resíduos gerados durante o processo produtivo.

Segundo Silva et al. (2017), é importante destacar que os resíduos sólidos gerados no processo produtivo podem ser classificados como biomassa para recuperação energética. A biomassa, assim como o lodo centrifugado do tratamento de efluente avícolas, é formada por resíduos orgânicos geralmente volumosos e com alto teor de umidade, tornando seu transporte mais caro. Uma alternativa promissora para reduzir esse impacto é a densificação da biomassa em briquetes. Nesse contexto, a técnica de densificação de biomassa pode aumentar a densidade energética, resultando em diversos benefícios, como redução de custos de transporte e necessidade de espaço de armazenamento, além de uma alimentação mais uniforme (TUMULURU et al., 2011). No entanto, a sustentabilidade da densificação de biomassa também depende do consumo de energia, emissões e custos associados à própria densificação e aplicação de briquetes.

Atualmente, o lodo centrifugado gerado no tratamento de efluente é mais comumente destinado ao processo de compostagem, que, por sua vez apresenta boa eficiência neste tipo

de biomassa em que, segundo Costa et al. (2008), em no máximo 90 dias, o material é estabilizado, permitindo também a preservação de nutrientes característicos deste tipo de biomassa. No entanto, o lodo centrifugado não tem valor comercial, deixando os custos de transporte para a empresa geradora.

O objetivo deste trabalho é apresentar um panorama da viabilidade técnica e econômica da instalação de uma planta de produção de briquetes como alternativa para a disposição dos principais resíduos sólidos da atividade avícola.

6.2 Material e métodos

O material alvo deste estudo é o lodo centrifugado gerado durante o tratamento de efluente da industrialização avícola. Na indústria de abate e processamento de aves, o efluente apresenta altos valores de demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), óleos e graxas, dissolvidos e suspensos, assim como fragmentos de carne, ossos, sangue e vísceras.

Normalmente, os efluentes de abatedouros de aves são divididos em tratamentos primários e secundários. O tratamento primário (etapa em que é produzido o lodo) é composto por peneiramento (estático ou rotativo), tanques de equalização e flotores físico-químicos, seguido do tratamento secundário, composto por lagoas de estabilização ou sistemas de lodos ativados (Figura 8).

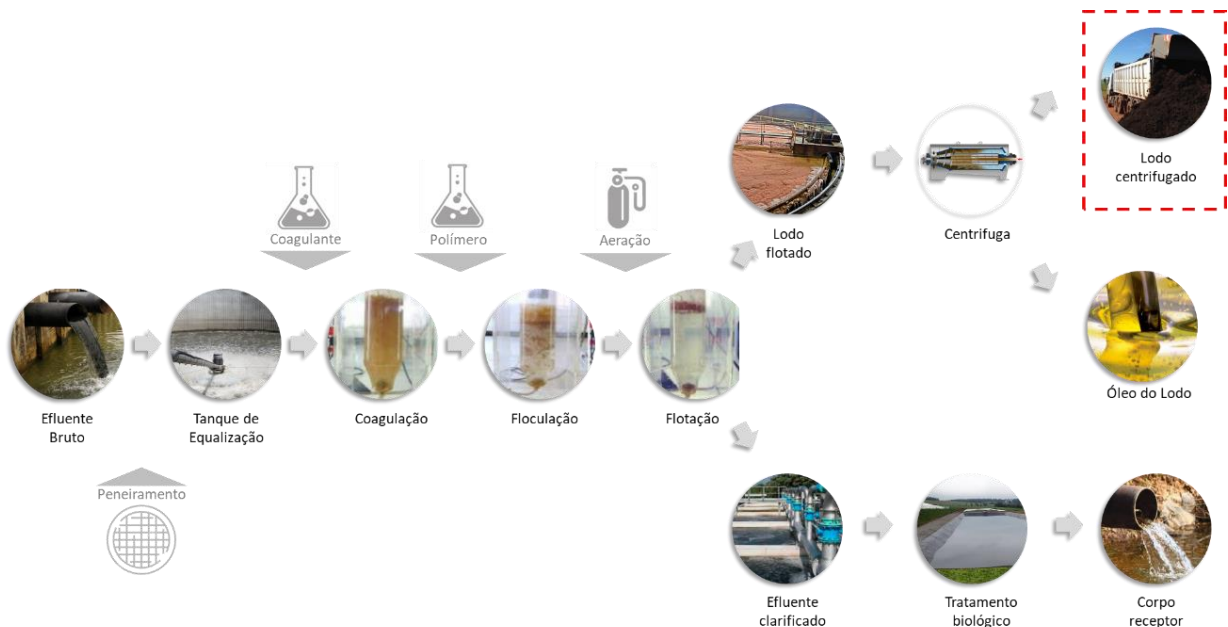


Figura 8 Tratamento de efluente do abate de aves.
Fonte: A autora

Os dois principais resíduos sólidos gerados a partir do lodo flotado no tratamento primário de efluente avícolas são: o lodo centrifugado e o óleo centrifugado (Tabela 9).

Tabela 9 Estimativa de produção de resíduos no tratamento de efluente avícola: adaptado de Ferreira et al. (2018)

Resíduos do efluente	Aves abatidas ¹ cabeças	Volume abatido ¹ tons	Consumo ² de água l/aves	Total de água consumida m ³	Estimativa de volume ³ tons
Lodo flotado	5.805.393.000	13.245.000	30	174.161.790	34.832.358
Lodo centrifugado					497.087
Óleo centrifugado					120.051

¹Dados extraídos e adaptados do relatório da USDA, 2015, referente as estimativas de volumes para 2016; ² Orientação do Departamento de Inspeção de Produtos de Origem Animal (DIPOA); ³ Cálculo com base na estimativa de produção citado por Bellaver (2007).

Para o óleo, há destinação para reciclagem como insumo na produção de biodiesel ou como combustível líquido para combustão direta em caldeiras e fornos, substituindo o óleo diesel. No entanto, o lodo centrifugado não tem um destino economicamente viável. Atualmente, o Brasil produz um volume estimado de mais de 497.000 toneladas por ano, gerando um custo de destinação de aproximadamente R\$ 94,80/ton, tendo uma estimativa de custo total para destinação de R\$ 47.115.600,00 no ano.

6.2.1 Tecnologia para Produção de Briquetes

Não há padronização regulamentada para a produção de briquetes no Brasil. Porém, na Europa, o processo produtivo é mais consolidado, com normas regionais como DIN 51731 da Alemanha, ONORM M 1735 da Áustria, SS 18 71 20 e SS 18 71 21 da Suécia para briquetes de madeira. A International Standard Organization (ISO) instalou em 21 de maio de 2008, um primeiro comitê com o CEN (Comité Européen de Normalization) para criar um padrão mundial para biocombustíveis sólidos chamado ISO/TC 238-Biocombustíveis sólidos.

Os detalhes do processo de briquetagem ou transformação da biomassa residual em briquetes podem ser resumidos nas etapas de trituração da biomassa (moagem) e posterior compactação em alta pressão, o que faz com que a temperatura de processamento aumente. O acréscimo da temperatura provoca um aumento no potencial de ligação das partículas da biomassa (ZHANG et al., 2019). Para que essa aglomeração seja bem-sucedida, é necessária a presença de uma quantidade de água entre 6 e 15% de umidade. O tamanho das partículas está entre 5 e 10 mm (QUIRINO, 2004).

O processo de compactação de briquetagem é uma alternativa para o reaproveitamento de resíduos industriais como fonte de energia, ou seja, como matéria-prima (SILVA, 2006; LIU et al., 2020; SONG et al., 2020; WANG et al., 2021). No entanto, é imprescindível uma análise aprofundada de alguns parâmetros para a viabilidade técnica de

sua produção, como avaliação físico-química da biomassa a ser briquetada, bem como suas propriedades após a briquetagem, avaliação da necessidade de aditivo aglutinante, resistência a compressão axial e poder calorífico.

O equipamento mais utilizado na compactação de resíduos são as Prensas Briquetadeiras de Pistão: um pistão acionado por dois volantes golpeia os resíduos, compactando-os. Do silo de armazenamento (aéreo ou subterrâneo), o resíduo é transferido para um dosador e, em seguida, briquetado em formato cilíndrico, conforme esquema da Figura 9.

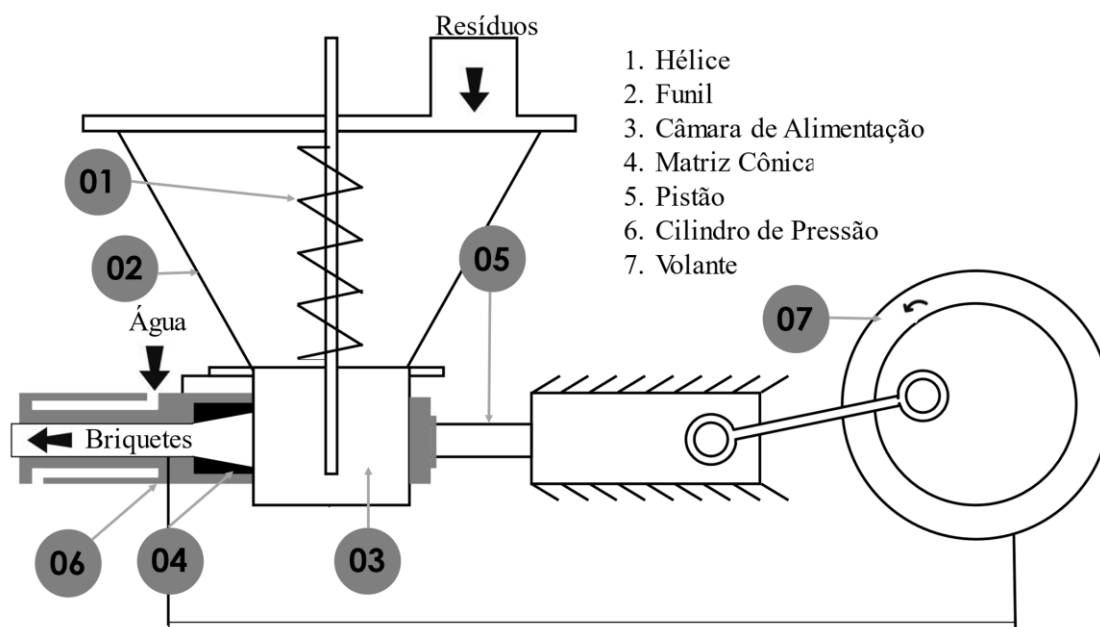


Figura 9 Esquema genérico de produção de briquetes.
Fonte: Biomax

Existem também máquinas de extrusão de briquetes, onde o produto é obtido com até 5% de umidade. Nesse processo, a matéria-prima é transportada para a parte central do equipamento, chamada de matriz, onde sofre intenso atrito e forte pressão. A temperatura pode chegar a 250 °C, fluidizando os resíduos; assim, o material é submetido a alta pressão, compactando-se. Ao final do processo, o material é resfriado naturalmente, solidificando e resultando em um produto com alta resistência mecânica e proteção contra a umidade natural (EMBRAPA, 2021).

6.2.2 Viabilidade técnica do briquete produzido com lodo e serragem

Kunh et al. (2022) desenvolveram briquetes híbridos utilizando lodo centrifugado do tratamento de efluente de aves e serragem da indústria moveleira. Eles avaliaram o poder calorífico superior, teor de cinzas, materiais voláteis, carbono fixo e resistência à compressão axial até a ruptura. Neste estudo, foram realizadas análises termogravimétricas por TGA,

calorimetria exploratória diferencial (DSC) e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FITIR) com refletância total atenuada (ATR).

Também foram realizados tratamentos estatísticos para verificar os fatores mais significativos na produção de briquetes e suas propriedades e determinar as melhores proporções de matéria-prima para sua produção, avaliar se há interferência da umidade e da quantidade de aglutinante, avaliar as condições ideais para produzir briquetes, considerando principalmente as operações de transporte e armazenamento, bem como o melhor poder energético.

Após a obtenção dos resultados dos testes, verificou-se se que o lodo obtido do tratamento térmico e centrífugo de efluente avícola, consorciado com serragem de madeira, possui poder calorífico igual ou superior ao dos briquetes já estudados na literatura.

Assim, concluiu-se que o tratamento com melhores condições foi a incorporação de 15% em peso de lodo centrifugado de abatedouro de aves e 85% de serragem com 6% de umidade. Os parâmetros de resistência mecânica atingiram 23,82 MPa e poder calorífico de 17,25 MJkg⁻¹, com densidade de 1.374,15 kgm⁻³, atendendo aos requisitos mínimos de viabilidade técnica do uso de briquetes como combustível.

6.2.3 Viabilidade Econômica para implantação de uma usina de briquetagem

Após analisar os aspectos técnicos da fabricação de briquetes a partir de resíduos, serão abordadas algumas análises com viés econômico-financeiro para verificar a viabilidade de implantação de um projeto de fabricação desses produtos, por meio de um estudo de caso em uma empresa da região oeste do estado do Paraná. O estado é o maior produtor de carne de frango do Brasil que, segundo dados da Associação Brasileira de Proteína Animal, em 2020 teve uma participação de 33,4% na produção brasileira. O abatedouro de aves em estudo abate cerca de 200 milhões de aves anualmente, gerando aproximadamente 17.125 toneladas de lodo centrifugado por ano.

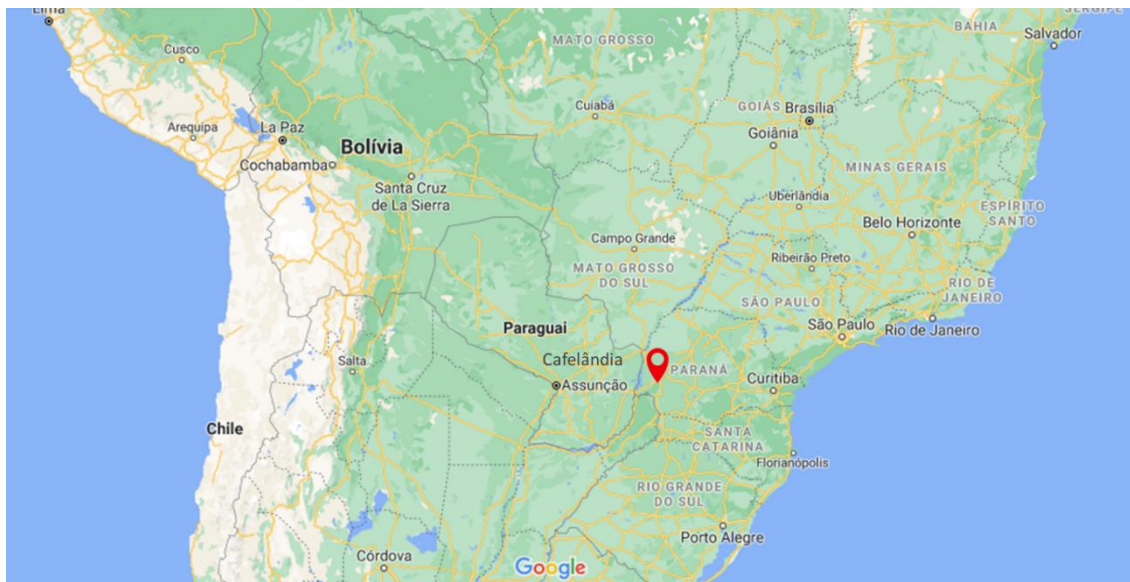


Figura 10 Mapa de localização da fábrica de briquetes.
Fonte: Google Maps

O primeiro pressuposto desta análise é que a localização da indústria de briquetes deve ser um apêndice da indústria de abate e processamento de aves, de modo que não haja custos adicionais com logística para transporte do lodo. Produzir briquetes próximos às fontes de matéria-prima e próximo ao local para sua aplicação na recuperação de energia reduzirá os custos de produção (MAROUŠEK et al., 2019). De acordo com Suvunnapob et al. (2015), embora os resíduos sejam nominalmente isentos de custos ou a sua valorização permita evitar custos de eliminação, é normal que existam custos de transporte para levar os resíduos até à fábrica de briquetes. Os custos de envio podem ser uma parte significativa dos custos operacionais.

Para análise, considerou-se que: a) a capacidade de produção de briquetes será de 24.333 toneladas por ano; b) serão necessárias 3.650 toneladas de lodo seco centrifugado e 20.683 toneladas de serragem por ano, que não terão valor de aquisição, apenas transporte, pois são gerados na própria empresa; c) a localização da fábrica de briquetes será próxima à fonte geradora dos resíduos, conforme mencionado acima (IFA et al., 2020).

6.2.4 Investimento inicial para a usina de briquetagem

Inicialmente, é necessário construir o espaço físico para abrigar os equipamentos. Segundo Silva et al. (2006), uma briquetadeira que produz 1,1 t/hora necessita de um espaço de 25 m² para o equipamento e 160 m² para um galpão de armazenamento com capacidade para armazenar 3.000 sacas de 40 kg. O custo da construção civil por metro quadrado no Paraná, tendo como base o mês de agosto de 2021, segundo o SIDUSCON-PR (2022), é de R\$ 1.283,53.

Para uma linha de produção de briquetes, segundo Lela et al. (2016), a estrutura básica inclui silo úmido e seco, moinho triturador, peneira rotativa para classificação de biomassa, secador rotativo com forno, briquete e máquina de embalagem. Além disso, geralmente estão incluídos refrigeradores, correias transportadoras e tremonhas.

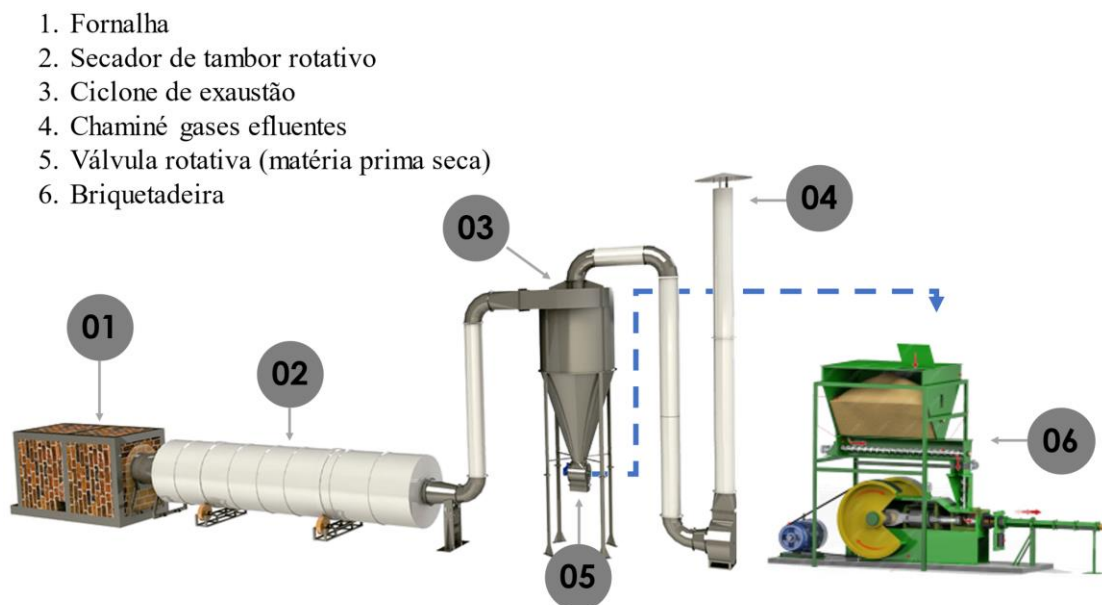


Figura 11 Principais equipamentos para uma fábrica de briquetes
Fonte: Biomax

A Figura 11 mostra um esboço simplificado de uma planta industrial para fabricação de briquetes e os equipamentos básicos que a compõem.

6.2.5 Custos de Produção dos briquetes

6.2.5.1 Custos com mão-de-obra

Os custos com mão-de-obra estão associados à linha de produção e dividem-se em várias tarefas, que implicam em um trabalho contínuo durante o tempo de funcionamento da fábrica. A mão-de-obra necessária para trabalhar em uma linha de produção é tão grande quanto o tamanho da fábrica; ou seja, aumenta com sua capacidade de produção. Outro fator que implica em maior número de trabalhadores é o número de turnos em que a fábrica opera, podendo trabalhar até no máximo três turnos diários de oito horas cada, sendo o custo da mão-de-obra maior devido aos adicionais noturnos (BARBOSA, 2008).

Considerando que a fábrica de briquetes deve ser uma atividade agregada a um empreendimento já existente, é possível aproveitar a mão-de-obra administrativa disponível, sendo necessário contratar apenas os funcionários que atuarão na linha de produção.

Um estudo realizado pela Fundação Getúlio Vargas, contido em Silva et al. (2015), resultou no conceito de custo trabalhista ampliado, com resultado de 191,2% a soma dos

encargos sociais e benefícios aplicados à remuneração de um empregado. Nessa abordagem, os encargos sociais foram definidos como o total de despesas incidentes na folha de pagamento das empresas, que superam a unidade salarial (DIEESE, 2006).

6.2.5.2 Custos com manutenção

Os custos de manutenção dos equipamentos variam de acordo com a abrasividade da matéria-prima (OLIVEIRA, 2016), por isso é importante que os resíduos tenham boas características físico-químicas, como teor de lignina desejável e quantidade de amido.

Barbosa (2008) indica que também estão associados gastos relacionados à substituição de peças de desgaste rápido, substituição de óleos lubrificantes, avarias, entre outros. Os custos de reparo e manutenção são essenciais para garantir o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos, envolvendo gastos com peças e mão-de-obra para reparo do equipamento (Eq. 01). Asae (1998) propõe um percentual do investimento inicial em função de sua vida útil.

$$C_{rm} = \frac{(V_i \times F_{rm})}{V_{uh}} \quad \text{Eq. (01)}$$

Onde:

C_{rm} - Custos com reparo e manutenção;

V_i - Valor inicial dos equipamentos;

F_{rm} - Fator de reparos e manutenção;

V_{uh} - Vida útil dos equipamentos.

6.2.5.3 Custos com energia elétrica

Os maiores gastos energéticos são verificados no processo de secagem, no processo de moagem e no processo de prensagem da biomassa. No entanto, de acordo com a Pesquisa do BNDES (2011), a demanda exata de energia depende das condições de produção: granulometria do insumo, teor de umidade, tecnologia e escala da planta. Nesse sentido, Vale et al. (2015) indica a utilização de resíduos mais secos e serragem como preferência para a fabricação de briquetes, pois 76,63% de toda a energia para sua fabricação é utilizada para secagem.

Assim, com base na potência do equipamento, é possível aproximar o consumo de energia em uma linha de produção. Segundo dados do fornecedor, uma máquina de briquete com capacidade de 2 t/h possui motor de 100 cv e seu consumo de energia elétrica é de 75 kWh.

6.2.5.4 Impostos

No Brasil, os impostos são cobrados de acordo com o porte da pessoa jurídica, de tal modo que existem basicamente três formas de tributação: simples, lucro presumido e lucro real (LIMA; OLIVEIRA, 2015). Neste trabalho foi considerada a integralidade da carga tributária incidente sobre as atividades; no entanto, o fato de o conceito de fábrica não gerar um produto para comercialização permite que sejam isentos de qualquer imposto. Em um cenário de vendas no mercado interno, a viabilidade é fortemente impactada pelo alto custo tributário no Brasil. A incidência de tributos diretos como INSS, PIS, COFINS e ICMS afeta diretamente o resultado da operação (LIMA; REZENDE, 2019).

6.2.5.5 Secagem da biomassa

Eventualmente, as matérias-primas utilizadas como biomassa na produção de briquetes carecem de pré-tratamento para reduzir a umidade. Para estimar a demanda energética desse processo de pré-tratamento, é necessário calcular a quantidade de calor necessária para evaporar a água presente na biomassa a ser seca.

De acordo com os preceitos físicos da calorimetria, esse cálculo pode ser realizado usando a Eq. 02:

$$Q_{total} = (m \times c \times (T_f - T_i)) + (m \times Lv) \quad \text{Eq. (02)}$$

Onde:

Qtotal - quantidade de calor;

m - massa (g);

C - calor específico da água na fase líquida (1 cal/g°C);

Tf - temperatura final;

Ti - temperatura inicial;

Lv - calor latente da vaporização (o da água é 540cal/g).

De acordo com Lei et al. (2013), determinar uma quantidade padrão para o uso de lenha na secagem é um desafio, pois depende de vários fatores, como umidade da madeira e operação do secador. Fadele et al.(2021) monitoraram o consumo de lenha em um secador Kepler Weber 60 tn/h por um período de 14 dias, funcionando 24 horas, atingindo um consumo médio de aproximadamente 9 m³/dia. Se compararmos essa média com um forno que trabalha 8 horas/dia, seriam necessários 3 m³ de lenha por dia. De acordo com a cotação do IEA/Fundação Florestal/Florestar-SP, fechado em 08/2021, o preço da lenha de eucalipto para energia foi de R\$ 53,66/m³.

6.2.5.6 Matéria prima

A utilização de resíduos na produção de briquetes confere ao produto certa competitividade, tendo em vista que os resíduos geralmente geram prejuízos financeiros. Esse material muitas vezes é descartado em locais inadequados, gerando também uma preocupação ambiental.

Para a serragem, os valores foram baseados em informações de mercado, e os preços praticados na região onde a empresa atua apresentam um custo unitário de R\$ 7,66 por tonelada. O resíduo do lodo centrifugado em 15% da matéria-prima não tem custo, pois sua reciclagem evita custos de descarte.

6.2.5.7 Embalagens

As condições de armazenamento se mostram um aspecto importante para manter as características físico-mecânicas dos briquetes (KONISHI et al., 2017). A umidade relativa (UR) do ambiente de armazenamento pode alterar a umidade de equilíbrio dos briquetes. Neste contexto, o armazenamento em sacos confere aos briquetes maior estabilidade em termos de resistência.

6.2.6 Indicadores Econômicos

O primeiro passo para realizar a avaliação econômica é a montagem do fluxo de caixa, ou seja, a definição da entrada e saída de dinheiro durante o ciclo de vida planejado para o projeto. O fluxo de caixa utiliza de vários formatos de conhecimentos, sejam eles explícitos ou tácitos, para auxiliarem no processo de tomada de decisão (RODRIGUES, 2017). Assim, o fluxo de caixa de um projeto de investimento representa o saldo de tudo que entrará menos tudo que sairá de recursos ao longo da execução do projeto (SOUZA et al., 2019).

Segundo Dhaundiyal e Tewari (2015), o intervalo para cálculo do fluxo de caixa depende da duração do ciclo de vida do projeto. Nunes (2008) afirma que a análise de viabilidade é um estudo técnico de natureza financeira que determinará o sucesso de um projeto por meio do cálculo de diversos indicadores, como valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), Payback, entre outros (NOGUEIRA, 2001).

6.2.6.1 Fluxo de Caixa Descontado (Valor Presente Líquido – VPL)

O VPL é uma técnica de orçamento de capital usada para determinar o valor presente de uma empresa, ativo ou projeto com base no dinheiro que pode gerar no futuro. Ele usa projeções de fluxo de caixa e descontos para chegar a uma estimativa de valor presente (KASSAI et al., 2005; GITMAN, 2010; JULIAN; SEAVERT, 2011; DHAUNDIYAL; TEWARI, 2015; HAKIZIMANA; KIM, 2016).

Esta estimativa é então utilizada para avaliar o potencial de investimento e a soma do retorno anual de cada fluxo de caixa, avaliando simultaneamente as despesas (saídas de caixa) e as receitas (entradas de caixa) e aplicado um fator de redução que reflita o custo de oportunidade de possuir capital (AFONSO JÚNIOR et al., 2006; REZENDE; OLIVEIRA, 2008; ASSAF NETO, 2014; DHAUNDIYAL; TEWARI, 2015).

O valor atual no futuro é obtido multiplicando o fluxo de caixa pelo fator de desconto do valor presente, conforme mostrado na Eq. 03 (SATYASAI, 2014).

$$NPV = -TCI + \sum \left(\frac{CF}{(1+i)^n} \right) \quad \text{Eq. (03)}$$

Onde:

TCI - investimento de capital total;

CF - fluxo de caixa no n-ésimo ano;

n - ano e $1 / (1 + i)^n$ é o fator de desconto.

6.2.6.2 Taxa mínima de atratividade

Para calcular o VPL, é necessário definir a taxa mínima de atratividade (TMA), ou seja, o percentual mínimo que um investidor está disposto a ganhar com uma aplicação financeira. A TMA é um dos critérios utilizados para a aceitação de um projeto de investimento, geralmente comparada à TIR, em que o resultado esperado é $TIR > TMA$ (GAMA, 2005; CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2010; JULIAN; SEVERT, 2011).

6.2.6.3 Taxa interna de retorno (TIR)

Gitman (2010) conceitua a TIR como sendo a taxa de desconto que iguala o VPL de uma oportunidade de investimento a zero. A empresa obterá esta taxa se aplicar recursos em um projeto e receber as entradas de caixa previstas.

Ao usar a TIR para tomada de decisão deve-se considerar os seguintes critérios: aceitar o projeto caso a TIR seja maior que o custo de capital e rejeitar o projeto caso a TIR seja menor que o custo de capital (PATRICK; FRENCH, 2016; HAKIZIMANA; KIM, 2016; PETERS; TIMMERHAUS, 2003; PILÃO; HUMMER, 2003; SANTOS et al., 2002, REZENDE; OLIVEIRA, 2001). A TIR pode ser representada pela Eq. 04.

$$\sum \left(\frac{CF}{(1+i)^n} \right) = TCI \quad \text{Eq. (04)}$$

CF - fluxo de caixa no n-ésimo ano;

n - ano e $1 / (1 + i)^n$ é o fator de desconto).

6.2.6.4 Payback time

Payback time refere-se ao tempo de retorno do investimento inicial até o momento no qual o ganho acumulado se iguala ao valor deste investimento. Normalmente este período é medido em meses ou anos. Segundo Rezende e Oliveira (2001), não há um estabelecimento previamente definido do tempo necessário para que isso ocorra; quanto mais rápido os recursos investidos forem recuperados, mais conveniente ou mais viável economicamente é o projeto (BRIGHAM; EHRHARDT, 2012; PUCCINI, 2011). Entretanto, sabe-se que todo e qualquer projeto necessita de um período para recuperação do investimento inicial, sendo esse período variável de atividade para atividade. O Payback time pode ser calculado conforme a Eq. 05:

$$Payback = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{Ganho no período}} \quad \text{Eq. (05)}$$

6.2.6.5 Ponto de equilíbrio (Break Even Point – BEP)

O ponto de equilíbrio (Break Even Point – BEP) torna possível calcular o volume mínimo necessário somente para cobrir todos os custos e despesas variáveis e fixos, portanto sem restar lucro (Figura 12).

O estudo BEP é utilizado para avaliar a soma da capacidade de produção, onde o custo total é equivalente ao desempenho dos lucros. O valor da transação é igual aos custos acumulados. O ponto de divisão, o custo fixo e as atividades de produção semivariáveis devem ser determinados por meio de uma forma gráfica (BRUNI; FAMÁ, 2012; HAWAWINI; VIALLET, 2009). O BEP foi calculado de acordo com a Eq. 06.

$$BEP = \frac{FC+0,3xSVC}{S-0,7xSVC-VC} x 100 \quad \text{Eq. (06)}$$

Onde:

FC - é o custo fixo;

S - vendas;

SVC - custo semivariável;

VC - custo variável.

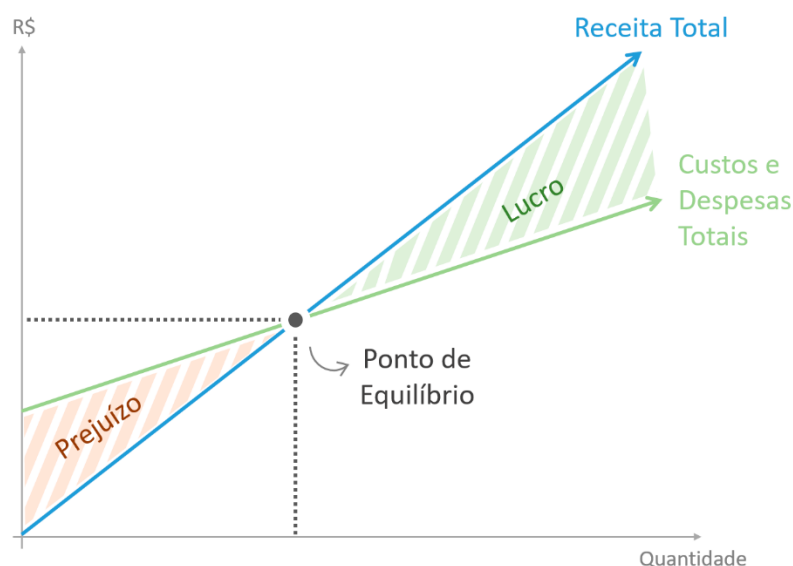


Figura 12 Ponto de equilíbrio entre prejuízo e lucro.

O cálculo do ponto de equilíbrio é utilizado para mitigar o risco de as fábricas incorrerem em perdas, supondo que operem a uma capacidade abaixo do ponto de equilíbrio. Um bom valor de ponto de equilíbrio para fábricas de briquetes geralmente varia entre 40 e 60% (DUBOIS et al., 2009).

6.2.6.6 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é uma técnica para avaliação da sensibilidade do projeto ao risco (Figura 13), bastando que o projeto seja testado sobre curvas de probabilidade, em que é necessário fornecer a faixa de variação associada a cada elemento do fluxo. Desse modo, a incerteza seria expressa por um intervalo de margem de erro no valor do investimento (PONCIANO et al., 2004; CORREIA NETO, 2009).

Quanto maiores o tamanho e a complexidade do projeto, maiores podem ser os erros de estimativa. Essa incerteza é o risco do projeto, gerado pelas dispersões das estimativas esperadas. A análise de sensibilidade determina o ponto de reversão de cada estimativa, ou seja, o valor de cada estimativa que anula o VPL, separando os intervalos de aceitação ou rejeição do projeto (NOGAS et al., 2011; RÊGO et al., 2015; HARZER, 2015; SOUZA et al., 2020).

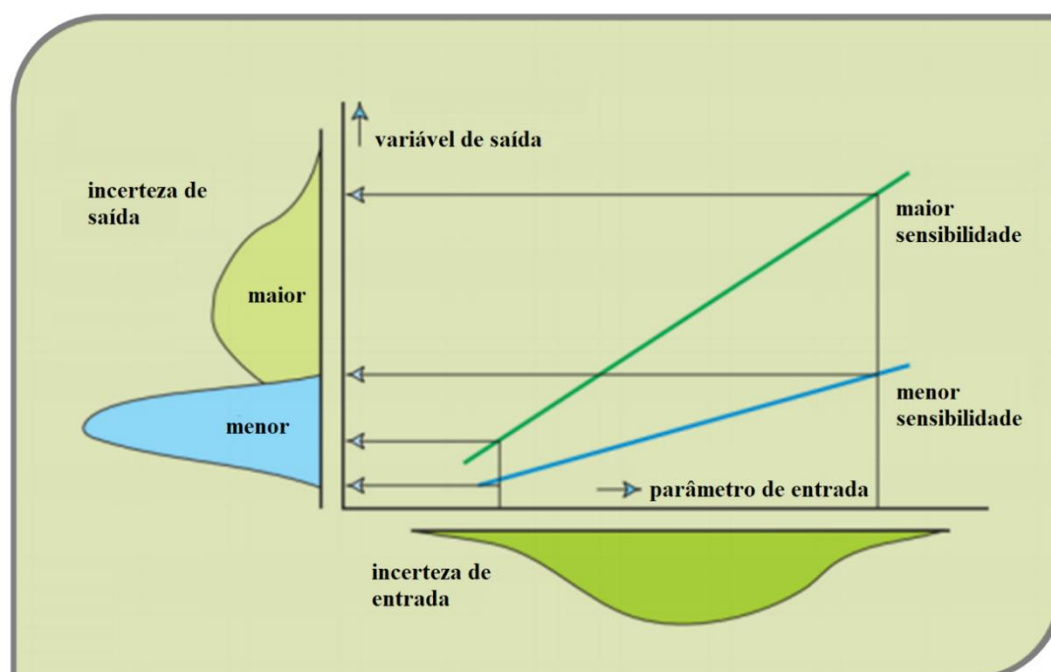


Figura 13 Diagrama da sensibilidade do projeto ao risco.
Fonte: LAL (1995, apud UNESCO, 2005).

6.3 Resultados e discussão

6.3.1 Viabilidade técnica do briquete

Para avaliar a viabilidade técnica do briquete foram considerados os resultados reportados por Kunh et al. (2022). O artigo apresenta primeiramente suas matérias-primas caracterizadas: lodo centrifugado e serragem de madeira, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 Caracterização dos materiais: lodo centrifugado e serragem

Parâmetros	Lodo centrifugado		Serragem	
	Valores	Unidade	Valores	Unidade
Umidade ²	67,77 ± 0,08	%	2,14 ± 0,02	%
Material Volátil ³	79,54 ± 0,66	%	87,34 ± 0,32	%
Cinzas ³	9,06 ± 0,47	%	4,24 ± 0,48	%
Carbono Fixo ³	11,39 ± 0,70	%	8,41 ± 0,21	%
Nitrogênio ³	2,51 ± 0,21	%	N.A.	%
Sólidos Totais ²	327,70 ± 0,73	g.kg ⁻¹	N.A.	N.A.
Sólidos Voláteis ³	867,70 ± 0,71	g.kg ⁻¹	N.A.	N.A.
Sólidos Fixos ³	132,30 ± 0,45	g.kg ⁻¹	N.A.	N.A.

Poder calorífico Superior ³	21,66 ± 0,05	MJ.kg ⁻¹	19,50 ± 0,48	MJ.kg ⁻¹
Densidade ³	0,57 ± 0,01	g.mL ⁻¹	0,19 ± 0,01	g.mL ⁻¹
Densidade Energética ³	12,42 ± 0,24	MJ.m ⁻³	3,69 ± 0,06	MJ.m ⁻³

² base úmida; ³ base seca

Fonte: Kunh et al. (2022)

O conteúdo de voláteis expressa a facilidade de queima de um material e é determinado como a fração de massa do combustível que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada. Devido aos altos níveis de matéria volátil, os resultados das matérias-primas analisadas neste estudo são equivalentes aos níveis relatados na literatura (SUVUNNAPOB et al., 2015; ZANELLA et al., 2016; AVELAR et al., 2016; MOREIRA et al., 2016).

Os critérios dos padrões de qualidade, segundo a comunidade científica, estipulam que o teor de cinzas residuais deve ser inferior a 10% em peso após a queima (SUVUNNAPOB et al., 2015), considerando que um alto volume de cinzas é uma desvantagem. O teor de cinzas tem um efeito poderoso na combustão do combustível (SAWADOGO et al., 2018). Na Tabela 10, pode-se observar que ambas as matérias-primas apresentam teores de cinzas abaixo de 10% em peso, o que é inferior ao relatado (TAMILVANAN, 2013; UJJINAPPA; SREEPATHI, 2018). Com esses níveis, o teor de cinzas atende aos padrões dos briquetes SNI 016235-2000 (<8%).

A determinação do teor geral de carbono (Tabela 10) foi compatível com a literatura (MARDOYAN; BRAUN, 2015), e seus volumes têm uma relação próxima aos valores térmicos nos biocombustíveis (MARDOYAN; BRAUN, 2015). Quanto maior o teor de carbono, melhor o carbono produzido, uma vez que a energia térmica correspondente é tipicamente alta (PINHEIRO et al., 2006). As propriedades caloríficas encontradas para os briquetes produzidos sugerem que o lodo centrifugado e os resíduos de serragem são adequados para a produção de briquetes de acordo com Aina et al. (2009) e Akowuah et al. (2012).

Também foram realizados ensaios de resistência mecânica e poder calorífico para diferentes proporções de umidade e aglutinante na produção de briquetes, observando-se que a inserção crescente de agente aglutinante em até 15% aumentou a resistência mecânica dos briquetes. Isso ocorre porque o aglutinante provoca a formação de uma ponte, filme, matriz ou até mesmo uma reação química que fortalece a ligação e a densificação entre as partículas sólidas do briquete (REZVANI et al., 2014). No entanto, esses mesmos briquetes apresentaram uma tendência sutil de redução do poder calorífico com o aumento da inserção de agente aglutinante. Comportamento semelhante foi observado por Soleimani et al. (2017) e Lestari et al. (2019).

A umidade de até 6% melhora a resistência mecânica dos briquetes, pois o teor de umidade da biomassa, juntamente com a temperatura e a pressão da briquetagem, desempenha um papel fundamental na gelatinização de moléculas orgânicas como amido e proteínas, melhorando a densificação. No entanto, o teor de umidade excessivo dificulta a adesão entre as partículas sólidas do briquete (TUMULURU et al., 2011).

Em relação ao poder calorífico, observou-se que o aumento da umidade nos briquetes provocou uma tendência de redução dessa característica. Esse comportamento é típico, pois a umidade nos combustíveis reduz seu potencial de combustão ao exigir energia excessiva para a evaporação da biomassa durante a queima (AFSAL et al., 2020).

Embora o aglutinante e a umidade tenham afetado as propriedades do briquete, o estudo mostrou que as proporções de 15% de lodo centrifugado e 85% de serragem de madeira com 6% de umidade resultaram em características de resistência mecânica, atingindo 23,82 MPa, poder calorífico de 17,25 MJ/kg e densidade de 1374,15 kg/m³.

Os resultados atendem aos requisitos mínimos de viabilidade técnica do uso do briquete como combustível, que foram superiores ao requisito mínimo (14,5 MJ/kg), recomendado pela ISO 17225-7, 2021.

6.3.2 Viabilidade Econômica

Para a viabilidade econômica, foi analisado o investimento inicial do projeto, bem como seu custo de capital, projeção de receitas ou custos proporcionados pela implantação do projeto, os custos de produção e armazenamento de briquetes e demais despesas de suporte à operação.

Para este estudo de caso, as análises de valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e período de retorno (PP) foram desenvolvidas no software Excel®, assim como fluxos de caixa (FC) e outros cálculos. Para o cálculo da TIR, foram comparados os fluxos de caixa ao longo dos dez anos do ciclo de vida do projeto, considerando uma taxa de retorno de atratividade mínima (TMAR) de 10%.

6.3.2.1 Estimativa de investimento em capital

O investimento de capital é a quantidade de dinheiro gasto em bens ou serviços para fins de renda futura. Existem dois tipos de capital: fixo e de giro. Investimento de capital fixo (FCI – Fixed Capital Investment) é o recurso utilizado por uma empresa para iniciar suas atividades, ou seja, os bens tangíveis ou intangíveis da empresa, que não se espera que sejam convertidos em caixa no curto prazo. Também é definido como o custo total de instalação dos equipamentos de processo, edifícios, dispositivos auxiliares e engenharia envolvidos na instalação de uma nova fábrica (IFA et al., 2020). A capacidade nominal de uma

linha de produção de briquetes, segundo informações do fornecedor Biomax, é de 1,1 t/hora. O projeto prevê um regime de operação de dois turnos de 8,8 horas e 300 dias por ano, de acordo com o regime de operação do frigorífico, totalizando 5.280 horas de operação por ano. Com essas informações, foi feito um dimensionamento de uma usina para produção de briquetes, conforme demonstrado na Tabela 11.

Tabela 11 Dimensionamento de uma Usina para produção de briquetes

Dimensionamento da usina	Quantidade
Volume total estimado de produção (toneladas/ano)	24.333,00
Capacidade nominal de uma linha (toneladas/ano)	7.392,00
Necessidade de linhas de produção	3,29

Assim, necessitando de quatro linhas de produção para atender o volume total de resíduos, com taxa de ocupação de 83,5%, o projeto exigirá uma área de 925 m², que será avaliada a uma taxa de R\$ 1.283,53 por m² e exigiria um investimento em obras civis de R\$1.187.283,74, incluindo todos os custos de implementação do projeto. A Tabela 12 mostra todos os componentes do custo direto (D) que foram orçados para os equipamentos entregues no local de instalação, incluídos no orçamento: instalação, instrumentação e controles, tubulações, sistemas elétricos, melhorias de pátio, prédios e instalações de serviços. Os custos indiretos (i), como engenharia e construção, são adicionados ao investimento inicial dos equipamentos adquiridos entregues.

Tabela 12 Componentes dos custos diretos (D) e seus respectivos valores

Equipamento	Função	Quantidade	Custo unt.	Custo total
Dosador subterrâneo	Inserir o resíduo úmido na usina de briquetagem	4	R\$ 42.000,00	R\$ 168.000,00
Chupim do secador	Transportar os resíduos úmidos até a entrada do secador	4	R\$ 51.000,00	R\$ 204.000,00
Secador tambor B1200	Tambor rotativo com ventilador de exaustão e fornalha para secagem dos resíduos	4	R\$ 567.000,00	R\$ 2.268.000,00
Silo dosador da briquetadeira	Alimentar a briquetadeira com os resíduos secos de forma contínua	4	R\$ 35.000,00	R\$ 140.000,00
Chupim da briquetadeira	Transportar os resíduos secos até a entrada da briquetadeira	4	R\$ 24.000,00	R\$ 96.000,00
Briquetadeira B 85/210	Densificar a biomassa e resfriar os briquetes	4	R\$ 376.000,00	R\$ 1.504.000,00
Motor principal da briquetadeira	Acionar a briquetadeira para extrusão da biomassa	4	R\$ 34.000,00	R\$ 136.000,00
Quadro de comando	Controlar por inversor de frequência os volumes de produção	4	R\$ 21.000,00	R\$ 84.000,00
Total da Usina		4	R\$ 1.150.000,00	R\$ 4.600.000,00

O valor total do investimento de capital fixo para instalação de equipamentos de processo, prédios, dispositivos auxiliares e engenharia é de R\$ 5.797.283,75, conforme Tabela 13.

Tabela 13 Investimento inicial na instalação do parque industrial

Investimento inicial	Orçamento	Vida útil (anos)	Depreciação
Equipamentos	R\$ 4.600.000,00	10,00	R\$ 460.000,00
Obras civis	R\$ 1.187.283,75	25,00	R\$ 47.491,35
Utensílios	R\$ 10.000,00	5,00	R\$ 2.000,00
Total	R\$ 5.797.283,75	11,38	R\$ 509.491,35

6.3.2.2 Custos com mão-de-obra direta

Como o processo é, em sua maior parte, automatizado, a mão-de-obra é reduzida. A Tabela 14 apresenta os custos com mão-de-obra direta referente ao quadro de lotação necessário para operar a fábrica com um regime de operação de dois turnos, seis dias por semana, totalizando 12 funcionários.

Tabela 14 Custos com mão-de-obra direta

Cargo	Quantidade	Salário	Custo total	Custo com encargos
Auxiliar operacional	10	R\$ 1.700,00	R\$ 17.000,00	R\$ 35.938,00
Operador de máquinas	2	R\$ 2.300,00	R\$ 4.600,00	R\$ 9.724,40
Total	12	R\$ 1.800,00	R\$ 21.600,00	R\$ 45.662,40

6.3.2.3 Custo com matéria prima

Na Tabela 15 é possível identificar o custo unitário das matérias-primas utilizadas na produção dos briquetes. O lodo centrifugado não tem custo, tendo em vista que o resíduo é um passivo ambiental e que sua reciclagem proporciona economia ao reduzir os custos de descarte. A serragem é um material comercializável e produzido na empresa de estudo de caso em uma fábrica de paletes, e seu custo é de R\$ 7,67 por tonelada.

Tabela 15 Custo com Matérias Primas

Matéria prima	Volume	Custo unitário	Custo total
Lodo centrifugado base seca (toneladas)	3.650	-	-
Serragem de madeira (toneladas)	20.683	R\$ 7,67	R\$ 158.569,67
Total	24.333	R\$ 6,52	R\$ 158.569,67

6.3.2.4 Custo com embalagens

Após serem produzidos, os briquetes são embalados em sacos de rafia, garantindo a sua qualidade no armazenamento e estocagem do produto final. A Tabela 16 apresenta os

custos com sacaria para armazenagem dos briquetes, com base em volumes de 40 kg cada saco.

Tabela 16 Custos com embalagens por saco de 40kg

Custo de embalagens	Valor
Volume/saco (Kg)	40
Produção anual (Kg)	24.333.300
Consumo de sacos	608.333
Custo unitário do saco	R\$ 1,30
Custo total de embalagens	R\$ 790.832,25

6.3.2.5 Custos com energia elétrica

A eletricidade é calculada a um custo de R\$ 0,75 por kW/h. Considera-se que os briquetes produzidos requeiram 82 kW/h de energia elétrica por briquetadeira, de acordo com dados fornecidos pelo fornecedor. A Tabela 17 mensura o custo de energia elétrica com base na capacidade instalada dos equipamentos e os custos atuais de energia elétrica.

Tabela 17 Custos com energia elétrica

Custo com energia elétrica	Valor
Horas trabalhadas ano	5.280
Consumo kWh/h	82
Consumo kWh/ano	432.960
Tarifa R\$/kWh	0,75
Quantidade briquetadeiras	4
Custo	R\$ 1.298.880,00

6.3.2.6 Custos com secagem das matérias primas

A matéria-prima que vai ser compactada exige um pré-tratamento antes de ser introduzida na prensa, sendo necessária a secagem para reduzir o teor de umidade. Para melhorar o desempenho energético da briquetadeira, o projeto está configurado com um sistema de pré-aquecimento da matéria-prima constituído por um trocador de calor tubular onde a matéria-prima passa por um tubo central, aquecido em torno por um fluxo de ar quente. A biomassa utilizada para aquecer a matéria prima é cavaco de eucalipto. A Tabela 18 demonstra o custo com cavaco de eucalipto para secagem das matérias primas.

Tabela 18 Custos com secagem das matérias primas por m³

Custo da secagem	Valores
Consumo m ³ de cavaco	12.028,00
Custo do m ³ de cavaco	42,20
Custo da secagem	507.581,60

Outros custos, como de manutenção, foram estimados com base em recomendação técnica do fornecedor.

Em geral, os custos de produção são divididos em dois grupos, a saber: custos variáveis de fabricação e custos fixos de fabricação. Custos Fixos de Fabricação são aqueles que não sofrem alteração de valor em caso de aumento ou diminuição da produção, independem, portanto, do nível de atividade. Os custos de variáveis são aqueles que variam proporcionalmente de acordo com o nível de produção ou atividades. Os resultados do cálculo dos custos de fabricação diretos, indiretos e fixos são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 Custos anuais da fábrica

Grupo de gastos	Custo	Valor anual
Custos fixos	Mão de obra	R\$ 547.948,80
	Depreciação	R\$ 509.491,35
	Manutenção	R\$ 207.000,00
Custos variáveis	Matéria prima	R\$ 158.569,67
	Embalagens	R\$ 790.832,25
	Energia elétrica	R\$ 1.298.880,00
	Lenha (secagem)	R\$ 507.581,60
Custo total		R\$ 4.020.303,67

Incluso aos custos totais está a depreciação, que representa a desvalorização ocorrida em função da obsolescência dos ativos imobilizados.

6.3.2.7 Despesas gerais

As despesas gerais são os gastos com bens e serviços relativos à manutenção da atividade da empresa, bem como aos esforços para a obtenção de receitas por meio da venda dos produtos, como exemplo, comissão de venda, impostos sobre venda, despesas com marketing, despesa financeira de TCI. Como o objetivo do projeto é consumir a produção dos briquetes na produção de energia térmica, não haverá despesas relacionadas ao esforço de comercialização.

6.3.3 Estimativa de receitas e indicadores econômicos para implantação de uma usina de briquetagem

Para esse estudo as receitas serão substituídas pelo conceito Cost Avoidance, ou seja, o quanto foi feito de economia e quanto de custo foi evitado, com a substituição da fonte de energia térmica atual (lenha de eucalipto) pelo briquete de lodo e serragem.

Tabela 20 Custo evitado com a destinação para os aterros anualmente

Volume de Lodo (Base úmida)	Kg	8.220.000
Custo destinação (Agregare)	R\$/tonelada	94,80
Custo evitado destinação anual		R\$ 779.256,00

Na Tabela 20 é possível observar que a empresa estudada destina para aterro anualmente 8.220.000 quilos de lodo centrifugado, com um custo unitário para destinação na ordem de R\$ 94,80 por tonelada de lodo centrifugado, para empresa especializada em compostagem, gerando dessa forma um custo anual de destinação de R\$ 779.256,00.

O resultado obtido com a diferença entre o custo da fonte de energia atual (lenha de eucalipto) menos o custo da fonte de energia gerada por meio da reciclagem do lodo e da serragem são considerados como lucro da operação.

Tabela 21 Custo evitado com a substituição de cavaco por briquetes (kg)

Volume de briquetes	Kg	24.333.300
Energia do cavaco	kcal/Kg	2.650
Energia do briquete	kcal/Kg	3.799
Equivalência cavaco/briquete	Kg/m³	290
Consumo evitado de cavaco	m³	120.289
Custo do cavaco	R\$/m³	42,20
Custo evitado com cavaco	R\$/m³	5.076.201,85

Na Tabela 21 é possível identificar que por meio da relação de energia total do briquete produzido e a biomassa tradicional quanto de volume de cavaco de eucalipto é possível substituir pelo briquete de lodo e serragem na produção de energia térmica. A correção permite estimar uma economia anual de 120.289 metros cúbicos de cavaco de eucalipto, que atualmente tem um custo de aquisição na ordem de R\$ 42,20 por metro cúbico. O custo evitado pela utilização dos briquetes é de aproximadamente R\$ 5.076.201,85 por ano.

Com os ganhos acumulados do Cost Avoidance da destinação e da substituição da biomassa tradicional, menos seus custos operacionais, a empresa tem de recuperar o dinheiro aplicado no TCI, avaliados pela taxa interna de retorno (TIR) ou pelo Payback time.

6.3.3.1 Ponto de equilíbrio

De acordo com os custos de produção e o Cost Avoidance é possível calcular a margem de contribuição (Eq. 07) de R\$ 25,59 por metro cúbico, tendo um montante total de custos fixos de R\$ 1.264.440,15 ao ano, gerando um ponto de equilíbrio de 49.415,62 metros cúbicos, ou seja 41,10% da produção.

$$MC = \frac{(CA_{total} - COT)}{V} \quad \text{Eq. (07)}$$

Onde:

MC - margem de contribuição;

CA - Cost Avoidance;

COT - Custo operacional total;

V - Volume produzido de briquetes.

6.3.3.2 Fluxo de caixa descontado (VPL)

Para o cálculo do VPL é necessário a definição da Taxa Mínima de Atratividade – TMA: essa taxa representa o retorno mínimo esperado para o investimento. Neste contexto, as premissas atuais definem a taxa de desconto a ser aplicada em 10% ao ano, como a taxa de desconto dos fluxos de caixa, e trazendo os ganhos futuros para ano zero (0).

Tabela 22 Projeção de fluxo de caixa para 10 anos

DESCRIÇÃO	Ano 0	Ano 1	Ano 2	...	Ano 10
Taxa mínima de atratividade	10,0%				
Investimento inicial	-5.797.284				
Fluxo de caixa descontado	0	2.131.496	1.937.724	...	903.962
Saldo inicial	-5.797.284	-3.665.788	-1.728.064	...	8.609.548
Tota de entradas (+)	0	5.855.458	5.855.458	...	5.855.458
Custo evitado com destinação	0	779.256	779.256	...	779.256
Custo evitado com cavaco	0	5.076.202	5.076.202	...	5.076.202
Total de saídas (-)	0	4.020.304	4.020.304	...	4.020.304
Custos fixos	0	1.264.440	1.264.440	...	1.264.440
Custos variáveis	0	2.755.864	2.755.864	...	2.755.864
Depreciação	0	509.491	509.491	...	509.491

O fluxo de caixa descontado como cenário base gera um valor presente líquido de R\$ 8.609.548,00, considerando a vida útil do projeto em 10 anos e TMA de 10% ao ano.

6.3.3.3 Taxa interna de retorno do investimento (TIR)

Após a definição de uma taxa de juros mínima aceitável pelo investidor (TMA) de 10% ao ano, e considerando que a TIR é a taxa de desconto aplicada ao fluxo de caixa para que o VPL seja igual a zero, é possível observar que para este estudo de caso a TIR calculada foi de 38,93%, sendo, dessa forma, possível afirmar que o projeto deve ser aceito pela premissa de que se $TIR > TMA =$ aceitar o projeto.

6.3.3.4 Tempo de pagamento (Payback time)

Payback time, como demonstrado na Figura 14, é o período de tempo necessário para que as entradas de caixa do projeto, avaliando-se os fluxos de caixa descontados, se igualem ao valor a ser investido, ou seja, o tempo de recuperação do investimento realizado, sendo caracterizado como um indicador de risco para aceitação do investimento (SHORT et al., 1995).

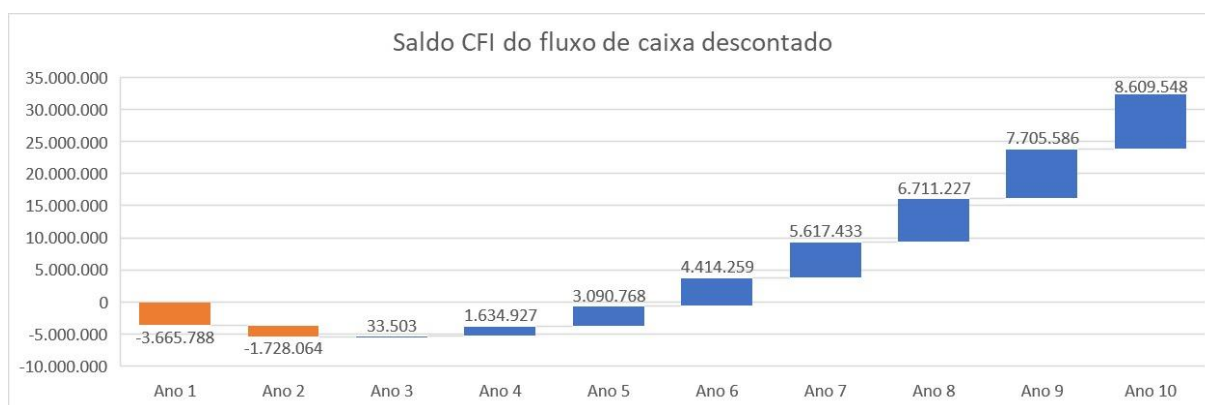


Figura 14 Payback time.

Fonte: A autora

A Figura 14 mostra que, interpolando entre o segundo e o terceiro ano, o Payback time foi obtido em 2,98 anos a um valor de VPL de R\$ 8.609.548,00. No eixo y pode-se observar a soma do VPL de cada ano de forma acumulativa, sendo ao final do período o valor presente líquido dos 10 anos somados. O Payback time deste estudo é mais curto do que o Payback time de 5 a 6 anos de Hakizimana e Kim (2016) e de Maroušek et al. (2019), que é de 4 a 6 anos, antes dos impostos. Apesar de não haver uma regra clara a respeito do período ideal para o Payback time, Áries e Newton (1955) preconizam que o máximo aceitável para produtos químicos industriais é de cinco anos para baixo risco e dois anos para alto risco.

6.3.3.5 Análise de sensibilidade

O risco é identificado como sendo tudo o que pode comprometer o caixa da empresa. Em geral, para mitigar os riscos, uma análise de sensibilidade faz-se necessária para assegurar-se da viabilidade do projeto e das ameaças ao resultado desejado. Para fortalecer o estudo de viabilidade econômica foi analisada a sensibilidade dos investimentos à luz da variação da taxa do custo de capital cruzado com a variação do custo evitado ou Cost Avoidance, e como variável de resposta foram analisados os indicadores Payback time e VPL.

Tabela 23 Cenários pessimista, moderado e otimista

Resposta	Taxa/Custo evitado	-10%	0%	10%
Payback	7,5%	3,93 Anos	2,84 Anos	2,23 Anos
	10,0%	4,20 Anos	2,98 Anos	2,32 Anos
	12,5%	4,52 Anos	3,15 Anos	2,43 Anos
Resposta	Taxa/Custo evitado	-10%	0%	10%
VPL	7,5%	6.277.319,34	10.296.553,01	14.315.786,69
	10,0%	5.011.622,71	8.609.548,08	12.207.473,45
	12,5%	3.941.850,32	7.183.684,05	10.425.517,78
Resposta	Taxa/Custo evitado	-10%	0%	10%
TIR	7,5%	27,72%	38,93%	49,65%
	10,0%	27,72%	38,93%	49,65%
	12,5%	27,72%	38,93%	49,65%

Na Tabela 23 é possível analisar que no cenário mais pessimista, onde o custo de capital chegue a 12,5% ao ano e o Cost Avoidance reduza em 10%, temos um Payback time de 4,52 anos; em um cenário moderado o tempo de pagamento do projeto reduz para 2,98 anos e, em um cenário otimista, com redução do custo de capital para 7,5% ao ano e o Cost Avoidance aumentando em 10%, o tempo de retorno do investimento se iguala a 2,23 anos. Com a variável de resposta VPL nos cenários pessimista, moderado e otimista, os valores respectivos são: R\$ 5.011.622,71, R\$ 8.609.548,08 e R\$ 12.207.473,45. Em todos os cenários testados na análise de sensibilidade o $VPL > 0$, representando dessa forma que o projeto é de baixo risco. A variável de resposta TIR ajuda a calcular a taxa de desconto do fluxo de caixa para que seu valor presente líquido (VPL) chegue a zero, os cenários testados demonstram $TIR > TMA$, ou seja, se a TIR de um projeto for maior que a taxa mínima de atratividade, significa que ele é viável.

6.4 Conclusões

Em conclusão, os resultados obtidos a partir da análise de briquetes de lodo centrifugado e serragem confirmaram sua viabilidade técnica para uso como combustível. Além disso, a viabilidade econômica foi determinada a partir da taxa interna de retorno de

38,93%, bem acima da taxa mínima de atratividade de 10%, com Payback time de 2,98 anos e ponto de equilíbrio de 41,10%.

Os briquetes geram economia por meio dos custos evitados com o descarte de resíduos, bem como pela substituição de parte da biomassa tradicional utilizada como combustível no processo de geração de energia térmica.

Na análise de sensibilidade, o projeto apresentou baixo risco e, portanto, pode ajudar a empresa a reduzir seus custos e fortalecer o viés de governança corporativa, o que proporciona mais uma iniciativa na produção sustentável.

6.5 Agradecimentos

À Capes, pela bolsa concedida, ao CNPq, ao PGAGRI e à UNIOESTE de Cascavel e Toledo.

6.6 Referências

AFONSO, J.P.C.; OLIVEIRA, F.D.O.; COSTA, D.R. Economic feasibility of producing eucalyptus firewood for drying agricultural products. **Agricultural Engineering**, v. 26, n. 1, p. 28-35, 2006.

AFSAL, A.; DAVID, R.B.V.; SUHAIL, N.; PARVATHY, U.; RAKHI, R.B. Experimental investigations on combustion characteristics of fuel briquettes made from vegetable market waste and saw dust. **Materials Today: Proceedings**, n. 33, n. 2, p. 3826-3831, 2020. Doi: 10.1016/j.matpr.0.06.222.

AINA, O.M.; ADETOGUN, A.C.; IYIOLA, K.A. Heat Energy From Value-Added Sawdust Briquettes of Albizia Zygia. **Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management**, v. 2, n. 1, p. 42-49, 2009.

AKOWUAH, J.O.; KEMAUSUOR, F.; MITCHUAL, S.J. Physico-chemical characteristics and market potential of sawdust charcoal briquette. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 3, n. 2, p. 1-6, 2012.

ASAE - American Society of Agricultural Engineers S313.2. St. Joseph: Agricultural Engineers Yearbook of Standards, 1998. p.820-1.

ASSAF NETO, A. **Corporate finance and value**. 3a.ed. São Paulo: Atlas, 2014.

AVELAR, N.V.; REZENDE, A.A.P.; CARNEIRO, A.C.O.; SILVA, C.M. Evaluation of briquettes made from textile industry solid waste. **Renewable Energy**, v. 91, p. 417-424, 2016.

BARBOSA, M.T.C. **Analysis of the use of biomass and forest residues for the production of pellets**. 2008. 103f. Dissertation (Integrated Master in Mechanical Engineering), University of Aveiro, Aveiro, 2008.

BNDES Sectorial. Rio de Janeiro: National Bank for Economic and Social Development, 2011.

BRIGHAM, E.F.; EHRHARDT, M.C. **Financial administration: theory and practice**. 13a.ed. São Paulo: Thomson Learning, 2012.

BRUNI, A.L.; FAMÁ, R. **Investment decisions**. 3a.ed. São Paulo: Atlas, 2012.

- CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKKE, B.H. **Investment Analysis**: Financial Mathematics, Economic Engineering, Decision Making, Business Strategy. 11a.ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- DHAUNDIYAL, A.; TEWARI, P.C. Comparative analysis of pine needles and coal for electricity generation using carbon taxation and emission reductions. **Acta Technologica Agriculturae**, v. 18, n.2, p. 29-35, 2015.
- DUBOIS, A.; KULPA, L.; SOUZA, L.E. **Cost management and pricing**: concepts, models and instruments: working capital and competitiveness margin approach. 3a.ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- EMBRAPA Information Technology Agency. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica (Ageitec)** 2021. Disponível em: www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fmurarmI02wyiv8065610d9gndlvw.html. Acesso em 20 dez. 2021.
- FADELE, O.K.; AMUSAN, T.O.; AFOLABI, A.O.; OGUNLADE, C.A. Characterisation of a briquette from forest wastes: Optimisation approach. **Reserch in Agricultural Engineering**, v. 67, p. 138-147, 2021. Doi: doi.org/10.17221/6/2021-RAE. 2021.
- FAO. Industrial Charcoal Making, **FAO Forestry Paper No. 63**. Mechanical Wood Products Branch. Forest Industries Division. FAO Forestry Department, 1985.
- FERREIRA, A.; SHEILA, K.S.; CREMONEZ, P.; DIETER, J.; TELEKEN, J.G.; SAMPAIO, S.C.; KUNH, P.D. Brazilian poultry activity waste: Destinations and energetic potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, Part 2, p. 3081-3089, 2018.
- GAMA, M.M.B.; SILVA, M.L.; VILCAHUAMÁN, L.J.M.; LOCATELLI, M. Economic analysis of agroforestry systems in Eastern Amazonia, Machadinho d'Oeste- RO, Brazil. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, 2005. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000300007>.
- GITMAN, L.J. **Financial administration principles**. 12.ed. São Paulo: Pearson, 2010.
- HAKIZIMANA, J.D.K.; KIM, H. Peat briquette as an alternative to cooking fuel: a techno-economic viability assessment in Rwanda. **Energy**, v. 102, p. 453-464, 2016.
- HARZER, J.H. **Risk indicators in investment projects**: a contribution to the Multi-Index Methodology. 2015. Tese (Doutorado em Administração) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2015.
- HAWAWINI, G.; VIALLET, C. **Finance for Executives – Management for Value Creation**. São Paulo: Cengage Learning, 2009.
- IFA, L.; YANI, S.; NURJANNAH, N.; DARNENGSIH, D.; RUSNAENAH, A.; MEL, M.; MAHFUD, M.; KUSU MA, H.S. Techno-economic analysis of bio-briquette from cashew nut shell waste. **Heliyon**, v. 6, n. 9, p. e05009, 2020. Doi: [10.1016/j.heliyon.2020.e05009](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05009).
- INTER - Union Department of Statistics and Socioeconomic Studies. **Social burdens in Brazil**: concept, magnitude and impact on employment. São Paulo: DIEESE, 2006.
- ISO - International Organization for Standardization. **ISO 17225-7**. Solid Biofuels—Fuel Specifications and Classes—Part 7: Graded Non-woody Briquettes. Geneva, Switzerland: ISO, 2021. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/76094.html>. Acesso em 21 dez. 21.
- JULIAN, J.W.; SEAVERT, C.F. AgProfit™: a net present value and cash flow based decision aid for agriculture producers. **Agricultural Finance Review**, v. 71, n. 3, p. 366-378, 2011.

- KASSAI, J.R.; CASANOVA, S.P.C.; SANTOS, A.; ASSAF NETO, A. **Return on investment**. São Paulo: Atlas, 2005.
- KONISHI, P.A.; HANSTED, A.L.S.; NAKASHIMA, G.T.; PADILLA, E.R.D.; RÓZ, A.L.; SETTE JÚNIOR, C.R.; YAMAJI, F.M. Influence of Different Storage Conditions on the Physico-Mechanical Properties of Briquettes. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 3, 2017.
- KUNH, S.S.; TAVARES, M.H.F.; SILVA, E.A.; OLIVEIRA, R.S.; BITTENCOURT, P.R.S.; DAMACENO, F.M.; NASCIMENTO, C.T. Briquette production from a mixture of biomass: poultry slaughterhouse sludge and sawdust. **Environmental Science and Pollution Research**, 2022. Doi: 10.1007/s11356-022-20218-w.
- LEI, T.; WANG, Z.; LI, Z.; XU, J.; HE, X.; ZHU, J. A biomass briquetting fuel machine and its large-scale operation system. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 5, 013107, 2013.
- LELA, B.; BARIŠIĆ, M.; NIŽETIĆ, S. Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical–mechanical and thermal characteristics. **Waste Management**, v. 47, Part B, p. 236-245, 2016. Doi: doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.035.
- LESTARI, L.; VARIANI, V.I.; SUDIANA, I.N.; FIRIHU, M.Z.; RAHARJO, S.; AGUSU, L.; DEWI, A. Production and characterization of briquette from the activated charcoal of corncob. **Journal of Physics: Conference Series**, 9th International Conference on Physics and Its Applications (ICOPIA) 14 August 2018, Surakarta, Indonesia, v. 1153, 2019.
- LIMA, E.M.; REZENDE, A.J. Study on the evolution of tax burden in Brazil: an analysis from the Laffer Curve. **Articles Interactions**, v. 20, n. 1, Jan-Mar, 2019.
- LIU, L.; WANG, D.; GAO, L.; DUAN, R. Distributed heating/centralized monitoring mode of biomass briquette fuel in Chinese northern rural areas. **Renewable energy**, v. 147, p. 1221-1230, 2020.
- MARDOYAN, A.; BRAUN, P. Analysis of Czech subsidies for solid biofuels. **International Journal of Green Energy**, v. 12, n. 4, p. 405-408, 2015.
- MAROUŠEK, J.; STRUNECKÝ, O.; STEHEL, V. Biochar farming: defining economically perspective applications. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21, n. 7, p. 1389-1395, 2019.
- MOREIRA, R.; ORSINI, R.R.; VAZ, J.M.; PENTEADO, J.C.; SPINACE, E.V. Production of biochar, bio-oil and synthesis gas from cashew nut shell by production of biochar, bio-oil and synthesis gas from cashew nut shell by slow pyrolysis. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, p. 217-224, 2016.
- NOGAS, P.S.M.; SOUZA, A.; SILVA, W.V. Investment analysis: a probabilistic contribution to the TMA/TIR index of the Multi-Index Methodology. **Revista Iberoamericana de Ciencias Empresariales y Economía**, v. 2, n. 2, p. 43-55, 2011.
- NOGUEIRA, E. Investment analysis. In: BATALHA, M. O. **Agro-industrial management**. Vol.1. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2001. 692p.
- OLIVEIRA, B.M. **Qualidade de pellets de bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto em diferentes composições**. 2016. 52f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.
- ONU – https://www.un.org/development/desa/dspd/wp-content/uploads/sites/22/2021/05/World-Social-Report-2021_web_FINAL.pdf. Acesso em 10 out. 2021.

- PATRICK, M.; FRENCH, N. The internal rate of return (IRR): projections, benchmarks and pitfalls. **Journal of Property Investment & Finance**, v. 34, p. 664-669, 2016.
- PETERS, M.S.; TIMMERHAUS, K.D.; WEST, R.E. **Plant design and economics for chemical engineers**. Vol. 4. New York: McGraw-Hill, 2003.
- PILÃO, N.E.; HUMMER, P.R.V. **Financial mathematics and economic engineering**: the theory and practice of investment project analysis. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.
- PUCCINI, A.L. **Financial Mathematics**: Objective and Applied. 9a.ed. São Paulo: Elsevier, 2011.
- QUIRINO, W.F. Briquetting of Ligno-cellulosic Waste. Forest Products Laboratory – LPF/IBAMA. Brasília, (2004).
- RÊGO, T.F.; CORREIA, A.M.M.; ARAÚJO, J.A.R.; GURGEL, J.C.; SOUZA, A. Return expectations and perceived risks in the natural coloring cashew agribusiness for the B2B market. **Costs and Agribusiness**, online, v. 11, n. 2, p. 370-400, 2015.
- REZENDE, J.L.P.; OLIVEIRA, A.D. **Economic and social analysis of forest projects**. Viçosa: Editora UFV, 2001. 389 p.
- REZENDE, J.L.P.; OLIVEIRA, A.D. **Economic and social analysis of forestry projects**: financial mathematics, project formulation, project evaluation, project location, cost-benefit analysis. 2.ed. Viçosa: Editora UFV, 2008.
- REZVANI, Z.; CHENGINI, G.R.; ARABHOSSEINI, A.; KIANMEHR, M.H. Natural energy of briquette, definitions, benefits and technologies. **Journal of Automotive and Applied Mechanics** v. 2, n. 1, 2014.
- RODRIGUES, W.; MELO, J. A Economic evaluation of low carbon farming technologies in Brazilian savannas. **Informe IGEPEC**, v. 21, n. 1, p. 82-100, 2017.
- SANTOS, M.J.; RODRIGUEZ, L.C.E.; WANDELLI, E.V. Economic evaluation of four agroforestry models in pasture-degraded areas in the Western Amazon. **Scientia Forestalis**, v. 62, p. 48-61, 2002.
- SATYASAI, K.J.S. Application of modified internal rate of return method for watershed evaluation. **Agricultural Economics Research Review**, v. 22, p. 401-406, 2014.
- SAWADOGO, M.; TANO, S.T.; SIDIB, S.; KPAI, N.; TANKOANA, I. Cleaner production in Burkina Faso: a case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 1047-1056, 2018.
- SHORT, W.; PACKY, D.J.; HOLT, T. **A Manual for the Economic Evaluation of Energy**. Efficiency and Renewable Energy Technologies. Denver, CO: National Renewable Energy Laboratory, 1995.
- SILVA, C.A.; FELFLI, F.F.; PÉREZA, J.M.M., ROCHA, J.D., SIMÕES, A.F. Study of the technical-economic feasibility of a briquette factory for energy generation purposes. In: **Annual 6th Rural Energy Meeting**, 2006.
- SILVA, J.W.F.; CARNEIRO, R.A.F.; LOPES, J.M. Briquette residual biomass: technical feasibility for the production of briquettes in the golden microregion. **Brazilian magazine of renewable energies**, v. 6, n. 4, p. 624-646, 2017.

SILVA, M.P.; MARTINS, R.M.; VENDRUSCULO, I.V. Cost of work in Brazil: a study in companies that stood out ranking in the internationalization. **Economy and Development Magazine**, v. 14, n. 1, p. 126-139, 2015.

SOLEIMANI, M.; TABIL, X.L.; GREWAL, R.; TABIL, L.G. Carbohydrates as binders in biomass densification for biochemical and thermochemical processes. **Fuel**, v. 193, p. 134-141, 2017.

SONG, X.; ZHANG, S.; WU, Y.; ZHONGYAO, C. Investigation of the properties of biobriquette fuel prepared from hydrothermally pretreated cotton stalk and wood sawdust. **Renewable energy**, v. 151, p. 184-191, 2020.

SOUZA, V.S.; GIMENES, R. M. T.; BINOTTO, E. Economic viability for deploying hydroponic system in emerging countries: A differentiated risk adjustment proposal. **Land Use Policy**, v. 83, p. 357-369, 2019.

SUVUNNAPOB, S.; AYUDHYA B.I.N.; KUSUKTHAM, B. A study of cotton dust mixed with wood dust for biobriquette fuel. **Engineering Journal**, v. 19, n. 4, p. 57-70, 2015.

TAMILVANAN, A. Preparation of biomass briquettes using various agro-residues and waste papers. **Journal of Biofuels**, v. 4, n. 2, p. 47-55, 2013.

TUMULURU, J.S.; WRIGHT, C.T.; HESS, R.; KENNEY, K.L. A review of biomass densification systems to develop uniform feed stock commodities for bioenergy application. **Biofuels Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

UJJINAPPA, S.; SREEPATHI, L.K. Evaluation of physico-mechanical-combustion characteristics of fuel briquettes made from blends of areca nut husk, simarouba seed shell and black liquor. **The International Journal of Renewable Energy Development**, v. 7, n. 2, p. 131-137, 2018.

VALE, A.T.; GENTIL, L.V. Energy balance and efficiency in wood sawdust briquettes production. **Floresta**, online, v. 45, p. 281-288, 2015.

WANG, D.; LIU, L.; LIU, C.; XIE, J.; YUAN, Y.; YANG, H.; DUAN, R. A novel supply chain of straw briquette fuel and the optimal way to acquire fixed assets. **Energy policy**, v. 153, 2021.

ZANELLA, K.; GONÇALVES, J.L.; TARANTO, O.P. Charcoal briquette production using orange bagasse and corn starch. **Chemical Engineering Transactions**, v. 49, p. 313-318, 2016.

ZHANG, J.; ZHENG, D.; WU, K.; ZHANG, X. The optimum conditions for preparing briquette made from millet bran using Generalized Distance Function. **Renewable energy**, v.140, p. 692-703, 2019.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de briquetes compostos por resíduos de lodo do tratamento de efluente e serragem de madeira, em diferentes proporções, teve sua viabilidade técnica comprovada.

O desempenho dos briquetes como fonte de energia térmica foi tecnicamente comprovado, com possibilidade de mitigação do impacto ambiental com a destinação atual dos resíduos e redução dos custos operacionais de sua destinação.

Os briquetes foram caracterizados quanto a sua resistência mecânica, poder calorífico superior, teor de cinzas, materiais voláteis, carbono fixo e resistência à compressão axial. Os tratamentos estatísticos foram realizados para verificar os fatores mais significativos para a produção de briquetes, determinar as melhores proporções das matérias-primas e avaliar se há interferência da umidade e da farinha de cola utilizada como aglutinante. A melhor condição da mistura lodo-serragem foi 15 e 85% respectivamente, com 6,0% de umidade. O melhor tratamento apresentou resistência mecânica de 23,82 MPa, poder calorífico de 17,20 MJ/kg e densidade de 1374,15 kgm⁻³.

Os resultados obtidos com a análise dos briquetes confirmaram a sua viabilidade técnica de utilização como combustível. Além disso, a viabilidade econômica foi determinada a partir da Taxa Interna de Retorno ser de 38,98%, bem superior à taxa média de atratividade mínima de 10%, com Payback time de 2,98 anos e ponto de equilíbrio de 41,10%. Os briquetes geram economia por meio dos custos evitados com a destinação dos resíduos, bem como pela substituição de parte da biomassa tradicional utilizada como combustível no processo de geração de energia térmica da empresa.