



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**



HÍVILA MARIA PONTES MARREIRO

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BRIQUETES A
PARTIR DO RESÍDUO DA MADEIRA DA PODA E DA CAMA DE AVE**

**JOÃO PESSOA – PB
2022**

HÍVILA MARIA PONTES MARREIRO

AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BRIQUETES A PARTIR DO RESÍDUO DA MADEIRA DA PODA E DA CAMA DE AVE

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, na área de concentração de Meio Ambiente, Economia e Aproveitamento Energético, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi

Coorientadora: Profa. Dra. Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa Lopes

JOÃO PESSOA – PB

2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M358a Marreiro, Hívila Maria Pontes.

Avaliação energética e otimização da produção de briquetes a partir do resíduo da madeira da poda e da cama de ave / Hívila Maria Pontes Marreiro. - João Pessoa, 2022.

136 f. : il.

Orientação: Rogério Santana Peruchi.

Coorientação: Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa Lopes.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Resíduos sólidos - Biocombustível. 2. Biomassas residuais - Briquetagem. 3. Briquetes. 4. PCS - Poder Calorífico Superior. I. Peruchi, Rogério Santana. II. Lopes, Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa. III. Título.

UFPB/BC

CDU 606:662.6(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA nº 95 da Sessão de Defesa Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

Ao vigésimo nono dia do mês de julho de dois mil e vinte e dois foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas, as 10h00, de forma remota meet.google.com/iwu-ogwt-gkp (Google Meet) que se submeteu a defesa pública de HÍVILA MARIA PONTES MARREIRO, matrícula 20191024434, com o título “**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BRIQUETES A PARTIR DO RESÍDUO DA MADEIRA DA PODA E DA CAMA DE AVE**”. A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: ROGERIO SANTANA PERUCHI (UFPB), RIUZUANI MICHELLE BEZERRA PEDROSA LOPES (UFPB), POLLYANA CAETANO RIBEIRO FERNANDES (UFPB) e SAYONARA ANDRADE ELIZIARIO (UFPB). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o(a) candidato(a) foi APROVADA pela Comissão Examinadora. E, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

Observações: _____

Membros da Banca Examinadora:

Rogério
Santana
Peruchi

Digitally signed by Rogério Santana Peruchi
DN: cn=Rogério Santana Peruchi, c=BR, o=UFPB, ou=Depto Engenharia de Produção, email=rsp@academico.ufpb.br
Date: 2022.07.29 11:53:52 -03'00'

Prof. Dr. ROGERIO SANTANA PERUCHI
Orientador(a)

Riuzuani M. B. P. Lopes
Prof. Dra. RIUZUANI MICHELLE BEZERRA PEDROSA LOPES - UFPB
Coorientador(a)

Pollyana Caetano R. Fernandes
Prof. Dra. POLLYANA CAETANO RIBEIRO FERNANDES
Examinador(a) Interno(a)

Sayonara Andrade Eliziário

Prof. Dr. SAYONARA ANDRADE ELIZIARIO - UFPB
Examinador(a) Externo(a)



Documento assinado digitalmente
SAYONARA ANDRADE ELIZIARIO
Data: 02/08/2022 11:32:44-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

PPGER/CEAR/UFPB - Campus I, Caixa Postal 5115, CEP: 58051-900, João Pessoa - PB, Brasil.

Obs.(1): O discente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 45 dias a contar da data da defesa, os exemplares definitivos da dissertação.

Obs.(2): O docente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 20 dias a contar da data da defesa, o relatório de orientação para avaliação do colegiado.

Dedico este trabalho aos meus pais, os quais sempre estiveram ao meu lado oferecendo apoio, conselhos e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus por todas as oportunidades e pessoas que vêm sendo colocadas ao longo de toda a minha jornada acadêmica e profissional. Sempre que faço uma reflexão percebo que todas as situações enfrentadas serviram de crescimento e me tornaram melhor de alguma forma. O mesmo é válido para as pessoas que me ajudaram nesse processo, desde técnicos e professores a amigos e familiares. Todos foram fundamentais para que mais essa etapa fosse possível de se realizar.

Logo, quero agradecer em especial à minha família, composta por Wellingson F. Marreiro, Lucenilda de Lima P. Marreiro e Ana Beatriz P. Marreiro. Vocês são minha eterna fonte de amor e apoio.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi, um profissional admirável, que me ensinou muito e acreditou no potencial desse trabalho. Ver sua dedicação à educação e à pesquisa me faz querer ser uma pesquisadora cada vez melhor.

A minha coorientadora Profa. Dra. Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa Lopes, que me guiou e ensinou tanto desde a graduação, estando sempre à disposição para me ajudar e ensinar.

Aos membros da minha banca de avaliação, a Profa. Dra. Sayonara Andrade Eliziário e Profa. Dra. Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes, por aceitarem o convite para participar da banca e contribuírem com o enriquecimento deste trabalho.

A Profa. Dra. Silvia Layara Floriani Andersen e ao Prof. Dr. Paulo Rotella Junior por contribuírem com o artigo de revisão sistemática da literatura.

Agradeço também aos técnicos dos laboratórios Sr. Delby, Sr. Sebastião e Jonathas, por me ajudarem tanto na condução dos experimentos.

Agradeço em nome de Mikaely Renaly e José Wellington a todos os colegas do mestrado e aos amigos que me ajudaram a concluir esse trabalho. Não posso deixar de agradecer Wellyson Pontes, por todo o incentivo e amor.

Agradeço a todos da CentrySol, em Especial a Rebeka Amaro, Deda Claudino e Kleciane Souza que foram compreensivos e me apoiaram quando precisei me ausentar do trabalho para realizar atividades do mestrado.

Enfim, a todos muito obrigada, esse trabalho também é fruto do apoio e incentivo de todos vocês.

RESUMO

A biomassa em sua forma natural possui características precárias como baixa densidade, elevado teor de umidade e baixa densidade energéticas. No entanto, por meio de rotas de conversão física, termoquímica ou bioquímica é possível realizar seu aproveitamento como fonte de energia. O presente trabalho fez uso da conversão física de densificação de duas biomassas residuais, sendo elas a madeira da poda urbana da espécie Nim (*Azadirachta indica*) e a cama de aviário. O processo utilizado foi a briquetagem, que consiste na uniformização e aglomeração das partículas de biomassa transformando-as em um combustível sólido, cujas características devem seguir um padrão de qualidade determinado por normas internacionais. As principais características dos briquetes são elevadas densidade e resistência a compressão, baixo teor de umidade (TU), elevado Poder Calorífico Superior (PCS) e densidade energética. Tais características permitem que o biocombustível seja facilmente transportado, manuseado e armazenado, além de garantir uma combustão mais eficiente e uniforme. Diante disso, foram produzidos briquetes seguindo a metodologia da pesquisa experimental. Primeiro realizou-se uma revisão sistemática da literatura (RSL) para verificar as publicações já existente na área. Por meio dessa revisão identificou-se que 95% das publicações utilizam a granulometria como variável de processo, 73% utilizam pressão de compressão, 68% o teor de umidade inicial e 59 % utilizam o tempo de compactação. Esses resultados ajudaram na decisão das variáveis de controle e de respostas a serem avaliadas na condução dos experimentos de acordo metodologia de superfície de resposta (RSM). As variáveis de saída foram modeladas empiricamente e validados estatisticamente pela ANOVA, R^2_{adj} , normalidade dos resíduos, observações influentes e Lack-of-Fit. As variáveis de controle selecionadas foram a carga de compressão da biomassa, o tempo de compactação, proporção de cama de aviário e madeira da poda a compor os briquetes e granulometria. Já as variáveis de saída foram a densidade do briquete, teor de umidade TU e PCS. Após a obtenção dos modelos matemáticos validados, realizou-se uma otimização multiobjetivo para maximizar simultaneamente a densidade e PCS e minimizar o TU. Para isso foi aplicado o Método do Critério Global Normalizado (MCGN), utilizando o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG). Experimentalmente foram obtidos PCS de 24,18MJ/kg, densidade de 1252,02kg/m³ e TU de 9,05%. Tais resultados comprovam o potencial físico e energético da madeira da poda e da cama de aviário como biocombustível.

Palavras-chave: briquetagem, resíduos sólidos, densidade, PCS, otimização

ABSTRACT

Biomass in its natural form has precarious characteristics such as low density, high moisture content and low energy density. However, through physical, thermochemical or biochemical conversion routes, it is possible to use it as an energy source. The present work made use of the physical conversion of densification of two residual biomasses, being them the wood of the urban pruning of the species Neem (*Azadirachta indica*) and the poultry litter. The process used was briquetting, which consists of the uniformization and agglomeration of biomass particles, transforming them into a solid fuel, whose characteristics must follow a quality standard determined by international standards. The main characteristics of briquettes are high density and compressive strength, low moisture content (MC), Higher Heating Value (HHV) and energy density. Such characteristics allow biofuel to be easily transported, handled and stored, in addition to ensuring more efficient and uniform combustion. Therefore, briquettes were produced following the experimental research methodology. First, a systematic literature review (RSL) was carried out to verify existing publications in the area. Through this review it was identified that 95% of the publications use granulometry as a process variable, 73% use compression pressure, 68% the initial moisture content and 59% use the compaction time. These results helped in the decision of the control and response variables to be evaluated in conducting the experiments according to the response surface methodology (RSM). The output variables were empirically modeled and statistically validated by ANOVA, R^2_{adj} , normality of residuals, influential observations and Lack-of-Fit. The control variables selected were the biomass compression load, compaction time, proportion of poultry litter and pruning wood to compose the briquettes and granulometry. The output variables were briquette density, moisture content MC and HHV. After obtaining the validated mathematical models, a multi-objective optimization was performed to simultaneously maximize the density and HHV and minimize the TU. For this, the Normalized Global Criterion Method (MCGN) was applied, using the Generalized Reduced Gradient (GRG). Experimentally, HHV of 24.18MJ/kg, density of 1252.02kg/m³ and MC of 9.05% were obtained. Such results prove the physical and energetic potential of pruning wood and poultry litter as biofuel.

Keywords: briquetting, solid waste, density, HHV, optimization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Caminhos de conversão de biomassa em bioenergia.	16
Figura 2. A natureza sequencial do RSM.....	21
Figura 3. Prensa de pistão hidráulica ou mecânica.	30
Figura 4. Um equipamento experimental específico para produção de briquetes.	32
Figura 5. (a) Esquema da extrusora de parafuso único; (b) visão geral da extrusora de parafuso único.....	32
Figura 6. Layout de prensa hidráulica com molde de aço usado para produção de briquetes.	33
Figura 7. Sequência de segmentação da poda urbana da madeira de Nim (<i>Azadirachta indica</i>).	98
Figura 8. Etapas de segmentação da cama de aviário.	99
Figura 9. Base e molde de ferro utilizados na produção dos briquetes.....	100
Figura 10. Briquetes produzidos a partir de diferentes proporções de madeira da poda e cama de aviário.	104

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Relação entre os valores individuais do poder calorífico superior (PCS) com o princípio de funcionamento das máquinas de briquetagens.	69
Gráfico 2. Relação entre os valores individuais do teor de umidade (TU) com o princípio de funcionamento das máquinas de briquetagens.	69
Gráfico 3. Relação entre os valores individuais do teor de cinzas (TC) com o princípio de funcionamento das máquinas de briquetagens.	70
Gráfico 4. Relação entre os valores individuais de densidade aparente com o princípio de funcionamento das máquinas de briquetagens.	76
Gráfico 5. Relação entre os valores individuais de Resistência à compressão (MPa) com o princípio de funcionamento das máquinas de briquetagens.	76
Gráfico 6. Efeitos Principais para a Densidade.	113
Gráfico 7. Gráfico de contorno Densidade vs Cama; Carga.	113
Gráfico 8. Gráfico de superfície da Densidade vs Cama; Carga.	114
Gráfico 9. Efeitos principais para o TU.	115
Gráfico 10. Gráfico de Contorno do TU e interações.	115
Gráfico 11. Gráfico de Superfície do TU vs Tempo; Carga.	116
Gráfico 12. Efeitos principais para o PCS.	117
Gráfico 13. Gráfico de Contorno do PSC vs Cama; Tempo.	117
Gráfico 14. Gráfico de Superfície do PCS vs Cama; Tempo.	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Diretrizes para projetar um experimento	22
Tabela 2. Principais máquinas de produção de briquetes.....	34
Tabela 3. Principais variáveis de entrada para produção de briquetes.....	39
Tabela 4. Níveis de temperatura do processo de briquetagem.	43
Tabela 5. Variação dos níveis de proporção de biomassa a compor os briquetes.	46
Tabela 6. Níveis de aglutinante adicionados a biomassa densificada.....	49
Tabela 7. Níveis de tempo de prensagem.....	52
Tabela 8. Níveis de umidade da biomassa para o processo de briquetagem.	55
Tabela 9. Níveis de Pressão aplicados durante o processo de densificação.....	58
Tabela 10. Níveis de granulometria da biomassa utilizada para a produção de briquetes.....	62
Tabela 11. Principais variáveis de saída energéticas e de combustão para qualificar os briquetes.	77
Tabela 12. Principais variáveis físico-mecânicas de saída para qualificar os briquetes.	79
Tabela 13. Estudos conduzidos seguindo um DOE, modelos matemáticos e análises estatísticas para avaliar as variáveis de processo.....	81
Tabela 14. Desenho da matriz experimental e resposta das propriedades físicas e químicas dos briquetes de cama de aviário e madeira da poda.	103
Tabela 15. Caracterização química e energética da cama de aviário e da madeira da poda por meio da análise imediata, PCS e TU.....	107
Tabela 16. Análise de variância para as respostas densidade, TU e PCS.	111
Tabela 17. Solução ideal para o problema multiobjetivo.....	119

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Contextualização acerca da relação entre o consumo e a geração de resíduos.....	14
1.2 Objetivos.....	15
1.3 Fundamentação teórica	15
1.4 Contribuições científicas	18
1.5 Limitações da pesquisa.....	19
1.6 Sinergia entre as propostas de produção científica	20
1.7 As etapas da pesquisa experimental.....	21
1.8 Referências.....	22
2. ARTIGO 1 – ESTUDOS EMPÍRICOS SOBRE A PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE BIOMASSA: UMA REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1 Introdução.....	25
2.2 Briquetagem.....	28
2.2.1 Biomassa e Pré-Tratamentos Utilizados na Produção de Briquetes.....	28
2.2.2 Principais processos da produção de briquetes	30
2.2.3. Principais parâmetros de produção de briquetes em trabalhos acadêmicos	37
2.3. Níveis dos parâmetros de produção de briquetes	41
2.3.1 Efeito da temperatura na produção dos briquetes	42
2.3.2 Variação da proporção das biomassas misturadas na produção dos briquetes	44
2.3.3 Efeito da adição de aglutinantes à biomassas para produção dos briquetes	46
2.3.4 Efeito do tempo de prensagem na produção dos briquetes.....	49
2.3.5 Efeito da umidade da biomassa na produção dos briquetes.....	53
2.3.6 Efeito da pressão na produção de briquetes de biomassa	55
2.3.7 Efeito da granulometria das partículas na produção de briquetes de biomassa	59
2.4 Principais parâmetros de resposta da produção de briquetes.....	64
2.4.1 Variáveis de resposta térmicas, energéticas e teor de umidade	65
2.4.2 Variáveis de saída físico-mecânicas	70
2.5 Modelagem e análises estatísticas dos experimentos	82
2.6 Conclusão	82
2.7 Recomendações para trabalhos futuros	84
2.8 Referências.....	84

3. ARTIGO 2 – OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE BRIQUETAGEM DA CAMA DE AVIÁRIO E DA MADEIRA DA PODA	94
3.1 Introdução	95
3.2 Materiais e métodos.....	97
3.2.1 Coleta e preparo das biomassas.....	97
3.2.2 Caracterização da biomassa in natura.....	99
3.2.3 Briquetagem	99
3.2.4 Determinação das propriedades dos briquetes	101
3.2.5 Design experimental, Metodologia de Superfície de Resposta e Otimização	101
3.3 Análises dos resultados e discussões.....	105
3.3.1 Análise imediata, Teor de Umidade e Poder Calorífico Superior da biomassa in natura	105
3.3.2 Análise de variância (ANOVA) e testes de validação dos modelos de regressão	107
3.3.3 Análises de efeitos principais e gráficos de superfície de resposta.....	112
3.3.4 Otimização Multiobjetivo-MCGN	118
3.4 Conclusões	120
3.5 Recomendações para trabalhos futuros	120
3.6 Referências.....	121
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
5. REFERÊNCIAS	129

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização acerca da relação entre o consumo e a geração de resíduos

Ao longo dos anos o homem vem fazendo uso dos recursos naturais para produzir energia e garantir seu desenvolvimento. Foi assim desde os primórdios das civilizações, passando pela revolução industrial e culminando com a era da globalização, caracterizada pela expansão de grandes potências econômicas e pelo desenvolvimento de países de economia emergente (ANSARI; HOLZ, 2020; ODUGBESAN; RJOUB, 2020).

Com a globalização das relações econômicas, os níveis de produção e consumo cresceram de maneira acelerada, resultando em um consumo descontrolado de energia e dos recursos naturais. Tal cenário ainda é acentuado por mudanças no ecossistema e agravado pelo uso indiscriminado dos combustíveis fósseis (UZAR, 2020).

O consumo de energia, o tipo de tecnologia utilizada para obtê-la e a sua destinação entre os diversos setores da economia possuem relação com o nível de desenvolvimento social, econômico e populacional de uma sociedade (BROWN *et al.*, 2011). O mesmo acontece com os resíduos sólidos produzidos, pois geralmente eles estão associados a fatores econômicos, sociais e demográficos, oscilando de acordo com o crescimento econômico e populacional (YOUNES *et al.*, 2016). Deste modo, um dos reflexos do desenvolvimento econômico é a preocupação com o gerenciamento de resíduos urbanos, de modo a preservar a saúde humana, ambiental e dos recursos naturais (ABBASI; EL HANANDEH, 2016).

Numa sociedade baseada no consumo, onde a todo o momento um novo produto ou serviço é lançado, é necessário que haja uma infraestrutura energética e ambiental que garanta que tais demandas sejam atendidas de maneira sustentável. Dentro dessa cadeia de produção e consumo, vale lembrar que um grande montante de resíduos é gerado, e que muitas das vezes não há uma destinação correta e eficiente para esses. A combinação desses fatores nos leva a buscar soluções energéticas e ambientais eficientes e que permitam reutilizar tais insumos.

Os resíduos orgânicos oriundos das atividades agrícolas, urbanas e florestais são classificados como biomassa, uma fonte de energia renovável, que pode ser convertida em energia por meio de processos físicos, térmicos ou biológica (BRIDGWATER, 2006; SCHUCK, 2006).

1.2 Objetivos

Objetivo geral

Avaliar o potencial energético do resíduo da arborização urbana (madeira da poda) e do resíduo da cama de aviário como combustível sólido e otimizar o processo de produção de briquetes a partir dos resíduos.

Objetivos específicos

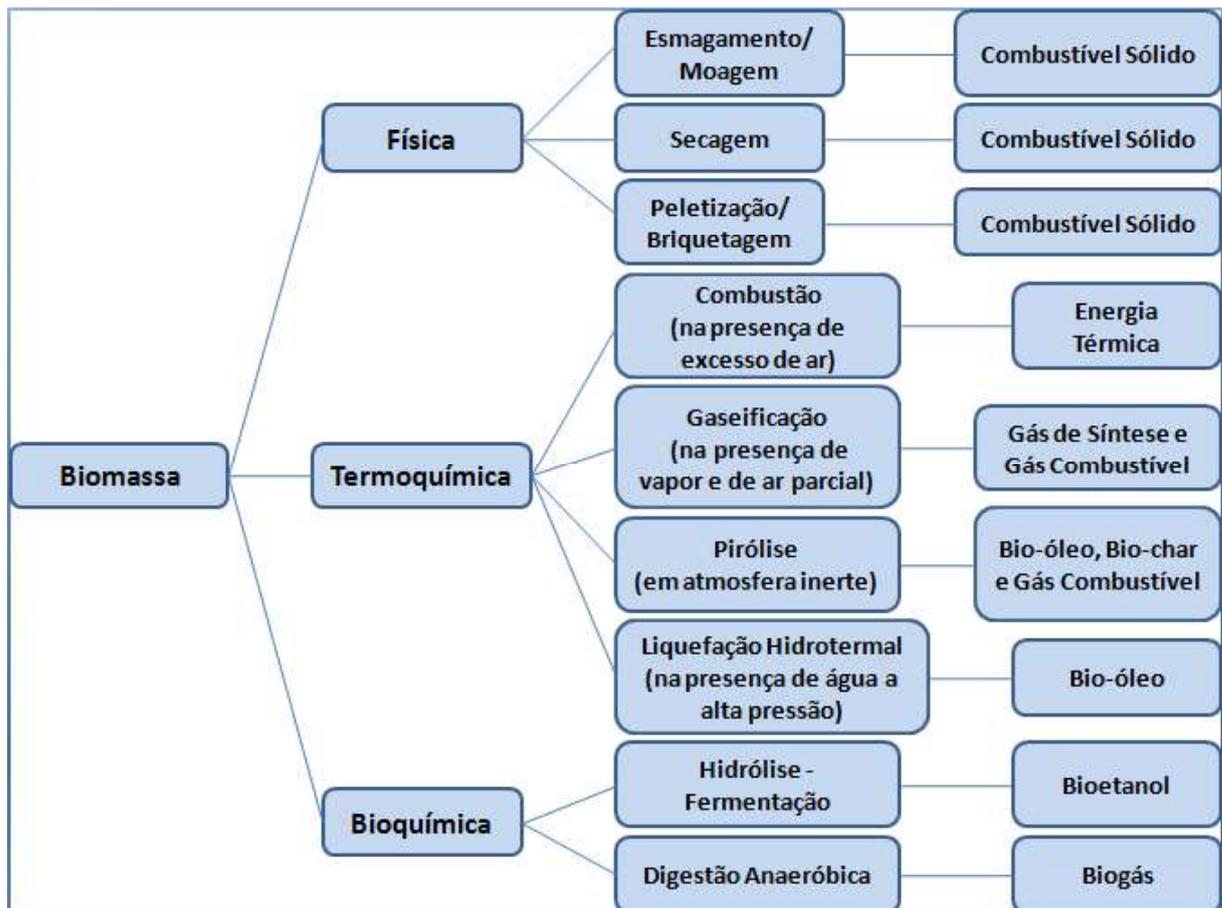
1. Identificar por meio de revisão sistemática da literatura (RSL) os principais tipos de biomassa utilizadas para produção de briquetes. Identificar os processos de briquetagem mais utilizados, bem como as diversas aplicações energéticas com briquetes;
2. Baseado na literatura, identificar as principais variáveis de respostas (Y_i) e os principais fatores de produção (X_i) e seus níveis;
3. Realizar análise química e energética da madeira da poda, do resíduo da cama de aviário e dos briquetes produzidos por meio análise imediata, teor de umidade e de poder calorífico superior (PCS);
4. Determinar a resposta mecânica da densidade (D);
5. Identificar quais são os fatores de produção (X_i) significativos para a modelagem matemática dos briquetes produzidos;
6. Avaliar a curvatura da região experimental e determinar se os fatores de produção estão operando em região ótima;
7. Criar modelos empíricos capazes de modelar a não linearidade do processo;
8. Aplicar um algoritmo de otimização para maximizar o poder calorífico superior (PCS), densidade (D) e atingir um teor de umidade (U) ótimo.

1.3 Fundamentação teórica

A biomassa apresenta-se como um recurso renovável muito versátil, uma vez que pode ser obtida em um curto prazo a partir de diversas matérias-primas de origem orgânica por meio da fotossíntese de plantas. Fazem parte desse grupo, os resíduos florestais e agrícolas, subprodutos de resíduos orgânicos, lodo de esgoto, resíduos verdes municipais, culturas energéticas, bio-sólidos e plantas lenhosas (SCHUCK, 2006).

A conversão da biomassa em biocombustível pode ocorrer por meio de três rotas principais, sendo elas a conversão termoquímica, conversão bioquímica e conversão física, como pode ser observado na Figura 1. Através de diferentes configurações e projetos de reatores, são obtidos biocombustíveis na forma sólida, líquida e gás (BRIDGWATER, 2006; SHARMA; PAREEK; ZHANG, 2015).

Figura 1. Caminhos de conversão de biomassa em bioenergia.



Fonte: Adaptado de Sharma, Pareek e Zhang (2015).

A conversão via processos físicos resulta na formação de combustíveis sólidos, como os briquetes e pellets, que são produzidos por meio da densificação da matéria-prima através de processos de briquetagem e peletização, respectivamente. A utilização da biomassa densificada como recurso energético foi adotada de outras indústrias já consolidadas dos ramos farmacêuticos, alimentícios e de ração animal, fazendo uso de moinho de pellets, cubador, prensa de briquete, extrusora, *tabletizer* e aglomerador (TUMULURU *et al.*, 2011).

A produção de briquetes vem sendo tema de alguns trabalhos no Brasil e no mundo, utilizando biomassas residuais como a da casca de castanha de caju, casca de coco de babaçu, casca de arroz e de café, resíduos de madeira, entre outros (GARCIA *et al.*, 2018; TORRES

GADELHA *et al.*, 2019; FELFLI *et al.*, 2011). Devido à alta produtividade do Brasil no setor de exportação de produtos agrícolas, muitos resíduos são gerados, de modo que 298.051.832 toneladas de resíduos são produzidas por ano (BONASSA *et al.*, 2018). Segundo dados da ABRELPE (2019), em 2018, 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) foram gerados no Brasil, o equivalente a uma média de 380kg/ano de RSU gerados por pessoa.

A Oferta Interna de Energia (OIE) brasileira, em 2021, contou com 44,7% de participação de energias renováveis, dos quais 16,4% são representados pela biomassa da cana-de-açúcar, 8,7% pela lenha e carvão vegetal, 11% por fontes hidráulicas e 8,7% de outras renováveis (BRASIL, 2022a). O uso do carvão vegetal e da lenha é observado principalmente nos setores industrial, residencial e agropecuário.

No setor industrial a ênfase é dada ao uso da lenha, com representatividade de 8,9% e 9,0% nos anos de 1999 e 2021, indicando uma relativa constância quanto ao seu uso nesse setor. Nos setores residencial e agropecuário o uso da lenha diminuiu ao longo dos anos, mas ainda conta com a participação de 26,8% e 24,1% respectivamente, no ano de 2021 (BRASIL, 2022b). O consumo da lenha e do carvão ao longo dos anos de 1999 a 2021, nesses setores, pode ser observado no Quadro 1. Esses dados indicam que tais setores podem ser potenciais consumidores da biomassa densificada em forma de briquetes, sendo um substituto alternativo ao uso da lenha.

Quadro 1. Consumo de Energia da biomassa por Setor.

Ano	Setor Industrial		Setor Residencial		Setor Agropecuário
	Lenha (%)	Carvão vegetal (%)	Lenha (%)	Carvão vegetal (%)	Lenha (%)
1999	8,9	6,7	31,6	1,9	22,9
2000	8,8	7,2	31,8	2,0	22,4
2001	8,4	6,4	34,0	2,1	21,2
2002	7,6	6,4	37,1	2,1	23,0
2003	7,7	7,2	38,1	2,4	24,4
2004	7,7	8,1	37,8	2,4	25,7
2005	7,7	7,8	37,7	2,4	26,1
2006	7,6	7,2	37,5	2,3	26,2
2007	7,5	7,0	35,1	2,3	26,0
2008	8,0	6,9	33,9	2,3	25,6
2009	8,6	4,3	32,6	2,5	25,3
2010	8,4	4,7	30,9	2,2	25,2
2011	8,3	4,8	28,0	2,1	24,5
2012	8,4	4,5	27,2	2,0	23,4
2013	8,7	4,2	24,2	1,7	24,9
2014	8,9	4,1	24,6	1,9	24,0
2015	8,8	4,2	25,4	1,9	24,6
2016	8,6	3,6	24,4	1,7	23,3
2017	8,6	3,7	24,4	1,4	25,5
2018	9,1	3,9	24,7	1,4	24,7
2019	9,5	4,4	26,5	1,5	25,1
2020	8,8	4,2	26,1	1,5	24,6
2021	9,0	4,0	26,8	1,5	24,1

Fonte: BRASIL (2022b).

1.4 Contribuições científicas

A pesquisa tem o intuito de associar a produção energética com baixo impacto ambiental e de natureza renovável ao reaproveitamento de resíduos. Para isso, dentre as várias formas de proveito energético da biomassa sólida, o estudo se ateve a produção de briquetes por compressão hidráulica. O equipamento utilizado foi a prensa hidráulica da marca Contenco, modelo I-3058 com capacidade de carga de 100t, que se situa Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME). O conteúdo dos briquetes foi dado principalmente por combinações entre resíduos da poda arbórea da cidade de Guarabira - PB, e da cama de aviário, proveniente da Granja São Paulo, em Cachoeira dos Guedes, distrito de Guarabira-PB.

Como será exposta ao longo desta pesquisa, a biomassa em seu estado natural tem baixa densidade e uniformidade de suas partículas, o que dificulta seu transporte, armazenamento e bom desempenho energético. A produção dos briquetes permite uma maior densidade energética por volume em comparação com a biomassa *in natura*, além de padronizá-la e melhorar sua qualidade física.

Levando em consideração que a biomassa sólida, em geral, é utilizada para geração de energia por meio da sua queima direta, a utilização de briquetes padronizados é uma alternativa que garante uma combustão uniforme e mais eficiente.

Para encontrar as melhores associações entre as variáveis do processo de briquetagem, a pesquisa delimitou um arranjo experimental previamente definido, permitindo estabelecer estatisticamente a relação entre as variáveis de produção dos briquetes, bem como sua influência sobre as características finais da biomassa densificada. O trabalho ainda se propôs a otimizar os resultados obtidos. Tais contribuições não são amplamente encontradas na literatura, principalmente ao especificar a combinação de biomassas proposta pelo estudo.

Isso pode ser provado por uma breve busca nos bancos de dados da Web of Science, como foi feita na seguinte pesquisa: O conjunto de palavras-chave *Briquettes + biomass + regression analysis + ANOVA* foi associado às palavras-chave *Briquettes + biomass + process optimization*, por meio do conectivo lógico OR, com as buscas feitas por tópicos. Essa busca apresentou um total de 39 resultados mesmo sem especificar o tipo de biomassa utilizada, ou incluir filtros de buscas quanto ao ano de publicação ou categorias da Web of Science.

1.5 Limitações da pesquisa

As limitações da pesquisa foram associadas a restrições técnicas, uma vez que a Universidade Federal da Paraíba - Campus I, não possui uma máquina briquetadeira, que é específica para a produção de briquetes. Deste modo, a pesquisa ficou impossibilitada de avaliar outros fatores de produção importantes, como a temperatura de briquetagem.

Ademais, em razão das medidas de combate a pandemia de COVID-19 (o SARS-CoV-2), declarada em 11 de março de 2020 pela OMS (BRASIL, 2020c), a condução dos experimentos laboratoriais foi paralisada por quase 1 ano, até que fosse seguro o retorno gradual do acesso aos laboratórios. Deste modo, houve um atraso na obtenção dos dados experimentais para a conclusão da pesquisa.

1.6 Sinergia entre as propostas de produção científica

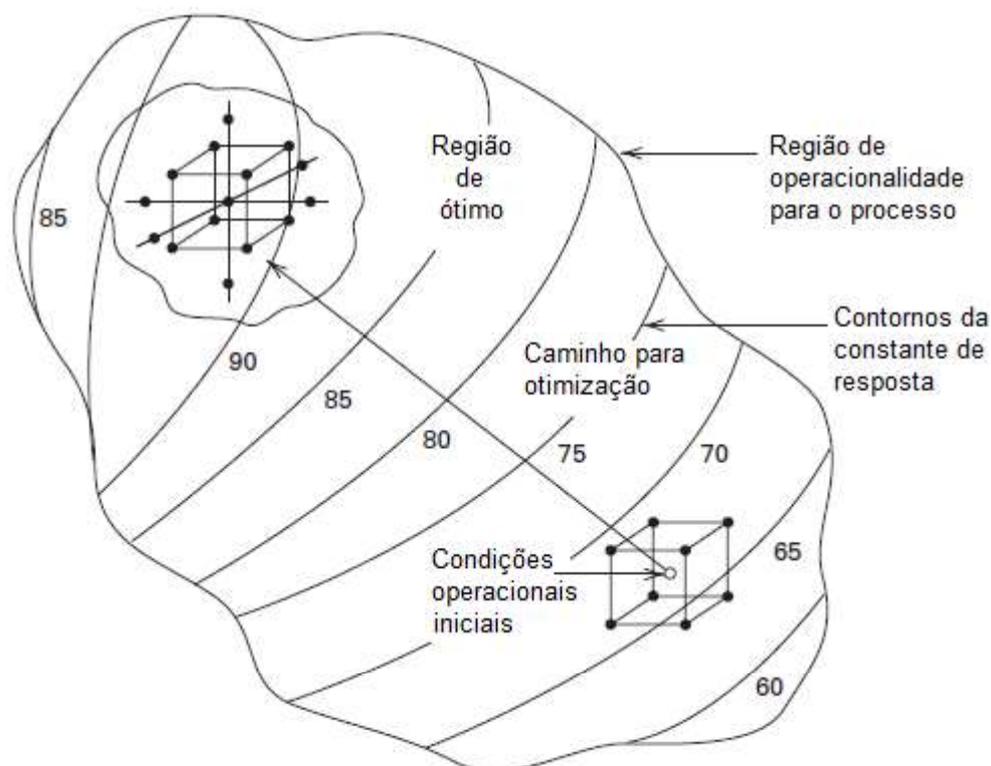
A pesquisa foi estruturada de acordo com a Metodologia de Superfície de Resposta (do inglês RSM), a qual possui uma natureza sequencial de técnicas estatísticas que levam a otimização de um processo. De acordo com Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009), as fases da RSM são: fase 0 (experimento de triagem), fase 1 e fase 2.

A fase dos experimentos de triagem serve para identificar dentre vários fatores, aqueles mais importantes para a otimização de superfície de resposta. Na seguinte etapa (fase 1) é determinado se os níveis atuais das variáveis independentes se aproximam da região de otimização, ou se estão distantes de uma resposta ideal. Caso o processo não esteja operando conforme um desempenho ideal, alguns ajustes são executados para que o processo seja direcionado para a região de operação ótima. Ao chegar próximo da região de otimização, começa a fase 2, onde se busca uma função que modele a resposta dentro de uma região o mais próximo possível em torno do ideal (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009).

Dependendo do objetivo do estudo, pode-se utilizar o método do *Steepest Ascent* ou o *Steepest Descent*. O primeiro método leva a otimização sequencial para o ponto de máximo para a resposta do sistema. Já o segundo é utilizado quando a minimização da resposta é desejada (MONTGOMERY, 2013).

O objeto de estudo parte de um sistema com pouca curvatura, tal qual as condições operacionais iniciais da Figura 2, que se adéqua bem a um modelo de primeira ordem. Ao passo que os experimentos são conduzidos à região de otimização, que tende a ter mais pontos experimentais, um modelo de segunda ordem é desenvolvido para atingir o ponto de ótimo. Ao final do processo, o sistema é mais elaborado e conta com uma maior curvatura que diz respeito à ordem do modelo matemático desenvolvido, que são representadas por superfícies de respostas.

Figura 2. A natureza sequencial do RSM.



Fonte: Adaptado de Montgomery (2013).

O estudo seguiu esses passos, à medida que os experimentos foram sendo executados. Dada essa metodologia, foi desenvolvido um artigo experimental abrangendo cada uma dessas fases com o intuito de encontrar a região de operação ótima para a produção dos briquetes.

Ademais, a seleção do processo, suas variáveis e o arranjo experimental escolhidos seguiram as etapas da pesquisa experimental, a qual também norteou a execução dos experimentos, as análises dos resultados, conclusões e recomendações.

1.7 As etapas da pesquisa experimental

Para que um experimento seja executado de forma mais clara é recomendável que se sigam algumas etapas da pesquisa experimental. Elas auxiliam ao projetista e a toda equipe envolvida a vislumbrar os resultados que se desejam alcançar, e realizá-lo de forma organizada. A princípio é preciso que haja o reconhecimento e declaração do objeto de estudo e que as ideias dos objetivos experimentais sejam desenvolvidas previamente (MONTGOMERY, 2013).

Este trabalho seguiu as sete etapas da pesquisa experimental, feitas de forma sequenciada, com o intuito de planejar previamente a estruturação do experimento por meio da delimitação do problema, escolha das variáveis saída, variáveis de entrada e seus níveis e

definição do arranjo experimental. Em seguida o experimento foi realizado e seus resultados foram analisados estatisticamente, permitindo, por fim, que conclusões sejam tomadas e recomendações sejam feitas. Tais etapas podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1. Diretrizes para projetar um experimento

Etapas	Descrição
1	Reconhecimento e declaração do objeto de estudo
2	Seleção das variáveis de respostas (Y)
3	Seleção dos fatores e níveis (X)
4	Escolha do arranjo experimental
5	Coleta de dados
6	Análise estatística dos dados
7	Conclusões e recomendações

Fonte: Adaptado de Montgomery (2013).

1.8 Referências

ABBASI, M.; EL HANANDEH, A. Forecasting municipal solid waste generation using artificial intelligence modelling approaches. **Waste Management**, v. 56, p. 13–22, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.05.018.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2018/2019**, 2019.

ANSARI, Dawud; HOLZ, Franziska. Between stranded assets and green transformation: Fossil-fuel-producing developing countries towards 2055. **World Development**, [S. l.], v. 130, p. 104947, 2020. DOI: 10.1016/j.worlddev.2020.104947. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104947>.

BONASSA, G. et al. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. June 2016, p. 2365–2378, fev. 2018.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional (BEN)**. Ministério de Minas e Energia (MME). Relatório Síntese 2022, Ano base 2021. 2022a. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. > Acesso em: 08 de outubro de 2022.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional (BEN)**. Ministério de Minas e Energia (MME). Balanco Energético Nacional 2022, ano base 2021. Relatório final. 2022b. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>>. Acesso em: 08 de outubro de 2022.

BRASIL. **Organização Mundial de Saúde declara pandemia do novo Coronavírus**. Empresa Brasil de Comunicação (EBC), 2020c. Disponível em: <

<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-03/organizacao-mundial-da-saude-declara-pandemia-de-coronavirus>> Acesso em: 29 de março de 2021.

BRIDGWATER, T. Biomass for energy. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 12, p. 1755–1768, set. 2006.

BROWN, J. H. et al. Energetic Limits to Economic Growth. **BioScience**, v. 61, n. 1, p. 19–26, jan. 2011.

FELFLI, F. F. et al. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 236–242, 2011.

GARCIA, D. P. et al. Comparative Energy Properties of Torrefied Pellets in Relation to Pine and Elephant Grass Pellets. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 2898–2906, 28 fev. 2018.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2013.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. John Wiley & Sons, 3 ed. 2009.

ODUGBESAN, Jamiu Adetola; RJOUB, Husam. Relationship Among Economic Growth, Energy Consumption, CO₂ Emission, and Urbanization: Evidence From MINT Countries. **SAGE Open**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 215824402091464, 2020. DOI: 10.1177/2158244020914648. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2158244020914648>.

SCHUCK, S. Biomass as an energy source. **International Journal of Environmental Studies**, v. 63, n. 6, p. 823–835, dez. 2006.

SHARMA, A.; PAREEK, V.; ZHANG, D. Biomass pyrolysis - A review of modelling, process parameters and catalytic studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 1081–1096, 2015.

TORRES GADELHA, A. M. et al. Cashew nut husk and babassu coconut husk residues: evaluation of their energetic properties. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 00, n. 00, p. 1–9, 19 nov. 2019.

TUMULURU, J. S. et al. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683–707, nov. 2011.

UZAR, U. Is income inequality a driver for renewable energy consumption? **Journal of Cleaner Production**, v. 255, p. 120287, maio 2020.

YOUNES, M. K. et al. Landfill area estimation based on integrated waste disposal options and solid waste forecasting using modified ANFIS model. **Waste Management**, v. 55, p. 3–11, set. 2016.

2. ARTIGO 1 – ESTUDOS EMPÍRICOS SOBRE A PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE BIOMASSA: UMA REVISÃO DA LITERATURA

RESUMO

A biomassa é um recurso renovável amplamente utilizado para geração de energia de diferentes naturezas graças a sua disponibilidade e às diferentes rotas de conversão energéticas existentes. Uma delas é conversão física da biomassa *in natura* em briquetes, que consiste na densificação da matéria-prima. Este método garante uniformidade ao combustível sólido, com melhores propriedades físicas e energéticas, proporciona uma combustão mais homogênea e facilitando seu armazenamento e transporte. Dada a importância dessas características, este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura, com ênfase nos níveis experimentais das variáveis de processos de briquetagem, bem como nos parâmetros de qualidade mais relevantes para obtenção de briquetes. Foram ainda levantadas quais as principais tecnologias empregadas na produção de briquetes, assim como as metodologias experimentais e análises estatísticas utilizadas no planejamento e validação dos processos. Foi observado entre os estudos que a granulometria das partículas da matéria-prima, seguida da pressão, umidade inicial, tempo de compactação e aglutinante são as variáveis de processo mais utilizadas para a produção de briquetes. Outros fatores como a proporção de biomassa, temperatura de processo e eventuais pré-tratamentos térmicos são utilizados para alcançar maiores respostas energéticas e físicas do combustível sólido. Dentre os trabalhos foram observadas divergências quanto à relevância e interação de algumas variáveis de processo sobre as variáveis de qualidade dos briquetes, indicando a necessidade de que os experimentos sejam modelados matematicamente.

Palavras-chave: briquetagem, padrões de briquetes, variáveis de processo.

ABSTRACT

Biomass is a renewable resource widely used for the generation of energy of different natures thanks to its availability and to the different existing energy conversion routes. One is the physical conversion of biomass *in natura* into briquettes, which consists of the densification of the raw material. This method guarantees uniformity to the solid fuel, with better physical and energetic properties, provides a more homogeneous combustion and facilitates its storage and transport. Given the importance of these characteristics, this work presents a systematic review of the literature, with emphasis on the experimental levels of the briquetting process variables, as well as on the most relevant quality parameters for obtaining briquettes. We also surveyed the main technologies used in the production of briquettes, as well as the experimental methodologies and statistical analysis used in the planning and validation of processes. It was observed among the studies that the particle size of the raw material, followed by pressure, initial humidity, compaction time and binder are the most used process variables for the production of briquettes. Other factors such as the proportion of biomass, process temperature and eventual thermal pretreatments are used to achieve greater energetic and physical responses to solid fuel. Among the works, divergences were observed as to the relevance and interaction of some process variables on the quality variables of the briquettes, indicating the need for the experiments to be mathematically modeled.

Keywords: briquetting, briquette patterns, process variables.

2.1 Introdução

A humanidade é conhecida pela sua capacidade de transformar ambientes para garantir condições ideais para a sua sobrevivência e desenvolvimento, e graças a isso vem prosperando ao longo dos anos. No entanto, com a modernização e hábitos de consumo cada vez mais extravagantes, o que antes era questão de adaptação, deu lugar a um estilo de vida baseado no bem-estar a todo custo e crescimento material. Para isso, a sociedade vem fazendo uso dos recursos naturais de forma desregrada, desconsiderando o seu tempo de recuperação e limitações (BREYER; HEINONEN; RUOTSALAINEN, 2017).

Pesquisas em países exportadores de petróleo bruto estimam que a utilização de combustíveis fósseis provoca um efeito significativo positivo sobre a degradação ambiental a longo prazo. Essa perspectiva indica que as atuais políticas de transição energética são insuficientes para atender as demandas de sustentabilidade ambiental impostas a esses países (ONIFADE *et al.*, 2021).

Deste modo, para lidar simultaneamente com o crescimento da demanda energética e mitigar problemas como a emissão de CO₂ e gases poluentes, é necessário um novo sistema energético (BREYER; HEINONEN; RUOTSALAINEN, 2017). O uso de energias renováveis apresenta-se como um aliado ao desenvolvimento sustentável, pautado em tecnologias que viabilizem a eficiência energética e desenvolvimento (QUIJERA; ALRIOLS; LABIDI, 2011).

Uma das fontes de energias renováveis mais conhecidas e utilizada há mais tempo é a biomassa. Ela é a única fonte renovável dotada de carbono fixo, que é essencial para atender a diversos requisitos de combustível e bens de consumo (BRIDGWATER, 2006). A biomassa é uma fonte relativamente mais limpa que o carvão, que pode ser obtida a partir de insumos de origem orgânica como madeira, culturas anuais e resíduos agrícolas. Se for usada de maneira sustentável, ela pode suprir boa parte das necessidades energéticas do mundo (TCHAPDA; PISUPATI, 2014).

A biomassa é o único recurso renovável que pode ser convertido diretamente em combustível através de processos de combustão (TCHAPDA; PISUPATI, 2014). Apesar disso, os recursos *in natura* não são recomendados como fonte de energia devido às suas características precárias como baixa densidade aparente, alto teor de umidade e baixa densidade energética, causando elevados custos de transporte, armazenamento e manuseio (FELFLI *et al.*, 2011).

A melhoria dessas características resulta em um combustível sólido mais fácil de armazenar, manusear e transportar. Para isso a densificação da biomassa é um método eficiente

de garantir características desejáveis aos biocombustíveis sólidos como maior densidade aparente e energética, dureza e resistência. A densificação da biomassa pode ser feita em forma de briquetes, pellets, cubos ou discos (WONGSIRIAMNUAY; TIPPAYAWONG, 2015).

Os briquetes são combustíveis cuja conversão energética ocorre por queima direta, utilizados para aquecimento e cozimento de uso doméstico ou industrial, sendo melhor aproveitados em câmaras de leito fixo, devido sua estrutura física. Os pellets possuem as mesmas aplicabilidades, mas podem ser utilizados em reatores com diferentes geometrias e diferentes sistemas de alimentação (KHLIFI et al., 2020; OKWU; SAMUEL, 2018).

O aproveitamento da biomassa densificada em forma de combustível sólido tem ganhado relevância em países em desenvolvimento e já desenvolvidos (PANWAR; PRASAD; WASEWAR, 2011). Na Europa, países como a Suécia, França, Áustria, Suíça e Alemanha usam sistemas de aquecimento de biomassa em pequena escala, que utilizam pelletes para combustão (GILBERT *et al.*, 2009; VERMA; BRAM; DE RUYCK, 2009). No Brasil, os briquetes são usados como substitutos da lenha em padarias, pizzarias, estabelecimentos alimentícios e fábricas com fornos a lenha, como as fábricas de tijolos vermelhos. No entanto, o uso de briquetes de biomassa com finalidades energéticas no país ainda não se difundiu plenamente, uma vez que esse setor depende de um mercado de briquetes, tecnologias adequadas e disponibilidade de resíduos (FELFLI *et al.*, 2011; MENDOZA MARTINEZ et al., 2019). Trabalhos como o de Kpalo et al. (2020b) realizaram levantamentos bibliográficos para avaliar a viabilidade econômica e técnica da produção de briquetes, e para isso foi preciso revisar os tipos de biomassa utilizadas, os tipos de equipamentos de briquetagem, as habilidades de recursos humanos e o capital de investimento. Outros trabalhos de revisão como os de Faizal, Rahman e Latiff (2016) e Tumuluru et al. (2011) também deram ênfase às máquinas utilizadas para produção de briquetes e a algumas variáveis de produção, uma vez que estas afetam as características físicas e energéticas dos briquetes.

A adequada seleção e configuração das variáveis de processamento são fundamentais para a otimização da briquetagem. Navalta et al. (NAVALTA *et al.*, 2020) afirmam que parâmetros como pressão, temperatura, granulometria, tipo de ligante e características da biomassa escolhida têm grande influência na resistência à compressão, densidade e potencial energético dos briquetes. Trabalhos, como Kpalo et al. (KPALO *et al.*, 2020b) realizaram levantamentos bibliográficos para avaliar a viabilidade econômica e técnica da produção de briquetes, e para isso foi necessário revisar os tipos de biomassa utilizados, os tipos de equipamentos de briquetagem, as habilidades dos recursos humanos e o capital de investimento. Outros trabalhos de revisão, como o de Faizal, Rahman e Latiff (FAIZAL; RAHMAN;

LATIFF, 2016) e Tumuluru et al. (TUMULURU et al., 2011) também destacaram as máquinas utilizadas para produzir os briquetes e algumas variáveis de produção, uma vez que estas afetam as características físicas e energéticas dos briquetes. Dinesha et al. (DINESHA; KUMAR; ROSEN, 2019) apresentou uma revisão abrangente sobre a transformação de resíduos de biomassa agro e industrial em briquetes como combustíveis alternativos. Eles exploraram os efeitos dos parâmetros do processo, tipo de matéria-prima e tecnologias de processamento nas características de combustão. Oladeji (OLADEJI, 2015) revisou as tecnologias de briquetagem de biomassa e seus princípios fundamentais. Os autores também mostraram quais fatores influenciam a briquetagem da biomassa, bem como algumas vantagens e limitações do processo de briquetagem.

Diferentemente dos trabalhos citados, esta pesquisa visa fornecer orientações sobre como projetar experimentos para otimizar não apenas as características energéticas e de combustão dos briquetes, mas também as propriedades físico-mecânicas. Análises de dados abrangentes resumindo a gama de parâmetros do processo, bem como sua configuração final, foram discutidas. Gráficos elucidativos destacando a energia observada, combustão e características físico-mecânicas foram contrastadas com seus requisitos de padrão internacional. Adicionalmente, o desenho experimental, técnicas de modelagem e software estatístico foram revisados.

As pesquisas foram feitas nos bancos de dados da Web of Science a fim de selecionar artigos indexados para uma análise mais detalhada. Destarte, após uma série de buscas, foram definidos um conjunto de trabalhos científicos que compreendessem as variáveis de entrada e resposta na produção de briquetes, assim como métodos experimentais e de produção destes combustíveis sólidos. Os artigos selecionados foram resultado de uma pesquisa avançada utilizando operadores booleanos e rótulos de campo junto a palavras-chave. A busca foi feita da seguinte maneira: (TI = ((briquette) NOT (pellet*)) AND TS = ((production briquette AND biomass AND optimization) OR (biomass AND production briquette AND properties AND characterization))). Foram encontrados 29 resultados, sem emprego de filtros ou delimitação do período de publicação dos trabalhos. Dentre esses, 7 foram descartados, por não se tratarem de trabalhos experimentais de produção e caracterização de briquetes, ou por indisponibilidade de acesso, inclusive em outras bases de pesquisas. As buscas, portanto, alcançaram 22 estudos experimentais que associam modelagens matemáticas e análises estatísticas aos processos de produção de briquetes e suas variáveis.

2.2. Briquetagem

2.2.1 Biomassa e Pré-Tratamentos Utilizados na Produção de Briquetes

Os biocombustíveis são subdivididos em quatro gerações e classificados de acordo com a matéria-prima e processo de conversão (EL-DESOUKY *et al.*, 2021). A primeira geração diz respeito ao biocombustível obtido a partir de culturas alimentares, como oleaginosas e cana-de-açúcar para a produção de biodiesel e bioetanol (BAEYENS *et al.*, 2015; MATA; MARTINS; CAETANO, 2010). A segunda geração está associada a resíduos de biomassa, como caules, folhas e cascas dos setores agroflorestal e de resíduos urbanos. Tais matérias-primas são de origem vegetal e sua composição primária é lignina, hemicelulose e celulose (EL-DESOUKY *et al.*, 2021; NAIK *et al.*, 2010). A terceira geração abrange algas e microalgas com altos teores de açúcares totais para a produção de bioetanol e biodiesel (BAEYENS *et al.*, 2015). A quarta geração se beneficia da bioengenharia para modificar o metabolismo celular de algas e cianobactérias para aumentar a produção de biocombustíveis (LÜ; SHEAHAN; FU, 2011).

A produção de briquetes é comumente associada a biocombustíveis de segunda geração, promovendo o reaproveitamento de resíduos agrícolas e florestais, como ilustrado na Tabela 2. A maioria das obras utilizou materiais residuais, como caule, casca, folhas, palha, madeira ou serragem. Resíduos de madeira cortada (RASLAVIČIUS, 2012) e de espécies como eucalipto (*Eucalyptus spp.* e *Eucalyptus grandis*) (ARAÚJO *et al.*, 2016) e pinus (*Pinus spp.*) (MORALES-MÁXIMO *et al.*, 2020) foram usados. Cascas, espigas e palha de milho foram misturadas com outras biomassas, como casca de mandioca (WAHEED; AKOGUN, 2020) e casca de dendê (KPALO *et al.*, 2020a). Além disso, alguns trabalhos também incorporaram resíduos plásticos (resíduos de componentes elétricos e eletrônicos, fios sem halogênio e resíduos de trituração automotiva) associados a outros materiais na composição de seus briquetes, como serragem, tronco de tamareira e até carvão sub-betuminoso (carvão não renovável) (GARRIDO; CONESA; GARCIA, 2017; NWABUE; UNAH; ITUMOH, 2017).

A mistura de mais de um tipo de biomassa em diferentes proporções foi avaliada por vários dos trabalhos apresentados na Tabela 2. Esse processo busca obter um combustível com a combinação das melhores características físicas e químicas que cada componente possui (IFTIKHAR *et al.*, 2019; TUMULURU; FILLERUP, 2020). Masullo *et al.* (S. MASULLO *et al.*, 2018) por exemplo, utilizaram bagaço e palha de cana-de-açúcar, cujo teor de umidade antes da briquetagem era de 12% e observaram que os briquetes com maior proporção de palha apresentaram aumento no teor de umidade após a densificação, atingindo 13,3%. Esse resultado

indicou a necessidade de reduzir o percentual de palha de cana-de-açúcar na composição final dos briquetes.

A mistura de matérias-primas e o próprio processo de briquetagem são artificios utilizados para superar as características naturais da biomassa, como baixa densidade, alta umidade, baixa densidade energética e tamanho e forma irregulares. Essas propriedades dificultam o uso da biomassa como biocombustível, além de tornar seu manuseio, armazenamento e transporte onerosos e ineficientes (FELFLI *et al.*, 2011; KALIYAN; VANCE MOREY, 2009).

O processo de densificação da biomassa em briquetes foi capaz de elevar a densidade básica da biomassa de *Phyllostachys aurea* (bambu) de 0,48 g/cm³ para uma densidade média de 1,16 g/cm³. Consequentemente, a densidade de energia passou de cerca de 8,8 GJ/m³ para 21,478 GJ/m³ (SETTE JÚNIOR *et al.*, 2017). Algo semelhante foi observado para a biomassa de ervas daninhas florestais invasoras, da espécie *Lantana câmara*, cuja densidade inicial foi de 0,51 g/cm³ e após a briquetagem atingiu 1,20 g/cm³ (KUMAR; CHANDRASHEKAR, 2020). Os principais resultados encontrados em cada pesquisa estão registrados na Tabela 2 e alguns deles foram analisados com mais detalhes no tópico que trata das variáveis de resposta do processo de briquetagem.

Para que a biomassa seja eficientemente convertida em biocombustível sólido, ela passa por alguns processos de pré-tratamento, que podem variar de acordo com as características naturais do material e a disponibilidade de tecnologia. A Tabela 2 mostra os tratamentos utilizados na matéria-prima antes da produção dos briquetes.

Os pré-tratamentos térmicos de carbonização e torrefação são empregados com o objetivo de aumentar as características energéticas do combustível, uma vez que o processo resulta no aumento da quantidade de carbono fixo da biomassa (HELWANI *et al.*, 2020). A torrefação também apresenta incrementos na qualidade física dos briquetes, quanto a sua durabilidade, densidade e resistência à compressão (WAHEED; AKOGUN, 2020). Apesar das vantagens, tais procedimentos requerem um gasto extra de energia, pois requerem aquecimento em temperaturas que podem variar de 180 a 500 °C (ARAÚJO *et al.*, 2016; NWABUE; UNAH; ITUMOH, 2017).

Comumente, processos de secagem são realizados para reduzir a umidade da biomassa, esse processo pode ser feito ao sol e em condições ambientais (DE OLIVEIRA *et al.*, 2017; KPALO *et al.*, 2020a; NWABUE; UNAH; ITUMOH, 2017) ou em uma estufa (MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019; WAHEED; AKOGUN, 2020). Outro procedimento comum é a moagem ou trituração da biomassa em máquinas, como moinhos de martelos e facas

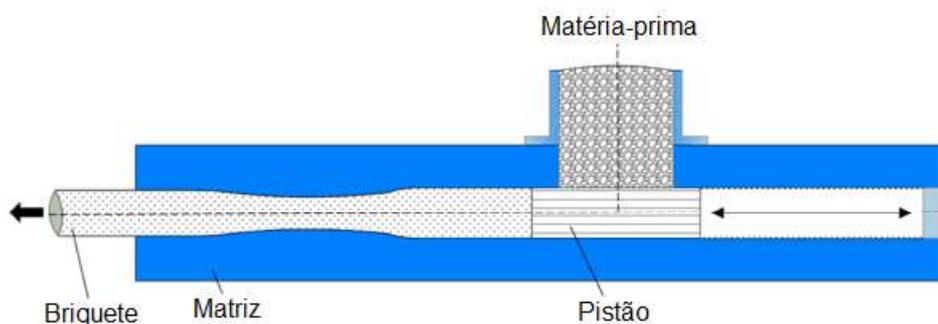
(GRANADO *et al.*, 2021; MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019) antes da classificação granulométrica por meio de peneiras. A redução e homogeneização das partículas permitem uma melhor compactação da matéria-prima, influenciando suas características físicas e mecânicas (FRANCIK *et al.*, 2020).

Dependendo da biomassa, não é necessário realizar tais processos, como ocorreu com a casca de arroz in natura utilizada por Oliveira Maia et al. (DE OLIVEIRA MAIA *et al.*, 2018) cujo teor de umidade já estava dentro do adequado para briquetagem (10%), bem como sua granulometria inicial. Vale destacar na Tabela 2 que, independentemente da máquina utilizada para produzir os briquetes, foi necessário realizar processos para reduzir o tamanho inicial da biomassa e sua umidade inicial por meio da secagem. A importância de ambos os processos é discutida nos tópicos que tratam das variáveis de processo na produção de briquetes.

2.2.2 Principais processos da produção de briquetes

A produção de briquetes pode ser feita em escala industrial e maior controle das condições do processo em máquinas automatizadas, como foi feito por Kumar e Chandrashekar (KUMAR; CHANDRASHEKAR, 2020) e Raslavičius (RASLAVIČIUS, 2012). Esses processos normalmente visam atender o mercado de biocombustíveis sólidos, exigindo produção efetiva e a melhor relação custo-benefício. Os briquetes também podem ser produzidos manualmente, utilizando prensas hidráulicas, ou utilizando dispositivos mecânicos manuais (Figura 3) (ARANSIOLA *et al.*, 2019; GADO *et al.*, 2014; MORALES-MÁXIMO *et al.*, 2020). Os briquetadores manuais são geralmente mais simples de operar. Eles operam em pressões menores e podem ter componentes de aquecimento, porém, produzem briquetes com menor densidade (ANTWI-BOASIAKO, C.; ACHEAMPONG, 2016; KPALO *et al.*, 2020a).

Figura 3. Prensa de pistão hidráulica ou mecânica.



Fonte: Adaptado de Tumuluru *et al.* (2011)

De acordo com Tumuluru et al. (TUMULURU *et al.*, 2011), a produção de briquetes geralmente é feita em prensas hidráulicas, mecânicas ou de rolos. Kpalo et al. (KPALO *et al.*, 2020b) também incluiu a briquetagem com prensa de parafuso, prensa de pistão (mecânica ou hidráulica) e prensa manual. Além dessas tecnologias, é possível encontrar briquetes de biomassa produzidos em cubo, aglomerador e tabletizador (TUMULURU *et al.*, 2011).

Mendoza Martinez et al. (MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019) e Seco et al. (SECO *et al.*, 2019) realizaram estudos experimentais para avaliar a briquetagem usando máquinas em nível laboratorial da prensa de pistão. Como dito anteriormente, tais equipamentos podem ser acionados hidráulicamente ou mecanicamente. A mecânica geralmente exerce uma força de compressão maior do que a hidráulica, fornecendo briquetes com uma densidade unitária mais alta. Por outro lado, os briquetes hidráulicos admitem teores de umidade superiores aos 15% tolerados por seus similares e possuem densidades unitárias que variam de 800 a 1000 kg/m³ (TUMULURU *et al.*, 2011). Na Figura 4 é possível observar uma bancada experimental específica para a produção de briquetes que possui molde, punção e placa de prensagem (LELA; BARIŠIĆ; NIŽETIĆ, 2016).

As máquinas de prensa de parafuso (extrusoras de parafuso) são populares para a produção de briquetes em países em desenvolvimento, como Brasil, África e Índia, sendo uma tecnologia adequada para usos em pequena escala (PANWAR; PRASAD; WASEWAR, 2011). Os briquetes produzidos nessas máquinas, diferentemente dos produzidos em prensas de pistão, são adequados para carbonização, gaseificação e torrefação (FELFLI *et al.*, 2011). No entanto, ambas as tecnologias produzem briquetes com resistência suficiente para suportar seu transporte em caminhões sem se degradar (ANTWI-BOASIAKO, C.; ACHEAMPONG, 2016).

Figura 4. Um equipamento experimental específico para produção de briquetes.

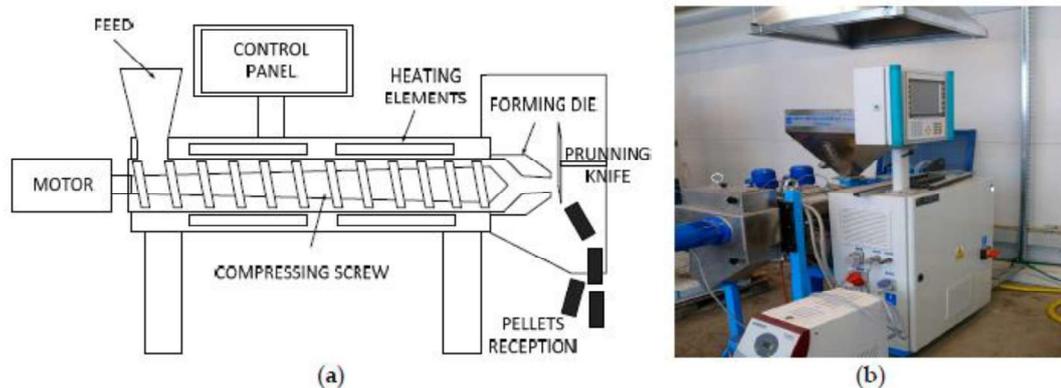


Fonte: Lela, Barišić e Nžetić (2016)

O esquema e a foto de uma extrusora de parafuso simples S45 da Metalchem, que produz combustível sólido na forma de briquetes, podem ser vistos na Figura 5a, b). Seu funcionamento não permite que a pressão de briquetagem seja determinada diretamente, sendo necessário controlar a velocidade de rotação do parafuso de compressão, ou variar o diâmetro interno da matriz, a fim de alterar a pressão de operação (REJDAK *et al.*, 2019).

Nas prensas de pistão, usualmente, a biomassa contida em uma matriz recebe uma carga de alta pressão por um cilindro alternativo. Já na extrusora de parafuso, que requer uma matriz aquecida para reduzir o atrito, a biomassa é extrudada continuamente por um parafuso através de uma matriz cônica. Embora as prensas de pistão consumam menos energia em sua execução e causem menos desgaste nas peças de contato, as máquinas de prensas de parafuso entregam briquetes de qualidade superior (GROVER; MISHRA, 1996; LEI *et al.*, 2013)

Figura 5. (a) Esquema da extrusora de parafuso único; (b) visão geral da extrusora de parafuso único.

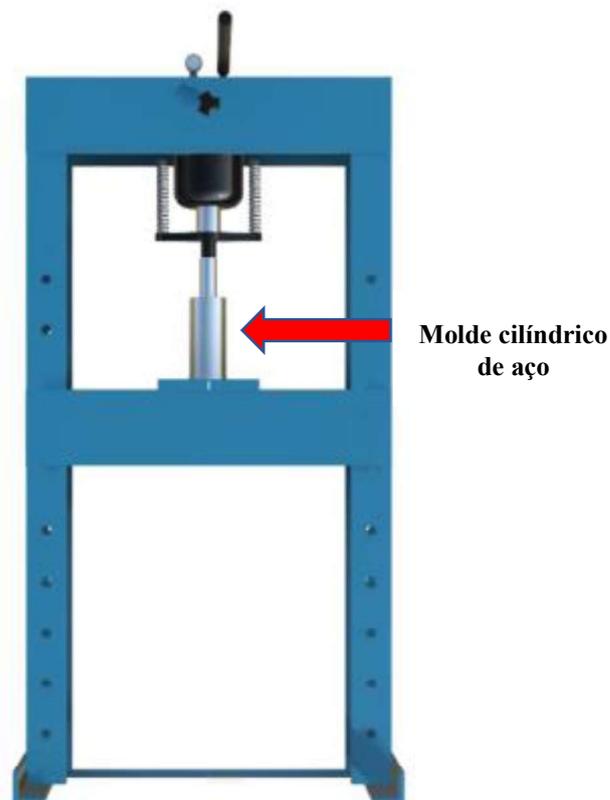


Fonte: Rejdak *et al.* (2019)

Algumas das principais máquinas de produção de briquetes podem ser vistas na Tabela 2. Ela também mostra a matéria-prima, os pré-tratamentos utilizados, as variáveis de entrada associadas ao equipamento de briquetagem utilizado e os resultados alcançados. Apesar da diversidade de materiais que compõem os briquetes, a maioria das pesquisas fez uso de prensas hidráulicas (manuais, automatizadas, de bancada e experimentais). Conforme o modelo da Figura 6, utilizado em pelo menos três dos trabalhos (D. PADILLA *et al.*, 2016; GRANADO *et al.*, 2021; S. MASULLO *et al.*, 2018). Prensas de pistão, extrusoras de parafuso e outras também foram utilizadas.

De acordo com a Tabela 2, é possível observar que os autores que utilizaram prensas hidráulicas tiveram a pressão como variável de entrada comum. Quando não foi possível medir a pressão, foi dada a carga em toneladas responsável pela compressão dos briquetes, conforme relatam Nwabue, Unah e Itumoh (NWABUE; UNAH; ITUMOH, 2017) e Masullo *et al.* (S. MASULLO *et al.*, 2018). Apesar desses padrões, a relação entre variáveis de processo, equipamentos de briquetagem, matéria-prima e outros elementos da produção de briquetes não é óbvia, como será discutido ao longo desta revisão de literatura.

Figura 6. Layout de prensa hidráulica com molde de aço usado para produção de briquetes.



Fonte: Adaptado de Granado *et al.* (2021)

Tabela 2. Principais máquinas de produção de briquetes.

Referências	Matéria-prima	Pré-tratamento	Máquina de briquetagem	Variáveis do equipamento de briquetagem	Resultados e conclusões dos estudos
Granado <i>et al.</i> (2021)	Resíduos de mandioca	Secagem, moagem e peneiramento	Prensa Hidráulica	Pressão	Briquetes produzidos sem aquecimento ou aglutinante atingiram bons resultados: densidade relaxada de 918 kg/m ³ , resistência a compressão de 1,29 MPa, durabilidade de 94,1%, expansão de 8,68 e densidade energética de 15,7 GJ/m ³
Kpalo <i>et al.</i> (2020a)	Espigas de milho (CC) e casca de dendezeiro (OPTB)	Secagem, moagem e peneiramento	Prensa de pistão hidráulica manual	Temperatura e pressão	TU de 9,24 a 10,00%, densidade de 0,38 a 0,40 g/cm ³ , resistência à água de 87,60% a 92,00%, força mecânica de 98,28% a 99,08%, resistência à compressão de 18,47 a 21,75 MPa e poder calorífico de 16,54 a 16,91 MJ/kg
Khelifi <i>et al.</i> (2020)	Resíduos de azeitonas	Secagem, moagem e peneiramento	Prensa Hidráulica	Temperatura e pressão	Briquetes com densidade unitária: 2,04 a 3,03 g/cm ³ e densidade a granel: 0,84 a 1,20 g/cm ³ . Com 15% de aglutinante obteve-se maior resistência à compressão (4581 kN), PCS (16,92 MJ/kg) e menor TC (6,72%)
Chungcharoen e Srisang (2020)	Cascas de castanha de caju (CNS) e cascas de castanha de arca (ANS)	Torrefação (CNS), secagem (ANS), moagem e peneiramento	Parafuso compactado acionado por motor	Velocidade do parafuso comprimido	Valores médios: 18,9 a 21 MJ/kg de poder calorífico, dureza de 103 a 123 HB, porosidade de 52 a 65%, TU de 3,5 a 4,5%, MV de 71,2 a 73,2%, TC de 3,3 a 5,2% e CF de 18,8 a 20%. A mistura "A" é adequada para produção dos briquetes, com velocidade de 90 rpm e CNS pequeno
Kumar e Chandrashekar (2020)	<i>Lantana camara</i> e <i>Prosopis juliflora</i>	Secagem, quebra, moagem, pulverização e peneiramento	Máquina industrial. Pistão e ariete	Não especificado	Os briquetes atingiram densidade de 1200 kg/m ³ , densidade de energia de 23,05 GJ/m ³ . TU ideal de 10-12% e menor TC de ≤ 2%
Helwani <i>et al.</i> (2020)	Caule de palma (Palm Stem)	Corte, limpeza, carbonização e peneiramento	Prensa Hidráulica	Pressão	Por meio de otimização obteve-se PCS de 306,704 MJ/kg e resistência a compressão de 10,0608 kg/cm ² , com os parâmetros de 120 mesh, ≈ 47% de aglutinante e ≈ 9,32 MPa
Morales-Máximo <i>et al.</i> (2020)	Resíduos de Madeira de <i>Pinus spp</i>	Coleta e peneira *	Aparelho mecânico manual	Não especificado	A biomassa teve densidade aparente de 160 e 170 kg/m ³ , TC de 0,38-1,78%, MV de 65,3-95,01% e CF de 4,49-34,3%. Os briquetes tiveram TU de 11,52-13,26%, PCS de 17,0-18,3 MJ/kg e densidade de 930-1240 kg/m ³
Waheed e Akogun (2020)	Casca de milho (CH) e casca de mandioca (CP)	Secagem, moagem, torrefação e umidificação	Máquina hidráulica de prensa pistão	Pressão	Briquetes torreficados a 300 °C com mistura de 10/90 (CH/CP) apresentaram boas características combustíveis. Esses apresentaram aumentos sobre os briquetes sem tratamento térmico de 18,19%; 2,98% e 32,25% na densidade, durabilidade e resistência a compressão, respectivamente

Tabela 2. Continuação.

Referências	Matéria-prima	Pré-tratamento	Máquina de briquetagem	Variáveis do equipamento de briquetagem	Resultados e conclusões dos estudos
Gwenzi, Ncube e Rukuni (2020)	Pó de carvão mineral (C), serragem (S) e plásticos pós-consumo (P)	Lavar, secar, moer e peneirar	Prensa Manual	Não especificado	PCS de 26,5 a 33,8 MJ/kg. Resistência ao impacto/índice de quebra $\geq 90\%$ em todos os briquetes e densidade de 1100 a 1300 kg/m ³ . No entanto teve baixa resistência a compressão, inferior a 1 Mpa
Mendoza Martinez <i>et al.</i> (2019)	Resíduos de caféiro e madeira de pinho	Secagem, moagem e peneiramento	Prensa Pistão Hidráulica	Temperatura e pressão	O resíduo caféiro com de 75% de pinho entregou densidade aparente de 1107-1163 kg/m ³ , densidade de energia de 19,13-19,89 GJ/m ³ , resistência à tração de 415-569 kgf e teor de umidade de equilíbrio de 9-11% em peso
de Oliveira Maia <i>et al.</i> (2018)	Folhas e pseudocaule de bananeira e casca de arroz	Picar, moer, peneirar, prensar e secar	Prensa Hidráulica	Pressão	Os briquetes de casca de arroz apresentaram a maior resistência a compressão (19,8 Mpa) e maior PCS (18,1 MJ/kg), no entanto tiveram alto valor de TC (25,4%)
Masullo <i>et al.</i> (2018)	Bagaço e palha da cana-de-açúcar	Secagem, moagem e peneiramento	Prensa Hidráulica manual	Carga mediada em toneladas	Os briquetes com maior quantidade de bagaço de cana tiveram maior resistência à compressão, menor geração de finos, teor de umidade de 11 a 12%. A utilização da palha só é viável associada ao bagaço da cana
Bazargan, Rough e Mckay (2018)	Biochars de casca de palmiste (PKSB)	Não informado	Máquina com Ariete cilíndrico de compressão	Pressão e velocidade de compactação	Poder calorífico médio de $31,29 \pm 1,44$ MJ/kg. Resistentes ao impacto, preservando 95% de seu peso inicial. Desempenho ruim para a resistência à água. A depender das condições de processamento pode-se atingir resistência a tração > 800 kN/m ²
Sette Júnior <i>et al.</i> (2017)	<i>Phylllostachys aurea</i>	Secagem, moagem, peneiramento e umidificação	Prensa de laboratório	Temperatura e pressão	Foi avaliada a biomassa, os briquetes produzidos a partir dela e o carvão. A briquetagem apresentou maior densidade energética (21,47 GJ/m ³) do que o carvão (11,38 GJ/m ³), mas ambos possuem potencial para aplicações energéticas
Garrido, Conesa e Garcia (2017)	Serragem (S) e tronco de tamarreira (PT), resíduos plásticos (fios (W), PCB, ASR)	Moagem e peneiramento	Prensa de pistão hidráulica laboratorial	Temperatura e pressão	Apesar dos briquetes de S70-W30 produzidos a 130 °C apresentarem maior densidade (≈ 1190 kg/m ³) e durabilidade (100%), quase todos os briquetes de PT produzidos a temperatura ambiente apresentaram densidades e durabilidades elevadas, e o maior PCI com PT90-ASR10

Tabela 2. Continuação.

Referências	Matéria-prima	Pré-tratamento	Máquina de briquetagem	Variáveis do equipamento de briquetagem	Resultados e conclusões dos estudos
de Oliveira <i>et al.</i> (2017)	Lodo de esgoto e finos de carvão vegetal	Secagem, moagem e peneiramento	Extrusora de parafuso cônica	Pressão	A mistura de 50:50 de carvão vegetal e lodo foi ideal para produção de energia com PCS de 17,47 MJ/kg, resistência a ruptura de 41,19 MPa e densidade aparente de 913 kg/m ³
Nwabue, Unah e Itumoh (2017)	Resíduo de plástico, casca de milho, serragem e carvão sub-betuminoso carbonizado	Secagem, corte, carbonização, moagem e peneiramento	Pressa Hidráulica	Carga de até 10 toneladas	PCS para os briquetes com 0% e 90% de coque foi de 13,8 e 21,45 MJ/kg, respectivamente. A matéria prima de 100% de coque produz PCS de 23,86 MJ/kg. O maior MV (31,74%) e resistência à compressão (4,61 N/mm ²) foram para o briquete com 100% de biomassa e 0% de coque
D. Padilla <i>et al.</i> (2016)	Fibra de coco (FC) e palha de cana-de-açúcar (PC)	Secagem, moagem e peneiramento	Pressa Hidráulica manual	Pressão	Os briquetes de FC e PC podem ser fabricados sem aquecimento ou adição de aglutinante. A maior quantidade de FC foi favorável: resistência à compressão (0,37 MPa), PCS (18,24 MJ/kg), CF (22,28%) e TC (3,71%)
Araújo <i>et al.</i> (2016)	Madeira de <i>Eucalyptus spp.</i> e <i>Eucalyptus grandis</i>	Secagem, corte, torrefação, moagem e peneiramento	Pressa Pistão Hidráulica	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 g/cm ³ ; densidade de energia (Tratamento a 200°C): 24,79 e 21,70 GJ/m ³ ; menor TU: 9,9 e 9,6%; menor higroscopia: <i>E. grandis</i> a 200°C e 10MPa; maior resistência a compressão: relativo
de Oliveira Maia <i>et al.</i> (2014)	Resíduos de folhas de bananeira	Moagem e dimensionamento	Pressa Hidráulica	Pressão	O tempo de compactação de 0,6 e 1 s foi irrisório para densidade, com valores de 999 e 1000 kg/m ³ , respectivamente. Maior resistência a compressão (5,3 MPa) foi para 1s. O cálculo da densidade de energia baseou-se na densidade de 999 kg/m ³
Thoreson <i>et al.</i> (2014)	Palha de milho	Secagem, corte e moagem	Pressa pistão (Êmbolo) de laboratório	Pressão	Dados os diferentes experimentos, com interações distintas das variáveis de entrada observa-se melhor densidade seca e densidade a granel de 470 e 190 kg/m ³ , respectivamente
Raslavičius (2012)	Resíduos de madeira de corte (WCW)	Secar e peneirar	Pressa pistão hidráulica automática	Força de fixação e temperatura	A proporção de 10:90 de massa de glicerol bruto e WCW são adequados para formar briquetes. Sua densidade é 798 kg/m ³ , durabilidade de 86,7%; 0,91 kN de resistência ao stress, PCS de 17,1 MJ/kg e TC de 0,9%

Fonte: Autores.

2.2.3. Principais parâmetros de produção de briquetes em trabalhos acadêmicos

Diversos são os parâmetros de briquetagem utilizados para atingir as características desejadas para os briquetes, os quais também variam de acordo com o processo de produção aplicado. A Tabela 3 apresenta alguns trabalhos encontrados na literatura, cujo conteúdo são os parâmetros de briquetagem utilizados e seus respectivos autores.

É possível observar que dos parâmetros para a produção dos briquetes, a granulometria foi a variável de processo (ou de entrada) mais frequente entre as pesquisas analisadas. Ela esteve presente em 21 dos 22 trabalhos, o equivalente a uma representatividade de 95% dos estudos. A granulometria diz respeito ao tamanho das partículas de biomassa a compor os briquetes, conferindo uniformidade aos grãos.

A pressão aplicada na produção dos briquetes também foi muito explorada, sendo um dos principais parâmetros associados ao equipamento de briquetagem. Essa variável foi estudada em 16 estudos, correspondendo a 73% desses. Subsequentemente, o teor de umidade inicial da matéria-prima foi a terceira variável de entrada com maior ocorrência entre as pesquisas, estando presente em 15 delas.

O tempo de prensagem ao qual o briquete é submetido ao ser compactado foi estudado por 13 trabalhos, o equivalente a 59% deles. Já a fração (ou porcentagem) de aglutinante incorporada nos briquetes, esteve presente em 11 dos trabalhos analisados. Vale ressaltar, que a umidade na produção dos briquetes é importante para ativar alguns aglutinantes como o amido, auxiliando no processo de densificação (KUMAR; CHANDRASHEKAR, 2020; SECO *et al.*, 2019).

Ainda na Tabela 3, observa-se que a proporção de diferentes tipos de biomassas compondo os briquetes foi estudada em 10 trabalhos. Enquanto isso, a temperatura de briquetagem foi aplicada em 7 dos estudos. Já o tipo de biomassa dos briquetes foi observada em 4 trabalhos. Diferente do parâmetro proporção de biomassa, essa variável avalia tipos distintos de matérias-primas a compor os briquetes, comparando-os separadamente.

Por fim, a velocidade de compactação e o tempo de resfriamento dos briquetes após sua produção foram os parâmetros com menor número de ocorrência dentre as pesquisas exploradas. Sua frequência foi em 2 e 3 trabalhos, respectivamente. Isso não significa que essas variáveis tenham menos importância para o processo de briquetagem, ou para as propriedades finais do combustível sólido. Para Chungcharoen e Srisang (2020), a velocidade foi a variável de maior efeito sobre a taxa de produção de seus briquetes. Enquanto o tempo de resfriamento

foi necessário para processos que envolvem aquecimento na produção de briquetes (ARAÚJO et al., 2016; MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019; SETTE JÚNIOR *et al.*, 2017).

Com base na ocorrência entre os trabalhos, observa-se que os parâmetros de entrada mais utilizados para a produção de briquetes são a temperatura de briquetagem, a proporção de mistura de biomassa, presença de ligante, tempo de prensagem dos briquetes durante sua produção, teor de umidade da matéria-prima antes da briquetagem, pressão de compactação e granulometria do material.

Tabela 3. Principais variáveis de entrada para produção de briquetes.

Pesquisadores	Temperatura	Tempo de compactação	Tempo de resfriamento	Pressão	Granulometria	% biomassa	Tipo de biomassa	Aglutinante	Velocidade de compactação	Umidade
Granado <i>et al.</i> (2021)		X		X	X					X
Kpalo <i>et al.</i> (2020a)	X			X	X	X		X		X
Khlifi <i>et al.</i> (2020)	X	X		X	X			X		
Chungcharoen e Srisang (2020)					X	X		X	X	X
Kumar e Chandrashekar (2020)					X		X			X
Helwani <i>et al.</i> (2020)		X		X	X			X		
Morales-Máximo <i>et al.</i> (2020)					X			X		
Waheed e Akogun (2020)		X		X	X	X		X		
Gwenzi; Neube e Rukuni (2020)					X	X		X		
Mendoza Martinez <i>et al.</i> (2019)	X	X	X	X	X	X	X			X
de Oliveira Maia <i>et al.</i> (2018)		X		X	X		X			X
Masullo <i>et al.</i> (2018)		X			X	X				X
Bazargan, Rough e McKay (2018)		X		X				X	X	
Sette Júnior <i>et al.</i> (2017)	X	X	X	X	X					X
Garrido, Conesa e Garcia (2017)	X	X		X	X	X				
de Oliveira <i>et al.</i> (2017)				X	X	X		X		X
Nwabue, Unah e Itumoh (2017)					X	X		X		X
D. Padilla <i>et al.</i> (2016)		X		X	X	X				X
Araújo <i>et al.</i> (2016)	X	X	X	X	X		X			X

Tabela 3. Continuação.

Pesquisadores	Temperatura	Tempo de compactação	Tempo de resfriamento	Pressão	Granulometria	% biomassa	Tipo de biomassa	Aglutinante	Velocidade de compactação	Umidade
de Oliveira Maia <i>et al.</i> (2014)		X		X	X					X
Thoreson <i>et al.</i> (2014)				X	X					X
Raslavičius (2012)	X			X	X			X		X
Ocorrência	7	13	3	16	21	10	4	11	2	15
Porcentagem	32%	59%	14%	73%	95%	45%	18%	50%	9%	68%

Fonte: Autores

Como a produção de briquetes consiste na densificação de partículas soltas de material sólido em um combustível de alta densidade (LEI *et al.*, 2013; PANWAR; PRASAD; WASEWAR, 2011), é necessário que fatores operacionais, como pressão, temperatura e tempo de compactação sejam definidos para a produção dos briquetes. Como a própria definição sugere, a biomassa deve estar inicialmente na forma de partículas soltas, preferencialmente classificadas de acordo com seu tamanho e distribuição, sendo um dos parâmetros materiais mais importantes para o processo de densificação (FRANCIK *et al.*, 2020; MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019). Essa variável pode influenciar na energia gasta durante a briquetagem, bem como favorecer a resistência dos briquetes (CHALOUPKOVÁ *et al.*, 2018; KRIŽAN *et al.*, 2015).

Outra característica do material que deve ser controlada antes da briquetagem é o teor de umidade. Este parâmetro deve ter um valor que permita uma densificação suave, sem comprometer as propriedades físicas e energéticas dos briquetes (GROVER; MISHRA, 1996).

A presença de ligante é um fator relevante para a adesão das partículas de biomassa entre si, podendo ser adicionado ao material ou a sua própria estrutura (NAVALTA *et al.*, 2020). O ligante também pode ser ativado por meio de variáveis externas, como a adição de calor e pressão durante a produção dos briquetes (CHUNG, 1991; NAVALTA *et al.*, 2020). Pode-se observar que existe uma interação entre as variáveis operacionais e as características iniciais do material. A pressão, por exemplo, permite a densificação da biomassa, influenciando no aumento da densidade e resistência do briquete (GRANADO *et al.*, 2021).

Todos esses parâmetros são extremamente importantes para o processo de densificação da biomassa na forma de briquetes, de modo que aqueles já citados como os mais comuns entre os trabalhos serão discutidos detalhadamente em tópicos individuais.

2.3. Níveis dos parâmetros de produção de briquetes

Para encontrar os melhores resultados de produção para os briquetes de biomassa, diversas pesquisas variam os parâmetros de processo em alguns níveis, de modo a avaliar o comportamento do material densificado. Nas Tabelas 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 são ilustrados os níveis das variáveis de briquetagem encontrados nos estudos. Vale ressaltar que é comum entre as pesquisas manter algumas de suas variáveis de produção fixas, enquanto variaram outros parâmetros em níveis para avaliar sua influência sobre as propriedades finais dos briquetes. Isso pode ser observado nos trabalhos de Araújo *et al.* (2016); Kpalo *et al.* (2020a); Mendoza Martinez *et al.* (2019) e Masullo *et al.* (2018).

Como dito anteriormente, certas variáveis de processo tiveram uma pequena frequência entre as pesquisas analisadas. Deste modo, foram representados em tabelas apenas os níveis das variáveis com maior ocorrência dentre os trabalhos. As variáveis foram a temperatura de briquetagem, porcentagem de biomassa, aglutinante, tempo de compactação, teor de umidade, pressão e granulometria.

2.3.1 Efeito da temperatura na produção dos briquetes

A Tabela 4 apresenta os níveis de temperatura de briquetagem. Nela estão os 7 trabalhos que fizeram uso dessa variável em seu processo de produção. Os valores destacados na tabela indicam com quais níveis de temperatura foram obtidos os maiores resultados para as propriedades físico-mecânicas estudadas. As pesquisas que mantiveram esse parâmetro fixo não tiveram seus valores realçados na Tabela 4.

Entre os trabalhos apenas o de Garrido, Conesa e Garcia (2017) exploraram essa variável em diferentes níveis. O aquecimento a 120 e 130°C foi exercido apenas sobre os briquetes que não se compactaram a temperatura ambiente. Essa elevação na temperatura de briquetagem proporcionou uma durabilidade de aproximadamente 100% e valores de densidades em torno de 1,2-1,4 vezes maiores do que aqueles obtidos a temperatura ambiente. Alguns dos briquetes produzidos sem aquecimento, também apresentaram bons resultados de densidade e durabilidade, indicando a influência de outros fatores como a pressão de compactação.

A pesquisa de Khlifi *et al.* (2020), apesar de ter usado um nível de temperatura menor, também atingiu boas propriedades físicas, com densidade unitária e aparente elevadas. Em compensação, foi utilizada elevada pressão de compactação e baixa granulometria, o que segundo Okot, Bilsborrow e Phan (2019), é necessário quando se reduz a temperatura de briquetagem.

Analisando a Tabela 4, observa-se que o nível de temperatura de 120°C foi o mais estudado. As densidades alcançadas nessas condições foram elevadas e superiores a 1000kg/m³. Para biomassas de baixa umidade, a elevação da temperatura pode endurecer os briquetes e torna-los mais densos (NUREK *et al.*, 2019). Em briquetes de biomassa produzidos sob altas temperaturas (150 a 250°C) também se observa a relação de aumento para as propriedades de poder calorífico, material volátil, densidade, resistência à água e taxa de relaxamento do combustível sólido (FAIZAL; RAHMAN; LATIFF, 2016; OBI, 2015).

O trabalho de Araújo et al. (2016) foi um dos que produziram seus briquetes a 120°C. Apesar aplicarem uma temperatura relativamente alta realizou-se ainda, a torrefação da biomassa para alguns briquetes com o intuito de melhorar as propriedades do combustível sólido.

A temperatura de briquetagem, no entanto, não deve ultrapassar os 300°C para evitar o risco de que os componentes da biomassa se decomponham (GROVER; MISHRA, 1996). Esse valor pode ainda variar quando a biomassa é misturada a outros tipos de materiais. Um dos resíduos plásticos (placas de circuito impresso- PCB) misturado a biomassa dos briquetes produzidos por Garrido, Conesa e Garcia (2017), começou a se decompor nas temperaturas de 120 e 130°C. O ocorrido, portanto, impediu a produção de briquetes nessas condições.

O calor gerado com a temperatura de briquetagem é capaz de ativar os ligantes naturais da biomassa como lipídios, lignina, amido e proteína, ou os aglutinantes adicionados à biomassa, por meio de forças de atratividades entre as partículas (N. KALIYAN; R. V. MOREY, 2009; NAVALTA *et al.*, 2020). Em elevadas temperaturas ocorrem deformações plásticas de partículas termoplásticas, viabilizando a formação de ligações permanentes no material (N. KALIYAN; R. V. MOREY, 2009).

Como observado, o calor aplicado na produção dos briquetes é capaz de alterar suas propriedades físicas, mecânicas e energéticas. Apesar da influência que o aumento da temperatura tem sobre as características finais dos combustíveis sólidos, essa variável relaciona-se diretamente com os recursos que o equipamento de briquetagem dispõe. Por esse motivo, o tipo de máquina utilizada na densificação da biomassa pode ser uma limitação para a exploração dessa variável.

Tabela 4. Níveis de temperatura do processo de briquetagem.

Pesquisadores	28	30	38	60	90 (°C)	110	120	130	200
Kpalo <i>et al.</i> (2020a)	■								
Khelifi <i>et al.</i> (2020)			■						
Mendoza Martinez <i>et al.</i> (2019)							■		
Sette Júnior <i>et al.</i> (2017)							■		
Garrido, Conesa e Garcia (2017)							■	■	
Araújo <i>et al.</i> (2016)							■		
Raslavičius (2012)									■

Fonte: Autores.

2.3.2 Variação da proporção das biomassas misturadas na produção dos briquetes

A mistura de mais de um tipo de biomassa para a produção de combustíveis sólidos tem sido alvo de pesquisas que buscam encontrar a relação adequada entre qualidade, disponibilidade dos insumos e custo-benefício (MUAZU; STEGEMANN, 2015; TUMULURU; FILLERUP, 2020). Isso porque, a associação de matérias-primas diversas implica em diferentes características físicas, como densidade, granulometria e umidade (TUMULURU; FILLERUP, 2020). O mesmo acontece com as características químicas e composição de celulose, hemicelulose e lignina da biomassa (IFTIKHAR *et al.*, 2019; TUMULURU *et al.*, 2011).

A combinação de materiais também promove o reaproveitamento energético do excesso de resíduo de algumas culturas ou processos, trazendo benefícios ambientais e socioeconômicos (KPALO *et al.*, 2020a). Mas diante das possíveis diferenças que podem existir entre as matérias-primas é necessário aplicar técnicas de processamento adequadas, uma vez que elas influenciam no manejo, na qualidade final do produto e nos custos com o consumo de energia (TUMULURU; FILLERUP, 2020). Deste modo, é possível extrair o melhor que cada material tem a oferecer para o combustível sólido,

Na Tabela 5 encontram-se 10 dos 22 trabalhos que avaliaram os efeitos da combinação de mais de um tipo de biomassa na composição dos briquetes. Os níveis de biomassa são apresentados quanto a proporção de um de seus constituintes. Assim, Kpallo *et al.* (2020a) variaram a composição dos briquetes de espigas de milho (CC) e da casca de dendezeiro (OPTB) nas seguintes proporções em massa (%): 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100. O mesmo foi feito para outros 4 trabalhos dispostos na tabela, que analisaram o intervalo de 0 a 100% da combinação de resíduo. Variar a composição dos briquetes nas quantidades citadas permite que sejam níveis formados pela matéria-prima pura de cada componente do briquete, bem como de suas interações em diferentes frações.

O critério de seleção das biomassas utilizadas por Iftikhar *et al.* (2019) foi quanto ao maior poder calorífico com que cada matéria-prima poderia contribuir. Na Tabela 5, estão em destaque os níveis de biomassa que entregaram um maior poder calorífico por briquete. Apenas a pesquisa de Masullo *et al.* (2018) não avaliou seus briquetes quanto ao poder calorífico, mas sim, quanto às características físico-mecânicas. Eles chegaram à conclusão de que a proporção de 75:25 de bagaço e palha de cana-de-açúcar, respectivamente, foi a melhor relação de mistura para seus briquetes.

Mendoza Martinez et al. (2019) mediram o PCS apenas para as biomassas individualmente, uma vez que ele foi necessário para calcular a densidade de energia dos briquetes. Deste modo, com 100% da biomassa de madeira de pinho obteve-se o maior PCS (20,7 MJ/kg). Já os briquetes compostos por 75% de madeira de pinho e 25% dos demais resíduos (resíduos do café e madeira de arbustos de café) resultaram em ótimas propriedades de teor de umidade de equilíbrio (9–11% em peso), resistência à tração (415–569 kgf), densidade aparente (1107–1163 kg/m³) e densidade energética (19133–19899 MJ/m³).

A pesquisa de Chungcharoen e Srisang (2020) reforçou o conceito de que o poder calorífico final dos briquetes depende do poder calorífico inicial das matérias-primas individuais. Deste modo, pela Tabela 5, observa-se que os briquetes cuja maior fração corresponde à biomassa de poder calorífico mais elevado terão também, o maior poder calorífico final. Esse padrão se repetiu para os demais trabalhos que avaliaram essa variável. A exceção deu-se apenas à pesquisa de Gwenzi, Ncube e Rukuni (2020), que alcançaram o maior poder calorífico, de 33,8 MJ/kg com a mistura de 50% de pó de carvão, 40% de resíduos plásticos e 10% de serragem. Tais proporções alcançaram os melhores resultados de absorção de água e propriedades de resistência para os briquetes.

Para os trabalhos de Waheed e Akogun (2020) e de Oliveira *et al.* (2017), foram destacados na tabela dois níveis diferentes para cada um. Isso porque, além do nível com que foi obtido o maior poder calorífico, também foi destacado aquele indicado pelos autores como sendo o valor ótimo para um conjunto de variáveis de saída.

Em sua pesquisa de Oliveira *et al.* (2017), obtiveram o maior poder calorífico (23,10 MJ/kg) com 100% do briquete feito de finos de carvão vegetal. Tal resultado se deve a maior quantidade de carbono fixo presente no carvão vegetal e às fortes ligações entre seus átomos de carbono. Por outro lado, ao utilizar 50% de lodo de esgoto e 50% de carvão vegetal, também se obtêm um PCS elevado (17,47 MJ/kg), além de atingir a maior resistência mecânica e densidade aparente para os briquetes. Esse efeito pode se dar devido a existência de grupos funcionais presentes no lodo de esgoto que influenciam na força, dada a formação de interações de hidrogênio.

Já para os briquetes de Waheed e Akogun (2020), a proporção ótima de biomassa a compor os briquetes foi de 10:90 de casca de milho (CH) e casca de mandioca (CP). Essa combinação resultou em um combustível de melhor densidade, durabilidade e resistência mecânica, além de poder calorífico de 17,89 MJ/kg. Por outro lado, o maior poder calorífico (19,31MJ/kg) foi devido à maior concentração de CH, na composição de 90:10 de CH e CP,

respectivamente. Vale ressaltar que em ambas as proporções, os autores atribuíram seus resultados, em parte, ao processo de torrefação das biomassas.

Assim como a maioria dos autores da Tabela 5, Kpalo *et al.* (2020a) identificaram que mais de uma combinação para as proporções de biomassa dos briquetes atendem bem às finalidades energéticas a que se propõem. Deste modo, é necessário encontrar a combinação que resulte em boas propriedades energéticas e físicas simultaneamente.

Tabela 5. Variação dos níveis de proporção de biomassa a compor os briquetes.

Pesquisadores	0	10	22	25	46,66	50	65	70	75	80	90	100
	(%)											
Kpalo <i>et al.</i> (2020a) ^a												100
Chungcharoen e Srisang (2020) ^b						65						
Waheed e Akogun (2020) ^c	10*									90		
Gwenzi, Ncube e Rukuni (2020) ^d					50							
Mendoza Martinez et al. (2019) ^e								75		100		
Masullo et al. (2018) ^f								75				
Garrido, Conesa e Garcia (2017) ^g										90		
de Oliveira et al. (2017) ^h					50*							100
Nwabue, Unah e Itumoh (2017) ⁱ										90		
D. Padilla <i>et al.</i> (2016) ^j												100

Fonte: Autores.

* valor de ótimo indicado pelos autores

^a Espigas de milho

^b Cascas de castanha de caju (CNS) e contem 10 a 20 % de farinha de mandioca

^c Casca de milho (CH)

^d Pó de carvão (C)

^e Madeira de pinho

^f Bagaço de cana-de-açúcar

^g Biomassa de tronco de tamareira

^h Finos de carvão vegetal

ⁱ Coque

^j Fibra de coco (FC)

2.3.3 Efeito da adição de aglutinantes à biomassas para produção dos briquetes

O uso de aglutinantes para a produção de combustíveis sólidos como pellets e briquetes confere-lhes melhores propriedades físicas e otimizam processos operacionais (IFTIKHAR *et al.*, 2019). Uma vez submetidos a variáveis de processo como pressão e/ou temperatura, tais ligantes, que podem ser próprios da estrutura da biomassa, ou adicionados, são rearranjados na estrutura do material densificado, ou formam ligações entre as partículas (NAVALTA *et al.*, 2020).

Uma das ligações mais importantes para a produção de material densificado são as pontes sólidas. Elas podem ser formadas devido a reações químicas, endurecimento de ligantes, solidificação de compostos fundidos ou pela cristalização de alguns componentes como lignina e proteínas. As pontes sólidas são formadas preferencialmente durante a secagem/resfriamento de produtos densificados (KALIYAN; MOREY, 2010).

Chung (1991) apontou técnicas industriais para promover a adesão e aumentar o contato molecular entre conjunto de moléculas, tais como o fornecimento de calor a temperaturas acima do ponto de transição vítrea, o emprego de pressão, e o uso de solventes como a água. Ao aplicar calor a temperatura na faixa de transição vítrea, associada à umidade, é possível ativar (amolecer) os aglutinantes naturais a fim de atingir uma ligação durável entre partículas (KALIYAN; MOREY, 2010). Processos de fabricação que empregam altas pressões e temperatura, geralmente não necessitam de adição de aglutinantes artificiais, estando essa técnica, mais associada a compressões em baixa pressão (KPALO *et al.*, 2020b).

Diversos ligantes como o melão, amido de milho e de mandioca, glicerol bruto e polpa de papel foram usados em estudos anteriores como aglutinantes de combustíveis sólidos (GWENZI; NCUBE; RUKUNI, 2020; HELWANI *et al.*, 2020; KPALO *et al.*, 2020a; MORALES-MÁXIMO *et al.*, 2020; WAHEED; AKOGUN, 2020). Alguns destes estudos podem ser encontrados na Tabela 6, onde vários níveis de aglutinantes foram incorporados aos briquetes. Na tabela estão destacadas as frações de aglutinante que foram responsáveis por melhorar alguma propriedade de saída dos briquetes, como resistência a compressão e poder calorífico.

O aglutinante utilizado mais vezes entre os trabalhos foi o amido, sendo misturado muitas vezes com água aquecida para produzir uma pasta com consistência gelatinosa (BAZARGAN; ROUGH; MCKAY, 2018; MORALES-MÁXIMO *et al.*, 2020). A pesquisa Khlifi *et al.* (2020) utilizou amido de milho e analisaram os briquetes produzidos com a 0, 10, 15 e 30% do aglutinante. A conclusão obtida foi de que a adição de 15% do amido de milho propicia uma melhor resistência à compressão, um aumento do poder calorífico superior e redução no teor de cinzas.

Bazargan, Rough e Mckay (2018) que também utilizaram amido como agente aglutinante, observaram que briquetes resistentes podem ser feitos com adição de 3 ou 5% de amido, desde que, a pressão utilizada para compactação dos briquetes seja de 60 ou 40 MPa, respectivamente. Deste modo, fica a critério do fabricante optar por aquela condição de processo que mais lhe favoreça.

Kpalo et al. (2020a) observaram que a biomassa utilizada para seus briquetes possuía baixo teor de lignina, de carboidratos solúveis em água, baixa densidade aparente e baixa quantidade de proteínas. A elevação da concentração desses constituintes é imprescindível para a formação de pontes sólidas durante a produção de briquetes. Essas características os levaram a utilização de polpa de papel como aglutinante para proporcionar uma maior adesão entre as partículas. Como a pesquisa não teve a intenção de avaliar a variação de aglutinante para produzir os briquetes, esse parâmetro foi mantido fixo em 10%. O mesmo sucedeu-se nos estudos de Morales-Máximo et al. (2020), Waheed e Akogun (2020) e de Oliveira *et al.* (2017). Portanto, a proporção de aglutinante nesses trabalhos não foi destacada na Tabela 6.

Helwani et al. (2020) aplicaram a maior porcentagem de aglutinante estudada, mas vale ressaltar que a briquetagem ocorreu sob baixa pressão (máx. 12 MPa) e sem aquecimento. Esse trabalho utilizou o glicerol bruto e o avaliou em 3 níveis (20, 30 e 40%), realizando também otimização de metodologia de superfície de resposta, de arranjo CCD (*Central Composite Design*), de modo que outros níveis foram estudados. Entre os 3 níveis citados, a maior resistência a compressão e um elevado poder calorífico foram obtidos com 40% do aglutinante. Mas o valor de otimização que gerou simultaneamente o maior poder calorífico (30,67 MJ/kg) e maior resistência a compressão (10,06 kg/cm²) foi de aproximadamente 47% de glicerol bruto. Esse aglutinante proporciona firmeza aos briquete além de ter a capacidade de aumentar o poder calorífico.

Outro trabalho que utilizou o glicerol bruto foi o de Raslavičius (2012). Desta vez ele foi experimentado em níveis menores de 0, 10 e 20%, permitindo o reuso desse aglutinante que é um subproduto de grandes usinas de biodiesel. O nível de glicerol bruto ideal para o processo foi limitado pela tecnologia utilizada na pesquisa. O valor de 10% entregou maiores benefícios físicos, permitindo o transporte e manuseio dos briquetes, assim como uma combustão adequada e com pouca geração de cinzas. Também com 10% de aglutinantes, Nwabue, Unah e Itumoh (2017) atingiram as melhores respostas de resistência a compressão e poder calorífico. No entanto, os autores utilizaram proporções aleatórias de mais de um aglutinante. O maior poder calorífico foi obtido com o aglutinante nas proporções de 5% de amido e 5% de latária com briquetes feitos de 90% de coque. O aglutinante que resultou na

maior resistência a compressão era composto de 5% de calcário e 5% de lataria, com briquetes feitos de 80% biomassa carbonizada e 10% de plástico carbonizado.

Em linhas gerais, o aglutinante auxiliou nas propriedades físicas e energéticas dos briquetes, funcionando como uma cola, principalmente entre briquetes produzidos sob baixa pressão e temperatura. Os únicos trabalhos da Tabela 6 que fugiram dessa tendência e utilizaram aglutinante foi de Oliveira et al. (2017), que empregaram pressão de 100 MPa, e Raslavičius (2012), que pré-aqueceu sua câmara de prensagem a 200°C.

Tabela 6. Níveis de aglutinante adicionados a biomassa densificada.

Pesquisadores	0	0,5	1	4	8	10	15	20	25	30	40	47
	(%)											
Helwani <i>et al.</i> (2020)											40	≈ 47*
Kpalo <i>et al.</i> (2020a)												
Khelifi <i>et al.</i> (2020)							15					
Chungcharoen e Srisang (2020)						10						
Morales-Máximo <i>et al.</i> (2020)												
Waheed e Akogun (2020)												
Gwenzi, Ncube e Rukuni (2020)										25		
Bazargan, Rough e Mckay (2018)				3-5								
de Oliveira <i>et al.</i> (2017)												
Nwabue, Unah e Itumoh (2017)						10						
Raslavičius (2012)						10						

Fonte: Autores.

* valor de otimização

2.3.4 Efeito do tempo de prensagem na produção dos briquetes

A Tabela 7 ilustra os 13 trabalhos que tiveram o tempo de prensagem como variável de processo. Esse parâmetro diz respeito ao tempo que a biomassa permanecerá dentro do molde enquanto é compactado pelo equipamento utilizado para a briquetagem. Dentre as pesquisas analisadas, apenas Granado et al. (2021), Bazargan, Rough e Mckay (2018) e de Oliveira Maia et al. (2014) avaliaram diferentes níveis para esse parâmetro. Por esse motivo,

os níveis de tempo de compactação com os quais foram atingidos os maiores resultados para as propriedades físicas foram destacados na Tabela 7. Os trabalhos que mantiveram fixo o parâmetro em questão não têm seus valores destacados na tabela.

O tempo de compactação quando associado as demais variáveis como a presença de aglutinante e as condições de compactação, pressão e temperatura, determinam a densidade e a resistência à compressão dos briquetes (KPALO *et al.*, 2020b). De maneira semelhante, outros autores chegaram a conclusões estatísticas (p -valor $< 0,05$), de que o tempo de prensagem é uma variável de processo significativa para alcançar resultados apropriados de densidade e módulo de elasticidade para os briquetes (NIÑO; ARZOLA; ARAQUE, 2020).

Por outro lado, Bazargan, Rough e Mckay (2018) observaram que o tempo de prensagem (ou tempo de retenção) não teve influência significativa sobre a resistência a tração, uma vez que, sob pressões mais elevadas, esse efeito é desprezível. Deste modo, desde que seja preservada a qualidade dos briquetes, a variável tempo de retenção pode ser reduzida e proporcionar uma maior taxa de produção. Esse cenário levou os autores a desconsiderar tal parâmetro (0s) e atingir maior produção de briquetes. Granado *et al.* (2021) também avaliaram o nível de 0s para a variável, no entanto, observaram a necessidade de determinar um tempo de espera para obter briquetes mais densos. O tempo de 120s associado a pressão de 204 MPa de prensagem entregou os melhores resultados de densidades relaxada e energética, durabilidade e resistência a compressão. Porém, o tempo de compactação apresentou diferenças significativas apenas quando uma pressão mais baixa (102 MPa) foi aplicada durante a briquetagem.

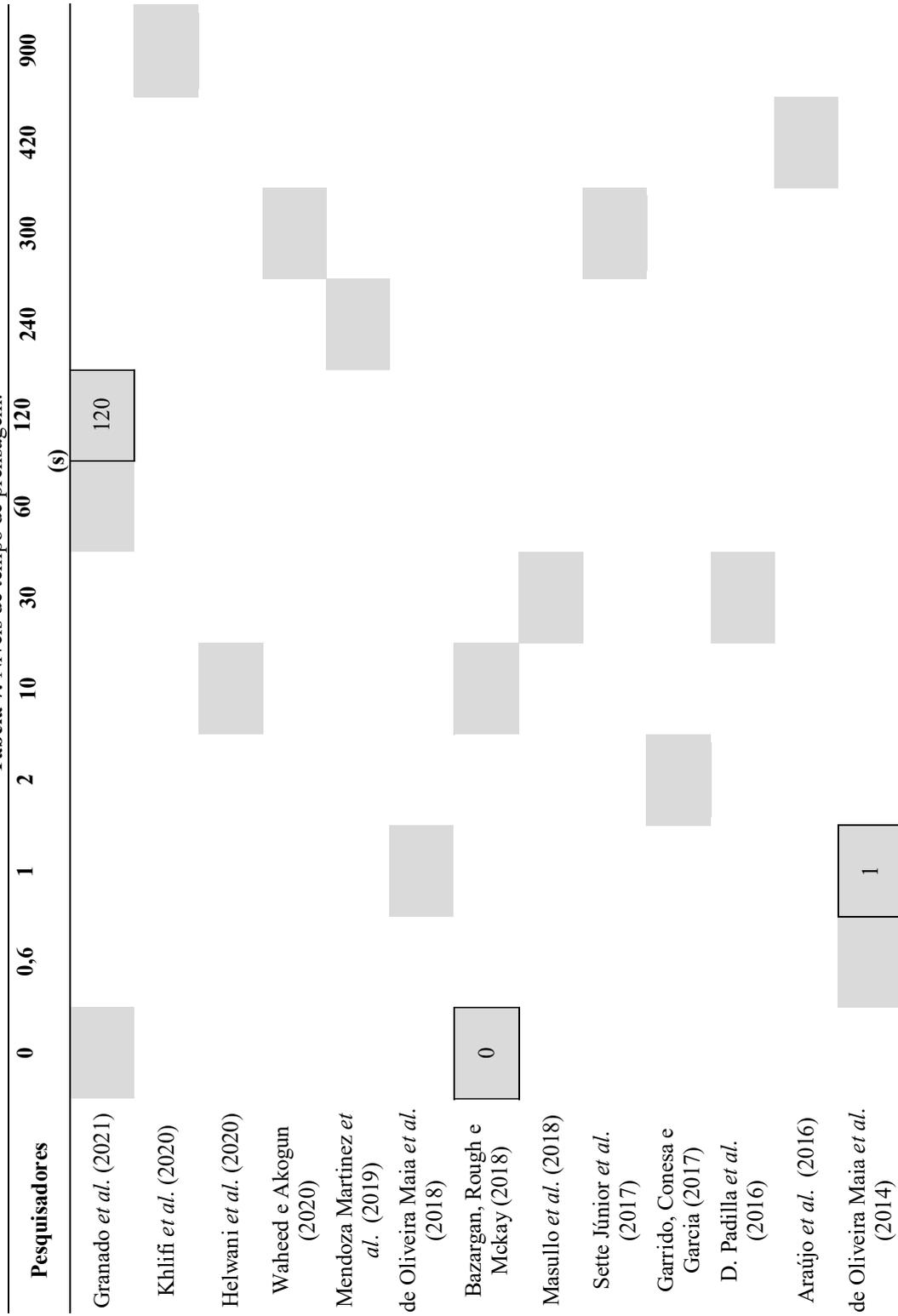
Para de Oliveira Maia *et al.* (2014), o tempo de compressão teve pouca influência sobre as propriedades físicas dos briquetes. A sensível variação no tempo de prensagem, de 0,6 para 1s, resultou em um pequeno aumento da resistência a compressão dos briquetes, passando de 3,6 para 5,3 MPa. Já quanto a densidade aparente, essa mudança foi praticamente nula.

Outros trabalhos, por sua vez, empregaram tempos de prensagem elevados, visando obter briquetes mais estáveis. Araújo *et al.* (2016) aplicaram um tempo de prensagem de 420s (7min) e 360s (6min) de tempo de descanso aos briquetes no intuito de evitar a formação de fissuras ou rachaduras no material compactado. Khelifi *et al.* (2020) aplicaram o valor ótimo de tempo de residência, segundo a literatura por eles pesquisada, de 900s (15 min). Esse foi o maior tempo de compactação entre os 13 trabalhos da Tabela 7, mesmo tendo empregado altos níveis de pressão.

A Tabela 7 permite observar ainda que não há um senso comum quanto ao tempo de prensagem ideal para todos os processos de densificação. de Oliveira Maia *et al.* (2018),

relataram que as condições operacionais como pressão e tempo de compactação são escolhidas de acordo com a configuração e disponibilidade do equipamento de briquetagem. Deste modo, alguns trabalhos como o de Sette Júnior *et al.* (2017) realizam testes preliminares para determinar o nível ideal para o tempo de compactação. Como pode-se observar, as divergências quanto ao tempo de prensagem e ao seu impacto no produto final indicam o quão particular é cada processo de briquetagem, e justifica uma investigação mais detalhada para essa variável de processo.

Tabela 7. Níveis de tempo de pensagem.



Fonte: Autores.

2.3.5 Efeito da umidade da biomassa na produção dos briquetes

O teor de umidade é um parâmetro importante tanto para a produção dos briquetes, quanto para as características finais do combustível sólido. No processo de briquetagem, ele auxilia numa densificação mais suave da biomassa, diminuindo os riscos de rachadura e quebras dos briquetes (GROVER; MISHRA, 1996; KUMAR; CHANDRASHEKAR, 2020).

Naturalmente, a biomassas *in natura* possui uma elevada umidade que dificulta sua utilização como fonte de energia. Alguns resíduos como a madeira de corte e o lodo de esgoto podem apresentar teor de umidade de aproximadamente 40% (DE OLIVEIRA *et al.*, 2017; RASLAVIČIUS, 2012). Deste modo, é comum realizar processos de secagem da matéria-prima ao ar livre, em fornos ou estufas com a intenção de reduzir a umidade (DE OLIVEIRA *et al.*, 2017; MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019; SETTE JÚNIOR *et al.*, 2017).

Alguns autores relatam que o teor de umidade ideal para briquetagem varia de 10 a 12% (KUMAR; CHANDRASHEKAR, 2020; MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019). Outros afirmam que a biomassa deve ter de 8% a 15% para que a densificação ocorra de maneira suave (MASULLO *et al.*, 2018).

A umidade atua como aglutinante em materiais compostos por produtos orgânicos e celulares. Ela promove ligações de forças de van der Waals, que em quantidades ideais promovem aumento da área de contato entre as partículas de biomassa (GROVER; MISHRA, 1996; KALIYAN; MOREY, 2010). Materiais muito secos demonstram uma interação fraca entre as partículas. Enquanto uma alta quantidade de água ($TU > 15\%$) provoca ligações internas frágeis e menor durabilidade dos briquetes (NUREK *et al.*, 2019).

Para a produção de briquetes em máquinas do tipo prensa de rolos recomenda-se que a biomassa tenha de 10 a 20% (base úmida) de umidade (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009). Em máquinas extrusoras, tal parâmetro é mais crítico, variando de 4 a 8%, segundo Tumuluru *et al.* (2011), e de 8 a 10%, de acordo com Grover e Mishra (1996). Já em máquinas de prensa pistão, há uma tolerância de 10 a 15%. Um valor superior aos 15% para essa variável pode ser admissível em prensas pistão hidráulicas (GROVER; MISHRA, 1996). Tais divergências quanto ao teor de umidade ideal mostra a necessidade de adequá-lo ao tipo de máquina de briquetagem.

Como pode-se observar na Tabela 8, a maioria dos trabalhos produziu seus briquetes com o teor de umidade da biomassa variando de 8 a 12%. Os níveis ideais de umidade inicial para as pesquisas de Kumar e Chandrashekar (2020) e Thoreson *et al.* (2014) encontram-se

destacados na tabela. Aqueles com apenas um nível de teor de umidade, mantiveram fixa essa variável, e por isso não foram realçados na tabela.

Chungcharoen e Srisang (2020) produziram briquetes compostos por duas biomassas, cada qual com um teor de umidade distinto. No mesmo trabalho, a casca de caju (CNS) após a carbonização apresentou umidade de 8%, enquanto a cacás de castanha de areca (ANS), após secagem, atingiu de 11 a 12%. Tais níveis de umidade, apesar de diferentes, não foram destacados na Tabela 8 por serem fixos para as biomassas a compor os briquetes. O mesmo aconteceu para o trabalho realizado por de Oliveira *et al.* (2017) e Nwabue, Unah e Itumoh (2017). Já para Araújo *et al.* (2016), que produziram briquetes com matérias-primas diferentes, mas sem misturá-las, foi apresentado o intervalo de teores de umidade encontrados para a Madeira de *Eucalyptus spp.* e *Eucalyptus grandis*. Para cada uma delas foram obtidos teores de umidade em condições sem pré- tratamento térmico da biomassa e com pré- tratamento térmico a variadas temperaturas (180, 200 e 220°C).

Kumar e Chandrashekar (2020) produziram briquetes mais densos, fortes e estáveis com o teor de umidade da biomassa entre 10 e 12%. Nesses níveis foi possível realizar a briquetagem com um menor consumo de energia e com o mínimo de fissuras e bloqueios. Thoreson *et al.* (2014) realizaram um experimento de interação de três vias, cujo teor de umidade explorado foi de 8,3 e 54,5%. Nesse cenário, os briquetes produzidos com o maior conteúdo de umidade sofreram uma influência negativa sobre a densidade média de partícula seca e a elasticidade dos briquetes.

O teor de umidade das biomassas a compor os briquetes feitos por de Oliveira *et al.* (2017) foram de 4% para os finos de carvão vegetal e 14,11% para o lodo de esgoto. Tais resultados foram obtidos após exposição das matérias-primas ao sol em secagem ao ar livre. No entanto, a umidade contida nas biomassas secas não era suficiente para realizar a briquetagem, sendo necessária a adição de 8% de umidade e 10% de aglutinante junto a mistura de biomassas.

Tabela 8. Níveis de umidade da biomassa para o processo de briquetagem.

Pesquisadores	4	5	8	9	10	11	12	14	55
Granado <i>et al.</i> (2021)									
Kpalo <i>et al.</i> (2020a)				9,27					
Chungcharoen e Srisang (2020)									
Kumar e Chandrashekar (2020)					10 a 12				
Mendoza Martinez <i>et al.</i> (2019)									
de Oliveira Maia <i>et al.</i> (2018)									
Masullo <i>et al.</i> (2018)									
Sette Júnior <i>et al.</i> (2017)									
de Oliveira <i>et al.</i> (2017)									
Nwabue, Unah e Itumoh (2017)					10,62				
D. Padilla <i>et al.</i> (2016)									
Araújo <i>et al.</i> (2016)									
de Oliveira Maia <i>et al.</i> (2014)									
Thoreson <i>et al.</i> (2014)				8,3					
Raslavičius (2012)									

Fonte: Autores.

2.3.6 Efeito da pressão na produção de briquetes de biomassa

Um dos fatores mais importantes no processo de densificação da biomassa é a aplicação de uma dada pressão para obtenção de combustíveis sólidos. De acordo com Nunes, Andrade e Dias Júnior (2019), esta variável de processo normalmente não altera as características do poder calorífico do material, no entanto, tem grande influência sobre as propriedades físico-mecânicas de briquetes, assim como sobre o teor de umidade e cinzas. Helwani *et al.* (2020) por sua vez, afirmam que a pressão possui sim influência sobre o poder calorífico dos briquetes, por permitir que mais matéria-prima entre em contato com o aglutinante feito de glicerol bruto, provocando um aumento do poder calorífico.

O aumento da pressão também influencia na resistência à força compressiva, uma vez que atua a nível molecular sobre os constituintes naturais da biomassa como lipídios, lignina,

amido e proteína. Tais componente são redistribuídos sobre a biomassa compactada ao passo que são expelidos de sua matriz de origem e passam a preencher os espaços vazios, formando uma nova matriz dos briquetes (NAVALTA *et al.*, 2020). Sabe-se ainda, que em dado momento, o efeito do aumento da pressão não eleva a durabilidade dos briquetes. Isso acontece quando o processo de briquetagem atinge a fase de compactação, onde as partículas de biomassa se deformam plasticamente na direção da tensão aplicada e se emaranham às partículas adjacentes, tornando a biomassa mais compacta (SONG *et al.*, 2020).

Os trabalhos citados na Tabela 9, aplicaram como variável de entrada a pressão para produção de seus briquetes. Alguns deles ainda se propuseram a avaliá-la em diferentes níveis, os quais tiveram uma grande amplitude entre seus valores, cujos extremos foram de 7 a 204 MPa. Nessas pesquisas, os níveis de pressão que otimizam as características dos briquetes, tornando seus processos de produção mais adequados estão destacados na Tabela 9. Alguns trabalhos não indicaram valores ótimos ou mantiveram a pressão como variável fixa e por isso não tiveram valores destacados na tabela. Os trabalhos que não mediram a pressão como elemento de densificação fizeram uso de outros meios para realizar a compactação. Como os trabalhos de Nwabue, Unah e Itumoh (2017) e Masullo *et al.* (2018) que utilizaram cargas medidas em toneladas para comprimir seus briquetes e não converteram os valores em unidade de pressão. Outros não especificaram como foi feito o processo, ou teve sua compressão acionado por motor (CHUNGCHAROEN; SRISANG, 2020; MORALES-MÁXIMO *et al.*, 2020).

Mesmo diante da relevância da pressão na produção de combustíveis sólidos, Araújo *et al.* (2016) observaram que a variável de entrada não provocou grandes diferenças sobre as características dos seus briquetes. Os efeitos da pressão foram avaliados nos níveis de 7, 10 e 14 MPa. Vale ressaltar que a briquetagem foi realizada em meio a aquecimento de 120°C, com partículas pequenas (0,42 mm) e a pressões relativamente baixas, fatores que podem ter contribuído para esse resultado.

Já para Helwani *et al.* (2020), tanto a resistência a compressão, quanto o poder calorífico sofrem influência da pressão de prensagem. Ambas as propriedades são otimizadas a uma pressão de 93,18 bar ($\approx 9,30$ MPa). Aparte do estudo de otimização, a maior resistência a compressão e poder calorífico foram obtidos com as pressões de 11,77 MPa (≈ 12 MPa) e 10,78 MPa (≈ 11 MPa), respectivamente. Os valores arredondados foram destacados na Tabela 9, assim como o valor da pressão de otimização.

Mendoza Martinez *et al.* (2019) apontaram como ideal para produção de seus briquetes à base de papel, a pressão de 8,27 MPa. De forma semelhante, Kpalo *et al.* (2020a) aplicaram

7 MPa de pressão, no entanto mantiveram esse parâmetro constante durante todo o processo de briquetagem.

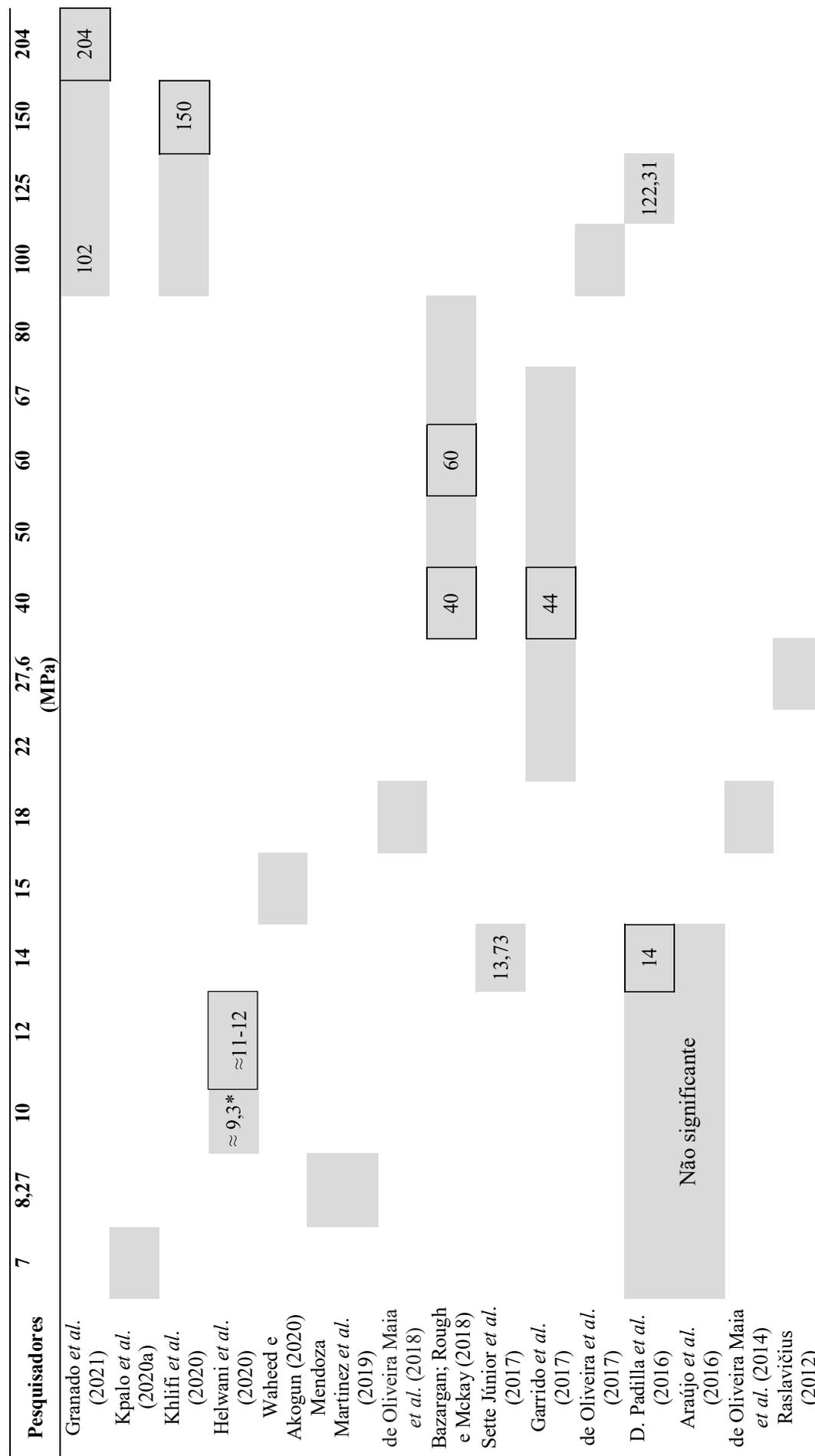
Utilizando pressões elevadas, Khlifi *et al.* (2020), que empregaram pressões de 100, 125 e 150 MPa, observaram que para os briquetes com proporção de 85% de biomassa e 15% de aglutinante, a pressão de 150 MPa garantiu uma maior resistência a compressão. O aumento da pressão de compactação também influenciou diretamente a densidade e resistência à compressão dos briquetes de resíduo de mandioca produzidos na ausência de aquecimento ou aglutinante (GRANADO *et al.*, 2021). A aplicação de 204 MPa em uma prensa hidráulica, resultou nos maiores valores de densidade relaxada, energética, durabilidade e resistência à compressão (GRANADO *et al.*, 2021). A pressão é considerada elevada quando é igual ou superior a 100 MPa, ela é intermediária para valores entre 5 e 100 MPa e é considerada baixa quando for menor do que 5 MPa (KPALO *et al.*, 2020b).

Ao utilizar a pressão de compactação para valores intermediárias de 40 e 60 MPa (a depender do teor de aglutinante), Bazargan, Rough e Mckay (2018) conseguiram produzir briquetes com resistência adequada e maior do que seu valor de referência, 375kN/m². Com pressões menores é possível reduzir custos operacionais com energia, e com manutenção, uma vez que o equipamento fica mais suscetível a desgaste e quebra ao utilizar elevadas pressões.

Também com pressões em níveis intermediários, Garrido, Conesa e Garcia (2017) atingiram a maior densidade e durabilidade quando a densificação ocorreu em meio a aquecimento e com pressões de 22 e 44 MPa. A influência da pressão foi mais relevante para os briquetes produzidos a temperatura ambiente, mas em ambas as condições de temperatura houve um aumento da densidade com a elevação da pressão. De modo geral, a maior durabilidade e densidade foram obtidas com 44 MPa, no entanto, para o processo com temperaturas elevadas também são obtidos briquetes densos e de boa durabilidade a 22 MPa.

Em linhas gerais, a maioria dos trabalhos aplicaram pressões classificadas como intermediárias (5-100 MPa), permitindo uma densificação com menor gasto energético. Observou-se também que a maior pressão nem sempre proporciona os resultados mais elevados para as variáveis de saída, podendo existir interações com outros fatores de entrada além de limitações técnicas.

Tabela 9. Níveis de Pressão aplicados durante o processo de densificação.



Fonte: Autores.

* valor de otimização

2.3.7 Efeito da granulometria das partículas na produção de briquetes de biomassa

A granulometria diz respeito ao tamanho das partículas a serem densificadas na produção dos briquetes, dando-lhes uma maior uniformidade dos grãos. O tamanho das partículas e sua distribuição compõe alguns dos principais fatores determinantes das propriedades físicas e mecânicas dos briquetes (FRANCIK *et al.*, 2020). Sabe-se que quanto maior for o tamanho das partículas, maior é a energia necessária para densificar a biomassa, exigindo que uma maior pressão seja aplicada durante a densificação (KRIŽAN *et al.*, 2015; MANI; TABIL; SOKHANSANJ, 2006).

O tamanho das partículas também produz efeito sobre a conversão de energia, armazenamento e emissões, uma vez que afeta poder calorífico, secagem e a durabilidade dos briquetes (FEBBI *et al.*, 2015; NATI; SPINELLI; FABBRI, 2010). Além disso, a distribuição das partículas, em seus diversos tamanhos, é um dos atributos mais importantes do material de entrada no processo de densificação (MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019). Deste modo, todos os trabalhos anteriormente ilustrados na Tabela 4 utilizaram a granulometria. 16 deles a apresentaram como variável de entrada fixa ou avaliada em níveis. Outros 5 realizaram estudo granulométrico para determiná-la antes da briquetagem, e apenas 1 não a especificou em nenhuma parte. Como em 21 trabalhos (equivalente a 95% deles) a matéria-prima passou por um processo de determinação da granulometria das partículas para realização da briquetagem, todos esses foram apresentados na Tabela 10.

A Tabela 10 apresenta os níveis nos quais alguns trabalhos variaram o tamanho das partículas para produção de seus briquetes. Nela, apenas Chungcharoen e Srisang (2020), Helwani *et al.* (2020), Thoreson *et al.* (2014) avaliaram a influência de diferentes granulometrias sobre as características finais dos biocombustíveis. Esses autores alcançaram as melhores características para os briquetes nos níveis destacados na Tabela 10. Os demais trabalhos mantiveram o parâmetro fixo em apenas um nível, ou produziram seus briquetes com uma granulometria heterogênea, sendo discriminados na tabela como “mistura”. Essa última configuração granulométrica se dá ao utilizar agitação de peneiras com furos de diferentes dimensões, resultando no recolhimento de partículas com tamanhos variados (DE OLIVEIRA *et al.*, 2017). Ainda assim, há a predominância de um tamanho de granulometria sobre as demais dentro dos briquetes. Para de Oliveira Maia *et al.* (2018), 60% das partículas de biomassa de seus briquetes possuíam granulometria de 2,36 mm, enquanto os 40% restantes, tinham tamanhos variantes de 0,5 a 5 mm. Kumar e Chandrashekar (2020),

utilizaram partículas grandes (5 a 6 mm) e pequenas (≤ 1 mm) na proporção de 1:4. Já D. Padilla et al. (2016), usaram granulometrias menores de que 0,84 mm.

Assim como o tamanho das partículas pode não ser uniforme, sua distribuição dentro do biocombustível também não é (GUO; CHEN; LIU, 2012). Normalmente as partículas menores aglomeram-se no fundo dos briquetes, enquanto as maiores encontram-se no meio. A promoção de uma distribuição homogênea dessas partículas durante a densificação poderia garantir o maior contato entre partículas de tamanhos diferentes trazendo maior resistência mecânica e menor abrasão durante o manuseio e transporte dos briquetes (CHALOUPKOVÁ *et al.*, 2018). Isso porque, durante a compactação da biomassa há uma diferença significativa entre a expansão volumétrica de partículas maiores e menores. Os espaços entre as partículas maiores são ocupados pelas menores, causando maior coesão entre elas e menor taxa de expansão, surtindo efeito sobre a qualidade dos briquetes (SETTE *et al.*, 2018).

Ao se trabalhar com partículas menores também há um aumento na área de contato, pela diminuição da distância entre elas, promovendo fortes ligação de forças mecânicas de engrenamento, forças químicas, ligação de ponte sólida e força de van der Waals, o que consequentemente tem influência sobre as propriedades mecânicas dos briquetes (PANG *et al.*, 2019). Esse aumento de pontos de contato facilita também a transferência de calor, fortalecendo as ligações entre partículas, que por sua vez, podem conferir aos combustíveis sólidos maiores densidade aparente, densidade de energia, durabilidade, resistência à compressão axial, resistência ao impacto e módulo de elasticidade (PANG *et al.*, 2019; SETTER *et al.*, 2021; ZHANG; GUO, 2014).

Nessa mesma perspectiva Chungcharoen e Srisang (2020) observaram que ao reduzir o tamanho das partículas foi obtido uma maior dureza dos briquetes, uma vez que as partículas menores lhes permitem uma agregação mais compacta. Ademais, foi observado um aumento no teor de carbono fixo e no teor de cinzas, bem como uma diminuição do teor de matéria volátil.

Helwani *et al.* (2020) observaram forte relação da granulometria, pressão de prensagem e composição da matriz dos briquetes com a resistência a compressão. Entre os 3 níveis (60, 80 e 100 mesh) de granulometria avaliados pelos autores, o maior deles, que corresponde ao menor tamanho de partícula (0,149 mm) permitiu o alcance da maior resistência a compressão. Os autores ainda realizaram um estudo de otimização dos resultados, chegando à conclusão de que a maior resistência a compressão é obtida com granulometria de partícula igual a 0,125 mm. O valor de otimização também está destacado na Tabela 10.

Em contrapartida ao uso de partículas pequenas para otimizar as características físicas dos briquetes, Thoreson *et al.* (2014) chegaram a conclusões qualitativas de que partículas maiores, resultaram em menores divisões de flocos nos briquetes de palha de milho crua. Apesar dessa constatação, não foram encontradas evidências consistentes do efeito do tamanho da partícula sobre a densidade de partículas secas. Os autores chegaram à conclusão de que a palha de milho da colheita industrial não deve ser submetida a processos adicionais de redução de tamanho. Isso permite que a densificação ocorra no local de colheita, diminuindo gastos com transporte. A utilização de partículas maiores também reduz os custos de produção dos briquetes, comuns em moagens de partículas muito finas (CHALOUPKOVÁ *et al.*, 2018).

Diante do exposto, percebe-se que apesar de haver uma propensão de que partículas menores promovam ligações mais fortes entre as partículas, existem fatores que provocam desvios nesse padrão. Deste modo, a granulometria ideal para densificação da biomassa varia com o tipo de matéria-prima utilizada e com o processo de produção empregado (KRIŽAN *et al.*, 2015). Sendo importante conhecer o processo de aglomeração da matéria-prima durante a densificação, permitindo um maior controle da briquetagem, assim como da qualidade final dos briquetes (CHALOUPKOVÁ *et al.*, 2018).

Tabela 10. Continuação.

Pesquisadores	0,10	0,125	0,149	0,25	0,297	0,31	0,5	0,84	1	1,19	2	2,38	3	5	6	19	40	42
de Oliveira <i>et al.</i> (2017)							Mistura											
Nwabue, Unah e Itumoh (2017)																		
D. Padilla <i>et al.</i> (2016)							Mistura											
Araújo <i>et al.</i> (2016)							0,42											
de Oliveira Maia <i>et al.</i> (2014)												2,5						
Thoreson <i>et al.</i> (2014)																		40 - 42
Raslavičius (2012)																		

Fonte. Autores.

* valor de otimização

2.4 Principais parâmetros de resposta da produção de briquetes

Após a densificação de uma matéria-prima em combustível sólido é importante conhecer suas características térmicas e energéticas através de parâmetros como o poder calorífico superior e teor de cinzas (LELA; BARIŠIĆ; NIŽETIĆ, 2016). Com a mesma importância, as características físicas podem determinar a durabilidade e resistência do material densificado através do conhecimento da sua densidade, durabilidade, resistência a compressão e resistência a água (FAIZAL; RAHMAN; LATIFF, 2016). Como mencionado anteriormente, esses parâmetros podem variar de acordo com diversos fatores entre eles o processo de produção, tipo de matéria-prima utilizada, temperatura e pressão de processos (FAIZAL; RAHMAN; LATIFF, 2016). Diante de tantos elementos que podem influenciar as características finais de um combustível é necessário padronizá-las a fim de garantir um nível de qualidade adequado para cada aplicação. Para isso, a utilização de biocombustíveis sólidos é certificada por normas, as quais padronizam a qualidade de combustíveis densificados e especificam critérios para utilização em aplicações comerciais e residenciais (TUMULURU *et al.*, 2011).

Com o intuito de auxiliar no entendimento dos resultados obtidos com a densificação em forma de briquetes, são ilustrados nas Tabelas 11 e 12, informações dos valores obtidos para variáveis de saída energéticas e físico-mecânicas de alguns trabalhos. Fatores como os princípios de acionamento das máquinas utilizadas para a produção dos briquetes e a utilização ou não de tratamentos térmicos anteriores a densificação também foram incluídos nas tabelas, dada a possível influência sobre os resultados alcançados. Além disso foram calculadas as médias e desvios padrão para cada variável de resposta e algumas delas foram relacionadas a normas de padronização internacionais.

As normas de padronização de biocombustíveis sólidos utilizadas foram a EN*plus*, EN 14961-2 e DIN 51731. Apesar de serem referentes as características da biomassa densificada em forma de pellets diversos trabalhos 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).

2.4.1 Variáveis de resposta térmicas, energéticas e teor de umidade

Através da Tabela 11 são apresentadas as variáveis de saída térmicas, energéticas e o teor de umidade dos briquetes estudadas em 20 dos 22 trabalhos analisados durante essa revisão bibliográfica.

Como indicado por Mendoza Martinez *et al.* (2019), a matéria-prima e os briquetes finais devem ter alta energia e teor de carbono fixo, e baixo teor de cinzas e material volátil. Deste modo, estão dispostos na tabela os valores máximos de poder calorífico, densidade de energia e carbono fixo encontrados nas pesquisas. Por outro lado, foram apresentados os resultados mínimos de material volátil, teor de cinzas e teor de umidade. O mínimo teor de umidade na tabela foi motivado pelas fracas características de combustão obtidas quando este parâmetro é elevado, comprometendo a produção de calor e o tempo de residência na câmara de combustão (KPALO *et al.*, 2020a).

Ainda a partir da Tabela 11 foram gerados os Gráficos 1, 2 e 3 para o poder calorífico superior, teor de umidade e teor de cinzas, respectivamente. Nos gráficos foram informadas linhas de referência para essas variáveis de saída baseadas nas normas de padronização ENplus, EN 14961-2 e DIN 51731. Dada a variedade de máquinas utilizadas para realizar a densificação e pela influência que o processo de briquetagem tem sobre a qualidade final dos briquetes (KPALO *et al.*, 2020b), o princípio de funcionamento dessas máquinas também foi incluído nos gráficos.

Teor de Material Volátil e Carbono fixo

Uma variável importante para a combustão dos briquetes é o seu teor de material volátil, que é proporcional a energia liberada durante a combustão (DE OLIVEIRA MAIA *et al.*, 2018). Ele representa a fração de gases combustíveis e não combustíveis, excetuando-se a umidade, que é liberada quando o combustível é aquecido a elevadas temperaturas. Quanto maior for a volatilidade de um combustível, mais reativo e facilmente inflamável ele será, resultando em uma queima mais rápida (FERNANDES *et al.*, 2013). No entanto, principalmente em uso doméstico, prefere-se que a queima ocorra de maneira mais lenta, (MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019). O elevado teor de material volátil também é responsável por provocar grandes quantidades de fumaça no início da combustão, resultando em combustível gasoso não queimado (ARAÚJO *et al.*, 2016).

A biomassa em geral apresenta cerca de 65 a 85% em peso de material volátil, enquanto a biomassa lenhosa tem de 76 a 86% em peso (MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019). Segundo a Tabela 11, a média desta variável entre os trabalhos analisados foi de 56,69%, com um DP de 23,32%. O elevado DP justifica-se pelos baixos valores de MV para os trabalhos de Helwani *et al.* (2020) e Nwabue, Unah e Itumoh (2017), que foram 19,73% e 17,23%, bem abaixo dos resultados encontrados para as demais pesquisas. Esses dois trabalhos utilizaram processo de carbonização da matéria-prima a elevadas temperaturas (200- 500°C) antes do processo de densificação, o que contribuiu para volatilização dos gases e redução do MV.

Além de liberar parte dos voláteis e umidade presente na matéria-prima, sabe-se ainda, que pré-tratamentos térmicos como a torrefação e carbonização são capazes de promover um aumento do conteúdo de carbono fixo presente no combustível (ANTMEN, 2019; HELWANI *et al.*, 2020). Isso porque o conteúdo de carbono fixo é inversamente proporcional ao teor de material volátil, sendo a parte remanescente após a liberação dos gases, umidade e excluindo-se as cinzas (FERNANDES *et al.*, 2013; MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019). Deste modo, o CF elevado permite uma combustão mais lenta e estável (MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019), com menos calor sendo gasto durante a decomposição do material volátil e mais energia sendo gerada por meio do maior volume de carbono fixo que será consumido (ARAÚJO *et al.*, 2016).

Segundo Fernandes *et al.* (2013), o conteúdo de carbono fixo é em torno de 7 a 20%, no entanto, na Tabela 11 é possível observar valores bem maiores. Como esperado, os maiores valores de carbono fixo de 71,40% e 42,41% foram obtidos nos mesmo briquetes onde foram alcançados os menores MV, nos trabalhos de Helwani *et al.* (2020) e Nwabue, Unah e Itumoh (2017) respectivamente. Mais uma vez, houve a influência do tratamento térmico realizado, gerando uma correlação direta positiva entre a maior produção de energia, poder calorífico superior e a porcentagem de carbono fixo (NWABUE; UNAH; ITUMOH, 2017).

Poder Calorífico Superior

O poder calorífico de um combustível é obtido por meio da combustão sob condições padrão de temperatura e pressão de um combustível, sendo quantificado em calor gerado pela combustão (ANTMEN, 2019). O poder calorífico superior (PCS) indica quanto desse calor é produzido na presença de oxigênio (KHLIFI *et al.*, 2020). Já o poder calorífico inferior (PCI), é obtido por meio de cálculo tendo como base o PCS menos os conteúdos de umidade e H₂ do material analisado (ANTMEN, 2019). Os dois trabalhos que estudaram esse parâmetro

encontraram resultados superiores aos 16,6 MJ/kg exigidos pela norma *ENplus*, indicando um bom potencial para geração de energia.

Ao analisar o Gráfico 1, que diz respeito ao PCS, percebe-se que grande parte dos trabalhos atendem a pelo menos uma das normas de padronização. O trabalho de Gwenzi, Ncube e Rukuni (2020) destaca-se pelo maior poder calorífico superior de 33,8 MJ/kg, com seus briquetes produzidos em máquina de princípio de funcionamento mecânico manual. Esse elevado PCS pode ser justificado pela composição dos briquetes que são feitos de resíduos não convencionais como o pó de carvão mineral (C), serragem (S) e plásticos pós-consumo (P).

Os outros dois trabalhos que tiveram elevados PCS em seus briquetes foram produzidos em máquinas com diferentes princípios de acionamento. Helwani et al. (2020), assim como a maioria dos demais pesquisadores, utilizaram uma prensa hidráulica para obter 30,67 MJ/kg em briquetes de caule de palma carbonizados. Enquanto Bazargan, Rough e McKay (2018) alcançaram 31,29 MJ/kg de PCS em briquetes feitos de biochars de casca de palmiste (PKSB), cuja máquina com ariete cilíndrico de compressão não teve seu princípio de acionamento especificado. O que os três trabalhos com maiores PCS têm em comum são as matérias-primas dos briquetes que possuem elevados PCS iniciais, seja devido a sua própria natureza ou graças a processos de pré-tratamento térmico.

Analisando conjuntamente a Tabela 11 e o Gráfico 1, percebe-se que a média de 21,95 MJ/kg para o PCS dos trabalhos é bem acima do requerido pelas normas EN 14961-2 e DIN 51731. O menor PCS de 16,92 MJ/kg é pouco menor do que os 17,5 MJ/kg padronizados pela norma DIN 51731, indicando um bom potencial energético para todos os estudos analisados.

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

Teor de Umidade

De acordo com a norma *ENplus* em suas classes A1, A2 e A3, o teor de umidade (TU) dos briquetes deve ser $\leq 10\%$ (ENPLUS, 2015). Como pode-se observar no Gráfico 2, a maioria dos trabalhos teve seu menor teor de umidade dentro do que requer a norma. Dos dois estudos que não atenderam a norma, um obteve o valor de 10,40% de umidade, resultado muito próximo àquele padronizado. Um fato em comum entre os dois trabalhos que não atenderam ao requisito

de umidade da ENplus é que ambos foram produzidos em máquinas manuais, sendo elas de acionamento hidráulico para a pesquisas de Masullo *et al.* (2018) e mecânico para Morales-Máximo *et al.* (2020).

As baixas faixas de umidade para os combustíveis sólidos são desejáveis uma vez que elevados TU podem resultar em briquetes frágeis, de baixa densidade, o que provocaria problemas em seu manuseio, além de problemas associados ao desligamento de caldeiras (KZ KU AHMADA, KHAZI Q SAZALIA, KAMAROLZAMAN, 2018; NUNES; ANDRADE; DIAS JÚNIOR, 2019). Os limites para o teor de umidade podem variar segundo a norma utilizada como padrão de referência. Segundo Kz Ku Ahmada, Khaziq Sazalia e Kamarolzaman (2018), a norma de padronização de qualidade da madeira como combustível sólido, ISO 17225, recomenda que o teor de umidade seja de 2,2 a 15,9%, de modo que os briquetes produzidos não sejam secos demais, provocando uma queima muito rápida, nem muito úmidos.

Teor de Cinzas

O teor de cinzas (TC) de um combustível é um bom parâmetro para avaliar sua qualidade, isso porque ele se relaciona com as demais propriedades (DUCA *et al.*, 2014). De acordo com a Tabela 11 a média para o teor de cinzas dos estudos é de 6,29%, sendo superior ao maior valor permitido pelas normas ENplus, que é de 2%. A elevação dessa média se dá pelo alto teor de cinzas encontrado por Nwabue, Unah e Itumoh (2017), que como pode ser observado no Gráfico 3, encontra-se em um ponto isolado dos demais trabalhos, com um TC de 27,93%. Esse resultado tem relação com a composição do briquete, que além de biomassa, é feito de coque, pó de calcário e lataria que contem grande quantidade de material não combustível contribuindo para o aumento do teor de cinzas.

Para biomassas herbáceas normalmente o teor de cinzas é de 10% (IVANOVA *et al.*, 2018), aproximando-se dos valores encontrados para de Oliveira Maia *et al.* (2018) (9,85%) e de Oliveira Maia *et al.* (2014) (10,70%) que utilizaram resíduos de bananeira como folhas e caule, além das cascas de arroz. No entanto, para produção de briquetes, recomenda-se que o teor de cinzas seja inferior a 4%, evitando corrosão do equipamento (D. PADILLA *et al.*, 2016).

Além disso, briquetes classificados segundo normas de qualidade devem ter baixos teores de cinzas, a fim de evitar altas emissões de poeira e prejuízos a combustão (IVANOVA *et al.*, 2018).

Gráfico 1. Relação entre os valores individuais do poder calorífico superior (PCS) com o princípio de funcionamento das máquinas de briquetagens.

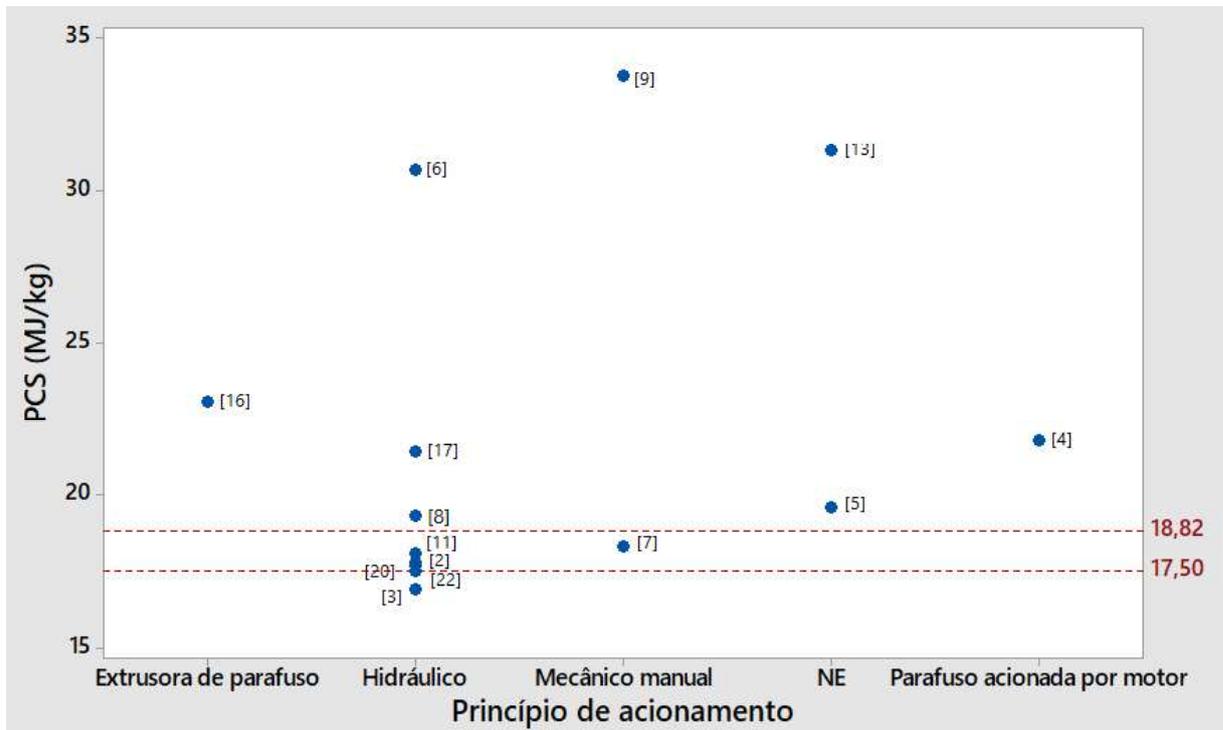


Gráfico 2. Relação entre os valores individuais do teor de umidade (TU) com o princípio de funcionamento das máquinas de briquetagens.

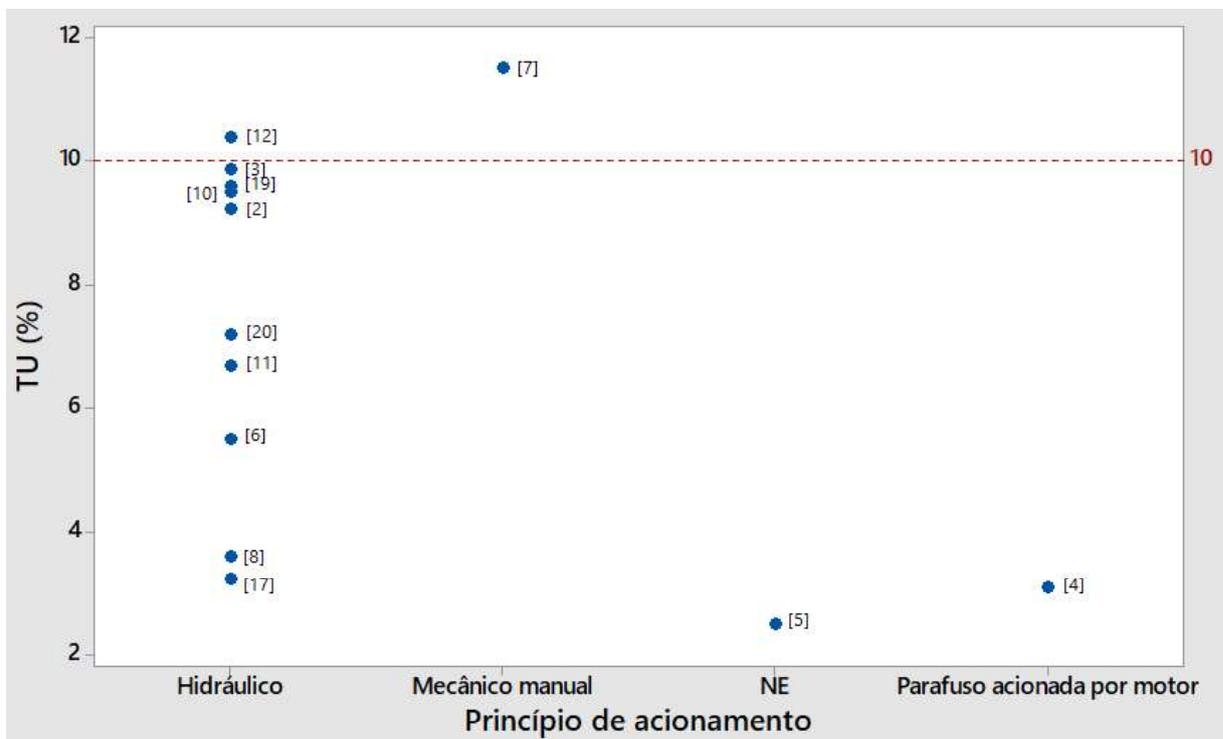
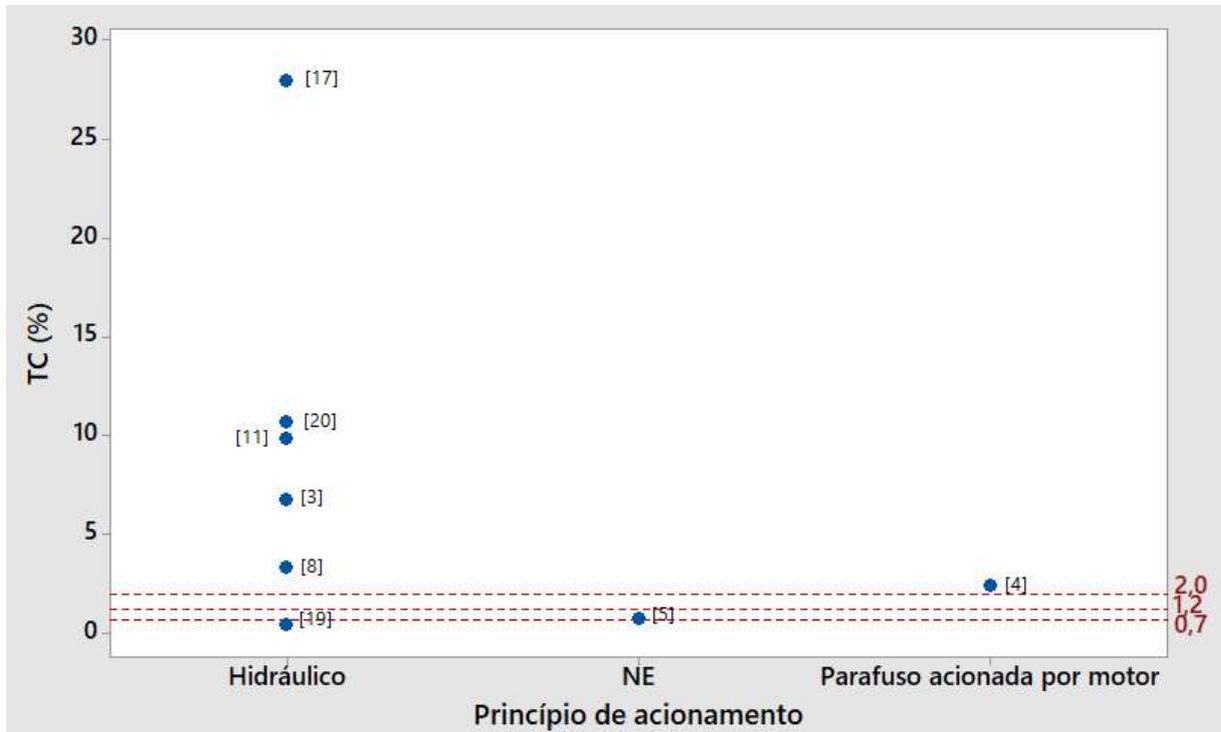


Gráfico 3. Relação entre os valores individuais do teor de cinzas (TC) com o princípio de funcionamento das máquinas de briquetagens.



2.4.2 Variáveis de saída físico-mecânicas

A densificação da biomassa tem como uma de suas principais vantagens elevar a baixa densidade da matéria-prima *in natura*, facilitando a capacidade de armazenamento, manuseio e transporte dos combustíveis sólidos (MUAZU; STEGEMANN, 2015; PRVULOVIC *et al.*, 2014; TUMULURU *et al.*, 2011). O processo também beneficia propriedades como a resistência mecânica, resistência à tração e a durabilidade (BAZARGAN; ROUGH; MCKAY, 2018; DE OLIVEIRA *et al.*, 2017; GARRIDO; CONESA; GARCIA, 2017). Essas e outras propriedades físicas e mecânicas podem ser observados na Tabela 12.

As variáveis de saída resistência à compressão, resistência ao impacto, resistência à tração, resistência à água, durabilidade e densidades são liustrados na tabela em função de seus maiores valores alcançados em cada trabalho. A maximização dessas propriedades favorece a obtenção de briquetes menos quebradiços e mais resistentes, reduzindo custos no transporte e armazenamento (OKOT; BILSBORROW; PHAN, 2018; REJDAK *et al.*, 2019).

As demais variáveis presentes na Tabela 12 são a geração de finos, expansão longitudinal e absorção de água. Como será discutido neste tópico, essas propriedades devem ser minimizadas para contribuir com a obtenção de briquetes adequados para transporte,

armazenamento e manuseio. Dito isso, os valores observados na Tabela 12 são os mínimos em cada trabalho.

Entre as propriedades físicas e mecânicas exploradas na Tabela 12, constata-se que a densidade e a resistência à compressão foram estudadas com maior frequência para avaliar e classificar um combustível sólido. Em vista disso, ambas as variáveis foram analisadas graficamente. Por meio do Gráfico 4 a densidade aparente individual de cada trabalho foi comparada com o valor de referência dado pela norma EN*plus* e classificado quanto ao princípio de funcionamento da máquina de briquetagem. De modo semelhante foi elaborado o Gráfico 5, que trata da resistência à compressão individual dos briquetes. No entanto, essa variável não foi comparada com a norma, mas sim com um valor de referência da literatura.

Expansão Longitudinal

A expansão longitudinal representa o quanto um material tende a se expandir após seu adensamento e atingir estabilidade dimensional. Essa propriedade também se relaciona com a higroscopicidade do material, que diz respeito a capacidade de absorção de água ao longo do tempo (MASULLO *et al.*, 2018). Assim, a expansão de um briquete pode ser devida ao excesso de umidade absorvido, provocando enfraquecimento das ligações entre partículas e diminuição da durabilidade (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009). Logo, a estabilidade dimensional dos briquetes, remete à sua resistência, refletindo sobre as condições de transporte e armazenamento do combustível (ARAÚJO *et al.*, 2016). Sendo preferível que o material densificado sofra menor expansão.

Para um período de 21 dias, a 20°C e umidade relativa de 95%, admite-se como ideal uma expansão inferior a 20% (ANTWI-BOASIAKO, C.; ACHEAMPONG, 2016). Na Tabela 12, nota-se que a expansão longitudinal dos trabalhos é menor do que essa faixa, variando de 3 a 15%. O briquete produzido na presença de calor por Araújo *et al.* (2016), obteve a menor expansão (3%). Enquanto os briquetes de D. Padilla *et al.* (2016) e Masullo *et al.* (2018), densificados sem aquecimento, alcançaram maiores valores de 13,47 e 15%, respectivamente.

Esse comportamento pode ser explicado pelo amolecimento da lignina na presença de calor, atuando como aglutinante entre as partículas, o que por sua vez, provoca menor expansão do material densificado (SETTER *et al.*, 2020).

Geração de Finos

Outra variável importante e que deve ser minimizada é a geração de finos, medida pelo teste de friabilidade. Sua medição é dada quanto ao grau de friabilidade dos briquetes, de modo que quanto mais friáveis, maior a desintegração do combustível durante o ensaio (MASULLO *et al.*, 2018). Segundo a norma *ENplus* (2015) os combustíveis devem ter uma geração de finos de até 1%, o que os classificariam como muito pouco friáveis (geração de finos <10%) (MASULLO *et al.*, 2018). Na Tabela 12, apesar de nenhum dos estudos terem atendido à norma, eles podem ser classificados como muito pouco friáveis, o que os tornam briquetes resistentes (D. PADILLA *et al.*, 2016).

Absorção de Água

A resistência dos briquetes também é avaliada por meio da absorção de água. Assim como as demais variáveis, ela também afeta o armazenamento e transporte dos briquetes, além do poder calorífico (ARAÚJO *et al.*, 2016). Por ser uma propriedade que se relaciona com as características da matéria-prima do combustível, a utilização de pré-tratamentos térmicos como a torrefação é capaz de diminuí-la, provocando mudanças benéficas à qualidade do material densificado (ARAÚJO *et al.*, 2016; GWENZI; NCUBE; RUKUNI, 2020). Segundo Gwenz, Ncube e Rukuni (2020) uma menor absorção de água também implica em briquetes com maior resistência a compressão. Entre os trabalhos avaliados na Tabela 12 apenas dois estudaram esse parâmetro de resposta, correspondendo a 1 e 3% de absorção de água.

Durabilidade

A durabilidade, apesar de ser uma variável importante e ter um valor de qualidade padronizado pela norma *ENplus* foi abordada apenas 5 vezes entre os trabalhos analisados na Tabela 12 e por isso não foi representada graficamente. Essa variável mede a resistência dos briquetes à vibrações, quedas, abrasões e outras ações decorrentes do seu manuseio e transporte (SETTE JÚNIOR *et al.*, 2017; WAHEED; AKOGUN, 2020).

Segundo a *ENplus* (2015), a durabilidade deve ser de pelo menos 97,5% para as classes A2 e A3 da norma, ou de 98% para a classe A1. O estudo de Raslavičius (2012) apresentou durabilidade de 95,6%, um pouco menor do que o valor padronizado. No entanto, a média geral encontrada entre os autores da Tabela 12 foi de 97,78%, atendendo aos valores de referência,

implicando em briquetes resistentes. Foi observado também, que os briquetes de maior durabilidade tendem a ser mais densos (RASLAVIČIUS, 2012; WAHEED; AKOGUN, 2020) e apresentar uma correlação logarítmica forte com a resistência à compressão (REJDAK *et al.*, 2019).

Densidade aparente

Dada a abrangência da variável densidade, os pesquisadores avaliaram seus briquetes e partículas de matéria-prima usando mais de um tipo de densidade. As de uso mais frequente são observados na Tabela 12, sendo a densidade aparente e a densidade simples, que é medida pela relação entre a massa do briquete e o seu volume (KPALO *et al.*, 2020a). A densidade granular ou densidade verdadeira é dada desconsiderando os vazios do material. Já a densidade aparente é a densidade que leva em consideração porosidade entre as partículas do material (GILVARI; DE JONG; SCHOTT, 2019).

A densidade aparente é uma das principais propriedades de avaliação da biomassa como um combustível sólido, que normalmente é aumentada com a densificação através de processos como a briquetagem (MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019). A elevação da variável viabiliza economicamente a utilização da biomassa como combustível sólido por reduzir os custos com transporte, armazenamento e manuseio (MUAZU; STEGEMANN, 2015; PRVULOVIC *et al.*, 2014; SETTE JÚNIOR *et al.*, 2017). Além disso, promove uma maior densidade energética dado o aumento na relação energia/volume em pellets e briquetes (KPALO *et al.*, 2020a).

Na Tabela 12, a densidade aparente (do inglês, bulk density-BD) dos briquetes é comparada com o valor de referência da norma ENplus, que tem como base os testes feitos segundo o ensaio da norma ISO 17828. No entanto, nem todos os trabalhos mediram a densidade dos briquetes segundo essa norma, que também pode ser usada para a biomassa não compactada. Ela consiste em despejar os briquetes em um recipiente de volume conhecido e medir seu peso para determinar a razão massa/volume, semelhante ao que foi feito nos trabalhos realizados por Khlifi *et al.* (2020) e Thoreson *et al.* (2014). Algumas das pesquisas ainda determinaram a densidade aparente pelo método de imersão dos briquetes em mercúrio, para determinar o volume deslocado e calcular a razão entre massa e volume (ARAÚJO *et al.*, 2016; MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019). Outras fizeram uso de paquímetros para medir as dimensões dos briquetes e assim calcular seu volume (DE OLIVEIRA MAIA *et al.*, 2018; DE OLIVEIRA *et al.*, 2017; S. MASULLO *et al.*, 2018). Apesar de suas diferenças, todos eles

avaliam a relação entre massa e volume, levando em conta a presença de poros ou vazios no material, que é o que define a densidade aparente.

Analisando o Gráfico 4, percebe-se que apenas um dos trabalhos apresentou densidade aparente menor do que 600 kg/m^3 , o mínimo estipulado pela norma *ENplus*. A baixa densidade de 190 kg/m^3 foi atribuída a grande quantidade de vazios dentro dos briquetes (THORESON *et al.*, 2014). A briquetagem ocorreu em uma máquina de princípio de acionamento não especificado, a uma pressão de 10,5 MPa e sem redução do tamanho das partículas, o que pode ter provocado expansão dos briquetes após a ejeção.

A maior densidade aparente de 1200 kg/m^3 foi obtida em uma prensa de princípio de acionamento hidráulico, a uma pressão de 150 MPa e aquecimento a temperatura de $38 \text{ }^\circ\text{C}$ (KHLIFI *et al.*, 2020). Os outros três estudos que alcançaram resultados elevados, superiores a 1000 kg/m^3 , utilizaram pressões de 8,27 a 14 MPa e temperatura de $120 \text{ }^\circ\text{C}$ (ARAÚJO *et al.*, 2016; MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019; SETTE JÚNIOR *et al.*, 2017). Dois desses trabalhos fizeram uso máquinas de acionamento hidráulico, enquanto o outro não especificou essa informação. Mendoza Martinez *et al.* (2019) atribuíram a maior densidade dos seus briquetes a alta taxa de compactação durante a briquetagem. Eles sugerem que briquetes produzidos com matéria prima de menor densidade inicial são mais facilmente densificados e requerem menor energia para tal.

Araújo *et al.* (2016), afirmam que a torrefação da biomassa teve maior influência sobre o aumento da densidade aparente dos briquetes, relacionando-se também com a menor higroscopicidade adquirida após o tratamento térmico. Esse comportamento está de acordo com Waheed e Akogun (2020), que observaram a influência da torrefação e do pré-condicionamento da água para o aumento da densidade simples dos briquetes. Outros autores como os de Kpalo *et al.* (2020a); Kumar e Chandrashekar (2020) e Thoreson *et al.* (2014) apontaram o aumento da umidade com um dos fatores que reduzem a densidade dos briquetes.

A depender da máquina utilizada na produção dos briquetes e dos parâmetros aplicados, é possível elevar a densidade da matéria-prima de 10 a 20 vezes (PANWAR; PRASAD; WASEWAR, 2011). A biomassa da palha da cana-de-açúcar passou de uma densidade de 280 kg/m^3 para aproximadamente 920 kg/m^3 de densidade aparente após 48 horas de sua densificação (MASULLO *et al.*, 2018). Já os resíduos da folha de bananeira, cuja densidade aparente é de 46 kg/m^3 alcançou o resultado de 990 kg/m^3 após a densificação (DE OLIVEIRA MAIA *et al.*, 2018). Ambos os trabalhos utilizaram prensas de princípio de funcionamento hidráulico. O Gráfico 4 reforça que todos os briquetes produzidos em máquinas acionadas por componentes hidráulicos alcançaram elevados valores de densidade aparente, superando

inclusive os 750 kg/m^3 limitados pela norma *ENplus*. O mesmo sucedeu no estudo de de Oliveira *et al.* (2017), produzindo os briquetes em uma extrusora de parafuso.

Resistência a compressão

A resistência a compressão é definida como a carga máxima de esmagamento que briquetes ou pellets suportam até o momento que antecede a falha (rachar ou quebrar). A carga na fratura é registrada em uma curva de tensão-deformação, reportando a resistência às forças compressivas. Esse teste tem o intuito de reproduzir o estresse compressivo sofrido durante o transporte e armazenamento em silos ou caixas, onde os briquetes ou pellets ficam amontoados (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009; MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019). Deste modo, entende-se que quanto maior for a resistência à compressão de um briquete, melhor sua qualidade para armazenamento e transporte.

Dada a sua relevância, a variável foi estudada na maioria dos trabalhos dispostos na Tabela 12, variando de 0,37 MPa a 41,19 MPa, resultando em uma média de 9,98 MPa. Para garantir que haja o mínimo de quebra no manuseio, armazenamento e transporte dos briquetes, a literatura recomenda uma resistência à compressão mínima de 2,56 MPa (OKOT; BILSBORROW; PHAN, 2018). Apesar de não ser um valor determinado por norma de padronização de qualidade, o mesmo foi utilizado como ponto de referência para analisar graficamente os demais resultados.

Como pode-se observar no Gráfico 5 os menores resultados de resistência à compressão (0,37 MPa) foram obtidos em máquinas manuais de princípio de funcionamento hidráulico. Também numa máquina manual, de funcionamento mecânico, foi obtido o segundo menor valor, igual 0,86 MPa. Ainda de acordo com o gráfico, 4 dos trabalhos que fizeram uso de briquetadeiras de acionamento hidráulico superaram os 2,56 MPa estipulados. Já o briquete que apresentou maior valor (41,19 MPa) para a variável de resposta foi obtido numa máquina extrusora de parafuso. Apesar do expressivo aumento da resistência a compressão obtido no briquete produzido em máquina de extrusora de parafuso, é necessário que mais trabalhos utilizando o mesmo princípio de funcionamento para briquetagem sejam analisados. Isso permitiria avaliar se esse fator é realmente diferencial para alcançar os maiores valores para a resistência a compressão.

Gráfico 4. Relação entre os valores individuais de densidade aparente com o princípio de funcionamento das máquinas de briquetagens.

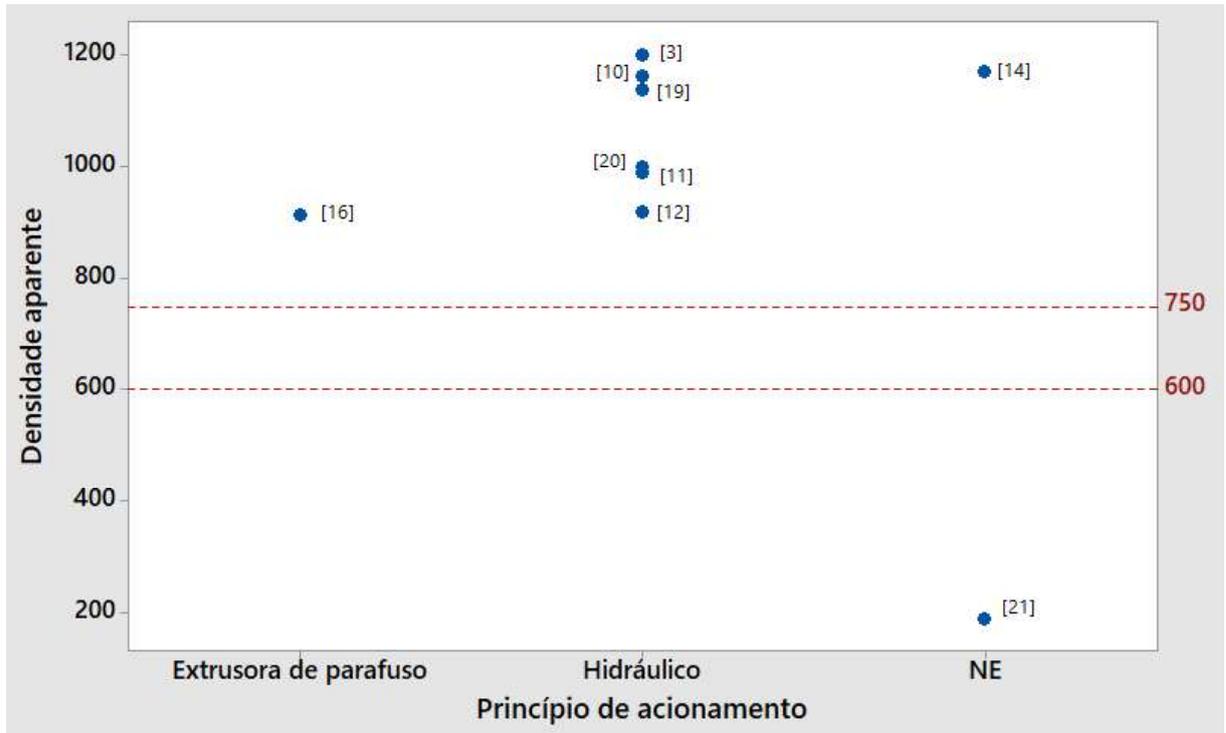


Gráfico 5. Relação entre os valores individuais de Resistência à compressão (MPa) com o princípio de funcionamento das máquinas de briquetagens.



Tabela 11. Principais variáveis de saída energéticas e de combustão para qualificar os briquetes.

Pesquisadores	Poder calorífico (MJ/kg)		Teor de cinzas (%)	Teor de umidade (%)	Material volátil (%)	Carbono fixo (%)	Densidade de energia (GJ/m ³)	Pré-tratamento térmico	Princípio de acionamento da briquetadeira
	Superior	Inferior							
Granado <i>et al.</i> (2021) ^[1]							15,7		Hidráulico
Kpalo <i>et al.</i> (2020a) ^[2]	17,78			9,24					Hidráulico
Khilifi <i>et al.</i> (2020) ^[3]	16,92		6,72	9,88	61,86	18,75			Hidráulico
Chungcharoen e Srisang (2020) ^[4]	21,78		2,40	3,10	70,00	20,62		Torreção da CNS (300°)	Parafuso acionada por motor
Kumar e Chandrashekar (2020) ^[5]	19,60	17,80	0,70	2,50	73,20	18,60	23,3		NE
Helwani <i>et al.</i> (2020) ^[6]	30,67		0,45	5,50	19,73	71,40		Carbonização (400°C e 2h)	Hidráulico
Morales-Máximo <i>et al.</i> (2020) ^[7]	18,30			11,52					Mecânico manual
Waheed e Akogun (2020) ^[8]	19,31		3,30	3,60	40,10	36,80		Torreção da CH e CP (200, 250 e 300°C)	Hidráulico
Gwenzi; Ncube e Rukuni (2020) ^[9]	33,80								Mecânico manual
Mendoza Martinez <i>et al.</i> (2019) ^[10]				9,50			19,90		Hidráulico
de Oliveira Maia <i>et al.</i> (2018) ^[11]	18,10		9,85	6,68	69,40	18,70	17,52		Hidráulico
Masullo <i>et al.</i> (2018) ^[12]				10,40					Hidráulico
Bazargan; Rough e Mckay (2018) ^[13]	31,29								NE
Sette Júnior <i>et al.</i> (2017) ^[14]							21,47		NE

Tabela 11. Continuação.

Pesquisadores	Poder calorífico (MJ/kg)		Teor de cinzas (%)	Teor de umidade (%)	Material volátil (%)	Carbono fixo (%)	Densidade de energia (GJ/m ³)	Pré-tratamento térmico	Princípio de acionamento da briquetadeira
	Superior	Inferior							
Garrido <i>et al.</i> (2017) ^[15]		20,80							Hidráulico
de Oliveira <i>et al.</i> (2017) ^[16]	23,101								Extrusora de parafuso
Nwabue, Unah e Itumoh (2017) ^[17]	21,45		27,93	3,23	17,23	42,41		Carbonização: biomassas (300 a 500°C) e resíduos plásticos (200 e 250°C)	Hidráulico
D. Padilla <i>et al.</i> (2016) ^[18]									Hidráulico
Araújo <i>et al.</i> (2016) ^[19]			0,42	9,60	83,39	15,92	24,79	Torrefação (180, 200 e 220°C, 1h)	Hidráulico
de Oliveira Maia <i>et al.</i> (2014) ^[20]	17,70		10,70	7,20	75,30	14,00	17,52		Hidráulico
Thoreson <i>et al.</i> (2014) ^[21]									NE
Raslavičius (2012) ^[22]	17,50		0,40						Hidráulico
Média aritmética	21,95	19,30	6,29	7,07	56,69	28,58	20,03		
DP	5,52	1,50	8,12	3,06	23,32	17,71	3,09		
ENplus A1		≥ 16,5	≤ 0,7	≤ 10,0					
ENplus A2		≥ 16,5	≤ 1,2	≤ 10,0					
ENplus A3		≥ 16,5	≤ 2,0	≤ 10,0					
EN 14961-2 ^[23]		≥ 18,82							
DIN 51731 ^[24]		≥ 17,50							

Fonte: Autores.

^[23] Martín-Ramos et al. (2020)^[24] Mohd Faizal et al. (2016)

NE- Não especificado;

DP- Desvio padrão.

Tabela 12. Principais variáveis físico-mecânicas de saída para qualificar os briquetes.

Pesquisadores	Densidades (Kg/m ³)		Resistência à compressão (MPa)	Resistência ao impacto (%)	Resistência a água (%)	Resistência à tração (kN/m ²)	Durabilidade (%)	Geração de finos (%)	Expansão longitudinal (%)	Absorção de água (%)	Princípio de acionamento da briquetadeira
	Densidade [m/v]	Aparente									
Granado <i>et al.</i> (2021) ^[1]	918,00		1,29			94,10			8,68		
Kpalo <i>et al.</i> (2020a) ^[2]	430,00		22,33	99,20	93,20						Hidráulico
Khlifi <i>et al.</i> (2020) ^[3]	3030,00	1200,00									Hidráulico
Kumar & Chandrashekar (2020) ^[5]	1250,00										NE
Helwani <i>et al.</i> (2020) ^[6]	1060,00		0,99								Hidráulico
Morales-Máximo <i>et al.</i> (2020) ^[7]	1240,00										Mecânico manual
Waheed & Akogun (2020) ^[8]	590,00		1,23			99,30					Hidráulico
Gwenzi; Ncube & Rukuni (2020) ^[9]	1300,00		0,86	99,00						3,00	Mecânico manual
Mendoza Martinez <i>et al.</i> (2019) ^[10]		1163,00									Hidráulico
de Oliveira Maia <i>et al.</i> (2018) ^[11]		990,00	19,80								Hidráulico
Masullo <i>et al.</i> (2018) ^[12]		920,00	0,37					4,00	15,00		Hidráulico
Bazargan; Rough & Mckay (2018) ^[13]				95,00	50,00	830,00					NE

Tabela 12. Continuação.

Pesquisadores	Densidades (Kg/m ³)		Resistência à compressão (MPa)	Resistência ao impacto (%)	Resistência a água (%)	Resistência à tração (kN/m ²)	Durabilidade (%)	Geração de finos (%)	Expansão longitudinal (%)	Absorção de água (%)	Princípio de acionamento da briquetadeira
	Aparente	[m/v]									
Sette Júnior <i>et al.</i> (2017) [14]	1170,00					2070,00	99,89				
Garrido <i>et al.</i> (2017) [15]	1190,00						100,00				Hidráulico
de Oliveira <i>et al.</i> (2017) [16]	913,00		41,19								Extrusora de parafuso
Nwabue, Unah & Itumoh (2017) [17]	1524,00										Hidráulico
D. Padilla <i>et al.</i> (2016) [18]			0,37					6,62	13,47		Hidráulico
Araújo <i>et al.</i> (2016) [19]	1140,00		16,00						3,00	1,00	Hidráulico
de Oliveira Maia <i>et al.</i> (2014) [20]	1000,00		5,30								Hidráulico
Thoreson <i>et al.</i> (2014) [21]	500,00		190,00								NE
Raslavičius (2012) [22]	861,00										Hidráulico
Arithmetic average	1157,75	965,11	9,98	97,73	71,60	1450,00	97,78	5,31	10,49	2,00	
DP	652,92	293,31	12,73	1,93	21,60	620,00	2,45	1,31	4,68	1,00	
ENplus A1	600 ≤ DA ≤ 750						≥ 98,0	< 1			
ENplus A2	601 ≤ DA ≤ 750						≥ 97,5	< 1			
ENplus A3	602 ≤ DA ≤ 750						≥ 97,5	< 1			

Fonte: Autores.

NE- Não especificado; DP- Desvio padrão; DA- Densidade aparente.

Tabela 13. Estudos conduzidos seguindo um DOE, modelos matemáticos e análises estatísticas para avaliar as variáveis de processo.

Referência	DOE	Análise estatística	Dados analisados	Softwares Estatísticos
Granado <i>et al.</i> (2021)	Não informado	Análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey	Avaliou-se os efeitos da pressão de densificação e tempo de prensagem sobre as propriedades. Os dados analisados estatisticamente foram a densidade relaxada, densidade energética, resistência a compressão e durabilidade.	R statistical software
Kpalo <i>et al.</i> (2020a)	Random sampling method	Análise de Variância (ANOVA) e Menor Diferença de Significância de Fisher (LSD)	As 5 diferentes composições dos briquetes e as propriedades de PCS, TU, densidade, resistência à compressão, resistência à água e índice de quebra foram testadas e replicadas quatro vezes, aleatoriamente.	Não informado
Chungcharoen e Srisang (2020)	Full factorial design ($2 \times 6 \times 2$)	Análise de variância (ANOVA) e teste HSD de Tukey	A influência do parâmetros operacionais (tamanhos de SNC, proporções mistas e velocidade) e suas interações sobre propriedades mecânicas e do combustível e da taxa de produção.	SPSS v.14
Helwani <i>et al.</i> (2020)	Response Surface Methods (RSM) with Central Composite Design (CCD)	Análise de variância (ANOVA), modelo de regressão e falta de ajuste	O efeito das variáveis de entrada (tamanho de partícula, composição de aglutinante e pressão de prensagem) sobre as repostas valor calorífico e a resistência à compressão dos briquetes.	Não informado
Waheed e Akogun (2020)	D-optimal crossed design	Análise de variância (ANOVA), análise de regressão, R^2 , R^2 adj, análise de pareto	Os índices físicos e de combustão dos briquetes, sendo eles a densidade, durabilidade, resistência a compressão, poder calorífico, TU, MV, CF e TC, além da proporção de combustível, Índice de combustibilidade e Inflamabilidade volátil.	Design Expert v.6.0.8
Gwenzi; Ncube e Rukuni (2020)	Experimento fatorial	Testes de Kolmogorov - Smirnov e Levene; e não paramétrico de Kruskal-Wallis, análise de variância (ANOVA), diferença mínima significativa (LSD) e teste t	Foram analisados o índice de quebra/resistência ao impacto, densidade, resistência à compressão, absorção de água e poder calorífico.	SPSS v.16
Mendoza Martinez <i>et al.</i> (2019)	Factorial design (5×5)	Análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey	Proporções de mistura de resíduos, cinco misturas de biomassas sobre as repostas: teor de umidade de equilíbrio, resistência a tração, densidade aparente e densidade de energia.	Statistica v.8.0 e programa R
Masullo <i>et al.</i> (2018)	Completely Randomized design (CRD)	Testes de Shapiro-Wilk e Box-cox. Análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey	Foram analisados os dados da caracterização química das biomassas (TU, MV, CF, TC), e os dados de análise física dos briquetes (TU e resistência a compressão).	R statistical software
Sette Júnior <i>et al.</i> (2017)	Completely Randomized design (CRD)	Análise de variância (ANOVA)	As médias, desvio padrão e os coeficientes de variação foram feitas para todas as variáveis. A ANOVA foi utilizada nos dados da análise imediata e PCS, densidade de energia da biomassa e do carvão.	Não informado
D. Padilla <i>et al.</i> (2016)	Não informado	Teste de Bartlett, análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey	Foram analisados o PCS, estabilidade dimensional (expansão longitudinal), resistência à compressão e geração de finos (friabilidade).	Statgraphics v.15.2.05 e Excel 2013
Thoreson <i>et al.</i> (2014)	Full factorial design	Análise de variância (ANOVA)	Avaliar os efeitos principais e as interações das variáveis de entrada sobre a densidade seca de partícula.	Minitab

Fonte: Elaboração própria

2.5 Modelagem e análises estatísticas dos experimentos

Ao longo deste trabalho é possível notar que algumas variáveis de entrada e de resposta são mais estudadas do que outras. No entanto, ainda são encontradas divergências entre as pesquisas quanto a influência de certas variáveis de processo sobre as respostas escolhidas. Isso está relacionado a diversos fatores como o tipo e máquina utilizada para briquetagem, a forma como os experimentos foram conduzidos, as matérias primas escolhidas e outros.

Tais variações indicam que não há um consenso quanto ao caminho ideal para a produção de briquetes. Uma maneira de identificar quais são os parâmetros de processo que resultam em melhores qualidades de briquetes é utilizando um *design* de experimentos (DOE - *design of experiments*), delimitado por modelos matemáticos e análises estatísticas para avaliar as variáveis. Na Tabela 13 pode-se observar alguns trabalhos que utilizaram esses artifícios para executar seus experimentos e analisar seus dados.

Pela Tabela 13, é possível observar que 100% dos trabalhos utilizaram a análise de variância (ANOVA) de seus dados. Em 5 dos estudos também foram realizados teste de Tukey, sendo essas, ferramentas importantes para análise de dados estatísticos. Os planejamentos experimentais dos trabalhos seguiram modelagens como as de modelos fatoriais e metodologia de superfície de resposta (RSM - *response surface methodology*). O uso dessas metodologias aplicadas a otimização de resultados pode ainda auxiliar na escolha ideal das condições de processo, reduzindo custos capitais, de manutenção e operacionais (GWENZI; NCUBE; RUKUNI, 2020).

2.6 Conclusão

A biomassa tem alto potencial de produção de energia quando submetida a técnicas de densificação como a briquetagem, promovendo uma destinação nobre a diversos materiais incluindo resíduos florestais, agrícolas ou urbanos. Com o intuito de ampliar os conhecimentos acerca do processo de briquetagem este trabalho apresentou os principais parâmetros de entrada do processo. Ademais também foram analisadas as propriedades físicas e energéticas para qualificar os briquetes. Por meio desta revisão da literatura, e da análise das variáveis de entrada e saída do processo de briquetagem foi possível perceber que:

- As variáveis de entrada que foram estudadas mais vezes foram: granulometria das partículas de biomassa (95%), pressão de compactação (73%), teor de umidade da matéria-prima

(68%), tempo de compactação (59%), proporção de aglutinante (50%), proporção de biomassa a compor os briquetes (45%) e temperatura (32%);

- As variáveis de resposta mais utilizadas para classificar os briquetes foram: poder calorífico superior, teor de umidade, teor de cinzas, densidade e resistência à compressão;

A partir da análise dos níveis de cada variável de processo, associados aos seus resultados depreende-se que:

- O teor de umidade inicial das matérias-primas variou de 8 a 12%;
- A temperatura de briquetagem mais utilizada entre os briquetes foi 120°C;
- A maioria dos trabalhos produzem seus briquetes a pressões intermediárias. Percebe-se também que maiores valores de pressão não necessariamente são os ideais para a maximização da qualidade física dos briquetes;
- Para a obtenção de um maior poder calorífico final dos briquetes, é preferível que os mesmos sejam compostos em maior parte pela matéria-prima de maior poder calorífico inicial;
- Em linhas gerais, partículas de menor granulometria promovem ligações mais fortes entre partículas, resultando em briquetes mais resistentes. No entanto, a granulometria ideal varia de acordo com a matéria-prima utilizada e o processo de briquetagem;
- A presença de aglutinante tem influência sobre as propriedades físico-mecânicas e energéticas dos briquetes. Sua utilização está relacionada aos processos realizados a baixa temperatura e pressão. O aglutinante mais utilizado foi o amido;
- Briquetes com densidade aparente superior ao limite de 750 kg/m³, estipulado pela norma de qualidade ENplus podem ser produzidos em máquinas de princípio de acionamento hidráulico;
- Os menores valores de resistência a compressão foram obtidos em máquinas manuais (hidráulica ou mecânica).

Para a análise de dados, a ANOVA e teste de Tukey são as ferramentas estatísticas mais utilizadas entre os trabalhos. Quanto ao desenho dos experimentos, os modelos fatoriais são utilizados com maior frequência.

As condições dos parâmetros de briquetagem, bem como composição dos briquetes, variaram de acordo com diversos fatores, tais como a tecnologia disponível e as matérias-primas estudadas. O mesmo foi observado quanto as propriedades físicas e energéticas que qualificam os briquetes. Deste modo, entende-se que as características, parâmetros e níveis de processo

ideais para produção de briquetes variam entre as pesquisas, fazendo-se necessário o planejamento de experimentos e modelagens matemáticas que possibilitem uma melhor investigação dos resultados.

2.7 Recomendações para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a análise de um maior número trabalhos com diferentes princípios de acionamento das máquinas de briquetagem. Isso permitiria uma comparação mais clara entre os resultados obtidos para os diversos tipos de tecnologias. Do ponto de vista experimental, percebe-se que poucos trabalhos utilizaram ferramentas de otimização de processo. Logo, os autores sugerem que os experimentos sigam planejamentos experimentais para lidar com múltiplas variáveis e realizem estudos de otimização.

2.8 Referências

ANTMEN, Z. F. EXPLOITATION OF PEANUT AND HAZELNUT SHELLS AS AGRICULTURAL INDUSTRIAL WASTES FOR SOLID BIOFUEL PRODUCTION. **FRESENIUS ENVIRONMENTAL BULLETIN**, [S. l.], v. 28, p. 2340–2347, 2019.

ANTWI-BOASIAGO, C.; ACHEAMPONG, B. B. Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 85, p. 144–152, 2016. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.12.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.006>.

ARANSIOLA, E. F.; OYEWUSI, T. F.; OSUNBITAN, J. A.; OGUNJIMI, L. A. O. Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized corncob briquette. **Energy Reports**, [S. l.], v. 5, p. 909–918, 2019. DOI: 10.1016/j.egy.2019.07.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.07.011>.

ARAÚJO, Solange; BOAS, Mariana Almeida Vilas; NEIVA, Duarte Miranda; DE CASSIA CARNEIRO, Angélica; VITAL, Benedito; BREGUEZ, Marcelino; PEREIRA, Helena. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 90, p. 181–186, 2016. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.04.007.

BAEYENS, Jan; KANG, Qian; APPELS, Lise; DEWIL, Raf; LV, Yongqin; TAN, Tianwei. Challenges and opportunities in improving the production of bio-ethanol. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S. l.], v. 47, p. 60–88, 2015. DOI: 10.1016/j.pecs.2014.10.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2014.10.003>.

BAZARGAN, Alireza; ROUGH, Sarah L.; MCKAY, Gordon. Fine tuning of process parameters for improving briquette production from palm kernel shell gasification waste. **Environmental Technology**, [S. l.], v. 39, n. 7, p. 931–938, 2018. DOI: 10.1080/09593330.2017.1317835. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1317835>.

BREYER, Christian; HEINONEN, Sirkka; RUOTSALAINEN, Juho. New consciousness: A societal and energetic vision for rebalancing humankind within the limits of planet Earth. **Technological Forecasting and Social Change**, [S. l.], v. 114, p. 7–15, 2017. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.06.029. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2016.06.029>.

BRIDGWATER, Tony. Biomass for energy. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [S. l.], v. 86, n. 12, p. 1755–1768, 2006. DOI: 10.1002/jsfa.2605. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/jsfa.2605>.

CHALOUPKOVÁ, Veronika; IVANOVA, Tatiana; EKRT, Ondřej; KABUTEY, Abraham; HERÁK, David. Determination of Particle Size and Distribution through Image-Based Macroscopic Analysis of the Structure of Biomass Briquettes. **Energies**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 331, 2018. DOI: 10.3390/en11020331. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1073/11/2/331>.

CHUNG, Frank H. Unified theory and guidelines on adhesion. **Journal of Applied Polymer Science**, [S. l.], v. 42, n. 5, p. 1319–1331, 1991. DOI: 10.1002/app.1991.070420515.

CHUNGCHAROEN, Thatchapol; SRISANG, Naruebodee. Preparation and characterization of fuel briquettes made from dual agricultural waste: Cashew nut shells and areca nuts. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 256, p. 120434, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120434.

D. PADILLA, Elias Ricardo; S. A. PIRES, Isis Cristina; M. YAMAJI, Fabio; M. FANDIÑO, Jorge Mario. Production and Physical-Mechanical Characterization of Briquettes from Coconut Fiber and Sugarcane Straw. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 8, n. 5, p. 1334–1346, 2016. DOI: 10.21577/1984-6835.20160095. Disponível em: http://rvq.s bq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=647&nomeArquivo=v8n5a07.pdf.

DE OLIVEIRA MAIA, Bianca G.; DE OLIVEIRA, Antonio P. N.; DE OLIVEIRA, Therezinha M. N.; MARANGONI, Cintia; SOUZA, Ozair; SELLIN, Noeli. Characterization and production of banana crop and rice processing waste briquettes. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, [S. l.], v. 37, n. 4, p. 1266–1273, 2018. DOI: 10.1002/ep.12798. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/ep.12798>.

DE OLIVEIRA MAIA, Bianca G.; SOUZA, Ozair; MARANGONI, Cintia; HOTZA, Dachamir; DE OLIVEIRA, Antonio Pedro N.; SELLIN, Noeli. Production and characterization of fuel briquettes from banana leaves waste. **Chemical Engineering Transactions**, [S. l.], v. 37, p. 439–444, 2014. DOI: 10.3303/CET1437074.

DE OLIVEIRA, Ricardo Sonsim; PALÁCIO, Soraya Moreno; DA SILVA, Edson Antonio; MARIANI, Filipe Quadros; REINEHR, Thiago Olinek. Briquettes production for use as power source for combustion using charcoal thin waste and sanitary sewage sludge. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 24, n. 11, p. 10778–10785, 2017. DOI:

10.1007/s11356-017-8695-0. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11356-017-8695-0>.

DINESHA, P.; KUMAR, Shiva; ROSEN, Marc A. Biomass Briquettes as an Alternative Fuel: A Comprehensive Review. **Energy Technology**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 1801011, 2019. DOI: 10.1002/ente.201801011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ente.201801011>.

DUCA, D.; RIVA, G.; FOPPA PEDRETTI, E.; TOSCANO, G. Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. **Fuel**, [S. l.], v. 135, p. 9–14, 2014. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.06.042. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.042>.

EL-DESOUKY, Mohamed G.; KHALIL, Muhammad A.; EL-BINDARY, Ashraf A.; EL-BINDARY, Mohamed A. Biological, Biochemical and Thermochemical Techniques for Biofuel Production: an Updated Review. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 3034–3054, 2021. DOI: 10.33263/BRIAC123.30343054. Disponível em: <https://biointerfaceresearch.com/wp-content/uploads/2021/08/20695837123.30343054.pdf>.

ENPLUS. **EN plus For Wood Pellets EN plus Handbook Part 6: Schedule of fees**, 2015. FAIZAL, Hasan Mohad; RAHMAN, Mohd Rosdzimin Abdul; LATIFF, Zulkarnain Abdul. REVIEW ON DENSIFICATION OF PALM RESIDUES AS A TECHNIQUE FOR BIOMASS ENERGY UTILIZATION. **Jurnal Teknologi**, [S. l.], v. 2, p. 31–39, 2016.

FEBBI, Paolo; MENESATTI, Paolo; COSTA, Corrado; PARI, Luigi; CECCHINI, Massimo. Automated determination of poplar chip size distribution based on combined image and multivariate analyses. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 73, p. 1–10, 2015. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.12.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.12.001>.

FELFLI, Felix Fonseca; MESA P, Juan M.; ROCHA, José Dilcio; FILIPPETTO, Daniele; LUENGO, Carlos A.; PIPPO, Walfrido Alonso. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 236–242, 2011. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.08.011.

FERNANDES, Eveline Ribas Kasper; MARANGONI, Cintia; SOUZA, Ozair; SELLIN, Noeli. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 75, p. 603–608, 2013. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.08.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.008>.

FRANCIK, Sławomir; KNAPCZYK, Adrian; KNAPCZYK, Artur; FRANCIK, Renata. Decision Support System for the Production of Miscanthus and Willow Briquettes. **Energies**, [S. l.], v. 13, n. 6, p. 1364, 2020. DOI: 10.3390/en13061364.

GADO, Ibrahim H.; OUIHINGA, Salifou K.; DAHO, Tizane; YONLI, Arsène H.; SOUGOTI, Moussa; KOULIDIATI, Jean. Characterization of Briquettes Coming From Compaction of Paper and Cardboard Waste at Low and Medium Pressures. **Waste and Biomass Valorization**, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 725–731, 2014. DOI: 10.1007/s12649-013-9282-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12649-013-9282-3>.

GARRIDO, Maria Angeles; CONESA, Juan A.; GARCIA, Maria Dolores. Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic Wastes. **Energies**, [S. l.], v. 10, n. 7, p. 850, 2017. DOI: 10.3390/en10070850. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/850>.

GILBERT, P.; RYU, C.; SHARIFI, V.; SWITENBANK, J. Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. **Fuel**, [S. l.], v. 88, n. 8, p. 1491–1497, 2009. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.03.015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.03.015>.

GILVARI, Hamid; DE JONG, Wiebren; SCHOTT, Dingena L. Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors - A review. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 120, n. November 2018, p. 117–134, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.11.013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096195341830309X>.

GRANADO, Marcos Paulo Patta; SUHOGUSOFF, Yuri Valentinovich Machado; SANTOS, Luis Ricardo Oliveira; YAMAJI, Fabio Minoru; DE CONTI, Andrea Cressoni. Effects of pressure densification on strength and properties of cassava waste briquettes. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 167, p. 306–312, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2020.11.087. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.087>.

GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. Biomass Briquetting : Technology and Pratices.Regional wood energy development program in Asia, field document no. 46. Bangkok, Thailand: Food and Agriculture Organization of the United Nations; [S. l.], n. 46, 1996.

GUO, Qiang; CHEN, Xueli; LIU, Haifeng. Experimental research on shape and size distribution of biomass particle. **Fuel**, [S. l.], v. 94, p. 551–555, 2012. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.11.041. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.041>.

GWENZI, Willis; NCUBE, Rumbidzai S.; RUKUNI, Tungamirai. Development, properties and potential applications of high-energy fuel briquettes incorporating coal dust, biowastes and post-consumer plastics. **SN Applied Sciences**, [S. l.], v. 2, n. 6, p. 1006, 2020. DOI: 10.1007/s42452-020-2799-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2799-8>.

HELWANI, Zuchra et al. Alternative Briquette Material Made from Palm Stem Biomass Mediated by Glycerol Crude of Biodiesel Byproducts as a Natural Adhesive. **Processes**, [S. l.], v. 8, n. 7, p. 777, 2020. DOI: 10.3390/pr8070777. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/7/777>.

IFTIKHAR, Maira; ASGHAR, Anam; RAMZAN, Naveed; SAJJADI, Baharak; CHEN, Weiyin. Biomass densification: Effect of cow dung on the physicochemical properties of wheat straw and rice husk based biomass pellets. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 122, n. January, p. 1–16, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.01.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.005>.

IVANOVA, Tatiana; MUNTEAN, Alexandru; LHAVRLAND, Bohumi; HUTLA, Petr. Quality assessment of solid biofuel made of sweet sorghum biomass. **BIO Web of Conferences**, [S. l.], v. 10, p. 02007, 2018. DOI: 10.1051/bioconf/20181002007. Disponível em: <https://www.bio-conferences.org/10.1051/bioconf/20181002007>.

KALIYAN, Nalladurai; MOREY, R. Vance. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 101, n. 3, p. 1082–1090, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.08.064. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>.

KALIYAN, Nalladurai; VANCE MOREY, R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 337–359, 2009. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.08.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>.

KHLIFI, Saaida; LAJILI, Marzouk; BELGHITH, Saoussen; MEZLINI, Salah; TABET, Fouzi; JEGUIRIM, Mejdí. Briquettes Production from Olive Mill Waste under Optimal Temperature and Pressure Conditions: Physico-Chemical and Mechanical Characterizations. **Energies**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 1214, 2020. DOI: 10.3390/en13051214. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/5/1214>.

KPALO, Sunday Yusuf; ZAINUDDIN, Mohamad Faiz; MANAF, Latifah Abd; ROSLAN, Ahmad Muhaimin. Production and Characterization of Hybrid Briquettes from Corncobs and Oil Palm Trunk Bark under a Low Pressure Densification Technique. **Sustainability**, [S. l.], v. 12, n. 6, p. 2468, 2020. a. DOI: 10.3390/su12062468. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/6/2468>.

KPALO, Sunday Yusuf; ZAINUDDIN, Mohamad Faiz; MANAF, Latifah Abd; ROSLAN, Ahmad Muhaimin. A Review of Technical and Economic Aspects of Biomass Briquetting. **Sustainability**, [S. l.], v. 12, n. 11, p. 4609, 2020. b. DOI: 10.3390/su12114609. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/11/4609>.

KRIŽAN, Peter; MATÚ, Miloš; ŠOOŠ, Ľubomír; BENIAK, Juraj. Behavior of Beech Sawdust during Densification into a Solid Biofuel. **Energies**, [S. l.], v. 8, n. 7, p. 6382–6398, 2015. DOI: 10.3390/en8076382. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/7/6382>.

KUMAR, Ritesh; CHANDRASHEKAR, N. Production and characterization of briquettes from invasive forest weeds: Lantana camara and Prosopis juliflora. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 158–164, 2020. DOI: 10.1007/s13196-020-00268-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13196-020-00268-8>.

KZ KU AHMADA, KHAZI Q SAZALIA, A. .. Kamarolzamanb. ScienceDirect Characterization of fuel briquettes from banana tree waste. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 5, n. 10, p. 21744–21752, 2018. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.07.027. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.027>.

LEI, Tingzhou; WANG, Zhiwei; LI, Zaifeng; XU, Jiufeng; HE, Xiaofeng; ZHU, Jinling. A biomass briquetting fuel machine and its large-scale operation system. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 013107, 2013. DOI: 10.1063/1.4781089. Disponível em: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4781089>.

LELA, B.; BARIŠIĆ, M.; NIŽETIĆ, S. Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical–mechanical and thermal characteristics. **Waste Management**, [S. l.], v. 47, p. 236–245, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.10.035.

LÜ, Jing; SHEAHAN, Con; FU, Pengcheng. Metabolic engineering of algae for fourth generation biofuels production. **Energy & Environmental Science**, [S. l.], v. 4, n. 7, p. 2451, 2011. DOI: 10.1039/c0ee00593b. Disponível em: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c0ee00593b>.

MANI, Sudhagar; TABIL, Lope G.; SOKHANSANJ, Shahab. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 30, n. 7, p. 648–654, 2006. DOI: 10.1016/j.biombioe.2005.01.004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953406000250>.

MARTÍN-RAMOS, Pablo; MARTÍN-GIL, Jesús; GÓMEZ-GARCÍA, Daniel; CUCHÍ-OTERINO, José Antonio. On the Physicochemical Characteristics and Applications of an “Undesirable” Pyrenean Thorny Cushion Dwarf: *Echinopartum horridum* (Vahl) Roth. **Plants**, [S. l.], v. 9, n. 9, p. 1180, 2020. DOI: 10.3390/plants9091180. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/9/9/1180>.

MATA, Teresa M.; MARTINS, António A.; CAETANO, Nidia S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 217–232, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109001646>.

MENDOZA MARTINEZ, Clara Lisseth; SERMYAGINA, Ekaterina; DE CASSIA OLIVEIRA CARNEIRO, Angélica; VAKKILAINEN, Esa; CARDOSO, Marcelo. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 123, n. January, p. 70–77, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.02.013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.013>.

MOHD FAIZAL, Hasan; M. NAZRI, M. Shafiq; RAHMAN, Md Mizanur; SYAHRULLAIL, S.; LATIFF, Z. A. DEVELOPMENT OF PALM BIOMASS BRIQUETTES WITH POLYETHYLENE PLASTIC WASTE ADDITION. **Jurnal Teknologi**, [S. l.], v. 78, n. 9–2, p. 69–75, 2016. DOI: 10.11113/jt.v78.9657. Disponível em: <https://journals.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/9657>.

MORALES-MÁXIMO, M.; RUÍZ-GARCÍA, V. M.; LÓPEZ-SOSA, L. B.; RUTIAGA-QUIÑONES, J. G. Exploitation of Wood Waste of *Pinus* spp for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 10, n. 8, p. 2933, 2020. DOI: 10.3390/app10082933. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/8/2933>.

MUAZU, Rukayya I.; STEGEMANN, Julia A. Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 133, p. 137–145, 2015. DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.01.022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.022>.

NAIK, S. N.; GOUD, Vaibhav V.; ROUT, Prasant K.; DALAI, Ajay K. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 578–597, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2009.10.003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109002342>.

NATI, Carla; SPINELLI, Raffaele; FABBRI, Piergiorgio. Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 34, n. 5, p. 583–587, 2010. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.01.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.005>.

NAVALTA, Carl John Louie G.; BANAAG, Kristian Gregg C.; RABOY, Von Adrian O.; GO, Alchris W.; CABATINGAN, Luis K.; JU, Yi-Hsu. Solid fuel from Co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 147, p. 1941–1958, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.129. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.129>.

NIÑO, Andrés; ARZOLA, Nelson; ARAQUE, Oscar. Experimental Study on the Mechanical Properties of Biomass Briquettes from a Mixture of Rice Husk and Pine Sawdust. **Energies**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 1060, 2020. DOI: 10.3390/en13051060. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/5/1060>.

NUNES, Eduardo Z.; ANDRADE, Azarias M. De; DIAS JÚNIOR, Ananias F. Production of briquettes using coconut and eucalyptus wastes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 23, n. 11, p. 883–888, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n11p883-888. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662019001100883&tlng=en.

NUREK, Tomasz; GENDEK, Arkadiusz; ROMAN, Kamil; DĄBROWSKA, Magdalena. The effect of temperature and moisture on the chosen parameters of briquettes made of shredded logging residues. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 130, n. August, p. 105368, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105368. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105368>.

NWABUE, F. I.; UNAH, U.; ITUMOH, E. J. Production and characterization of smokeless bio-coal briquettes incorporating plastic waste materials. **Environmental Technology & Innovation**, [S. l.], v. 8, p. 233–245, 2017. DOI: 10.1016/j.eti.2017.02.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2017.02.008>.

OBI, Okey Francis. Effect of briquetting temperature on the properties of biomass briquettes. **African Journal of Science, Technology, Innovation and Development**, [S. l.], v. 7, n. 6, p. 386–394, 2015. DOI: 10.1080/20421338.2015.1096508. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20421338.2015.1096508>.

OKOT, David K.; BILSBORROW, Paul E.; PHAN, Anh N. Effects of operating parameters on maize COB briquette quality. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 112, n. October 2017, p. 61–72, 2018. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.02.015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.015>.

OKOT, David K.; BILSBORROW, Paul E.; PHAN, Anh N. Briquetting characteristics of bean straw-maize cob blend. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 126, n. May, p. 150–158, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.05.009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.009>.

OKWU, Modestus O.; SAMUEL, Olusegun D. Adapted hyacinth briquetting machine for mass production of briquettes. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and**

Environmental Effects, [S. l.], v. 40, n. 23, p. 2853–2866, 2018. DOI: 10.1080/15567036.2018.1512681. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1512681>.

OLADEJI, J. .. Theoretical aspects of biomass briquetting: A Review Study. **Journal of Energy Technologies and Policy**, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 72–82, 2015. Disponível em: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JETP/article/view/20797>.

ONIFADE, Stephen Taiwo; ALOLA, Andrew Adewale; ERDOĞAN, Savaş; ACET, Hakan. Environmental aspect of energy transition and urbanization in the OPEC member states. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-12181-1.

PANG, Longlong; YANG, Yuzhong; WU, Liyun; WANG, Fei; MENG, Han. Effect of Particle Sizes on the Physical and Mechanical Properties of Briquettes. **Energies**, [S. l.], v. 12, n. 19, p. 3618, 2019. DOI: 10.3390/en12193618. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/19/3618>.

PANWAR, Varun; PRASAD, B.; WASEWAR, Kailas L. Biomass Residue Briquetting and Characterization. **Journal of Energy Engineering**, [S. l.], v. 137, n. 2, p. 108–114, 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000040. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29EY.1943-7897.0000040>.

PRVULOVIC, Slavica; GLUVAKOV, Zorica; TOLMAC, Jasna; TOLMAC, Dragiša; MATIC, Marija; BRKIC, Miladin. Methods for Determination of Biomass Energy Pellet Quality. **Energy & Fuels**, [S. l.], v. 28, n. 3, p. 2013–2018, 2014. DOI: 10.1021/ef402361k. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef402361k>.

QUIJERA, José Antonio; ALRIOLS, María González; LABIDI, Jalel. Integration of a solar thermal system in a dairy process. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 36, n. 6, p. 1843–1853, 2011. DOI: 10.1016/j.renene.2010.11.029. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.029>.

RASLAVIČIUS, Laurencas. Characterization of the woody cutting waste briquettes containing absorbed glycerol. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 45, p. 144–151, 2012. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.05.028. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.028>.

REJDAK, Michał; ROBAK, Jolanta; CZARDYBON, Agata; IGNASIAK, Karina; FUDAŁA, Piotr. 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**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 31, 2019. DOI: 10.3390/min10010031. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/10/1/31>.

S. MASULLO, Liamara; S. ALESI, Leticia; M. C. QUADROS, Taruhim; A. DA SILVA, Diego; A. DE PÁDUA, Franciane; M. YAMAJI, Fabio. Use of Blends Containing Different Proportions of Straw and Sugarcane Bagasse for the Production of Briquettes. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 641–654, 2018. DOI: 10.21577/1984-6835.20180047. Disponível em: http://rvq.s bq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=911&nomeArquivo=v10n3a15.pdf.

SECO, A.; ESPUELAS, S.; MARCELINO, S.; ECHEVERRÍA, A. M.; PRIETO, E. Characterization of Biomass Briquettes from Spent Coffee Grounds and Xanthan Gum Using Low Pressure and Temperature. **BioEnergy Research**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 369–377, 2019. DOI: 10.1007/s12155-019-10069-8. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12155-019-10069-8>.

SETTE, Carlos Roberto; HANSTED, Ana Larissa Santiago; NOVAES, Evandro; LIMA, Pedro Augusto Fonseca e.; RODRIGUES, Ana Claudia; SANTOS, Deborah Rodrigues de Souza; YAMAJI, Fabio Minoru. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 122, n. June, p. 209–213, 2018. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.05.057. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.057>.

SETTE JÚNIOR, Carlos Roberto; LIMA, Pedro Augusto Fonseca; LOPES, Domingos Manuel Mendes; BARBOSA, Pedro Vilela Gondim; CONEGLIAN, Ademilson; ALMEIDA, Rogério de Araújo. Characterization of biomass, charcoal and briquette of *Phyllostachys aurea* Carr. ex A. & C. Rivière. **Scientia Forestalis**, [S. l.], v. 45, n. 116, p. 619–628, 2017. DOI: 10.18671/scifor.v45n116.03. Disponível em: <http://www.ipecf.br/publicacoes/scientia/leitura.asp?Article=03&Number=116>.

SETTER, Carine; ATAÍDE, Carlos Henrique; MENDES, Rafael Farinassi; DE OLIVEIRA, Tiago José Pires. Influence of particle size on the physico-mechanical and energy properties of briquettes produced with coffee husks. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 28, n. 7, p. 8215–8223, 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-11124-0. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11356-020-11124-0>.

SETTER, Carine; SANCHEZ COSTA, Karen Letícia; PIRES DE OLIVEIRA, Tiago José; FARINASSI MENDES, Rafael. The effects of kraft lignin on the physicommechanical quality of briquettes produced with sugarcane bagasse and on the characteristics of the bio-oil obtained via slow pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 210, n. April, p. 106561, 2020. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106561. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106561>.

SONG, Xiaobing; ZHANG, Shouyu; WU, Yuanmo; CAO, Zhongyao. Investigation on the properties of the bio-briquette fuel prepared from hydrothermal pretreated cotton stalk and wood sawdust. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 151, p. 184–191, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.11.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.003>.

TCHAPDA, Aime; PISUPATI, Sarma. A Review of Thermal Co-Conversion of Coal and Biomass/Waste. **Energies**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 1098–1148, 2014. DOI: 10.3390/en7031098. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1073/7/3/1098>.

THORESON, Curtis; WEBSTER, Keith; DARR, Matthew; KAPLER, Emily. Investigation of Process Variables in the Densification of Corn Stover Briquettes. **Energies**, [S. l.], v. 7, n. 6, p. 4019–4032, 2014. DOI: 10.3390/en7064019. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1073/7/6/4019>.

TUMULURU, Jaya Shankar; FILLERUP, Eric. Briquetting characteristics of woody and herbaceous biomass blends: Impact on physical properties, chemical composition, and calorific value. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [S. l.], v. 14, n. 5, p. 1105–1124, 2020. DOI: 10.1002/bbb.2121. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bbb.2121>.

TUMULURU, Jaya Shankar; WRIGHT, Christopher T.; HESS, J. Richard; KENNEY, Kevin L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [S. l.], v. 5, n. 6, p. 683–707, 2011. DOI: 10.1002/bbb.324. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/bbb.324>.

VERMA, V. K.; BRAM, S.; DE RUYCK, J. Small scale biomass heating systems: Standards, quality labelling and market driving factors – An EU outlook. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 33, n. 10, p. 1393–1402, 2009. DOI: 10.1016/j.biombioe.2009.06.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.06.002>.

WAHEED, Mufutau Adekojo; AKOGUN, Opeyemi Ayodeji. Quality enhancement of fuel briquette from cornhusk and cassava peel blends for co-firing in coal thermal plant. **International Journal of Energy Research**, [S. l.], n. May, p. er.5865, 2020. DOI: 10.1002/er.5865. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.5865>.

WONGSIRIAMNUAY, Thanasit; TIPPAYAWONG, Nakorn. Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets. **Biosystems Engineering**, [S. l.], v. 139, p. 111–120, 2015. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.08.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.009>.

ZHANG, Jing; GUO, Yuming. Physical properties of solid fuel briquettes made from *Caragana korshinskii* Kom. **Powder Technology**, [S. l.], v. 256, p. 293–299, 2014. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.02.025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.02.025>.

3. ARTIGO 2 – OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE BRIQUETAGEM DA CAMA DE AVIÁRIO E DA MADEIRA DA PODA

RESUMO

A madeira da poda e a cama de aviário são resíduos sólidos com potencial para geração de energia por meio da conversão das biomassas em briquetes. Um processo bem modelado de briquetagem encontra a relação ideal entre as variáveis de controle e as variáveis de resposta. Desse modo, o presente trabalho investigou o potencial energético das biomassas e a relação das variáveis de entrada: carga de compressão tempo de compactação, granulometria e proporção de massa de cama de aviário e madeira da poda sobre as variáveis de resposta: poder calorífico superior (PCS), densidade (D) e teor de umidade (TU) dos briquetes. O processo de modelagem partiu de um fatorial fracionado (1/2) para determinação dos fatores relevantes para a briquetagem, progredindo para um do modelo fatorial completo e adição de pontos centrais e axiais segundo projeto composto central (CCD), fazendo uso da metodologia de superfície de resposta (RSM) e regressão linear múltipla (RLM). Todo o modelo foi validado segundo testes como análise de variância (ANOVA), coeficientes de determinação ajustável (R^2_{adj}), normalidade dos resíduos, observações influentes e falta de ajustes (Lack-of-Fit). A otimização multiobjetivo do processo foi realizada por meio do Método do Critério Global Normalizado (MCGN) aplicando o algoritmo Gradiente Reduzido Generalizado (GRG). A partir dos resultados experimentais o maior PCS obtido foi igual a 24,177MJ/kg, a maior densidade encontrada foi de 1252,02kg/m³ e o menor TU foi de 9,05%. Pelo método de otimização, para que o PCS e a densidade sejam maximizados simultaneamente, juntamente com a minimização do TU, a relação ideal de biomassa de cama de aviário e madeira da poda é de 50:50, com a granulometria obtida pela peneira de 30 mesh, sendo aplicada uma carga de 10 t, com um tempo de compactação de 194 s. Nessas condições de processo espera-se encontrar um PCS de cerca de 22,753MJ/kg, densidade de 1180,44kg/m³ e TU de 9,159%.

Palavras-chave: resíduos urbanos, cama de ave, densificação, otimização multiobjetivo.

ABSTRACT

Pruning wood and poultry litter are solid waste with potential for energy generation through the conversion of biomass into briquettes. A well-modeled briquetting process finds the ideal relationship between control variables and response variables. Thus, the present work investigated the energy potential of biomass and the relationship of input variables: compression load, compaction time, granulometry and proportion of poultry litter mass and pruning wood (0:60; 15:45; 30:30; 45:15; 60:0) on the response variables: Higher Heating Value (HHV), density (D) and moisture content (MC) of the briquettes. The modeling process started from a fractional factorial (1/2) to determine the relevant factors for briquetting, progressing to a full factorial model and addition of central and axial points according to central composite design (CCD), making use of the methodology of response surface (RSM) and multiple linear regression (MLR). The entire model was validated according to tests such as analysis of variance (ANOVA), adjustable coefficients of determination (R^2_{adj}), normality of residuals, influential observations and lack of fit (Lack-of-Fit). The multi-objective optimization of the process was performed using the Global Normalized Criterion Method (MCGN) applying the Generalized Reduced Gradient (GRG) algorithm. From the experimental results, the highest HHV obtained was equal to 24.177MJ/kg, the highest density found was 1252.02kg/m³ and the lowest MC was 9.05%. By the optimization method, so that the HHV

and density are maximized simultaneously, together with the minimization of MC, the ideal ratio of poultry litter biomass and pruning wood is 50:50, with the granulometry obtained by the sieve of 30 mesh, with a load of 10 t being applied, with a compaction time of 194 s. Under these process conditions, it is expected to find a HHV of about 22.753MJ/kg, density of 1180.44kg/m³ and MC of 9.159%.

Keywords: urban waste, bird litter, densification, multi-objective optimization.

3.1 Introdução

Todos os anos toneladas de resíduos sólidos urbanos e agrícolas são gerados, de modo que nem sempre ocorre uma destinação correta para estes. No entanto, esses recursos biológicos possuem potencial para uma destinação mais nobre através de seu reuso como fonte de bioenergia. Diante dessa situação, diversos países passaram a investir em tecnologia e recursos de gerenciamento de resíduos urbanos e agrícolas, trazendo ganhos para o meio ambiente e para a sociedade (ABBASI; EL HANANDEH, 2016; TIAMMEE; LIKASIRI, 2020).

Os resíduos agrícolas podem ser convertidos em bioenergia por meio de produtos energéticos como briquetes, bioetanol e biogás (TIAMMEE; LIKASIRI, 2020). Seus subprodutos gerados a partir da poda e da palha apresentam-se como recursos promissores para produção de biomassa densificada de baixo custo (CARONE; PANTALEO; PELLERANO, 2011).

Os subprodutos de urbanos lenhosos de árvores e jardins são denominados de resíduos de poda urbana (ARAÚJO *et al.*, 2018). Estes resíduos chamam atenção para a quantidade em que são gerados e pelo seu descarte ou reutilização ineficiente. Tal cenário se reflete em elevados custos de manejo aos municípios brasileiros e a aterros sanitários, sendo também um problema de caráter ambiental (ARAÚJO *et al.*, 2018; NUNES; ANDRADE; DIAS JÚNIOR, 2019; SMITH *et al.*, 2019).

Outro resíduo com potencial para geração de energia é a cama de aviário. Como o próprio nome sugere este material serve de cama para as aves de corte ou poedeiras. A cama de aviário é caracterizada por seu aspecto granular, de aparência física e consistência que se assemelha a serragem e lascas de madeira (LYNCH *et al.*, 2013). Possui uma composição heterogênea, cuja base pode ser de aparas de madeira, serragem, bagaço da cana-de-açúcar, e outros, misturada a uma associação do desperdício animal, como restos de ração, água, penas e a microbiota resultante (SANTOS DALÓLIO *et al.*, 2017).

O Brasil possui um grande potencial de geração de energia a partir desse subproduto, uma vez que é um dos maiores produtores mundiais de frango de corte, implicando em um grande volume de geração de resíduo de cama de aviário (SANTOS DALÓLIO *et al.*, 2017).

Este resíduo é reconhecido como fonte de biomassa para geração de bioenergia e outras aplicações de valor agregado, tal qual a utilização como fertilizante natural, devido a presença de nutrientes, potássio, fósforo e nitrogênio. Essa aplicação deve ser bem manipulada, uma vez que, seu uso inadequado ou excessivo pode propagar a disseminação de patógenos e bactérias, poluição do ar e das águas além da emissão de gases de efeito estufa (CHEN *et al.*, 2019; GERBA; SMITH, 2005; POLESEK-KARCZEWSKA *et al.*, 2018).

A conversão energética da cama de ave pode ser uma forma eficiente de lidar com o esse resíduo. Isso pode ser feito a partir da compostagem, digestão anaeróbica e combustão direta (KELLEHER, 2002). Esta última alternativa pode ser usada diretamente para o aquecimento do aviário, podendo ser associada à geração de eletricidade quando utilizada em larga escala (ABELHA, 2003).

Uma das barreiras ao uso da cama de ave como biocombustível sólido é a sua baixa densidade, elevado teor de umidade e heterogeneidade de suas partículas, o que dificulta seu transporte e armazenamento. Tais barreiras podem ser superadas ao densificar a cama de aviário em forma de briquetes (BERNHART *et al.*, 2010). A mesma solução se aplica a madeira da poda.

A produção de briquetes a partir da biomassa proporciona uma maior densidade energética, resultando em uma queima mais eficiente, além de uniformizar as partículas da matéria-prima utilizada e permitir o reuso de resíduos de biomassa sólida. Os benefícios também se estendem às melhorias das características físicas da biomassa, diminuindo custos relacionados ao seu manuseio e transporte (KHLIFI *et al.*, 2020; NAVALTA *et al.*, 2020).

O estudo feito por Marreiro *et al.* (2021), observou que algumas variáveis de processo são comumente avaliadas na produção de briquetes. São eles a pressão de compactação, o tempo de compactação, o teor de umidade inicial da biomassa, a granulometria das partículas e a adição de aglutinante. Esses e outros fatores são explorados por pesquisadores com o intuito de obter briquetes mais densos, resistentes e com elevado potencial energético (BAZARGAN; ROUGH; MCKAY, 2018; GILVARI; DE JONG; SCHOTT, 2019). O sucesso da produção de briquetes depende ainda do tipo de matéria-prima utilizada, do equipamento e de suas condições de operação (BELLO; ONILUDE, 2021).

Neste sentido, o presente trabalho se propõe a otimizar as características físico-químicas e energética dos briquetes produzidos a partir dos resíduos da madeira da poda urbana e da

cama de aviário. Para isso, foram selecionadas de acordo com a literatura e limitações técnicas dos equipamentos, as variáveis de controle carga de compressão, tempo de compactação, granulometria e proporção em massa de cama de ave e madeira da poda. O efeito de tais variáveis sobre os resultados da densidade (d), teor de umidade (TU) e poder calorífico superior (PCS) foram modelados de acordo com a metodologia de superfície de resposta (*Response Surface Methodology-RSM*). Posteriormente os resultados foram analisados estatisticamente para confirmar a significância e ajuste do modelo às variáveis de processo. Por fim, realizou-se a otimização das variáveis preditoras com o intuito de maximizar o PCS e densidade e minimizar o teor de umidade.

Para atingir o a otimização multiobjetivo, a pesquisa foi dividida em partes tal qual será apresentada nas seções do presente trabalho. Nos materiais e métodos são demonstradas a coleta e preparo da biomassa para a briquetagem, assim como a caracterização das biomassas e a determinação das propriedades dos briquetes. Também são apresentadas toda a metodologia de experimental para produção dos briquetes, assim como o método de validação dos modelos, seguido da otimização dos resultados. Em seguida os resultados são apresentados e interpretados, finalizando com as conclusões obtidas da pesquisa.

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Coleta e preparo das biomassas

Os resíduos selecionados para a produção dos briquetes foram a madeira da poda da espécie *Azadirachta indica*, comumente conhecida como Nim e a cama de aviário, cuja base é de cana-de-açúcar. O processo de segmentação da biomassa adaptou-se à norma BS EN 14780: 2011, “Biocombustíveis sólidos e preparação de amostras”, que apresenta aparelhos para a redução de tamanho das partículas, fazendo uso de moinhos de corte e peneiras.

A coleta da poda urbana ocorreu de forma manual no início do mês de agosto de 2021. Inicialmente foram retirados pequenos galhos e folhas, obtendo-se a madeira *in natura*. Como pode-se observar na sequência esquematizada da Figura 7, a biomassa passou por alguns processos até chegar às dimensões em que foram submetidas a briquetagem.

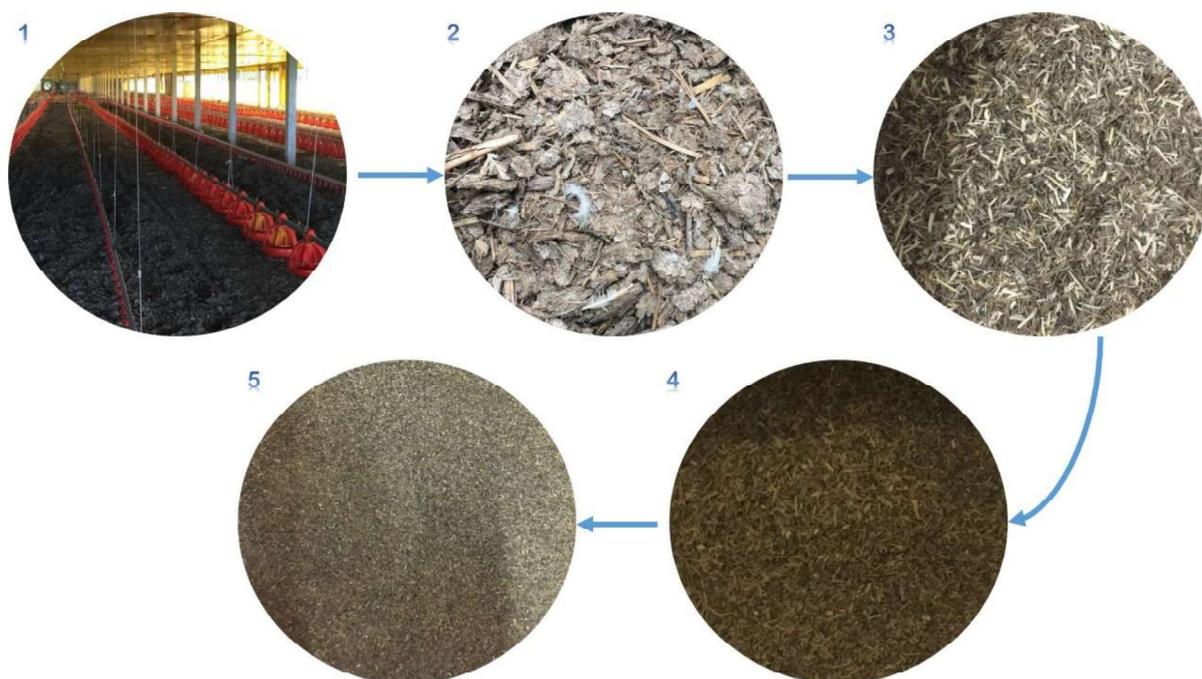
Figura 7. Sequência de segmentação da poda urbana da madeira de Nim (*Azadirachta indica*).



- 1- Local da coleta da poda urbana;
- 2- Após secagem natural por 15 dias, a biomassa foi dividida em partes menores de aproximadamente 20 cm, sendo novamente exposta ao sol por igual período;
- 3- Segmentação num moinho de martelos;
- 4- Duas moagens consecutivas no moinho de facas;
- 5- Biomassa resultante da peneira de malha (*mesh*) 16;
- 6- Biomassa obtida da peneira de malha (*mesh*) 30.

A cama de aviário passou por um processo semelhante ao da madeira da poda. Sua coleta foi realizada em junho de 2021, numa granja para criação de frangos de corte. O material foi recolhido de maneira manual e reservado em recipientes plásticos de 20L, os quais foram expostos ao ambiente natural para secagem por 30 dias. O processo de segmentação até obter-se a granulometria selecionada para briquetagem pode ser observado na Figura 8.

Figura 8. Etapas de segmentação da cama de aviário.



- 1- Local da coleta da cama de aviário;
- 2- Material reservado em recipientes plásticos para secagem natural por 30 dias;
- 3- Material seco submetido a duas moagens consecutivas no moinho de facas;
- 4- Biomassa resultante da peneira de malha (*mesh*) 16;
- 5- Biomassa obtida da peneira de malha (*mesh*) 30.

3.2.2 Caracterização da biomassa *in natura*

Para determinar as características de ambas as biomassas antes do processo de densificação, foram realizadas três réplicas do teor de umidade (TU) inicial, do Poder Calorífico Superior (PCS) e da análise imediata, que envolve o material volátil (MV), teor de cinzas (TC) e carbono fixo (CF).

O teor de umidade em base seca foi conduzido com a biomassa *in natura* e medido pela balança de umidade modelo AND MF-50. Para determinação do teor de cinzas e material volátil, seguiram-se as normas ASTM E1755 e ASTM E872, respectivamente. O carbono fixo foi calculado subtraindo de 100% os valores referentes ao teor de cinzas e material volátil. O PCS das partículas de biomassa residuais foi determinado por meio da bomba calorimétrica, modelo IKA C200, segundo a norma ASTM D5865-13.

3.2.3 Briquetagem

Para a produção dos briquetes foi utilizada uma prensa hidráulica de acionamento elétrico, da marca Contenco, modelo I-3058, com capacidade de carga de até 100t. O molde

utilizado para dar forma aos briquetes é feito de ferro, com 100mm de altura e 50mm de diâmetro interno, o molde pode ser observado na Figura 9.

Figura 9. Base e molde de ferro utilizados na produção dos briquetes.



A briquetagem sucedeu-se seguindo um planejamento experimental, o qual definiu os níveis de carga de compressão, o tempo de compactação do conjunto molde + biomassa, assim como as proporções de cama de aviário e de madeira da poda e granulometria.

Cada briquete foi produzido contendo 60g de biomassa moídas em granulometrias de 16 e 30 mesh, e misturada uniformemente nas proporções de cama de aviário e madeira da poda de 0:100; 25:75; 50:50; 75:25; 100:00, os mesmos níveis experimentais aplicados nas pesquisas de Kpalo *et al.* (2020); Mendoza Martinez *et al.* (2019) e Masullo *et al.* (2018). Os briquetes foram produzidos sem a adição de aglutinante e com o teor de umidade inicial da biomassa de aproximadamente 11,7%. Este valor encontra-se de acordo com a literatura, na qual o valor ideal varia de 10 a 12% (KUMAR; CHANDRASHEKAR, 2020; MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019). Para manter a biomassa da madeira da poda dentro do teor de umidade esperado foi necessário borrifar uma pequena quantidade de água a uma distância de 15cm até elevar o parâmetro à aproximadamente 11%.

A briquetagem ocorreu aplicando-se a carga de compressão oferecida pela prensa hidráulica, de modo semelhante ao ocorrido na pesquisa de Masullo *et al.* (2018). Os níveis operacionais escolhidos foram 3; 6; 9; 12 e 15t, sendo o último nível o valor limite suportado pelo molde sem que houvesse deformação do mesmo, ou sem que a biomassa extravasasse do molde.

Após atingir a carga de compressão pretendida, iniciava-se a contagem do tempo de compactação, que é o período no qual o briquete era mantido sob a carga determinada para aquela rodada experimental. Os tempos foram 0; 60; 120; 180 e 240s. Sendo o tempo zero, o nível em que o briquete era liberado da compressão assim que a prensa atingia a carga selecionada (BAZARGAN; ROUGH; MCKAY, 2018; GRANADO *et al.*, 2021).

3.2.4 Determinação das propriedades dos briquetes

Após uma semana da produção dos briquetes, foram medidas as suas dimensões de altura e diâmetro para que fosse possível determinar a sua densidade. O peso de cada um deles foi medido com o auxílio de uma balança eletrônica. Após 30 dias, os briquetes foram quebrados e despedaçados de modo que o pó resultante da quebra foi utilizado para condução das análises de teor de umidade e de Poder Calorífico Superior (PCS).

A densidade foi calculada pela razão entre a massa e o volume do briquete. Para isso foi necessário inicialmente calcular o volume do briquete, que tem um formato cilíndrico, de modo que o volume foi calculado por meio da Eq. (1).

$$V = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot h \quad (1)$$

Onde,

V = volume (m³)

D = diâmetro (m)

h = altura (m)

De posse do valor do volume do briquete foi possível calcular a densidade por meio da Eq. (2).

$$d = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Onde,

d = densidade (kg/m³)

m = massa (g)

A resposta energética dos briquetes foi obtida pela determinação do PCS, medido pela bomba calorimétrica de modelo IKA C200, de acordo a norma ASTM D5865-13. O teor de umidade, por sua vez, foi obtido por meio da balança de umidade de modelo AND MF-50.

3.2.5 Design experimental, Metodologia de Superfície de Resposta e Otimização

Para atingir o objetivo do estudo de produção de briquetes de alta qualidade, é necessário realizar a otimização das variáveis de processo para alcançar os valores máximos do PCS e densidade, e minimizar o TU do material densificado. Com esse propósito, utilizou-se a metodologia de superfície de resposta (*Response surface methodology-RSM*), que consiste numa coleção de técnicas matemáticas e estatísticas aplicadas para melhorar, desenvolver e otimizar processos (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009). Para lidar com

o problema de otimização de múltiplos objetivos foi aplicado o Método do Critério Global Normalizado (MCGN), a fim de obter uma solução ótima para as variáveis de resposta.

3.2.5.1 Metodologia de Superfície de Resposta

A RSM busca encontrar um modelo conveniente que relacione as respostas (y) e as variáveis de processo (x). Para isso busca-se uma função polinomial das variáveis independentes, que podem ser linear, caso a resposta adeque-se bem a um modelo de primeira ordem (Eq. (3)), ou na presença de curvatura, se utiliza um polinômio de ordem maior, tal qual um modelo de segunda ordem (Eq. (4)) (MONTGOMERY, 2017).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3)$$

$$y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=2}^k \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

Tem-se que o β é o coeficiente polinomial de regressão, y e x representam respectivamente as variáveis de resposta e variáveis de entrada, e o termo ε , se trata do erro experimental. O coeficiente polinomial β , é determinado pelo método dos mínimos quadrados ordinários (*Ordinary Least Squares - OLS*) usando a Equação (5). A matriz de variáveis de entrada é representada por X , e y representa a variável de resposta (PERUCHI *et al.*, 2020).

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}(\mathbf{X}'\mathbf{Y}) \quad (5)$$

De posse do modelo de regressão, foi necessário realizar a validação do mesmo por meio de uma série de testes estatísticos. O primeiro teste consiste em avaliar a significância do modelo por meio da análise de variância (ANOVA), medindo os coeficientes de correlação entre as variáveis por meio dos P-valores. Também foram avaliados os coeficientes de determinação ajustável (R^2_{adj}), calculado de acordo com a Eq. 6, e a normalidade dos resíduos, observações influentes e falta de ajustes (Lake-of-Fit) (SINGH; TIRKEY, 2022).

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_E/(n-p)}{SS_T/(n-1)} = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2) \quad (6)$$

onde o número total de quadrados é definido por

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_j)^2 \quad (7)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} \quad (8)$$

E R^2 é calculado pela Eq. 9.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (9)$$

Após a validação estatística do modelo, utilizou-se a análise de gráficos de contorno e de superfícies 3D para avaliar a influência e interação dos parâmetros de entrada sobre as respostas.

No presente trabalho, para realizar a coleta de dados da RSM utilizou-se o Projeto Composto Central (*Central Composite Design – CCD*). Após as etapas de validação do modelo, obteve-se uma matriz experimental com 18 rodadas, sendo 8 pontos fatoriais, 4 pontos centrais, 6 pontos axiais e um $\alpha=2$. A Tabela 14 apresenta o arranjo experimental completo. Os briquetes produzidos podem ser observados na Figura 10.

Tabela 14. Desenho da matriz experimental e resposta das propriedades físicas e químicas dos briquetes de cama de aviário e madeira da poda.

Rodada	Variáveis de processo				Respostas		
	Carga (t)	Tempo (s)	Cama (%)	Granulometria (mesh)	Densidade (kg/m ³)	TU (%)	PCS (MJ/kg)
1	6	60	25	16	733,882	11,15	18,575
2	12	60	25	30	994,650	10,20	19,390
3	6	180	25	30	845,860	9,85	19,739
4	12	180	25	16	872,686	10,50	18,108
5	6	60	75	30	1061,510	11,10	18,376
6	12	60	75	16	1146,105	11,55	15,897
7	6	180	75	16	957,484	12,75	18,033
8	12	180	75	30	1252,017	10,60	18,541
9	9	120	50	30	960,874	10,50	19,450
10	9	120	50	30	981,741	11,20	18,989
11	9	120	50	30	998,726	10,40	18,602
12	3	120	50	30	766,944	11,60	18,306
13	15	120	50	30	1054,250	10,75	19,358
14	9	0	50	30	987,878	10,65	18,835
15	9	240	50	30	1003,822	10,20	24,177
16	9	120	0	30	840,764	9,05	19,291
17	9	120	100	30	1167,167	11,00	17,107
18	9	120	50	30	1020,807	10,00	18,424

Figura 10. Briquetes produzidos a partir de diferentes proporções de madeira da poda e cama de aviário.



3.2.5.2 Otimização multiobjetivo através do Método do Critério Global Normalizado (MCGN)

Como a maioria dos problemas em RSM, o presente trabalho lida com múltiplas respostas. Isso significa que a análise individual de cada uma dessas variáveis pode convergir para resultados incongruentes, de modo que um dado nível pode otimizar uma das respostas, ao passo que prejudica drasticamente uma outra (CHIAO; HAMADA, 2001). Deste modo, utiliza-se métodos de otimização multiobjetivo para lidar com problemas mais complexos.

O Método do Critério Global Normalizado foi a técnica de otimização aplicada nesse estudo. Ele leva em consideração a amplitude de variação de cada variável de resposta, cuja função global escalonada $F(X)$ é dada pela Eq. (10) e a função restrição $g_j(X)$, pela Eq. (11) (ARDAKANI; WULFF, 2013).

$$\text{Minimizar } F(X) = \sum_{i=1}^q w_i \bar{f}_i(x) \quad (10)$$

$$\text{Sujeito a: } g_j(X) \leq 0 \rightarrow : X'X \leq \alpha^2 \quad (11)$$

$$\text{onde: } \bar{f}_i(x) = \frac{f_i(x) - f_i^U}{f_i^N - f_i^U}, \text{ para minimizar} \quad (12)$$

$$\bar{f}_i(\mathbf{x}) = \frac{f_i^U - f_i(\mathbf{x})}{f_i^U - f_i^N}, \text{ para maximizar} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} f_1^U & f_2^{N_1} & f_3^{N_1} \\ f_1^{N_1} & f_2^U & f_3^{N_2} \\ f_1^{N_2} & f_2^{N_2} & f_3^U \end{bmatrix}, \text{ matriz Payoff}$$

w_i é o peso atribuído a cada resposta do problema, \bar{f}_i é a função normalizada dos objetivos de respostas.

Para implementar este método, inicialmente foram determinadas as variáveis de decisão que são: Carga, tempo, cama e granulometria. Em seguida foram construídas as funções objetivos de respostas (\bar{f}_i), (maximizar ou minimizar), por meio das Eqs. (12) e (13), cujos resultados assumem valores codificados [0,1]. Tais funções são utilizadas para medir a distância mínima da solução ideal escrita em função dos pontos de Utopia f_i^U e de Nadir f_i^N , obtidos de uma matriz Payoff (ARDAKANI; WULFF, 2013). O ponto de Utopia representa o melhor resultado para determinada variável, e o ponto de Nadir é o valor correspondente das demais variáveis. Os resultados obtidos das funções objetivo são aplicados à função global escalonada $F(X)$ dada pela Eq. (10), a qual está sujeita a função restrição $g_j(X)$ (Eq. (11)), responsável por delimitar a região da solução ótima a um espaço de busca definido por uma esfera de raio alpha (α). Logo, as respostas obtidas na otimização ficaram restritas à região experimental. O algoritmo de busca da solução ótima utilizado na pesquisa foi o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), comumente aplicado em problemas de otimização não-lineares.

3.3 Análises dos resultados e discussões

3.3.1 Análise imediata, Teor de Umidade e Poder Calorífico Superior da biomassa in natura

As características químicas e energéticas da cama de aviário e da madeira da poda de Nim (*Azadirachta indica*) antes da briquetagem são apresentadas na Tabela 15. Os valores obtidos da análise imediata (MV, CF e TC), teor de umidade e PCS das biomassas coletadas no estudo foram comparadas com outras pesquisas que investigaram os mesmos materiais. Apesar de haver a comparação entre biomassas de mesma natureza ou espécie, há diferenças nos resultados encontrados para cada uma delas, uma vez que as variáveis ambientais como tipo de solo, localização geográfica, altitude e precipitação podem influenciar nas características da biomassa analisada (BAHRU; KIDANE; TOLESSA, 2021).

A maior diferença observada entre as biomassas coletadas está no teor de cinzas. O resultado dessa análise para a cama de aviário e para a madeira da poda de Nim foi 22,28% e 6,75%, respectivamente. O principal impacto da elevação do teor de cinzas é sobre o PCS da biomassa, que tende a diminuir. As cinzas formadas no reator podem prejudicar o processo de combustão e aumentar o nível de emissão de poeira, logo, para a briquetagem recomenda-se atingir menos de 4% para essa característica (D. PADILLA *et al.*, 2016; SETTER *et al.*, 2020).

Apesar de elevado, o valor do teor de cinzas obtido para a cama de aviário encontra-se de acordo com os resultados apresentados na literatura para essa biomassa. As pesquisas de Lynch *et al.* (2013) e Qian *et al.* (2018) encontraram resultados de teor de cinzas iguais a 34,28% e 28,21% cada. Tal resposta é devida a composição heterogênea do material.

O valor energético do PCS da cama de aviário coletada no estudo foi 16,05 MJ/kg, valor superior aos 13,52MJ/kg e 12,33MJ/kg encontrados por Lynch *et al.* (2013) e Qian *et al.* (2018). O resultado do estudo também chegou próximo ao PCS encontrado na pesquisa realizada por Singh e Tirkey (2022), cujo valor energético foi de 18,02MJ/kg.

O teor de umidade dos materiais analisados na pesquisa variou de 13,2% para a madeira da poda, e 13,73% para a cama de aviário, logo o mesmo método (secagem ao sol) e período de secagem da biomassa foi aplicado para redução da umidade inicial.

O poder calorífico superior da madeira da poda de Nim (17,73MJ/kg) foi um dos mais elevados entre todos os PCSs apresentados na Tabela 15, indicando seu bom potencial energético como combustível. Observa-se também, um maior teor de carbono fixo para essa biomassa (19,74%). Há uma relação direta entre o CF e o PCS, dado que uma maior composição de carbono fixo entrega um maior agregado de energia sendo gerado pela degradação do carbono (ARAÚJO *et al.*, 2016). Essa reação também se torna mais fácil de controlar, uma vez que a combustão se torna mais estável e lenta (MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019).

Tabela 15. Caracterização química e energética da cama de aviário e da madeira da poda por meio da análise imediata, PCS e TU.

Material	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%)	Material volátil (%)	Carbono fixo (%)	PCS (MJ/kg)	Referência
Cama de aviário	13,73	22,28	66,41	11,31	16,05	Autor
Madeira da poda <i>Azadirachta indica</i>	13,2	6,75	73,51	19,74	17,73	Autor
(Madeira da poda <i>Azadirachta indica</i>)	15	5,6	81,75	12,65	16,60	(DUTTA <i>et al.</i> , 2014)
Madeira da poda <i>Azadirachta indica</i>	*	*	*	*	14,10	(PÉREZ-ARÉVALO <i>et al.</i> , 2015)
Cama de aviário	41,82	15,49	71,26	13,36	18,02	(SINGH; TIRKEY, 2022)
Cama de aviário	*	28,21	60,77	11,02	12,33	(QIAN <i>et al.</i> , 2018)
Cama de aviário	9,29	34,28	43,48	13,06	13,52	(LYNCH <i>et al.</i> , 2013)

3.3.2 Análise de variância (ANOVA) e testes de validação dos modelos de regressão

Os resultados experimentais da densidade, teor de umidade e PCS da biomassa da madeira da poda e da cama de aviário briquetada é observada na matriz experimental da Tabela 14. A partir dela foi possível gerar modelos polinomiais quadráticos que correlacionassem as variáveis de saída às variáveis de processo, levando em conta a interação entre as variáveis de entrada propostas por meio de termos codificados, como pode-se observar nas Equações 14, 15 e 16, as quais foram desenvolvidas a partir do modelo de segunda ordem (Eq. (4))

$$\text{Densidade (kg/m}^3\text{)} = 1012,4 + 77,6*\text{carga} + 101,4*\text{cama} - 19,72*\text{carga}^2 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{TU (\%)} = & 10,466 - 0,2312*\text{carga} - 0,0750*\text{tempo} + 0,5125*\text{cama} + 0,1676*\text{carga}^2 \\ & - 0,1199*\text{cama}^2 - 0,175*\text{carga}*\text{cama} + 0,212*\text{tempo}*\text{cama} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{PCS (MJ/kg)} = 18,589 - 0,804*\text{tempo} - 0,583*\text{cama} + 0,695*\text{tempo}^2 \quad (16)$$

Essas equações permitem descrever a influência e interação das variáveis de processo carga e tempo de compressão, proporção de cama de aviário e da madeira poda a compor os briquetes e granulometria da biomassa sobre as respostas energéticas e física dos briquetes,

PCS, teor de umidade e densidade. Como mostra a Tabela 14, os resultados para o PCS variaram de 15,897 – 24,177 MJ/kg, o teor de umidade variou de 9,05 – 12,75 % e a densidade esteve entre valores de 733,88 – 1252,02 kg/m³.

Para validar os modelos matemáticos obtidos em cada uma dessas respostas alguns testes estatísticos foram aplicados. Na Tabela 16 encontra-se a análise de variância (ANOVA), onde é possível avaliar a significância estatística do modelo por meio do P-valor, o qual deve ser menor que 0,05. A ANOVA também permite identificar os termos significantes para o modelo e eliminar aqueles que não são. Pelo Lack-of-Fit (falta de ajuste) é possível identificar se o modelo especifica adequadamente a relação entre as respostas e os preditores. Nesse caso, deseja-se que o P-valor seja maior que ou igual ao nível de significância de 0,05, indicando que o teste não detectou a necessidade de ajustes. Pela análise estatística, encontra-se também o coeficiente de determinação R-sq (adj), o qual determina a adequação do modelo de regressão. Espera-se que o R-sq (adj) seja maior que ou igual a 70%. O último teste é o da normalidade dos resíduos, no qual caso o P-valor seja maior que ou igual a 0,05, tem-se que os resíduos são bem modelados por uma distribuição normal.

3.3.2.1 Análise estatística para a variável de resposta densidade

Analisando a Tabela 16 observa-se um P-valor de 0,000 para o modelo, indicando que a Eq. 14 foi bem modelada para a resposta. Por meio da análise do P-valor também é possível verificar que a variável Tempo não foi significativa para o modelo, e, portanto, pode ser descartada. Apesar de alguns autores como Niño, Arzola e Araque (2020) indicarem que o tempo de compactação é uma variável significativa para a resposta densidade, Kpalo *et al.* (2020b) relata a necessidade de associação do tempo com outros preditores como a presença de aglutinante, elevadas pressões e aquecimento durante a briquetagem. Outras pesquisas como as de Bazargan, Rough e Mckay (2018) e Granado *et al.* (2021), que variaram o tempo de compactação, verificaram sua relevância para outras respostas como a expansão volumétrica do briquete ou sua resistência. Algo análogo acontece com o presente estudo, no qual o tempo de compactação veio a ser relevante para outras respostas como será abordado posteriormente.

Ainda analisando o P-valor dos fatores de processo, tem-se que a variável carga (P-valor = 0,000), cama (P-valor = 0,000) e a granulometria (P-valor = 0,015) são significantes para o modelo. Pelo teste do Lack-of-Fit, observa-se um P-valor = 0,19, indicando que o modelo encontrado está bem ajustado quanto a relação entre os preditores do processo e a densidade. O

teste do coeficiente de determinação também foi validado, com um $R\text{-sq (adj)} = 90,60\%$ apontando uma ótima adequação do modelo.

Os últimos testes de validação é o de normalidade dos resíduos, cujo P-valor de 0,628, reporta que os resíduos se adequam bem a uma distribuição normal.

Após a validação de todos esses testes estatísticos, tem-se que a Eq. 14 é um bom modelo para a variável de saída densidade, sendo possível dar continuidade a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), a fim de realizar sua otimização.

3.3.2.2 *Análise estatística para a variável de resposta teor de umidade*

Entre os modelos de regressão encontrados para cada variável de resposta analisada no presente trabalho, o do teor de umidade é aquele com a maior quantidade de termos advindos de interações quadráticas das variáveis de entrada e suas interações entre si.

O P-valor encontrado foi de 0,001 indicando que a Eq. 15 foi bem modelada. Pela análise do P-valor dos fatores, observa-se que apenas o tempo (P-valor = 0,382) não é significativo estatisticamente. No entanto, ele não foi retirado no modelo devido a interação observada entre a o tempo de compactação e proporção de cama na composição dos briquetes.

Observa-se que a variável de controle cama teve um P-valor de 0,000, indicando forte significância desse fator para o resultado do TU. Isso ocorre pelo fato de que o teor de umidade final do briquete tem forte relação com o teor de umidade inicial de cada biomassa (SIAHDASHTI *et al.*, 2022). O ajuste do modelo foi verificado pelo teste Lack-of-fit, cujo P-valor foi de 0,979, indicando um bom ajuste. O teste do coeficiente de determinação foi validado pelo $R\text{-sq (adj)}$ de 83,63%. Outro teste realizado foi o de normalidade dos resíduos, com um P-valor de 0,309, indicando adequação à distribuição normal. Assim como para a variável de saída densidade, o TU também teve seu modelo de regressão validado estatisticamente. Em seguida, para dar continuidade às análises deve-se realizar a análise gráfica das superfícies de respostas para otimizar a variável de saída.

3.3.2.3 *Análise estatística para a variável de resposta Poder Calorífico Superior*

A resposta energética Poder Calorífico Superior teve seu modelo validado pelo P-valor igual a 0,000. A significância das variáveis para o processo foi avaliada quanto ao seu P-valor menor que 0,05, e observou-se que a única variável que não foi significativa para o PCS foi a carga de compactação, e, portanto, foi retirada do modelo. Para Nunes, Andrade e Dias Júnior

(2019), essa é um resultado esperado, já que a pressão exercida por uma carga não altera as características do material como o poder calorífico, mas influencia variáveis físico-mecânicas e o teor de umidade.

O ajuste do modelo dos preditores às respostas foi verificado pelo Lack-of-fit, cujo P-valor é de 0,145. O teste do coeficiente de determinação foi verificado estatisticamente pelo R-sq (adj) de 74,31%. O teste de normalidade dos resíduos também foi verificado, tendo-se um P-valor de 0,961, indicando uma distribuição normal para os resíduos.

Após todos esses testes, temos que o modelo encontrado para o PCS se encontra validado estatisticamente.

Tabela 16. Análise de variância para as respostas densidade, TU e PCS.

Análise de Variância (ANOVA)		Resposta: Densidade (kg/m ³)				Resposta: Teor de umidade (%)				Resposta: Poder calorífico superior (MJ/kg)					
		DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Modelo	4	285282	71320	41,98	0,000	8	10,0892	1,26114	11,86	0,001	4	35,5178	8,8794	13,29	0,000
Carga	1	96307	96307	56,68	0,000	1	0,8556	0,85562	8,05	0,020					
Tempo	1	164601	164601	96,88	0,000	1	0,0900	0,09	0,85	0,382	1	10,3475	10,3475	15,49	0,002
Cama	1	13170	13170	7,75	0,015	1	2,9294	2,92944	27,55	0,001	1	8,2528	8,2528	12,36	0,004
Granulometria	1	10004	10004	5,89	0,031	1	0,6795	0,67953	6,39	0,032					
Carga*Carga	1	10004	10004	5,89	0,031	1	0,6795	0,67953	6,39	0,032					
Tempo*Tempo	1	10004	10004	5,89	0,031	1	0,6795	0,67953	6,39	0,032	1	12,4302	12,4302	18,61	0,001
Cama*Cama	1	10004	10004	5,89	0,031	1	0,6795	0,67953	6,39	0,032					
Carga*Cama	1	10004	10004	5,89	0,031	1	0,6795	0,67953	6,39	0,032					
Tempo*Cama	1	10004	10004	5,89	0,031	1	0,6795	0,67953	6,39	0,032					
Erro	13	22087	1699			9	0,9571	0,10634			13	0,6212	0,2071		
Lack-of-Fit	10	20147	2015	3,11	0,19	6	0,2096	0,03493	0,14	0,979	10	8,0623	0,8062	3,89	0,145
Pure Error	3	1941	647			3	0,7475	0,24917			3	0,6212	0,2071		
Total	17	307369				17	11,0463				17	44,201			

3.3.3 Análises de efeitos principais e gráficos de superfície de resposta

Após a definição de modelos confiáveis para cada uma das respostas é possível gerar os gráficos dos efeitos principais de cada variável de processo sobre as respostas a serem analisadas. É possível ainda obter gráficos de contorno de região e gráficos de superfície 3D, nos quais alguns fatores de processo são mantidos fixos enquanto outros são variados para avaliar seu efeito sobre as variáveis de resposta.

3.3.3.1 Análises gráficas para a variável de resposta densidade

No gráfico 6 observa-se os efeitos principais das variáveis carga, cama e granulometria sobre a variável de saída densidade. Por meio dessa análise gráfica é simples verificar uma correlação positiva entre o aumento da carga de compressão e a densidade. Também é possível notar uma leve curvatura próximo ao nível máximo de carga, logo, a maior densidade é obtida um pouco antes de se atingir o valor máximo de 15t.

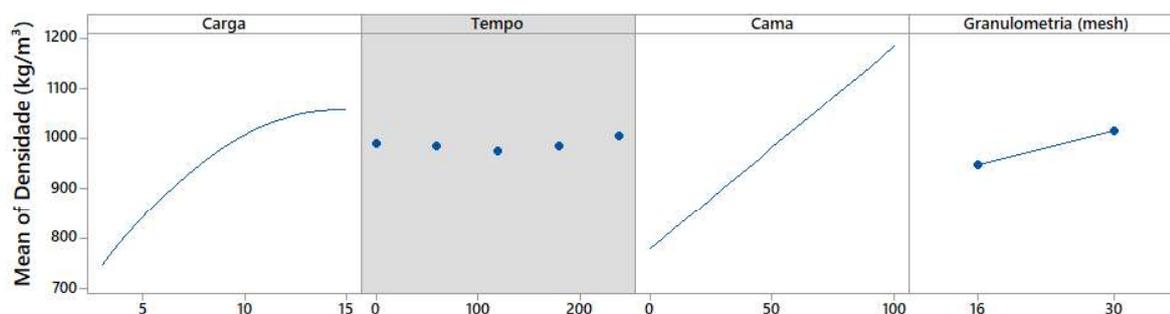
A mesma correspondência positiva existe entre as variáveis de entrada cama e granulometria com a resposta densidade. O gráfico do efeito principal da cama de aviário sobre a densidade, nos diz que quanto maior a proporção de cama de aviário presente no briquete, maior a sua densidade final. A partir da análise do efeito da granulometria, observa-se que quanto maior a malha da peneira (mesh 30), maior a densidade. É válido ressaltar que, quanto maior o mesh da peneira, menor é o tamanho da partícula de biomassa obtida.

Outros gráficos importantes para avaliar o comportamento das variáveis entrada sobre as de saída são os gráficos de contorno e de superfície 3D. Nos Gráficos 7 e 8 é possível observar simultaneamente a influência das variáveis de processo carga e cama sobre a resposta densidade. A granulometria foi mantida fixa em 30 mesh. A interpretação de ambos os gráficos nos leva a conclusão de que para maximizar a densidade a valores em torno de 1200kg/m³ é necessário aplicar uma carga de compressão de aproximadamente 10-15t, ao passo que a composição dos briquetes deve ser de pelo menos 80% de cama de aviário, sendo o valor complementar, composto por madeira da poda.

Tais condições estão de acordo com a literatura. A carga exercida pela prensa hidráulica, medida em toneladas, exerce uma pressão sobre a biomassa compactada no molde. Deste modo, pode-se comparar o efeito da carga exercida pela prensa com a pressão de compactação medida por alguns autores como Garrido, Conesa e Garcia (2017), cuja pressão exercida influencia

principalmente em processos de briquetagem a temperatura ambiente, elevando fatores como a densidade. Já a relação entre a cama de aviário com a maior densidade do briquete pode relacionar-se com o teor de umidade inicial da biomassa logo antes da briquetagem. Isso porque a umidade atua um como aglutinante natural em materiais orgânicos e celular, proporcionando coesão entre as partículas (GROVER; MISHRA, 1996; KALIYAN; MOREY, 2010). Como mencionado anteriormente nesse trabalho, o teor de umidade da matéria prima antes da densificação deve ser de 10-12% (KUMAR; CHANDRASHEKAR, 2020; MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019). Outros autores afirmam ainda que para prensas hidráulicas o TU deve variar entre 10-15% (S. MASULLO *et al.*, 2018). A cama de aviária apontou maior facilidade de manter esse parâmetro entre 10-12% do que a madeira da poda, que apresentou maior facilidade de perder umidade, podendo influenciar na densidade do briquete.

Gráfico 6. Efeitos Principais para a Densidade.



Um fundo cinza representa um termo que não está no modelo.

Gráfico 7. Gráfico de contorno Densidade vs Cama; Carga.

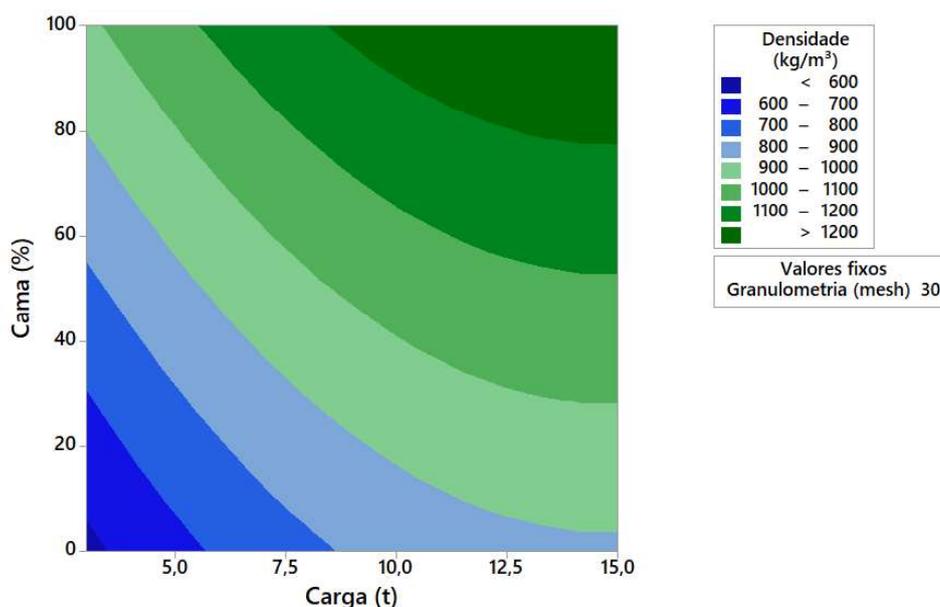
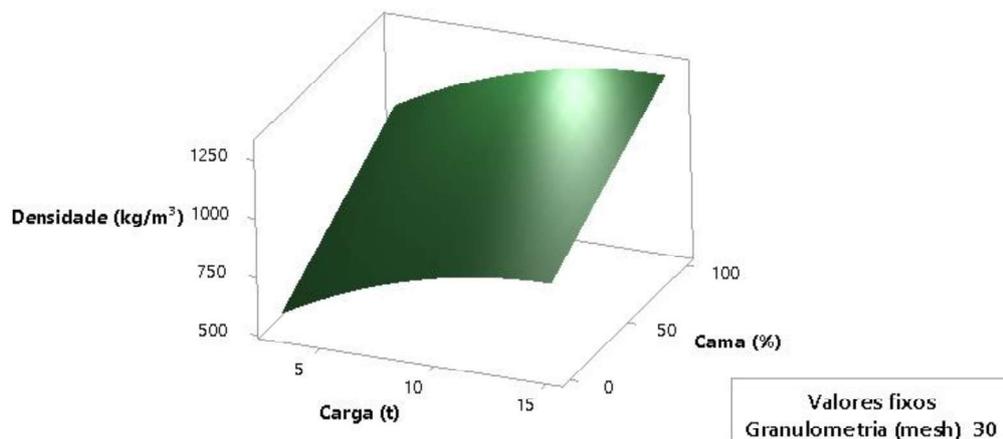


Gráfico 8. Gráfico de superfície da Densidade vs Cama; Carga.

3.3.3.2 Análises gráficas para a variável de resposta teor de umidade

Após confeccionado, os briquetes precisam apresentar um teor de umidade menor do que o teor de umidade inicial das partículas de biomassa. De acordo com a norma, *ENPlus* (2015) esse resultado deve ser menor que ou igual a 10%. Deste modo, deseja-se minimizar essa variável de saída.

Por meio da análise gráfica de efeitos principais do Gráfico 9, o TU é influenciado de maneiras diferentes por cada fator do processo. A carga de compressão apresenta uma influência não linear, decrescente sobre o TU, onde o mínimo valor para a resposta é obtido com a carga de compressão de cerca de 11 t. O efeito do tempo de compactação sobre a variável de saída em questão é uma relação inversamente proporcional, onde quanto maior o tempo de compactação (240s), menor o teor de umidade (um pouco menos de 11%).

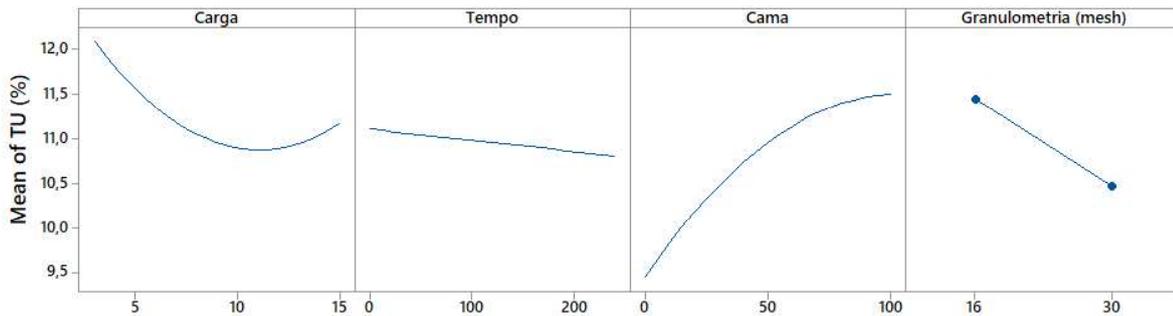
Como esperado, devido ao maior TU da cama de aviário e de sua maior capacidade de reter umidade, os briquetes produzidos com 100% de madeira da poda e 0% de cama de aviário apresentam o menor teor de umidade. Já para a granulometria, briquetes produzidos com partículas menores (30 mesh), possuem menor TU.

Devido as várias interações entre as variáveis de entrada encontradas de umidade, foram gerados 3 gráficos de contorno para a variável. Para interação entre o tempo de compactação e carga de compressão, a granulometria foi mantida fixa em 30 mesh e a proporção de biomassas foi de 50% cada. Nessa conformação, o menor teor de umidade ocorre para cargas de 5 toneladas em diante, para qualquer tempo de compactação. Quando se analisa a influência da interação cama*carga, com o tempo fixado em 120s e a granulometria em 30 mesh, obtêm-se o menor TU quando a proporção de cama é de quase 0% e a carga é de cerca de 7,5 – 8 t. Já na

interação entre a cama*tempo, o menor TU é obtido com proporções de cama menores que 20% e tempo de compactação superior a 120s.

A análise do Gráfico 11 mostra a relação entre TU vs o tempo de compactação e a carga de compressão simultaneamente. A superfície gerada é do tipo côncava, onde o menor teor de umidade (cerca de 9 - 10%) é obtido quando é aplicada uma carga de cerca de 11t e com o maior tempo de compactação (240s).

Gráfico 9. Efeitos principais para o TU.



Todos os termos exibidos estão no modelo.

Gráfico 10. Gráfico de Contorno do TU e interações.

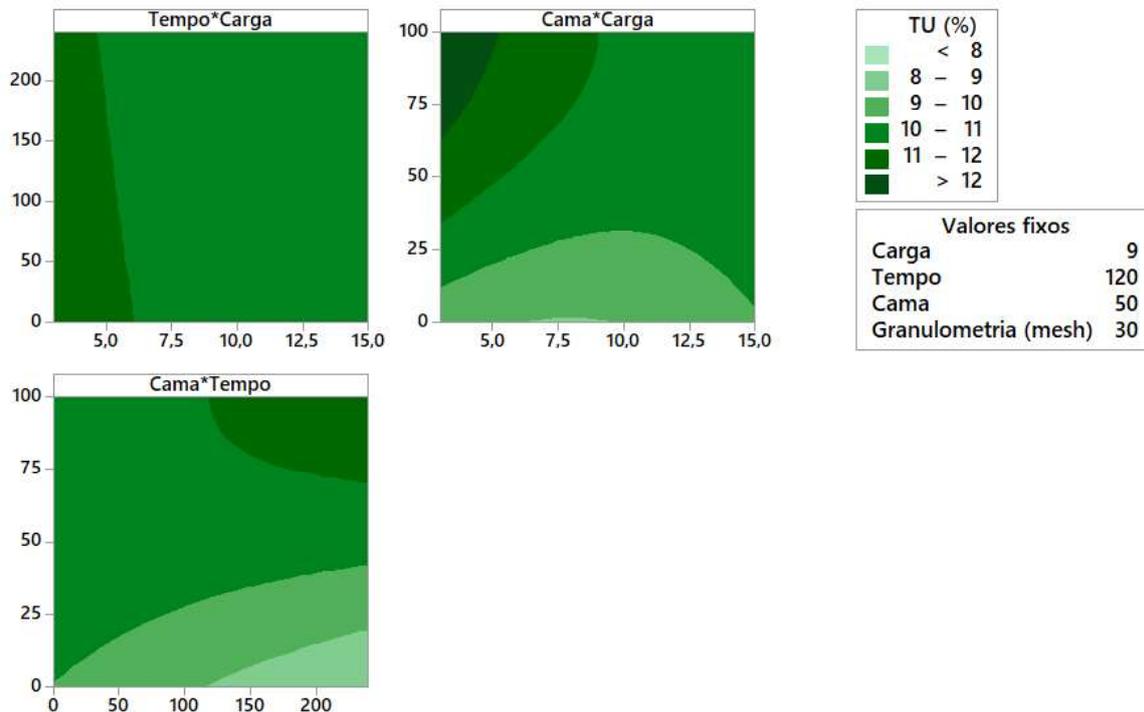
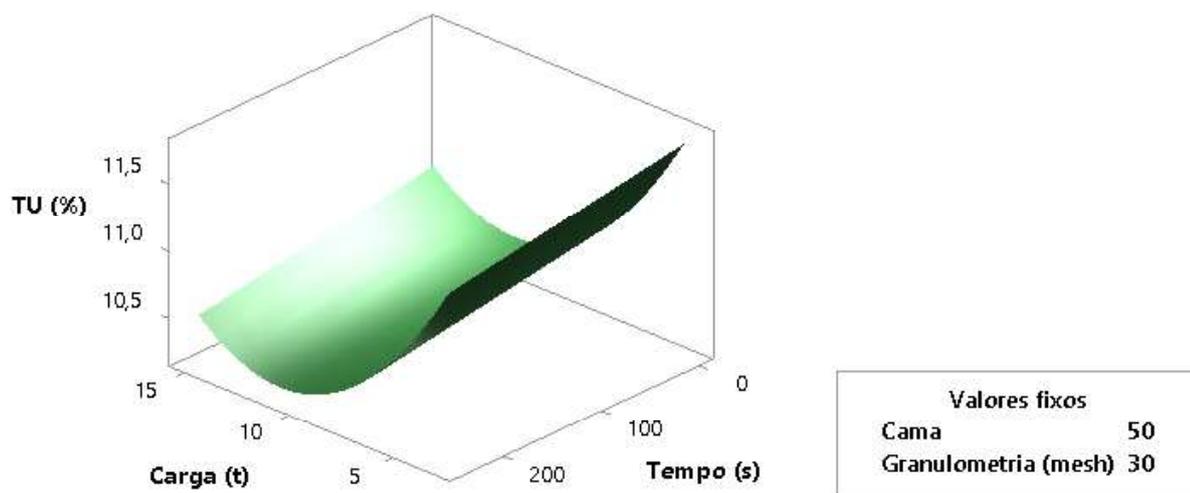


Gráfico 11. Gráfico de Superfície do TU vs Tempo; Carga.

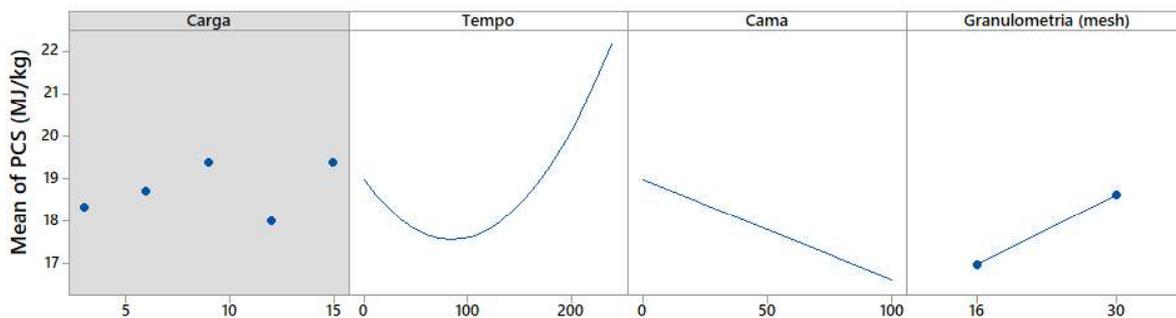
3.3.3.3 Análises gráficas para a variável de resposta Poder Calorífico Superior

O PCS da biomassa é a resposta energética do combustível. Quanto maior o poder calorífico de um material, maior a quantidade de calor gerado durante a combustão (ANTMEN, 2019). Pela análise dos efeitos principais do Gráfico 12 não foi possível encontrar uma relação entre a carga e o PCS, como já era esperado. As variáveis de processo que influenciaram a variável energética foi o tempo de compactação, proporção de cama de aviário presente no briquete e a granulometria.

O gráfico do efeito do tempo de compactação é uma curva côncava de tendência positiva, no qual o maior PCS de cerca de 22MJ/kg é obtido com o tempo de 240s (o maior). O maior PCS naturalmente vai ser obtido pelo briquete composto da biomassa de maior PCS inicial (MENDOZA MARTINEZ *et al.*, 2019). Visto que o Poder Calorífico Superior da madeira da poda é maior do que o da cama de aviário, temos que a resposta energética será maximizada com a produção de briquetes compostos em maior quantidade de madeira da poda e em menor quantidade de cama de aviário. O último efeito principal foi a granulometria. Observa-se pelo gráfico que partículas menores de biomassa (30 mesh) resulta num maior PCS, isso porque o contato entre elas é maior, facilitando o transporte de calor ao longo do briquete (SETTER *et al.*, 2021).

A partir dos Gráficos 13 e 14 é possível observar a influência simultânea da proporção de cama de aviário a compor os briquetes e do tempo de compactação. Em ambos os casos para atingir a maior resposta energética, de mais de 24MJ/kg é necessário produzir os briquetes na proporção 0:100 para cama de aviário e madeira da poda, com um tempo de compactação máximo de 240s.

Gráfico 12. Efeitos principais para o PCS.



Um fundo cinza representa um termo que não está no modelo.

Gráfico 13. Gráfico de Contorno do PSC vs Cama; Tempo.

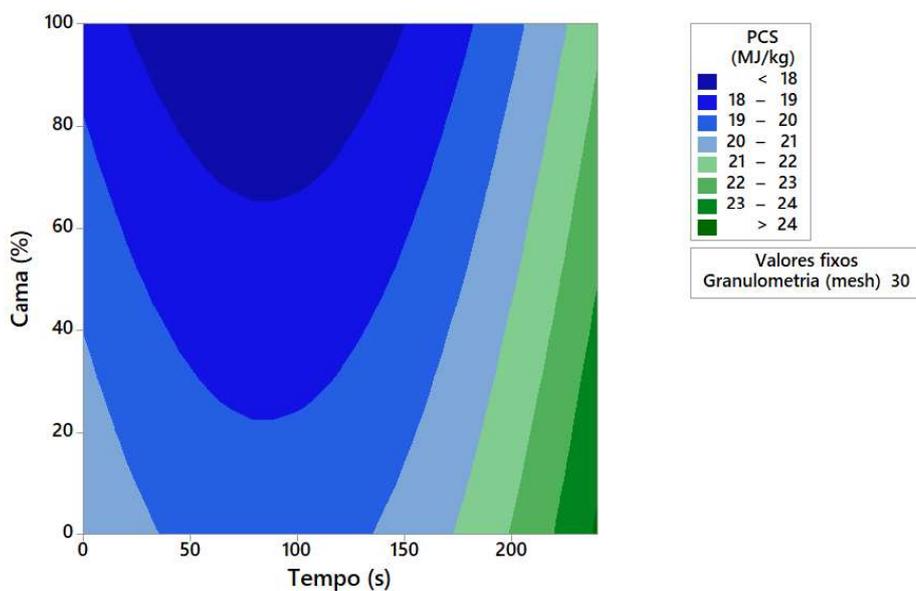
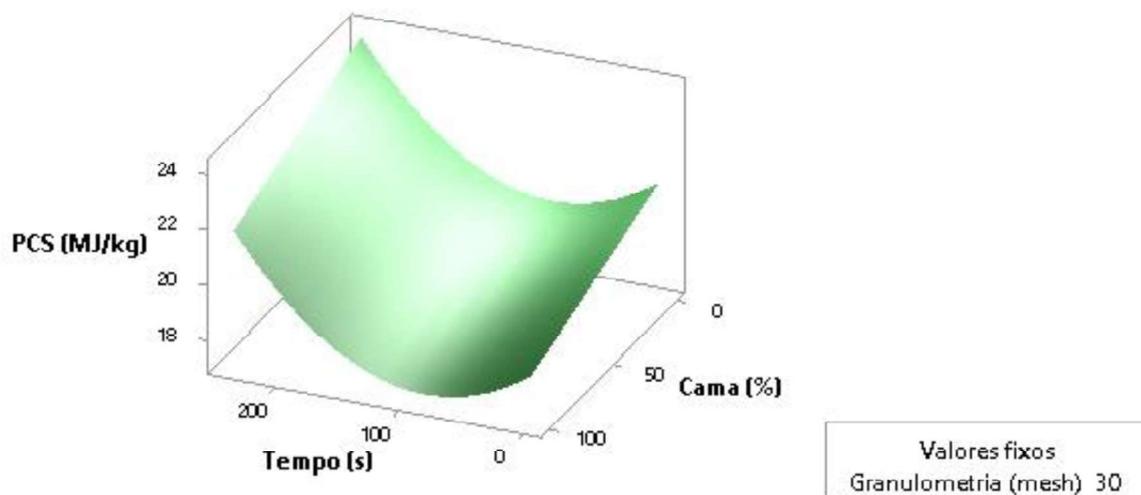


Gráfico 14. Gráfico de Superfície do PCS vs Cama; Tempo.



3.3.4 Otimização Multiobjetivo-MCGN

Como pode ser observado durante as análises gráficas, não é simples modelar uma otimização que atenda aos requisitos das variáveis de saída de forma simultânea. Um exemplo disso é maximização da densidade e do PCS, cuja variável proporção de cama de aviário para a primeira resposta deve ser máxima (100:0), a fim de obter a maior densidade possível. Em contrapartida, para se obter o maior PCS, deve-se zerar a proporção de cama de aviário (0:100) e produzir o briquete com 100 % de madeira da poda.

O Método do Critério Global Normalizado busca encontrar uma resposta que satisfaça a todos os objetivos de otimização do processo. Para isso foi necessário criar uma Matriz Payoff a partir da otimização de cada variável de saída densidade D, TU e PCS e os pontos de Utopia e Nadir D^U , TU^U , PCS^U e D^N , TU^N , PCS^N .

$$\begin{bmatrix} D^U & TU^{N1} & PCS^{N1} \\ D^{N1} & TU^U & PCS^{N2} \\ D^{N2} & TU^{N2} & PCS^U \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1.282,921 & 9,714 & 19,314 \\ 965,976 & 8,023 & 22,232 \\ 1.037,919 & 9,181 & 23,802 \end{bmatrix}$$

Em seguida foram construídas as funções normalizadas de acordo com as Eq. 12 e 13. Para a variável densidade foi aplicada a função normalizada maximizar.

$$D(x) = 1.012,4 + 77,6 * \text{carga} + 101,4 * \text{cama} - 65,1 * \text{granulometria} - 19,72 * \text{carga}^2$$

$$\bar{D}(x) = \frac{D^U - D(x)}{D^U - D^{N1}}$$

$$\bar{D}(x) = \frac{1.282,921 - D(x)}{1.282,921 - 965,976}$$

Para a variável Teor de Umidade (TU), foi utilizada a função normalizada minimizar, conforme segue a descrição abaixo.

$$TU(x) = 10,47 - 0,231 * \text{carga} - 0,75 * \text{tempo} + 0,513 * \text{cama} + 0,974 * \text{granulometria} - 0,168 * \text{carga}^2 - 0,12 * \text{cama}^2 - 0,175 * \text{carga} * \text{cama} + 0,212 * \text{tempo} * \text{cama}$$

$$\bar{TU}(x) = \frac{TU(x) - TU^U}{TU^{N1} - TU^U}$$

$$\bar{TU}(x) = \frac{TU(x) - 8,023}{9,714 - 8,023}$$

Assim como para a densidade, o PCS também consiste num problema de maximização, logo, foi utilizada a função normalizada maximizar.

$$PCS(x) = 18,589 + 0,804 * \text{tempo} - 0,583 * \text{cama} - 1,631 * \text{granulometria} + 0,695 * \text{tempo}^2$$

$$\overline{PCS} = \frac{PCS^U - PCS(x)}{PCS^U - PCS^{N1}}$$

$$\overline{PCS} = \frac{23,802 - PCS(x)}{23,802 - 19,314}$$

O terceiro passo envolve a formulação do problema de otimização multiobjetivo baseado no Método do Critério Global Normalizado (MCGN), realizando o somatório da relação de um peso atribuído às funções normalizadas vezes as funções normalizadas. Os pesos (w_i) atribuídos às variáveis de decisão foram 0,5 para densidade, 0,45 para o PCS e 0,05 para o teor de umidade. A soma dos pesos deve totalizar o valor unitário 1 (um). A função global, por sua vez, está limitada a uma função restrição baseada no quadrado do valor de α (distância axial = 2).

$$\text{Minimizar } F(x) = w_1 * [\overline{D}(x)] + w_2 * [\overline{TU}(x)] + w_3 * [\overline{PCS}(x)]$$

$$\text{Sujeito a: } g(x) = x^T x \leq \alpha^2$$

No quarto passo utiliza-se o Algoritmo GRG para encontrar os níveis para as variáveis de decisão que resultam nos resultados ótimos para a densidade, TU e PCS.

Logo, um experimento de otimização nos níveis de 10t para a carga, com o tempo de compactação de 194s, proporção de cama de aviário e madeira da poda em 50:50 e granulometria de 30 mesh, deve resultar nas respostas ideais de 1180,444 kg/m³ de densidade, 9,159% de TU e 22,753MJ/kg de PCS, com um intervalo de confiança de 95% para tais estimativas. Esses valores são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Solução ideal para o problema multiobjetivo.

Otimização				Literatura	
Variáveis de entrada	Nível	Variável de saída	Resultados	Normas	Referência
Carga (t)	10	Densidade (kg/m³)	1180,444	1060	Helwani et al. (2020)
Tempo (s)	194	TU (%)	9,159	≤ 10,0	ENplus A1, A2, A3
Cama (%)	50	PCS (MJ/kg)	22,753	≥ 17,50	DIN 51731
Granulometria (mesh)	30			≥ 18,82	EN 14961-2

3.4 Conclusões

O trabalho de pesquisa comprovou que dois resíduos que inicialmente possuíam baixo valor agregado são capazes de ser reaproveitados para a produção de briquetes para geração de energia por meio de processos como a combustão. Por meio de um planejamento experimental foram obtidos modelos de regressão validados para cada uma das variáveis de saída do estudo: densidade, TU e PCS. Para otimizar todas essas variáveis simultaneamente foi aplicado com sucesso um método de otimização multiobjetivo que encontrou uma única resposta que maximizasse as variáveis densidade, PCS e minimizasse o TU, simultaneamente.

Observou-se ainda que:

- O processo de briquetagem foi capaz de elevar o PCS das biomassas *in-natura*, uma vez que PCS da cama de aviário antes da densificação foi de 16,5MJ/kg e o briquete composto de 100% de cama resultou num PCS de 17,107MJ/kg. O mesmo ocorreu para madeira da poda, passando de um PCS de 17,73MJ/kg para 19,291MJ/kg;
- Por meio do processo de briquetagem foi possível reduzir o teor de umidade inicial das biomassas *in natura*, assim como esperado;
- O maior PCS obtido foi de 24,177MJ/kg, sendo produzido com briquetes na proporção de 50:50 de cada biomassa, indicando a influência das interações dos outros preditores sobre essa resposta energética;
- A maior densidade obtida para os briquetes foi de 1252,02kg/m³;
- O menor teor de umidade obtido para os briquetes foi de 9,05%;
- O Método do Critério Normal Globalizado adequou-se bem ao problema de otimização. Os resultados obtidos foram PCS = 22,753MJ/kg, densidade = 1180,44kg/m³ e TU = 9,159%, devendo ser produzidos com uma carga de 9t, tempo de compactação de 194s, proporção de 50:50 de cada biomassa e granulometria de 30 mesh.

3.5 Recomendações para trabalhos futuros

Como recomendação para trabalhos futuros, os autores sugerem que sejam exploradas outras tecnologias de produção de briquetes, como as extrusoras, que por sua vez permitirão avaliar novas variáveis de decisão e investigar outras propriedades dos briquetes, tal qual sua resistência mecânica. Do ponto de vista metodológico e diante das diversas variáveis de decisão e níveis que podem ser estudados, recomenda-se aplicar outros arranjos experimentais como os

projetos de mistura e otimizar os resultados de média e variância. As pesquisas também podem ser conduzidas com projetos de parâmetros robustos ou aplicar métodos multivariados de otimização.

3.6 Referências

ABBASI, Maryam; EL HANANDEH, Ali. Forecasting municipal solid waste generation using artificial intelligence modelling approaches. **Waste Management**, [S. l.], v. 56, p. 13–22, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.05.018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.018>.

ABELHA, P. Combustion of poultry litter in a fluidised bed combustor*. **Fuel**, [S. l.], v. 82, n. 6, p. 687–692, 2003. DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00317-4. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236102003174>.

ANTMEN, Z. F. EXPLOITATION OF PEANUT AND HAZELNUT SHELLS AS AGRICULTURAL INDUSTRIAL WASTES FOR SOLID BIOFUEL PRODUCTION. **FRESENIUS ENVIRONMENTAL BULLETIN**, [S. l.], v. 28, p. 2340–2347, 2019.

ARAÚJO, Solange; BOAS, Mariana Almeida Vilas; NEIVA, Duarte Miranda; DE CASSIA CARNEIRO, Angélica; VITAL, Benedito; BREGUEZ, Marcelino; PEREIRA, Helena. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 90, p. 181–186, 2016. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.04.007.

ARAÚJO, Yuri Rommel Vieira; DE GÓIS, Monijany Lins; JUNIOR, Luiz Moreira Coelho; CARVALHO, Monica. Carbon footprint associated with four disposal scenarios for urban pruning waste. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 1863–1868, 2018. DOI: 10.1007/s11356-017-0613-y. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11356-017-0613-y>.

ARDAKANI, Mostafa K.; WULFF, Shaun S. An overview of optimization formulations for multiresponse surface problems. **Quality and Reliability Engineering International**, [S. l.], v. 29, n. 1, p. 3–16, 2013. DOI: 10.1002/qre.1288.

BAHRU, Tinsae; KIDANE, Berhane; TOLESSA, Amsalu. Prioritization and selection of high fuelwood producing plant species at Boset District, Central Ethiopia: an ethnobotanical approach. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 51, 2021. DOI: 10.1186/s13002-021-00474-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13002-021-00474-9>.

BAZARGAN, Alireza; ROUGH, Sarah L.; MCKAY, Gordon. Fine tuning of process parameters for improving briquette production from palm kernel shell gasification waste. **Environmental Technology**, [S. l.], v. 39, n. 7, p. 931–938, 2018. DOI: 10.1080/09593330.2017.1317835. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1317835>.

BELLO, R. S.; ONILUDE, M. A. Effects of critical extrusion factors on quality of high-density briquettes produced from sawdust admixture. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 38, p.

949–957, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.468. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.468>.

BERNHART, M.; FASINA, O. O.; FULTON, J.; WOOD, C. W. Compaction of poultry litter. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 101, n. 1, p. 234–238, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.08.030. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.030>.

CARONE, Maria Teresa; PANTALEO, Antonio; PELLERANO, Achille. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 402–410, 2011. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.08.052. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.052>.

CHEN, Haili; FORBES, E. G. A.; ARCHER, J.; DE PRIALL, O.; ALLEN, M.; JOHNSTON, C.; ROONEY, D. Production and characterization of granules from agricultural wastes and comparison of combustion and emission results with wood based fuels. **Fuel**, [S. l.], v. 256, n. July, p. 115897, 2019. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115897. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115897>.

CHIAO, Chih-Hua; HAMADA, Michael. Analyzing Experiments with Correlated Multiple Responses. **Journal of Quality Technology**, [S. l.], v. 33, n. 4, p. 451–465, 2001. DOI: 10.1080/00224065.2001.11980104. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00224065.2001.11980104>.

D. PADILLA, Elias Ricardo; S. A. PIRES, Isis Cristina; M. YAMAJI, Fabio; M. FANDIÑO, Jorge Mario. Production and Physical-Mechanical Characterization of Briquettes from Coconut Fiber and Sugarcane Straw. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 8, n. 5, p. 1334–1346, 2016. DOI: 10.21577/1984-6835.20160095. Disponível em: http://rvq.s bq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=647&nomeArquivo=v8n5a07.pdf.

DUTTA, Partha Pratim; DAS, Ashutosh; PANDEY, Vivek; DEVI, Manasi. Fuel Characteristics of Some Locally Available Biomass as a Potential Gasification Feedstock for Thermal Application. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S. l.], v. 53, n. 51, p. 19806–19813, 2014. DOI: 10.1021/ie5034107. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie5034107>.

ENPLUS. **EN plus For Wood Pellets EN plus Handbook Part 6: Schedule of fees**, 2015. GARRIDO, Maria Angeles; CONESA, Juan A.; GARCIA, Maria Dolores. Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic Wastes. **Energies**, [S. l.], v. 10, n. 7, p. 850, 2017. DOI: 10.3390/en10070850. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/850>.

GERBA, Charles P.; SMITH, James E. Sources of pathogenic microorganisms and their fate during land application of wastes. **Journal of environmental quality**, [S. l.], v. 34, n. 1, p. 42–8, 2005. DOI: 10.2134/jeq2005.0042a. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15647533>.

GILVARI, Hamid; DE JONG, Wiebren; SCHOTT, Dingena L. Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors - A review. **Biomass**

and **Bioenergy**, [S. l.], v. 120, n. November 2018, p. 117–134, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.11.013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096195341830309X>.

GRANADO, Marcos Paulo Patta; SUHOGUSOFF, Yuri Valentinovich Machado; SANTOS, Luis Ricardo Oliveira; YAMAJI, Fabio Minoru; DE CONTI, Andrea Cressoni. Effects of pressure densification on strength and properties of cassava waste briquettes. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 167, p. 306–312, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2020.11.087. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.087>.

GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. Biomass Briquetting : Technology and Pratices. Regional wood energy development program in Asia, field document no. 46. Bangkok, Thailand: Food and Agriculture Organization of the United Nations; [S. l.], n. 46, 1996.

HELWANI, Zuchra et al. Alternative Briquette Material Made from Palm Stem Biomass Mediated by Glycerol Crude of Biodiesel Byproducts as a Natural Adhesive. **Processes**, [S. l.], v. 8, n. 7, p. 777, 2020. DOI: 10.3390/pr8070777. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/7/777>.

KALIYAN, Nalladurai; MOREY, R. Vance. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 101, n. 3, p. 1082–1090, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.08.064. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>.

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J.J.; HENIHAN, A.M.; O'DWYER, T.F.; SUTTON, D.; LEAHY, M. J. .. Advances in poultry litter disposal technology – a review. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 83, p. 27–36, 2002.

KHLIFI, Saaida; LAJILI, Marzouk; BELGHITH, Saoussen; MEZLINI, Salah; TABET, Fouzi; JEGUIRIM, Mejd. Briquettes Production from Olive Mill Waste under Optimal Temperature and Pressure Conditions: Physico-Chemical and Mechanical Characterizations. **Energies**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 1214, 2020. DOI: 10.3390/en13051214. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/5/1214>.

KPALO, Sunday Yusuf; ZAINUDDIN, Mohamad Faiz; MANAF, Latifah Abd; ROSLAN, Ahmad Muhaimin. Production and Characterization of Hybrid Briquettes from Corncobs and Oil Palm Trunk Bark under a Low Pressure Densification Technique. **Sustainability**, [S. l.], v. 12, n. 6, p. 2468, 2020. a. DOI: 10.3390/su12062468. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/6/2468>.

KPALO, Sunday Yusuf; ZAINUDDIN, Mohamad Faiz; MANAF, Latifah Abd; ROSLAN, Ahmad Muhaimin. A Review of Technical and Economic Aspects of Biomass Briquetting. **Sustainability**, [S. l.], v. 12, n. 11, p. 4609, 2020. b. DOI: 10.3390/su12114609. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/11/4609>.

KUMAR, Ritesh; CHANDRASHEKAR, N. Production and characterization of briquettes from invasive forest weeds: Lantana camara and Prosopis juliflora. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 158–164, 2020. DOI: 10.1007/s13196-020-00268-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13196-020-00268-8>.

LYNCH, Deirdre; HENIHAN, Anne Marie; BOWEN, Barry; LYNCH, Declan; MCDONNELL, Kevin; KWAPINSKI, Witold; LEAHY, J. J. Utilisation of poultry litter as an energy feedstock. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 49, n. 0, p. 197–204, 2013. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.12.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.009>.

MARREIRO, Hívila M. P.; PERUCHI, Rogério S.; LOPES, Riuzuani M. B. P.; ANDERSEN, Silvia L. F.; ELIZIÁRIO, Sayonara A.; ROTELLA JUNIOR, Paulo. Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. **Energies**, [S. l.], v. 14, n. 24, p. 8320, 2021. DOI: 10.3390/en14248320. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/24/8320>.

MENDOZA MARTINEZ, Clara Lisseth; SERMYAGINA, Ekaterina; DE CASSIA OLIVEIRA CARNEIRO, Angélica; VAKKILAINEN, Esa; CARDOSO, Marcelo. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 123, n. January, p. 70–77, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.02.013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.013>.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MYERS, Raymond H.; MONTGOMERY, Douglas C.; ANDERSON-COOK, Christine M. **Response Surface Methodology: process and product optimization using designed experiments**. John Wiley & Sons, 3 ed. 2009.

NAVALTA, Carl John Louie G.; BANAAG, Kristian Gregg C.; RABOY, Von Adrian O.; GO, Alchris W.; CABATINGAN, Luis K.; JU, Yi-Hsu. Solid fuel from Co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 147, p. 1941–1958, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.129. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.129>.

NIÑO, Andrés; ARZOLA, Nelson; ARAQUE, Oscar. Experimental Study on the Mechanical Properties of Biomass Briquettes from a Mixture of Rice Husk and Pine Sawdust. **Energies**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 1060, 2020. DOI: 10.3390/en13051060. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/5/1060>.

NUNES, Eduardo Z.; ANDRADE, Azarias M. De; DIAS JÚNIOR, Ananias F. Production of briquettes using coconut and eucalyptus wastes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 23, n. 11, p. 883–888, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n11p883-888. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662019001100883&tlng=en.

PÉREZ-ARÉVALO, J. J.; CALLEJÓN-FERRE, A. J.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; SUÁREZ-MEDINA, M. D. Prediction models based on higher heating value from the elemental analysis of neem, mango, avocado, banana, and carob trees in Guayas (Ecuador). **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 053122, 2015. DOI: 10.1063/1.4934593. Disponível em: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4934593>.

PERUCHI, Rogerio Santana; ROTELA JUNIOR, Paulo; BRITO, Tarcisio G.; PAIVA,

Anderson P.; BALESTRASSI, Pedro P.; MENDES ARAUJO, Lavinia M. Integrating Multivariate Statistical Analysis into Six Sigma DMAIC Projects: A Case Study on AISI 52100 Hardened Steel Turning. **IEEE Access**, [S. l.], v. 8, p. 34246–34255, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973172.

POLESEK-KARCZEWSKA, S.; TURZYŃSKI, T.; KARDAŚ, D.; HEDA, Ł. Front velocity in the combustion of blends of poultry litter with straw. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 176, n. March, p. 307–315, 2018. DOI: 10.1016/j.fuproc.2018.03.040. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382017319720>.

QIAN, Xuejun; LEE, Seong; SOTO, Ana-maria; CHEN, Guangming. Regression Model to Predict the Higher Heating Value of Poultry Waste from Proximate Analysis. **Resources**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 39, 2018. DOI: 10.3390/resources7030039. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2079-9276/7/3/39>.

S. MASULLO, Liamara; S. ALESI, Letícia; M. C. QUADROS, Taruhim; A. DA SILVA, Diego; A. DE PÁDUA, Franciane; M. YAMAJI, Fabio. Use of Blends Containing Different Proportions of Straw and Sugarcane Bagasse for the Production of Briquettes. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 641–654, 2018. DOI: 10.21577/1984-6835.20180047. Disponível em: http://rvq.s bq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=911&nomeArquivo=v10n3a15.pdf.

SANTOS DALÓLIO, Felipe; DA SILVA, Jadir Nogueira; CARNEIRO DE OLIVEIRA, Angélica Cássia; FERREIRA TINÔCO, Ilda de Fátima; CHRISTIAM BARBOSA, Rúben; RESENDE, Michael de Oliveira; TEIXEIRA ALBINO, Luiz Fernando; TEIXEIRA COELHO, Suani. Poultry litter as biomass energy: A review and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 76, n. March, p. 941–949, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.104. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.104>.

SETTER, Carine; ATAÍDE, Carlos Henrique; MENDES, Rafael Farinassi; DE OLIVEIRA, Tiago José Pires. Influence of particle size on the physico-mechanical and energy properties of briquettes produced with coffee husks. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 28, n. 7, p. 8215–8223, 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-11124-0. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11356-020-11124-0>.

SETTER, Carine; SANCHEZ COSTA, Karen Letícia; PIRES DE OLIVEIRA, Tiago José; FARINASSI MENDES, Rafael. 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**, [S. l.], v. 210, n. April, p. 106561, 2020. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106561. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106561>.

SIAHDASHTI, Majid Salehi; TALAEIPOOR, Mohammad; KHADEMIESLAM, Habibollah; BAZYAR, Behzad. Investigation of physical and thermal properties of fuel briquettes made of bagasse. **BioResources**, [S. l.], v. 17(2), p. 2053–2073, 2022. DOI: 10.15376/biores.17.2.2053-2073.

SINGH, Deepak Kumar; TIRKEY, J. V. Process modelling and thermodynamic performance optimization of biomass air gasification fuelled with waste poultry litter pellet by integrating Aspen plus with RSM. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 158, n. June 2021, p. 106370, 2022.

DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106370. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106370>

SMITH, Ana K. de G.; ALESI, Letícia S.; VARANDA, Luciano D.; SILVA, Diego A. Da; SANTOS, Luis R. O.; YAMAJI, Fábio M. Production and evaluation of briquettes from urban pruning residue and sugarcane bagasse. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 138–143, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n2p138-143. Disponível em:
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662019000200138&tlng=en

TIAMMEE, Supalin; LIKASIRI, Chulin. Sustainability in corn production management: A multi-objective approach. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 257, p. 120855, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120855. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620309021>.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado apresentou o método de briquetagem como uma rota de conversão da biomassa *in natura*, sendo uma solução para elevar suas características físicas e energéticas a fim de promover seu aproveitamento para geração de energia. Para isso, foram selecionadas duas biomassas, a madeira da poda e a cama de aviário. A pesquisa consistiu-se numa otimização bem-sucedida do processo de briquetagem desses materiais, atingindo resultados elevados de poder calorífico, baixo teor de umidade e elevada densidade simultaneamente, sendo essas, características ideais à aplicação energética. Todo o desenvolvimento da pesquisa sucedeu-se de acordo com os passos da pesquisa experimental, encontrado resultados modelados matematicamente e validados estatisticamente.

O primeiro artigo foi o ponto de partida de toda pesquisa experimental, pois fundamentou-se numa revisão sistemática da literatura, a qual deu embasamento teórico para a condução dos experimentos e permitiu a identificação lacunas para o desenvolvimento de novas pesquisas. Por meio dele foi possível identificar as principais propriedades dos briquetes, assim como os fatores aplicados na sua produção, que são: granulometria, pressão, teor de umidade, tempo de compactação, aglutinante, proporção de biomassa a compor os briquetes e temperatura.

O artigo também permitiu inferir sobre os níveis mais frequentemente aplicados a algumas variáveis de entrada do processo de briquetagem como o teor de umidade inicial da biomassa (8 a 12%), temperatura aplicada (120°C), pressão (intermediárias), granulometria (partículas pequenas). Também se observou a influência da presença de aglutinantes sobre as propriedades físico-mecânicas e energéticas dos briquetes, e que o poder calorífico inicial da biomassa influencia diretamente o poder calorífico final dos briquetes.

Quanto as propriedades dos briquetes, observou-se que as variáveis de resposta mais estudadas foram PCS, TU, TC, densidade e resistência à compressão. De acordo com o estudo, é possível produzir briquetes em máquinas hidráulicas e atingir a densidade (750kg/m³) determinada por normas de qualidade como a ENplus. Em contrapartida, os menores resultados para resistência à compressão foram encontrados utilizando máquinas manuais (hidráulica ou mecânica). Para analisar os resultados obtidos, os testes estatísticos mais aplicados foram a ANOVA e teste de Tukey. Devido as muitas variáveis de entrada e de saída, recomenda-se que os experimentos sigam planejamentos experimentais e realizem estudos de otimização.

O segundo artigo consiste na consolidação dos conhecimentos adquiridos no artigo anterior por meio da condução do processo de produção dos briquetes feitos de madeira da poda e da cama de aviário. A partir de ambas as biomassas foi possível obter briquetes com elevado potencial energético. O processo de otimização multiobjetivo aplicado foi capaz de encontrar uma resposta única que maximizou o PCS (22,753MJ/kg) e a densidade (1180,44kg/m³) do briquete, ao passo que minimizou o seu TU (9,159%). Esses valores são obtidos a partir da combinação das variáveis de entrada carga, no nível de 9t, tempo de compactação em 194s, granulometria de 30 mesh e proporção de 50:50 de cama de aviário e madeira da poda.

Os resultados experimentais encontrados na pesquisa provam a eficiência do método de briquetagem para elevar as propriedades da biomassa *in natura*, dado o incremento do PCS de ambas as biomassas após a densificação. O mesmo ocorreu para os briquetes compostos de 50% em massa de cada biomassa (24,177MJ/kg). A densidade também aumentou, atingindo valores de 1252,02kg/m³ e o menor teor de umidade alcançado foi de 9,05%.

De modo geral, a pesquisa pode auxiliar na definição dos processos metodológicos de produção de briquetes de maneira otimizada, contribuindo com dados estatisticamente validados acerca dos briquetes produzidos a partir dos materiais residuais que são a madeira da poda e a cama de aviário.

5. REFERÊNCIAS

ABBASI, M.; EL HANANDEH, A. Forecasting municipal solid waste generation using artificial intelligence modelling approaches. **Waste Management**, v. 56, p. 13–22, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.05.018.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2018/2019**, 2019.

ANSARI, Dawud; HOLZ, Franziska. Between stranded assets and green transformation: Fossil-fuel-producing developing countries towards 2055. **World Development**, [S. l.], v. 130, p. 104947, 2020. DOI: 10.1016/j.worlddev.2020.104947. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104947>.

ANTMEN, Z. F. EXPLOITATION OF PEANUT AND HAZELNUT SHELLS AS AGRICULTURAL INDUSTRIAL WASTES FOR SOLID BIOFUEL PRODUCTION. **FRESENIUS ENVIRONMENTAL BULLETIN**, [S. l.], v. 28, p. 2340–2347, 2019.

ANTWI-BOASIAKO, C.; ACHEAMPONG, B. B. Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 85, p. 144–152, 2016. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.12.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.006>.

ARANSIOLA, E. F.; OYEWUSI, T. F.; OSUNBITAN, J. A.; OGUNJIMI, L. A. O. Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized corncob briquette. **Energy Reports**, [S. l.], v. 5, p. 909–918, 2019. DOI: 10.1016/j.egy.2019.07.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.07.011>.

ARAÚJO, Solange; BOAS, Mariana Almeida Vilas; NEIVA, Duarte Miranda; DE CASSIA CARNEIRO, Angélica; VITAL, Benedito; BREGUEZ, Marcelino; PEREIRA, Helena. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 90, p. 181–186, 2016. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.04.007.

ARAÚJO, Yuri Rommel Vieira; DE GÓIS, Monijany Lins; JUNIOR, Luiz Moreira Coelho; CARVALHO, Monica. Carbon footprint associated with four disposal scenarios for urban pruning waste. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 1863–1868, 2018. DOI: 10.1007/s11356-017-0613-y. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11356-017-0613-y>.

ARDAKANI, Mostafa K.; WULFF, Shaun S. An overview of optimization formulations for multiresponse surface problems. **Quality and Reliability Engineering International**, [S. l.], v. 29, n. 1, p. 3–16, 2013. DOI: 10.1002/qre.1288

BAEYENS, Jan; KANG, Qian; APPELS, Lise; DEWIL, Raf; LV, Yongqin; TAN, Tianwei. Challenges and opportunities in improving the production of bio-ethanol. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S. l.], v. 47, p. 60–88, 2015. DOI: 10.1016/j.pecs.2014.10.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2014.10.003>.

BAHRU, Tinsae; KIDANE, Berhane; TOLESSA, Amsalu. Prioritization and selection of high fuelwood producing plant species at Boset District, Central Ethiopia: an ethnobotanical approach. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 51, 2021. DOI: 10.1186/s13002-021-00474-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13002-021-00474-9>.

BAZARGAN, Alireza; ROUGH, Sarah L.; MCKAY, Gordon. Fine tuning of process parameters for improving briquette production from palm kernel shell gasification waste. **Environmental Technology**, [S. l.], v. 39, n. 7, p. 931–938, 2018. DOI: 10.1080/09593330.2017.1317835. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1317835>.

BELLO, R. S.; ONILUDE, M. A. Effects of critical extrusion factors on quality of high-density briquettes produced from sawdust admixture. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 38, p. 949–957, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.468. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.468>.

BERNHART, M.; FASINA, O. O.; FULTON, J.; WOOD, C. W. Compaction of poultry litter. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 101, n. 1, p. 234–238, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.08.030. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.030>.

BONASSA, G. et al. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. June 2016, p. 2365–2378, fev. 2018.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional (BEN)**. Ministério de Minas e Energia (MME). Relatório Síntese 2022, Ano base 2021. 2022a. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. > Acesso em: 08 de outubro de 2022.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional (BEN)**. Ministério de Minas e Energia (MME). Balanco Energético Nacional 2022, ano base 2021. Relatório final. 2022b. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>>. Acesso em: 08 de outubro de 2022.

BRASIL. **Organização Mundial de Saúde declara pandemia do novo Coronavírus**. Empresa Brasil de Comunicação (EBC), 2020c. Disponível em: < <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-03/organizacao-mundial-da-saude-declara-pandemia-de-coronavirus>> Acesso em: 29 de março de 2021.

BREYER, Christian; HEINONEN, Sirkka; RUOTSALAINEN, Juho. New consciousness: A societal and energetic vision for rebalancing humankind within the limits of planet Earth. **Technological Forecasting and Social Change**, [S. l.], v. 114, p. 7–15, 2017. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.06.029. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2016.06.029>.

BRIDGWATER, Tony. Biomass for energy. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [S. l.], v. 86, n. 12, p. 1755–1768, 2006. DOI: 10.1002/jsfa.2605. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/jsfa.2605>.

BROWN, J. H. et al. Energetic Limits to Economic Growth. **BioScience**, v. 61, n. 1, p. 19–26, jan. 2011.

CARONE, Maria Teresa; PANTALEO, Antonio; PELLERANO, Achille. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 402–410, 2011. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.08.052. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.052>.

CHEN, Haili; FORBES, E. G. A.; ARCHER, J.; DE PRIALL, O.; ALLEN, M.; JOHNSTON, C.; ROONEY, D. Production and characterization of granules from agricultural wastes and comparison of combustion and emission results with wood based fuels. **Fuel**, [S. l.], v. 256, n. July, p. 115897, 2019. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115897. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115897>.

CHALOUPKOVÁ, Veronika; IVANOVA, Tatiana; EKRT, Ondřej; KABUTEY, Abraham; HERÁK, David. Determination of Particle Size and Distribution through Image-Based Macroscopic Analysis of the Structure of Biomass Briquettes. **Energies**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 331, 2018. DOI: 10.3390/en11020331. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1073/11/2/331>.

CHIAO, Chih-Hua; HAMADA, Michael. Analyzing Experiments with Correlated Multiple Responses. **Journal of Quality Technology**, [S. l.], v. 33, n. 4, p. 451–465, 2001. DOI: 10.1080/00224065.2001.11980104. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00224065.2001.11980104>.

CHUNG, Frank H. Unified theory and guidelines on adhesion. **Journal of Applied Polymer Science**, [S. l.], v. 42, n. 5, p. 1319–1331, 1991. DOI: 10.1002/app.1991.070420515.

CHUNGCHAROEN, Thatchapol; SRISANG, Naruebodee. Preparation and characterization of fuel briquettes made from dual agricultural waste: Cashew nut shells and areca nuts. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 256, p. 120434, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120434.

D. PADILLA, Elias Ricardo; S. A. PIRES, Isis Cristina; M. YAMAJI, Fabio; M. FANDIÑO, Jorge Mario. Production and Physical-Mechanical Characterization of Briquettes from Coconut Fiber and Sugarcane Straw. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 8, n. 5, p. 1334–1346, 2016. DOI: 10.21577/1984-6835.20160095. Disponível em: http://rvq.s bq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=647&nomeArquivo=v8n5a07.pdf.

DE OLIVEIRA MAIA, Bianca G.; DE OLIVEIRA, Antonio P. N.; DE OLIVEIRA, Therezinha M. N.; MARANGONI, Cintia; SOUZA, Ozair; SELLIN, Noeli. Characterization and production of banana crop and rice processing waste briquettes. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, [S. l.], v. 37, n. 4, p. 1266–1273, 2018. DOI: 10.1002/ep.12798. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/ep.12798>.

DE OLIVEIRA MAIA, Bianca G.; SOUZA, Ozair; MARANGONI, Cintia; HOTZA, Dachamir; DE OLIVEIRA, Antonio Pedro N.; SELLIN, Noeli. Production and characterization of fuel briquettes from banana leaves waste. **Chemical Engineering Transactions**, [S. l.], v. 37, p. 439–444, 2014. DOI: 10.3303/CET1437074.

DE OLIVEIRA, Ricardo Sonsim; PALÁCIO, Soraya Moreno; DA SILVA, Edson Antonio; MARIANI, Filipe Quadros; REINEHR, Thiago Olinek. Briquettes production for use as power source for combustion using charcoal thin waste and sanitary sewage sludge. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 24, n. 11, p. 10778–10785, 2017. DOI: 10.1007/s11356-017-8695-0. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11356-017-8695-0>.

DINESHA, P.; KUMAR, Shiva; ROSEN, Marc A. Biomass Briquettes as an Alternative Fuel: A Comprehensive Review. **Energy Technology**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 1801011, 2019. DOI: 10.1002/ente.201801011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ente.201801011>.

DUCA, D.; RIVA, G.; FOPPA PEDRETTI, E.; TOSCANO, G. Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. **Fuel**, [S. l.], v. 135, p. 9–14, 2014. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.06.042. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.042>.

DUTTA, Partha Pratim; DAS, Ashutosh; PANDEY, Vivek; DEVI, Manasi. Fuel Characteristics of Some Locally Available Biomass as a Potential Gasification Feedstock for Thermal Application. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S. l.], v. 53, n. 51, p. 19806–19813, 2014. DOI: 10.1021/ie5034107. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie5034107>.

EL-DESOUKY, Mohamed G.; KHALIL, Muhammad A.; EL-BINDARY, Ashraf A.; EL-BINDARY, Mohamed A. Biological, Biochemical and Thermochemical Techniques for Biofuel Production: an Updated Review. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 3034–3054, 2021. DOI: 10.33263/BRIAC123.30343054. Disponível em: <https://biointerfaceresearch.com/wp-content/uploads/2021/08/20695837123.30343054.pdf>.

ENPLUS. **EN plus For Wood Pellets EN plus Handbook Part 6: Schedule of fees**, 2015. FAIZAL, Hasan Mohad; RAHMAN, Mohd Rosdzimin Abdul; LATIFF, Zulkarnain Abdul. REVIEW ON DENSIFICATION OF PALM RESIDUES AS A TECHNIQUE FOR BIOMASS ENERGY UTILIZATION. **Jurnal Teknologi**, [S. l.], v. 2, p. 31–39, 2016.

FEBBI, Paolo; MENESATTI, Paolo; COSTA, Corrado; PARI, Luigi; CECCHINI, Massimo. Automated determination of poplar chip size distribution based on combined image and multivariate analyses. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 73, p. 1–10, 2015. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.12.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.12.001>.

FELFLI, Felix Fonseca; MESA P, Juan M.; ROCHA, José Dilcio; FILIPPETTO, Daniele; LUENGO, Carlos A.; PIPPO, Walfrido Alonso. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 236–242, 2011. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.08.011.

FERNANDES, Eveline Ribas Kasper; MARANGONI, Cintia; SOUZA, Ozair; SELLIN, Noeli. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 75, p. 603–608, 2013. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.08.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.008>.

FRANCIK, Sławomir; KNAPCZYK, Adrian; KNAPCZYK, Artur; FRANCIK, Renata. Decision Support System for the Production of Miscanthus and Willow Briquettes. **Energies**, *[S. l.]*, v. 13, n. 6, p. 1364, 2020. DOI: 10.3390/en13061364.

GADO, Ibrahim H.; OUMINGA, Salifou K.; DAHO, Tizane; YONLI, Arsène H.; SOUGOTI, Moussa; KOULIDIATI, Jean. Characterization of Briquettes Coming From Compaction of Paper and Cardboard Waste at Low and Medium Pressures. **Waste and Biomass Valorization**, *[S. l.]*, v. 5, n. 4, p. 725–731, 2014. DOI: 10.1007/s12649-013-9282-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12649-013-9282-3>.

GARCIA, D. P. et al. Comparative Energy Properties of Torrefied Pellets in Relation to Pine and Elephant Grass Pellets. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 2898–2906, 28 fev. 2018.

GARRIDO, Maria Angeles; CONESA, Juan A.; GARCIA, Maria Dolores. Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic Wastes. **Energies**, *[S. l.]*, v. 10, n. 7, p. 850, 2017. DOI: 10.3390/en10070850. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/850>.

GERBA, Charles P.; SMITH, James E. Sources of pathogenic microorganisms and their fate during land application of wastes. **Journal of environmental quality**, *[S. l.]*, v. 34, n. 1, p. 42–8, 2005. DOI: 10.2134/jeq2005.0042a. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15647533>.

GILBERT, P.; RYU, C.; SHARIFI, V.; SWITHENBANK, J. Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. **Fuel**, *[S. l.]*, v. 88, n. 8, p. 1491–1497, 2009. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.03.015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.03.015>.

GILVARI, Hamid; DE JONG, Wiebren; SCHOTT, Dingen L. Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors - A review. **Biomass and Bioenergy**, *[S. l.]*, v. 120, n. November 2018, p. 117–134, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.11.013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096195341830309X>.

GRANADO, Marcos Paulo Patta; SUHOGUSOFF, Yuri Valentinovich Machado; SANTOS, Luis Ricardo Oliveira; YAMAJI, Fabio Minoru; DE CONTI, Andrea Cressoni. Effects of pressure densification on strength and properties of cassava waste briquettes. **Renewable Energy**, *[S. l.]*, v. 167, p. 306–312, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2020.11.087. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.087>.

GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. Biomass Briquetting : Technology and Pratices. Regional wood energy development program in Asia, field document no. 46. Bangkok, Thailand: Food and Agriculture Organization of the United Nations; *[S. l.]*, n. 46, 1996.

GUO, Qiang; CHEN, Xueli; LIU, Haifeng. Experimental research on shape and size distribution of biomass particle. **Fuel**, *[S. l.]*, v. 94, p. 551–555, 2012. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.11.041. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.041>.

GWENZI, Willis; NCUBE, Rumbidzai S.; RUKUNI, Tungamirai. Development, properties and potential applications of high-energy fuel briquettes incorporating coal dust, biowastes and

post-consumer plastics. **SN Applied Sciences**, [S. l.], v. 2, n. 6, p. 1006, 2020. DOI: 10.1007/s42452-020-2799-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2799-8>.

HELWANI, Zuchra et al. Alternative Briquette Material Made from Palm Stem Biomass Mediated by Glycerol Crude of Biodiesel Byproducts as a Natural Adhesive. **Processes**, [S. l.], v. 8, n. 7, p. 777, 2020. DOI: 10.3390/pr8070777. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/7/777>.

IFTIKHAR, Maira; ASGHAR, Anam; RAMZAN, Naveed; SAJJADI, Baharak; CHEN, Wei-yin. Biomass densification: Effect of cow dung on the physicochemical properties of wheat straw and rice husk based biomass pellets. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 122, n. January, p. 1–16, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.01.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.005>.

IVANOVA, Tatiana; MUNTEAN, Alexandru; LHAVRLAND, Bohumi; HUTLA, Petr. Quality assessment of solid biofuel made of sweet sorghum biomass. **BIO Web of Conferences**, [S. l.], v. 10, p. 02007, 2018. DOI: 10.1051/bioconf/20181002007. Disponível em: <https://www.bio-conferences.org/10.1051/bioconf/20181002007>.

KALIYAN, Nalladurai; MOREY, R. Vance. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 101, n. 3, p. 1082–1090, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.08.064. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>.

KALIYAN, Nalladurai; VANCE MOREY, R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 337–359, 2009. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.08.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>.

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J.J.; HENIHAN, A.M.; O'DWYER, T.F.; SUTTON, D.; LEAHY, M. J. .. Advances in poultry litter disposal technology – a review. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 83, p. 27–36, 2002.

KHLIFI, Saaida; LAJILI, Marzouk; BELGHITH, Saoussen; MEZLINI, Salah; TABET, Fouzi; JEGUIRIM, Mejdí. Briquettes Production from Olive Mill Waste under Optimal Temperature and Pressure Conditions: Physico-Chemical and Mechanical Characterizations. **Energies**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 1214, 2020. DOI: 10.3390/en13051214. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/5/1214>.

KPALO, Sunday Yusuf; ZAINUDDIN, Mohamad Faiz; MANAF, Latifah Abd; ROSLAN, Ahmad Muhaimin. Production and Characterization of Hybrid Briquettes from Corncobs and Oil Palm Trunk Bark under a Low Pressure Densification Technique. **Sustainability**, [S. l.], v. 12, n. 6, p. 2468, 2020. a. DOI: 10.3390/su12062468. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/6/2468>.

KPALO, Sunday Yusuf; ZAINUDDIN, Mohamad Faiz; MANAF, Latifah Abd; ROSLAN, Ahmad Muhaimin. A Review of Technical and Economic Aspects of Biomass Briquetting. **Sustainability**, [S. l.], v. 12, n. 11, p. 4609, 2020. b. DOI: 10.3390/su12114609. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/11/4609>.

KRIŽAN, Peter; MATÚ, Miloš; ŠOOŠ, Ľubomír; BENIAK, Juraj. Behavior of Beech Sawdust during Densification into a Solid Biofuel. **Energies**, [S. l.], v. 8, n. 7, p. 6382–6398, 2015. DOI: 10.3390/en8076382. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/7/6382>.

KUMAR, Ritesh; CHANDRASHEKAR, N. Production and characterization of briquettes from invasive forest weeds: Lantana camara and Prosopis juliflora. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 158–164, 2020. DOI: 10.1007/s13196-020-00268-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13196-020-00268-8>.

KZ KU AHMADA, KHAZI Q SAZALIA, A. .. Kamarolzamanb. ScienceDirect Characterization of fuel briquettes from banana tree waste. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 5, n. 10, p. 21744–21752, 2018. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.07.027. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.027>.

LEI, Tingzhou; WANG, Zhiwei; LI, Zaifeng; XU, Jiufeng; HE, Xiaofeng; ZHU, Jinling. A biomass briquetting fuel machine and its large-scale operation system. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 013107, 2013. DOI: 10.1063/1.4781089. Disponível em: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4781089>.

LELA, B.; BARIŠIĆ, M.; NIŽETIĆ, S. Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical–mechanical and thermal characteristics. **Waste Management**, [S. l.], v. 47, p. 236–245, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.10.035.

LÜ, Jing; SHEAHAN, Con; FU, Pengcheng. Metabolic engineering of algae for fourth generation biofuels production. **Energy & Environmental Science**, [S. l.], v. 4, n. 7, p. 2451, 2011. DOI: 10.1039/c0ee00593b. Disponível em: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c0ee00593b>.

LYNCH, Deirdre; HENIHAN, Anne Marie; BOWEN, Barry; LYNCH, Declan; MCDONNELL, Kevin; KWAPINSKI, Witold; LEAHY, J. J. Utilisation of poultry litter as an energy feedstock. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 49, n. 0, p. 197–204, 2013. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.12.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.009>.

MANI, Sudhagar; TABIL, Lope G.; SOKHANSANJ, Shahab. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 30, n. 7, p. 648–654, 2006. DOI: 10.1016/j.biombioe.2005.01.004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953406000250>.

MARREIRO, Hívila M. P.; PERUCHI, Rogério S.; LOPES, Riuzuani M. B. P.; ANDERSEN, Silvia L. F.; ELIZIÁRIO, Sayonara A.; ROTELLA JUNIOR, Paulo. Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. **Energies**, [S. l.], v. 14, n. 24, p. 8320, 2021. DOI: 10.3390/en14248320. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/24/8320>.

MARTÍN-RAMOS, Pablo; MARTÍN-GIL, Jesús; GÓMEZ-GARCÍA, Daniel; CUCHÍ-OTERINO, José Antonio. On the Physicochemical Characteristics and Applications of an “Undesirable” Pyrenean Thorny Cushion Dwarf: *Echinopartum horridum* (Vahl) Roth. **Plants**, [S. l.], v. 9, n. 9, p. 1180, 2020. DOI: 10.3390/plants9091180. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/9/9/1180>.

MATA, Teresa M.; MARTINS, António A.; CAETANO, Nidia S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 217–232, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109001646>.

MENDOZA MARTINEZ, Clara Lisseth; SERMYAGINA, Ekaterina; DE CASSIA OLIVEIRA CARNEIRO, Angélica; VAKKILAINEN, Esa; CARDOSO, Marcelo. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 123, n. January, p. 70–77, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.02.013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.013>.

MOHD FAIZAL, Hasan; M. NAZRI, M. Shafiq; RAHMAN, Md Mizanur; SYAHRULLAIL, S.; LATIFF, Z. A. DEVELOPMENT OF PALM BIOMASS BRIQUETTES WITH POLYETHYLENE PLASTIC WASTE ADDITION. **Jurnal Teknologi**, [S. l.], v. 78, n. 9–2, p. 69–75, 2016. DOI: 10.11113/jt.v78.9657. Disponível em: <https://journals.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/9657>.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2013.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MORALES-MÁXIMO, M.; RUÍZ-GARCÍA, V. M.; LÓPEZ-SOSA, L. B.; RUTIAGA-QUIÑONES, J. G. Exploitation of Wood Waste of Pinus spp for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 10, n. 8, p. 2933, 2020. DOI: 10.3390/app10082933. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/8/2933>.

MUAZU, Rukayya I.; STEGEMANN, Julia A. Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 133, p. 137–145, 2015. DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.01.022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.022>.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. John Wiley & Sons, 3 ed. 2009.

NAIK, S. N.; GOUD, Vaibhav V.; ROUT, Prasant K.; DALAI, Ajay K. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 578–597, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2009.10.003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109002342>.

NATI, Carla; SPINELLI, Raffaele; FABBRI, Piergiorgio. Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 34, n. 5, p. 583–587, 2010. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.01.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.005>.

NAVALTA, Carl John Louie G.; BANAAG, Kristian Gregg C.; RABOY, Von Adrian O.; GO, Alchris W.; CABATINGAN, Luis K.; JU, Yi-Hsu. Solid fuel from Co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 147, p. 1941–1958, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.129. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.129>.

NIÑO, Andrés; ARZOLA, Nelson; ARAQUE, Oscar. Experimental Study on the Mechanical Properties of Biomass Briquettes from a Mixture of Rice Husk and Pine Sawdust. **Energies**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 1060, 2020. DOI: 10.3390/en13051060. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/5/1060>.

NUNES, Eduardo Z.; ANDRADE, Azarias M. De; DIAS JÚNIOR, Ananias F. Production of briquettes using coconut and eucalyptus wastes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 23, n. 11, p. 883–888, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n11p883-888. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662019001100883&tlng=en.

NUREK, Tomasz; GENDEK, Arkadiusz; ROMAN, Kamil; DĄBROWSKA, Magdalena. The effect of temperature and moisture on the chosen parameters of briquettes made of shredded logging residues. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 130, n. August, p. 105368, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105368. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105368>.

NWABUE, F. I.; UNAH, U.; ITUMOH, E. J. Production and characterization of smokeless bio-coal briquettes incorporating plastic waste materials. **Environmental Technology & Innovation**, [S. l.], v. 8, p. 233–245, 2017. DOI: 10.1016/j.eti.2017.02.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2017.02.008>.

OBI, Okey Francis. Effect of briquetting temperature on the properties of biomass briquettes. **African Journal of Science, Technology, Innovation and Development**, [S. l.], v. 7, n. 6, p. 386–394, 2015. DOI: 10.1080/20421338.2015.1096508. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20421338.2015.1096508>.

ODUGBESAN, Jamiu Adetola; RJOUB, Husam. Relationship Among Economic Growth, Energy Consumption, CO 2 Emission, and Urbanization: Evidence From MINT Countries. **SAGE Open**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 215824402091464, 2020. DOI: 10.1177/2158244020914648. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2158244020914648>.

OKOT, David K.; BILSBORROW, Paul E.; PHAN, Anh N. Effects of operating parameters on maize COB briquette quality. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 112, n. October 2017, p. 61–72, 2018. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.02.015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.015>.

OKOT, David K.; BILSBORROW, Paul E.; PHAN, Anh N. Briquetting characteristics of bean straw-maize cob blend. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 126, n. May, p. 150–158, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.05.009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.009>.

OKWU, Modestus O.; SAMUEL, Olusegun D. Adapted hyacinth briquetting machine for mass

production of briquettes. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, [*S. l.*], v. 40, n. 23, p. 2853–2866, 2018. DOI: 10.1080/15567036.2018.1512681. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1512681>.

OLADEJI, J. .. Theoretical aspects of biomass briquetting: A Review Study. **Journal of Energy Technologies and Policy**, [*S. l.*], v. 5, n. 3, p. 72–82, 2015. Disponível em: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JETP/article/view/20797>.

ONIFADE, Stephen Taiwo; ALOLA, Andrew Adewale; ERDOĞAN, Savaş; ACET, Hakan. Environmental aspect of energy transition and urbanization in the OPEC member states. **Environmental Science and Pollution Research**, [*S. l.*], 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-12181-1.

PANG, Longlong; YANG, Yuzhong; WU, Liyun; WANG, Fei; MENG, Han. Effect of Particle Sizes on the Physical and Mechanical Properties of Briquettes. **Energies**, [*S. l.*], v. 12, n. 19, p. 3618, 2019. DOI: 10.3390/en12193618. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/19/3618>.

PANWAR, Varun; PRASAD, B.; WASEWAR, Kailas L. Biomass Residue Briquetting and Characterization. **Journal of Energy Engineering**, [*S. l.*], v. 137, n. 2, p. 108–114, 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000040. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29EY.1943-7897.0000040>.

PÉREZ-ARÉVALO, J. J.; CALLEJÓN-FERRE, A. J.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; SUÁREZ-MEDINA, M. D. Prediction models based on higher heating value from the elemental analysis of neem, mango, avocado, banana, and carob trees in Guayas (Ecuador). **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, [*S. l.*], v. 7, n. 5, p. 053122, 2015. DOI: 10.1063/1.4934593. Disponível em: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4934593>.

PERUCHI, Rogerio Santana; ROTELA JUNIOR, Paulo; BRITO, Tarcisio G.; PAIVA, Anderson P.; BALESTRASSI, Pedro P.; MENDES ARAUJO, Lavinia M. Integrating Multivariate Statistical Analysis into Six Sigma DMAIC Projects: A Case Study on AISI 52100 Hardened Steel Turning. **IEEE Access**, [*S. l.*], v. 8, p. 34246–34255, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973172.

POLESEK-KARCZEWSKA, S.; TURZYŃSKI, T.; KARDAŚ, D.; HEDA, Ł. Front velocity in the combustion of blends of poultry litter with straw. **Fuel Processing Technology**, [*S. l.*], v. 176, n. March, p. 307–315, 2018. DOI: 10.1016/j.fuproc.2018.03.040. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382017319720>.

PRVULOVIC, Slavica; GLUVAKOV, Zorica; TOLMAC, Jasna; TOLMAC, Dragiša; MATIC, Marija; BRKIC, Miladin. Methods for Determination of Biomass Energy Pellet Quality. **Energy & Fuels**, [*S. l.*], v. 28, n. 3, p. 2013–2018, 2014. DOI: 10.1021/ef402361k. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef402361k>.

QIAN, Xuejun; LEE, Seong; SOTO, Ana-maria; CHEN, Guangming. Regression Model to Predict the Higher Heating Value of Poultry Waste from Proximate Analysis. **Resources**, [*S. l.*], v. 7, n. 3, p. 39, 2018. DOI: 10.3390/resources7030039. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2079-9276/7/3/39>.

QUIJERA, José Antonio; ALRIOLS, María González; LABIDI, Jalel. Integration of a solar thermal system in a dairy process. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 36, n. 6, p. 1843–1853, 2011. DOI: 10.1016/j.renene.2010.11.029. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.029>.

RASLAVIČIUS, Laurencas. Characterization of the woody cutting waste briquettes containing absorbed glycerol. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 45, p. 144–151, 2012. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.05.028. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.028>.

REJDAK, Michał; ROBAK, Jolanta; CZARDYBON, Agata; IGNASIAK, Karina; FUDAŁA, Piotr. 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**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 31, 2019. DOI: 10.3390/min10010031. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/10/1/31>.

SANTOS DALÓLIO, Felipe; DA SILVA, Jadir Nogueira; CARNEIRO DE OLIVEIRA, Angélica Cássia; FERREIRA TINÔCO, Ilda de Fátima; CHRISTIAM BARBOSA, Rúben; RESENDE, Michael de Oliveira; TEIXEIRA ALBINO, Luiz Fernando; TEIXEIRA COELHO, Suani. Poultry litter as biomass energy: A review and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 76, n. March, p. 941–949, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.104. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.104>.

SCHUCK, S. Biomass as an energy source. **International Journal of Environmental Studies**, v. 63, n. 6, p. 823–835, dez. 2006.

SECO, A.; ESPUELAS, S.; MARCELINO, S.; ECHEVERRÍA, A. M.; PRIETO, E. Characterization of Biomass Briquettes from Spent Coffee Grounds and Xanthan Gum Using Low Pressure and Temperature. **BioEnergy Research**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 369–377, 2019. DOI: 10.1007/s12155-019-10069-8. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12155-019-10069-8>.

SETTE, Carlos Roberto; HANSTED, Ana Larissa Santiago; NOVAES, Evandro; LIMA, Pedro Augusto Fonseca e.; RODRIGUES, Ana Claudia; SANTOS, Deborah Rodrigues de Souza; YAMAJI, Fabio Minoru. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 122, n. June, p. 209–213, 2018. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.05.057. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.057>.

SETTE JÚNIOR, Carlos Roberto; LIMA, Pedro Augusto Fonseca; LOPES, Domingos Manuel Mendes; BARBOSA, Pedro Vilela Gondim; CONEGLIAN, Ademilson; ALMEIDA, Rogério de Araújo. Characterization of biomass, charcoal and briquette of *Phyllostachys aurea* Carr. ex A. & C. Rivière. **Scientia Forestalis**, [S. l.], v. 45, n. 116, p. 619–628, 2017. DOI: 10.18671/scifor.v45n116.03. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/leitura.asp?Article=03&Number=116>.

SETTER, Carine; ATAÍDE, Carlos Henrique; MENDES, Rafael Farinassi; DE OLIVEIRA, Tiago José Pires. Influence of particle size on the physico-mechanical and energy properties of briquettes produced with coffee husks. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 28, n. 7, p. 8215–8223, 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-11124-0. Disponível em:

<http://link.springer.com/10.1007/s11356-020-11124-0>.

SETTER, Carine; SANCHEZ COSTA, Karen Letícia; PIRES DE OLIVEIRA, Tiago José; FARINASSI MENDES, Rafael. 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**, [S. l.], v. 210, n. April, p. 106561, 2020. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106561. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106561>.

SHARMA, A.; PAREEK, V.; ZHANG, D. Biomass pyrolysis - A review of modelling, process parameters and catalytic studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 1081–1096, 2015.

SIAHDASHTI, Majid Salehi; TALAEIPOOR, Mohammad; KHADEMIESLAM, Habibollah; BAZYAR, Behzad. Investigation of physical and thermal properties of fuel briquettes made of bagasse. **BioResources**, [S. l.], v. 17(2), p. 2053–2073, 2022. DOI: 10.15376/biores.17.2.2053-2073.

SINGH, Deepak Kumar; TIRKEY, J. V. Process modelling and thermodynamic performance optimization of biomass air gasification fuelled with waste poultry litter pellet by integrating Aspen plus with RSM. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 158, n. June 2021, p. 106370, 2022. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106370. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106370>

S. MASULLO, Liamara; S. ALESI, Letícia; M. C. QUADROS, Taruhim; A. DA SILVA, Diego; A. DE PÁDUA, Franciane; M. YAMAJI, Fabio. Use of Blends Containing Different Proportions of Straw and Sugarcane Bagasse for the Production of Briquettes. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 641–654, 2018. DOI: 10.21577/1984-6835.20180047. Disponível em: http://rvq.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=911&nomeArquivo=v10n3a15.pdf.

SMITH, Ana K. de G.; ALESI, Letícia S.; VARANDA, Luciano D.; SILVA, Diego A. Da; SANTOS, Luis R. O.; YAMAJI, Fábio M. Production and evaluation of briquettes from urban pruning residue and sugarcane bagasse. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 138–143, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n2p138-143. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662019000200138&tlng=en

SONG, Xiaobing; ZHANG, Shouyu; WU, Yuanmo; CAO, Zhongyao. Investigation on the properties of the bio-briquette fuel prepared from hydrothermal pretreated cotton stalk and wood sawdust. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 151, p. 184–191, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.11.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.003>.

TCHAPDA, Aime; PISUPATI, Sarma. A Review of Thermal Co-Conversion of Coal and Biomass/Waste. **Energies**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 1098–1148, 2014. DOI: 10.3390/en7031098. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1073/7/3/1098>.

THORESON, Curtis; WEBSTER, Keith; DARR, Matthew; KAPLER, Emily. Investigation of Process Variables in the Densification of Corn Stover Briquettes. **Energies**, [S. l.], v. 7, n. 6, p.

4019–4032, 2014. DOI: 10.3390/en7064019. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1073/7/6/4019>.

TIAMMEE, Supalin; LIKASIRI, Chulin. Sustainability in corn production management: A multi-objective approach. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 257, p. 120855, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120855. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620309021>.

TORRES GADELHA, A. M. et al. Cashew nut husk and babassu coconut husk residues: evaluation of their energetic properties. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 00, n. 00, p. 1–9, 19 nov. 2019.

TUMULURU, Jaya Shankar; FILLERUP, Eric. Briquetting characteristics of woody and herbaceous biomass blends: Impact on physical properties, chemical composition, and calorific value. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [S. l.], v. 14, n. 5, p. 1105–1124, 2020. DOI: 10.1002/bbb.2121. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bbb.2121>.

TUMULURU, Jaya Shankar; WRIGHT, Christopher T.; HESS, J. Richard; KENNEY, Kevin L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [S. l.], v. 5, n. 6, p. 683–707, 2011. DOI: 10.1002/bbb.324. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/bbb.324>.

UZAR, U. Is income inequality a driver for renewable energy consumption? **Journal of Cleaner Production**, v. 255, p. 120287, maio 2020.

VERMA, V. K.; BRAM, S.; DE RUYCK, J. Small scale biomass heating systems: Standards, quality labelling and market driving factors – An EU outlook. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 33, n. 10, p. 1393–1402, 2009. DOI: 10.1016/j.biombioe.2009.06.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.06.002>.

WAHEED, Mufutau Adekojo; AKOGUN, Opeyemi Ayodeji. Quality enhancement of fuel briquette from cornhusk and cassava peel blends for co-firing in coal thermal plant. **International Journal of Energy Research**, [S. l.], n. May, p. er.5865, 2020. DOI: 10.1002/er.5865. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.5865>.

WONGSIRIAMNUAY, Thanasit; TIPPAYAWONG, Nakorn. Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets. **Biosystems Engineering**, [S. l.], v. 139, p. 111–120, 2015. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.08.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.009>.

YOUNES, M. K. et al. Landfill area estimation based on integrated waste disposal options and solid waste forecasting using modified ANFIS model. **Waste Management**, v. 55, p. 3–11, set. 2016.

ZHANG, Jing; GUO, Yuming. Physical properties of solid fuel briquettes made from Caragana korshinskii Kom. **Powder Technology**, [S. l.], v. 256, p. 293–299, 2014. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.02.025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.02.025>.