



**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BIOMASSA DO DISTRITO
FEDERAL PARA FINS ENERGÉTICOS**

BRUNA BÁRBARA MACIEL AMORAS ORELLANA

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BIOMASSA DO DISTRITO
FEDERAL PARA FINS ENERGÉTICOS

BRUNA BÁRBARA MACIEL AMORAS ORELLANA

ORIENTADOR: Dr. Ailton Teixeira do Vale
TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

BRASÍLIA-DF, 20 DE FEVEREIRO DE 2019.

“UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BIOMASSA DO DISTRITO FEDERAL PARA
FINS ENERGÉTICOS”

BRUNA BÁRBARA MACIEL AMORAS ORELLANA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM CIÊNCIAS FLORESTAIS.

Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale
(Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB)
(ORIENTADOR)

AVALIADO POR:

Prof. Dr. Alexandre Florian da Costa
(Departamento de Engenharia Florestal - EFL/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

Dr. Alessandro César Moreira
(Serviço Florestal Brasileiro - SFB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

Prof. Dr. Carlos Roberto Sette Júnior
(Universidade Federal de Goiás – UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

Prof. Dr. Joaquim Carlos Gonzalez
(Departamento de Engenharia Florestal - EFL/UnB)
(EXAMINADOR SUPLENTE)

Dr. Divino Eterno Teixeira
(Serviço Florestal Brasileiro - SFB)
(EXAMINADOR SUPLENTE)

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ou Orellana, Bruna Bárbara Maciel Amoras
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BIOMASSA DO DISTRITO FEDERAL
PARA FINS ENERGÉTICOS / Bruna Bárbara Maciel Amoras
Orellana; orientador Ailton Teixeira do Vale. -- Brasília,
2019.
202 p.

Tese (Doutorado - Doutorado em Ciências Florestais) --
Universidade de Brasília, 2019.

1. Pellets. 2. Briquetes. 3. Bioenergia. 4.
Agroindústria. 5. Distrito Federal. I. Teixeira do Vale,
Ailton, orient. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ORELLANA, B.B.M.A. (2019). Utilização de resíduos de biomassa do Distrito Federal para fins energéticos. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 202p.

CESSÃO DE DIREITOS

Autora: Bruna Bárbara Maciel Amoras Orellana

Título: Utilização de resíduos de biomassa do Distrito Federal para fins energéticos.

Grau/ano: Doutor/2019.

É concedida à Universidade de Brasília-UnB permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias, com o propósito exclusivamente acadêmico e/ou científico. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Bruna Bárbara Maciel Amoras Orellana

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as bênçãos recebidas e pela oportunidade de concluir este trabalho.

Ao meu orientador Dr. Ailton Teixeira do Vale, por novamente ter me aceitado como orientanda, por toda atenção, dedicação e ensinamento compartilhado nesses quatro anos.

Ao meu esposo Jorge Breno pelo imenso incentivo que me deu em ingressar no programa de doutorado e por todo apoio durante o curso.

À minha mãe, pai, familiares e amigos que sempre torceram por mim.

Em nome do Técnico MSc. Vandui Francisco de Siqueira Dantas agradeço aos funcionários e colaboradores do Departamento de Engenharia Florestal que me ajudaram nos ensaios, nas coletas e nos preparos das amostras.

Ao Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro pela parceria com o Departamento de Engenharia Florestal, que permite aos alunos desenvolver importantes pesquisas científicas no setor florestal. Em especial aos funcionários e amigos do Laboratório de Bionergia: Bruno, Gustavo, Lucélia e Greg, pela atenção e espaço concedido para desenvolver meus ensaios laboratoriais. E, ainda, aos responsáveis pelo Laboratório de Química, Dr. Alessandro César e Francisco Lopes pelo acompanhamento nas análises químicas.

Aos demais professores e colegas do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais da UnB pelas trocas de ideias e informações.

Ao “mundo” UnB, do qual tenho muito orgulho de ter participado.

Por fim, agradeço imensamente a CAPES pela bolsa concedida e a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

Utilização de resíduos de biomassa do Distrito Federal para fins energéticos

Autora: Bruna Bárbara Maciel Amoras Orellana

Orientador: Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, 20 de fevereiro de 2019.

Dentre todos os usos da biomassa agroflorestal, a geração de energia pode ser considerada uma das mais expressivas. O Brasil é o país que mais possui vantagens para liderar a agricultura de energia, pois, como grande produtor agrícola, gera expressiva quantidade de biomassa residual nos processos resultantes da colheita e processamento de diversos produtos agropecuários. Uma das maneiras de utilização de biomassa como fonte energética é através do seu densificação em forma de pellets e briquetes. Este trabalho objetivou identificar as características físicas, químicas e energéticas de dez tipos de resíduos da agroindústria coletados na região do Distrito Federal e aplica-los à tecnologias de compactação de biomassa (pellets e briquetes), bem como analisar a viabilidade econômica da produção dos mesmos. Os resíduos *in natura* que apresentaram as características mais desejáveis para geração de energia foram: madeira de madeireira, madeira de construção civil, palha de milho e sabugo de milho. As quirelas de milho e de sorgo não apresentaram aptidão devido o excesso de amido. Os resíduos que melhor se adaptaram em forma de pellets foram palhada de milho, feijão e sabugo. Somente a madeira de madeireira não conseguiu se transformar em pellets. Quanto à formação de briquetes, todos os resíduos foram compactados, com destaque para madeira de madeireira, feijão, madeira de construção civil e milho palhada, que formaram briquetes firmes e sem rachaduras. Na análise econômica que simulou a produção em diferentes cenários, apenas os pellets se mostraram viáveis em escala industrial. O elevado investimento inicial e menor preço no mercado, inviabilizaram o fluxo de caixa na produção de briquetes em todos os cenários.

Palavras-chave: pellets, briquetes, bioenergia, agroindústria, Distrito Federal.

ABSTRACT

Use of biomass waste from the Federal District for energy purposes

Author: Bruna Bárbara Maciel Amoras Orellana

Supervisor: Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale

PhD Programme in Forestry

Brasília, february 20, 2019.

Among all the uses of biomass, the generation of energy can be considered the most expressive. Brazil is the country that has the most advantages to lead energy agriculture, since, as a large agricultural producer, it generates significant amounts of residual biomass in the processes resulting from the harvesting and processing of various agricultural products. One way of using biomass as an energy source is through its densification in the form of pellets and briquettes. The objective of this work was to raise the physical, chemical and energetic characteristics of ten types of agroindustry waste collected in the Federal District and apply them to biomass compaction technologies (pellets and briquettes), as well as to analyze the economic viability of their production. The residues that presented the most desirable characteristics for energy generation were: timber, construction timber, corn straw and corn cob. Corn and sorghum leaves were not apt due to excess starch. The residues that best adapted in the form of pellets were straw of corn, beans and cob. Only the timber could not turn into pellets. As for the form of briquettes, all the residues were compacted, with emphasis on timber, beans, construction timber and mulch, which formed firm briquettes and without cracking. In the economic analysis that simulated the production in different scenarios, only the pellets proved viable on an industrial scale. The high initial investment and lower price in the market, made the cash flow impossible to produce briquettes in all scenarios.

Key-words: pellets, briquettes, bioenergy, agroindustry, Federal District.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
Capítulo 1: Caracterização de resíduos agroindustriais	
1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1. Biomassa residual como fonte de energia.....	17
2.2. Resíduos provenientes de atividades agroindustriais.....	19
2.3. Caracterização dos resíduos lignocelulósicos.....	26
2.3.1. Teor de umidade	27
2.3.2. Granulometria e densidade a granel	28
2.3.3. Análise imediata	29
2.3.4. Poder calorífico	30
2.3.5. Análise elementar.....	31
2.3.6. Análise química.....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1. Coleta das biomassas residuais.....	35
3.2. Preparo das amostras.....	36
3.3. Teor de umidade.....	37
3.4. Caracterização dos resíduos.....	37
3.4.1. Análise granulométrica.....	37
3.4.2. Análise imediata.....	38
3.4.3. Poder Calorífico Superior (PCS).....	39
3.5. Densidade aparente (granel).....	40
3.6. Densidade energética.....	41
3.7. Análise química.....	41
3.7.1. Teor de Extrativos.....	41
3.7.2. Teor de cinzas sem extrativos.....	42
3.7.3. Teor de lignina insolúvel e insolúvel.....	42
3.7.4. Teor de lignina total.....	44
3.7.5. Teor de Holocelulose.....	44
3.8. Análise estatística.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1. Teor de umidade.....	45
4.2. Granulometria.....	47
4.3. Análise imediata.....	48
4.3.1. Materiais Voláteis.....	49
4.3.2. Teor de Cinzas.....	50
4.3.3. Carbono Fixo.....	52
4.4. Poder Calorífico Superior e Útil.....	53
4.5. Densidade a granel.....	55
4.6. Densidade energética.....	56

4.7. Análise química.....	57
5. CONCLUSÃO.....	60
Capítulo 2: Pellets de resíduos agrícolas	
1. INTRODUÇÃO.....	62
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	62
2.1. Adensamento de biomassa.....	62
2.2. O conceito de pellets de biomassa.....	64
2.3. Histórico da produção de pellets.....	65
2.4. Panorama atual da produção, comércio e logística de pellets no mundo	66
2.5. A técnica de peletização.....	71
2.6. Parâmetros que influenciam na produção dos pellets.....	76
2.7. Normas e certificação.....	78
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	83
3.1. Confeção dos pellets.....	83
3.2. Densidade aparente e granel.....	84
3.3. Resistência à compressão diametral.....	85
3.4. Durabilidade e teor de finos.....	85
3.5. Análise de combustão.....	86
3.6. Poder calorífico e densidade energética.....	87
3.7. Análise estatística.....	88
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	88
4.1. Propriedades físicas.....	89
4.2. Propriedades mecânicas.....	93
4.3. Poder calorífico e combustão.....	95
4.4. Densidade energética.....	101
4.5. Classificação de acordo com as normas internacionais.....	103
5. CONCLUSÃO.....	107
Capítulo 3: Briquetes de resíduos agrícolas	
1. INTRODUÇÃO.....	109
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	109
2.1. Histórico da produção de briquetes.....	109
2.2. Conceitos fundamentais.....	111
2.3. Mercado consumidor de briquetes.....	113
2.4. Princípios da técnica de briquetagem.....	114
2.5. Processo industrial de briquetagem.....	118
2.6. Parâmetros que influenciam na qualidade dos briquetes.....	120
2.7. Normas e classificação.....	123
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	125
3.1. Confeção dos briquetes.....	125
3.2. Densidade aparente.....	127

3.3. Resistência a compressão diametral.....	127
3.4. Durabilidade e teor de finos.....	128
3.5. Ensaio de combustão.....	128
3.6. Densidade energética.....	129
3.7. Análise estatística.....	129
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	130
4.1. Propriedades físicas.....	130
4.2. Propriedades mecânicas.....	133
4.3. Durabilidade e teor de finos.....	135
4.4. Combustão.....	137
4.5. Densidade Energética.....	141
4.6. Normas e padrões de qualidade de briquetes.....	143
5. CONCLUSÃO.....	144
Capítulo 4: Análise de viabilidade econômica da produção de pellets e briquetes	
1. INTRODUÇÃO.....	146
2. COMPARAÇÃO ENTRE OS PELLETS E BRIQUETES PRODUZIDOS.....	149
3. CONSIDERAÇÕES METODOLÓGICAS DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE PELLETS E BRIQUETES.....	151
3.1. Investimento inicial.....	152
3.2. Equipamentos.....	153
3.3. Mão-de-obra.....	155
3.4. Custo de manutenção.....	156
3.5. Consumo de energia elétrica.....	156
3.6. Impostos.....	158
3.7. Produção residual necessária para atender a demanda de fabricação.....	159
3.8. Indicadores de viabilidade econômica.....	162
3.9. Comercialização.....	164
3.10. Definição dos cenários.....	165
4. RESULTADOS.....	165
4.1. Investimentos e Custos Fixos e Variáveis.....	165
4.2. Cenários.....	167
4.3. Indicadores econômicos.....	177
5. CONCLUSÃO.....	178
CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	180
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	182

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1: Caracterização de resíduos agroindustriais.

Figura 1.1. Produção de cereais, leguminosas e oleaginosas no Brasil em 2017 por região.....	20
Figura 1.2. Classificação dos tipos de resíduos de madeira, segundo MMA (2009).....	23
Figura 1.3. Coleta dos resíduos na COOPA/DF.....	35
Figura 1.4. Resíduos <i>in natura</i> coletados.....	37
Figura 1.5. Classificação granulométrica.....	38
Figura 1.6. Ensaio de poder calorífico.....	39
Figura 1.7. Densidade a granel.....	41
Figura 1.8. Retirada dos extrativos dos resíduos.....	42
Figura 1.9. Processo de isolamento da lignina solúvel e insolúvel.....	43
Figura 1.10. Espectrofotômetro utilizado.....	44
Figura 1.11. Distribuição granulométrica dos resíduos.....	47
Figura 1.12. Teor de materiais voláteis dos resíduos (%).....	49
Figura 1.13. Teor de cinzas dos resíduos lignocelulósicos.....	50
Figura 1.14. Teor de carbono fixo dos resíduos lignocelulósicos.....	52
Figura 1.15. Densidade a granel dos resíduos.....	55

Capítulo 2: Pellets de resíduos agrícolas.

Figura 2.1. Processos de conversão energética da biomassa.....	62
Figura 2.2. Pellets de madeira.....	64
Figura 2.3. Localização geográfica dos moinhos de pellets na América do Norte.....	68
Figura 2.4. Principais etapas do processo de produção de pellets.....	70
Figura 2.5. Tipos de matrizes usadas no processo de peletização.....	74
Figura 2.6. Exemplos de Selos de Qualidade para as classes de qualidade ENplus A1, ENplus A2 e ENplus B.....	79
Figura 2.7. Peletizadora utilizada.....	82
Figura 2.8. Pellets produzidos eram expostos à temperatura ambiente para estabilização.....	83
Figura 2.9. Ensaio de densidade aparente dos pellets.....	83
Figura 2.10. Conjunto de teste de combustão, onde: 1 - Registrador de temperatura; 2 - balança digital; 3 - anteparo do combustor sob duas bandejas; 4 - termopar; 5 - placa de alumínio do álcool; e 6 - suporte da placa.....	85
Figura 2.11. Detalhe do ensaio de combustão de pellets demonstrando a queima da biomassa na grelha e no sistema combustor.....	86
Figura 2.12. Densidade a granel dos pellets produzidos.....	91
Figura 2.13. Análise de regressão entre durabilidade e densidade aparente dos pellets.....	93
Figura 2.14. Relação entre compressão diametral e densidade aparente dos pellets.....	94

Figura 2.15. Relação entre compressão diametral e taxa de compactação dos pellets.....	94
Figura 2.16. Consumo de massa dos pellets durante a queima em função do tempo e da temperatura.....	96
Figura 2.17. Análise de regressão demonstrando as relações entre o índice de combustão com o teor de umidade e compressão diametral dos pellets.....	98
Figura 2.18. Resíduos do processo de combustão dos pellets de sorgo (A), de quirela de milho (B), de sabugo (C) e de quirela+palha (D).....	99
Figura 2.19. Densidade energética dos resíduos in natura e dos pellets.....	102
Capítulo 3: Briquetes de resíduos agrícolas.	
Figura 3.1. Estrutura básica para fabricação de briquetes.....	114
Figura 3.2. Exemplo de uma briquetadeira do tipo prensa por pressão hidráulica.....	115
Figura 3.3. Prensa de pistão mecânico.....	115
Figura 3.4. Prensa extrusora do tipo rosca cônica.....	116
Figura 3.5. Fluxograma de um processo industrial de briquetagem.....	117
Figura 3.6. Classificação de briquetes por tamanho.....	124
Figura 3.7. Briquetaderia utilizada. À direita o detalhe do cilindro compactador.....	125
Figura 3.8. Briquetes produzidos.....	125
Figura 3.9. Ensaio de resistência à compressão diametral.....	126
Figura 3.10. Briquetes sendo retirados do tambor após o rotacionamento e peneirados para obtenção dos finos (à direita).....	127
Figura 3.11. Briquetes durante o ensaio de combustão.....	128
Figura 3.12. Teor de umidade das matérias primas antes e após o processo de briquetagem.....	132
Figura 3.13. Força máxima obtida no ensaio de compressão diametral dos briquetes confeccionados.....	133
Figura 3.14. Relação entre a densidade a granel dos resíduos e força de resistência dos briquetes durante a compressão diametral.....	134
Figura 3.15. Perda de massa dos briquetes ao longo do tempo durante o ensaio de combustão.....	138
Figura 3.16. Ensaio de combustão dos briquetes.....	139
Figura 3.17. Incremento na densidade energética após a transformação dos resíduos em briquetes.....	142
Capítulo 4: Análise de viabilidade econômica da produção de pellets e briquetes	
Figura 4.1. Comparativo da densidade energética nas três formas analisadas.....	149
Figura 4.2. Comparativo entre os índices de combustão dos pellets e briquetes por tipo de matéria-prima.....	150
Figura 4.3. Exemplos de equipamentos que podem ser utilizados em uma planta industrial de pellets.....	153
Figura 4.4. Exemplos de equipamentos que podem ser utilizados em uma	153

planta industrial de briquetes.....

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1: Caracterização de resíduos agroindustriais

Tabela 1.1. Classificação da biomassa florestal de acordo com o Poder Calorífico Inferior, segundo Torres (2013).....	31
Tabela 1.2. Valores de referência para análise elementar de diferentes resíduos agroindustriais.....	32
Tabela 1.3. Descrição das biomassas utilizadas e as respectivas nomenclaturas adotadas.....	36
Tabela 1.4. Análise de variância ANOVA do teor de umidade dos resíduos na condição <i>in natura</i> e moídos.....	45
Tabela 1.5. Médias de teor de umidade em base seca dos resíduos analisados, agrupadas conforme teste Tukey.....	45
Tabela 1.6. Análise variância ANOVA dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos resíduos agroindustriais.....	48
Tabela 1.7. Teste de Tukey para as médias de teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) de cada biomassa.....	48
Tabela 1.8. Análise de variância ANOVA do poder calorífico superior(PCS) e útil (PCU) dos resíduos analisados.....	53
Tabela 1.9. Teste de Tukey entre as médias do poder calorífico superior(PCS) e útil (PCU) dos resíduos analisados.....	53
Tabela 1.10. Análise variância ANOVA para densidade a granel.....	55
Tabela 1.11. Análise de variância ANOVA da densidade energética dos resíduos analisados.....	56
Tabela 1.12. Teste de Tukey entre as médias de densidade energética.....	56
Tabela 1.13. Análise de variância ANOVA do teor de extrativos, cinzas sem extrativos e holocelulose.....	57
Tabela 1.14. Teste de Tukey para as médias dos parâmetros da análise química.....	58

Capítulo 2: Pellets de resíduos agrícolas.

Tabela 2.1. Produção, oferta e demanda de pellets de madeira na Europa (Em megatoneladas – Mt).....	65
Tabela 2.2. Principais fornecedores de pellets para a União Européia (Em megatoneladas – Mt).....	66
Tabela 2.3. Capacidade e produção de pellets no Brasil por empresa.....	69
Tabela 2.4. Especificações técnicas de pellets segundo as normas austríaca, sueca, alemã, italiana e francesa.....	78
Tabela 2.5. Valores limite dos parâmetros mais importantes dos pellets do Manual de Certificação ENplus.....	79
Tabela 2.6. Tipos de madeira permitidos na produção de pellets segundo a	80

EN <i>plus</i> . Fonte: EPC, 2015.....	
Tabela 2.7. Normas publicadas no CEN e ISO sobre Biocombustíveis Sólidos.....	80
Tabela 2.8. Teores de umidade em base seca do resíduo antes e depois de peletizado.....	88
Tabela 2.9. Médias do diâmetro, comprimento, volume, umidade e densidade aparente unitária dos pellets.....	89
Tabela 2.10. Propriedades mecânicas dos pellets analisados.....	92
Tabela 2.11: Poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e útil (PCU) dos pellets de biomassa.....	95
Tabela 2.12. Percentual total de massa consumida, quantitativo de massa consumida por metro quadrado, temperatura máxima atingida, tempo de duração da combustão e índice de combustibilidade de cada tipo de pellet.....	97
Tabela 2.13. Valores médios da densidade energética dos pellets.....	101
Tabela 2.14. Classificação dos pellets produzidos segundo a certificação EN <i>Plus</i>	103
Tabela 2.15. Classificação dos pellets produzidos conforme a norma ONORM M7135 (Áustria), SS187120 (Suécia), DIN PLUS (Alemanha), CTI-R 05/5 (Itália) e ITEBE (França).....	105
Capítulo 3: Briquetes de resíduos agrícolas.	
Tabela 3.1: Propriedades dos briquetes analisados pela EN <i>Plus</i>	123
Tabela 3.2. Elementos permitidos para briquetes de madeira com certificação EN <i>Plus</i>	123
Tabela 3.3. Estatística descritiva de todos os briquetes produzidos.....	129
Tabela 3.4. Análise de variância das propriedades físicas dos briquetes.....	129
Tabela 3.5. Médias com agrupamento usando método de Tukey e desvio padrão das propriedades físicas dos briquetes.....	130
Tabela 3.6. Análise de Variância quanto à durabilidade e teor de finos dos briquetes.....	135
Tabela 3.7. Médias agrupadas dos briquetes conforme o teste de Tukey a 5% de probabilidade para durabilidade e teor de finos.....	135
Tabela 3.8. Tempo total, massa consumida, temperatura máxima atingida, taxa de perda de massa e índice de combustibilidade (ICOM) dos briquetes durante o ensaio de combustão.....	137
Tabela 3.9. Análise de variância da densidade energética dos briquetes confeccionados.....	140
Tabela 3.10. Médias de densidade energética agrupadas usando o método de Tukey e seus respectivos desvios-padrões.....	140
Tabela 3.11. Classificação dos briquetes produzidos conforme a certificação EN <i>plus</i> da Comissão Européia.....	143
Capítulo 4: Análise de viabilidade econômica da produção de pellets e briquetes.	
Tabela 4.1. Estimativa da quantidade de resíduos necessários para produzir 2	159

toneladas de adensados.....	
Tabela 4.2. Estimativa da produção anual de resíduos para atender a demanda de 1 t/hora.....	160
Tabela 4.3. Descrição dos cenários prospectivos escolhidos para avaliar a produção de pellets ou briquetes.....	164
Tabela 4.4. Investimento inicial para implantação do parque fabril.....	165
Tabela 4.5. Custos fixos mensais.....	165
Tabela 4.6. Custos variáveis mensais de acordo com o cenário desenvolvido.....	166
Tabela 4.7. Projeção das receitas brutas da fábrica operando com capacidade progressiva no horizonte de 3 anos para o Cenário 1.....	167
Tabela 4.8. Custos unitários dos produtos de acordo com o Cenário 1.....	167
Tabela 4.9. Fluxo de caixa do projeto fabril de pellets e briquetes de acordo com o Cenário 1.....	168
Tabela 4.10. Projeção das receitas brutas da fábrica operando com capacidade progressiva no horizonte de 3 anos para o Cenário 2.....	169
Tabela 4.11. Custos unitários dos produtos de acordo com o cenário 2.....	169
Tabela 4.12. Fluxo de caixa do cenário 2.....	170
Tabela 4.13. Projeção das receitas brutas da fábrica operando com capacidade progressiva no horizonte de 3 anos para o Cenário 3.....	171
Tabela 4.14. Custos unitários dos produtos de acordo com o cenário 3.....	171
Tabela 4.15. Fluxo de caixa para o cenário 3.....	172
Tabela 4.16. Projeção das receitas brutas da fábrica operando com capacidade progressiva no horizonte de 3 anos para o Cenário 4.....	173
Tabela 4.17. Custos unitários dos produtos de acordo com o cenário 4.....	174
Tabela 4.18. Fluxo de caixa para o cenário 4.....	175
Tabela 4.19. Indicadores financeiros para os cenários analisados.....	176
Tabela 4.20. <i>Payback</i> dos cenários de produção de pellets.....	176

INTRODUÇÃO GERAL

Depois da própria força a primeira fonte de energia utilizada pelo homem foi o fogo. Desde então, a humanidade vem dependendo de fontes de calor para diversas atividades essenciais. As distintas condições naturais em todo o planeta implicaram na busca por diferentes matérias-primas energéticas. Além disso, com o avanço tecnológico da sociedade, novas técnicas foram desenvolvidas para explorar e gerar energia.

Ao longo do tempo, as necessidades energéticas do homem trouxeram consequências ambientais e de ameaça de esgotamento de fontes não-renováveis. A preocupação com os danos à atmosfera ganhou consistência a partir da década de 70, quando a comunidade internacional foi alertada pelos estudiosos, sobre a destruição da camada de ozônio. Uma campanha internacional se desencadeou em defesa da camada de ozônio e culminou em diversas reuniões ambientais originando tratados como o Protocolo de Kyoto. Além disso, surgiram novos modelos como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que propõe aos países industrializados a troca da redução das emissões de gases em seus territórios por investimentos em projetos de energia renovável e de absorção de carbono (CONTI, 2005).

Com isso, as energias alternativas ganharam força no cenário mundial, e o conhecimento tecnológico volta-se para o aprimoramento dos processos de conversão de energia de fontes renováveis. É o caso da biomassa que, desde a descoberta do fogo, vem sendo utilizada de forma rudimentar. Hoje, há tecnologias de conversão que permitem transformar praticamente todo material orgânico existente em energia.

De tal modo, o adensamento, ou compactação, representa uma das formas mais modernas e eficientes de transformação da biomassa para produção de calor. Pellets e briquetes, hoje são produtos que vem ganhando cada vez mais espaço no mercado energético mundial por diversos motivos: facilidade de manuseio, maior concentração de energia, maior homogeneidade, menores danos ao meio ambiente, diversidade na utilização de matérias-primas, entre outros.

A matéria-prima mais comum utilizada no mundo na compactação como briquetes ou pellets são os resíduos de madeira oriundos de atividades florestais, principalmente pinus e eucalipto. No entanto, se faz necessário a ampliação do

conhecimento acerca de outras biomassas a serem aproveitadas nestes moldes tecnológicos, como os resíduos de atividades agrícolas. Assim, além de ampliar as possibilidades de matriz energética, a utilização desses materiais que, na maioria das vezes, são subaproveitados, ou simplesmente descartados, permite sua valoração econômica e traz benefícios ao meio ambiente.

No Brasil, são poucos os fabricantes de pellets e briquetes, sendo a maioria instalada na região Sul e Sudeste. O Centro-oeste é uma grande potência na produção agrícola do país, sendo, conseqüentemente, geradora de milhões de toneladas de resíduos por ano. Neste contexto, este trabalho é resultado de uma ampla pesquisa acerca do potencial de dez tipos de resíduos agrícolas produzidos na região do Distrito Federal como matéria-prima nas tecnologias de compactação em forma de pellets e briquetes.

Para tanto, dividiu-se esta tese em quatro capítulos para melhor compreensão didática. O capítulo 1 aborda os conhecimentos técnicos gerais acerca dos resíduos escolhidos, envolvendo as características físicas, químicas e energéticas de cada um. O capítulo 2 analisa o desempenho destes resíduos após sua transformação em pellets, investigando suas qualidades físicas, mecânicas e energéticas. Abordagem semelhante segue-se no Capítulo 3, porém, com a conversão em briquetes. Por fim, por entender que viabilidade técnica dos bioprodutos gerados necessita ser analisada sob uma ótica de mercado, o Capítulo 4 aborda uma análise de viabilidade econômica a partir de uma projeção de produção dos pellets e briquetes em escala industrial, simulando diferentes possibilidades de cenários.

Desse modo, esta pesquisa se insere em um contexto de inovação por propor um melhor aproveitamento de um material abundante, porém subutilizado. Podendo, ainda, impactar significativamente a gestão de resíduos de biomassa no setor agrícola e na cadeia de produção de energia, uma vez que as tecnologias propostas já são consagradas e estabelecidas em diversos países.

Com os resultados deste trabalho, pretende-se incrementar os conhecimentos técnicos no segmento de pellets e briquetes do Brasil, e incentivar aproveitamento de resíduos como fonte de energia. O estímulo é direcionado principalmente aos empreendimentos agrícolas, em especial aos produtores de culturas anuais voltadas para o agronegócio, pois são grandes geradoras de resíduos.

Capítulo 1: Caracterização de resíduos agroindustriais para fins energéticos.

1. INTRODUÇÃO

As atividades econômicas do setor primário são geradores de variados resíduos orgânicos que podem ser reaproveitados para diversos fins e que muitas vezes não são aproveitados ou são subaproveitados. Este capítulo apresenta um panorama generalista sobre a utilização de biomassa residual oriunda de atividades agroindustriais que pode ser utilizada como fonte de energia. O objetivo é levantar os aspectos técnicos relacionados diretamente ao potencial desses materiais como biocombustíveis sólidos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Biomassa residual como fonte de energia

Biomassa é todo material orgânico, não fóssil, que tenha conteúdo de energia química no seu interior, o que inclui todas as vegetações aquáticas ou terrestres, árvores, biomassa virgem, lixo orgânico, resíduos de agricultura, esterco de animais e outros tipos de restos industriais (VIDAL e HORA, 2010).

Dentre todas as utilizações possíveis para biomassa, a geração de energia pode ser considerada uma das mais expressivas. Em efeito, a sua combustão constituiu tradicionalmente a fonte de energia mais importante desde o descobrimento do fogo, e teve uma participação significativa até a Revolução Industrial, quando outras fontes alternativas de energia foram disponibilizadas, de forma a acompanhar o surto do desenvolvimento e a respectiva demanda por produtos industrializados (INFANTE e VEIRAS, 2003).

Uma das principais vantagens técnicas da utilização da biomassa para a obtenção da energia é que, embora de eficiência reduzida, sua diversidade é grande e seu aproveitamento pode ser feito pela simples combustão em fornos e caldeiras (VIDAL e HORA, 2010).

A biomassa voltou a ser a segunda fonte de geração mais importante do Brasil na Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) - toda a energia necessária para movimentar a economia – com o registro de 8,8% em 2016, superando os 8,1% de participação do gás natural (MME, 2017). Esta é uma tendência atual na maioria dos

países - desenvolvidos ou não - ou seja, o aumento da participação das energias alternativas nas matrizes energéticas mundiais, motivada pela necessidade de redução do uso de derivados do petróleo.

De um modo geral, a biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos e resíduos orgânicos, nos quais encontramos os resíduos agrícolas, industriais e urbanos, além dos biofluidos como os óleos vegetais. Na prática, as principais fontes de materiais lignocelulósicas com potencial de utilização energético são: 1) a atividade de colheita florestal; 2) a indústria de transformação da madeira, que produz subprodutos com alto índice de concentração local e consideravelmente heterogêneos e 3) as culturas de curta e média rotação, com potencial de utilização para fins de energia (BENABDALLAH, 1996).

A sociedade de consumo é sinônimo de produção de resíduos, e nas escalas mundial, nacional e municipal, esse processo resulta em imensos depósitos de materiais abandonados, que degradam o ambiente pela simples deposição inadequada (SPADOTTO e RIBEIRO, 2006). Em suma, uma expressiva fonte para gerar energia da biomassa está nos resíduos, e em todo o mundo são um recurso de muito potencial para a obtenção de energia apenas sob uma adequada exploração (CORTEZ et al., 2011).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº12.305/2010, define resíduos sólidos como todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Os resíduos de biomassa provenientes de culturas agrícolas sempre existiram e tradicionalmente é adicionado ao solo pela necessidade de devolver os nutrientes recolhidos durante o crescimento da planta. Porém, alguns estudos tem demonstrado que parte dos constituintes desta biomassa é carregada pelas águas das chuvas, causando diversos episódios de contaminação de águas superfícies por todo o país (MOURAD et al., 2004). Além da ciclagem de nutrientes do solo, os resíduos do setor agrícola podem, ser aproveitados para a alimentação animal e insumos para outros produtos.

Vale e Gentil (2008) citam outra preocupação relevante em relação ao descarte de resíduos de biomassa vegetal: é que formando matéria orgânica, pode acarretar o

aparecimento de insetos e roedores e, conseqüentemente, de doenças, ou quando queimados diretamente para sua eliminação, provoca um aumento na poluição ambiental. Segundo os autores, os resíduos vegetais, de um modo geral, apresentam alta umidade, baixa densidade e grande volume, necessitando de áreas para estocagem, além de serem dispersos geograficamente, o que aumenta as dificuldades em sua coleta e transporte.

Outras opções para o aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos podem ser citadas, como a utilização em coberturas de granjas, nas indústrias de painéis de madeira reconstituída, na compostagem, na geração de energia pela queima direta, na produção de combustível sólido (carvão vegetal) ou na transformação dos resíduos em briquetes, entre outras possibilidades (QUIRINO, 2003).

Ainda assim, Durães et al. (2012) afirmam que, com exceção do bagaço de cana-de-açúcar, a biomassa residual de atividades agrícolas ainda é subutilizada, onde na maioria das vezes é deixada para decomposição natural, sem aproveitamento da energia nela contida e gerando passivos ambientais importantes.

Mais especificamente, Mourad et al. (2004) explicam que a utilização da energia advinda da biomassa tem dois aspectos de grande importância: sua renovabilidade num espaço de tempo menor que o tempo de vida médio humano e a manutenção do equilíbrio de CO₂: o que é capturado no processo de fotossíntese é liberado no processo de queima.

Complementando, Nogueira e Lora (2003) explicam que quando se busca determinada disponibilidade de biomassa energética em um país ou região, é importante considerar as restrições de ordem ecológica, econômica e tecnológica. Somente assim, toda a biomassa potencialmente disponível pode assumir o conceito de reserva, a partir do qual se determina o potencial anual de produção. As restrições ecológicas estão associadas à preservação do meio ambiente e à qualidade de vida. As limitações econômicas são analisadas em dois níveis: primeiro é preciso saber se a biomassa a ser explorada não possui outra finalidade econômica (alimentícia ou industrial), em segundo, se todos os custos são compatíveis com os benefícios energéticos. Por fim, as restrições tecnológicas dizem respeito à existência ou não de processos e operações confiáveis para conversão de biomassa em combustível.

2.2. Resíduos provenientes de atividades agroindustriais

Segundo Cinelli (2012), o Brasil é o país que mais possui vantagens para liderar a agricultura de energia, com o maior potencial de desenvolvimento na produção de energia renovável, devido a: disponibilidade de solos agricultáveis; disposição geográfica e clima bastante favorável e boa competitividade internacional no ramo dos biocombustíveis.

Como grande produtor agrícola, o Brasil gera expressiva quantidade de biomassa residual nos processos resultantes da colheita e processamento de diversos produtos agropecuários (MOURAD et al., 2004). Segundo o MAPA (2016), o país é o maior produtor de cana-de-açúcar e de feijão do mundo, e o terceiro maior produtor mundial de milho. Ainda segundo o MAPA (2016) até 2020 a produção no agronegócio do País vai representar um terço da comercialização mundial.

Para o ano de 2017 a estimativa da produção agrícola brasileira de cereais, leguminosas e oleaginosas, segundo o IBGE (2017) foi de 240,6 milhões de toneladas, 29,5% superior à obtida em 2016 e a distribuição desta produção entre as grandes regiões produtoras é mostrada na Figura 1.1.

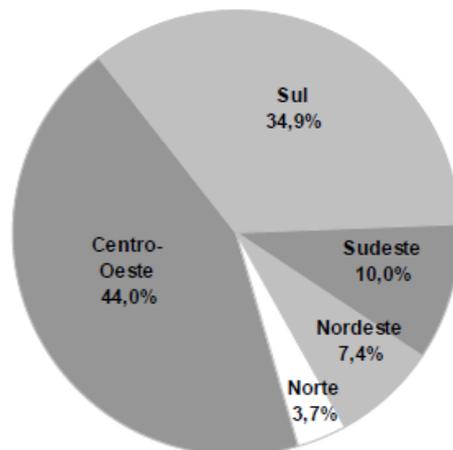


Figura 1.1. Produção de cereais, leguminosas e oleaginosas no Brasil em 2017 por região. Fonte: IBGE, 2017.

Até a década de 1980 o Distrito Federal não possuía uma agricultura dinâmica, o que a carretava em altos preços dos alimentos, em específico das olerícolas. A partir dos anos 2000, essa região já era autossuficiente em vários produtos, principalmente em hortaliças, chegando a vender o excedente para outros estados da Federação (EMATER, 2008).

Antes da inauguração da nova Capital, em 1960, as atividades agrícolas praticadas na região davam-se na forma de subsistência ou em grandes fazendas com a criação extensiva de gado. Após a inauguração de Brasília houve aumento da população, o que pressionou a demanda por alimentos e fez com que se iniciassem ações voltadas para o desenvolvimento da agricultura; um exemplo foi o Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal (PAD/DF) criado em 1977, (ROCHA, 1992).

Segundo os dados mais recentes do IBGE (2017), o Distrito Federal destaca-se, principalmente, pela produção de grãos (feijão, milho e soja) e de hortifrutigranjeiros que abastecem o mercado consumidor local (pimentão, tomate, batata etc.). Segundo o Censo Agropecuário de 2006, há 3.407 proprietários individuais de estabelecimentos agropecuários e apenas 3 cooperativas, o que correspondem juntos a aproximadamente 184 mil hectares. Apesar da restrição geográfica e tido como uma região essencialmente urbana, o Distrito Federal tem o quinto maior PIB agrícola do Brasil e agropecuária mais tecnificada do País (EMBRAPA CERRADOS, 2014). Um estudo da CODEPLAN (2013) aponta que a capital federal pode em breve se tornar um polo de atividade agropecuária com a produção de insumos, sementes, fertilizantes e maquinário.

Vale destacar o detalhamento do perfil de algumas atividades agroindustriais presentes na região do Distrito Federal e os resíduos lignocelulósicos por elas produzidos:

a) Milho

A cultura do milho é uma das mais importantes dentro do cenário da produção agropecuária no mundo, haja vista algumas utilizações deste cereal que justificam tal importância, como: a) principal fonte de energia dentro do processo de nutrição animal, sendo o cereal mais largamente consumido pelos setores de aves e suínos; b) pode ser utilizado na alimentação humana como flocos, farinha e óleo, além de fazer parte de vários processos da indústria alimentícia e de bebidas; e c) é uma importante matriz energética na produção de biocombustíveis como o etanol (CONAB, 2017).

Conforme o prognóstico do IBGE para 2018, a estimativa de produção é de 84,5 milhões de toneladas desta cultura no país. A safra 2017 foi recorde em decorrência dos aumentos substanciais da área plantada e do rendimento médio, alcançando 99,6 milhões de toneladas, o que eleva a base de comparação para a produção no próximo ano. Seguindo a tendência dos últimos anos, a 2ª safra deve apresentar o maior volume

colhido no País, com aproximadamente 69,2% da produção nacional em 2018, totalizando 57,9 milhões de toneladas.

A cultura do milho deixa como subprodutos no campo os caules, as folhas (palhada) e, na indústria, os sabugos. A palha é obtida ainda durante a colheita e na maioria dos casos não possui uma utilização definida. Já o sabugo, parte interna e mais densa do milho, é gerado na debulha e geralmente é usado para ração animal (SANTOS, 2014).

Estima-se que, para cada tonelada de grãos de milho colhida, geram-se entre 2,2 e 2,7 toneladas de talos e folhas, bem como entre 0,3 e 0,9 toneladas de sabugos (DIAS et al., 2012). Segundo a Associação Brasileira de Indústrias da Biomassa – ABIB (2011), os resíduos do processo do milho totalizam um fator residual de 58%.

A quirela de milho é um subproduto proveniente do beneficiamento industrial do grão de milho, sendo composta, em sua maior parte, de milho quebrado, além de sementes de plantas invasoras (PIRES, 1999).

b) Feijão

O feijão tem um papel importante na dieta alimentar da população brasileira e também na geração de receitas dos pequenos produtores que utilizam força de trabalho familiar. A produção desse grão é bastante difundida em todo o território nacional, sendo o Brasil o terceiro maior produtor mundial atualmente. Ainda assim, para suprir as necessidades de demanda interna, o país importa em torno de 150 mil toneladas por ano (CONAB, 2018).

No Brasil a produção de feijão é dividida em três safras: a safra das águas, de novembro a abril; a safra da seca, de abril a julho, e a safra irrigada (ou safra de inverno), que concentra-se na região Centro-Sul, de abril a junho (CONAB, 2018).

O Distrito Federal, embora seja a menor unidade da Federação que forma a região Centro-Oeste, apresentou um dos melhores índices de produtividade média de feijão (1^a, 2^a e 3^a safras) na safra 2016/17 por área plantada no país, ficando atrás apenas de Goiás. Tal feito é atribuído, sobretudo, a fatores relacionados a estabilidade climática (dias bem quentes e noites muito frias) (CONAB, 2018).

No beneficiamento o feijão é peneirado e grãos quebrados e outras impurezas do tamanho e densidades próximas do feijão são separados e, em seguida, por densimetria, os grãos são classificados por peso específico, separando os grãos leves, atacados por insetos, dos grãos inteiros e bem formados (PIRES, 2014).

Os principais resíduos do feijão são constituídos de palhada e vagem, totalizando 53% do total produzido. A palhada, que é constituída basicamente pelos talos, apresenta um poder calorífico inferior (PCI) de 4.080 kcal/kg, enquanto as vagens têm PCI em torno de 3.800 kcal/kg (RAMOS e PAULA et al., 2011).

De acordo com Chagas et al. (2007), a produção, em massa seca, de grão de feijão por hectare é de 1.350 kg, de palhada da vagem é de 432 kg, 810 kg de caule, e 1.032 kg de folha senescente.

A estimativa da produção de feijão para a safra 2018 é de 3,4 milhões de toneladas, sendo 1,6 milhões de toneladas na safra das águas; 1,3 milhões de toneladas na safra da seca e 519,6 mil toneladas na safra irrigada (IBGE, 2018).

c) Madeira

A atividade industrial madeireira no Brasil é altamente geradora de resíduos. Segundo MMA (2009), os diferentes tipos de resíduos de madeira podem ser classificados conforme sua origem, como industriais ou gerados no meio urbano (Figura 1.2).

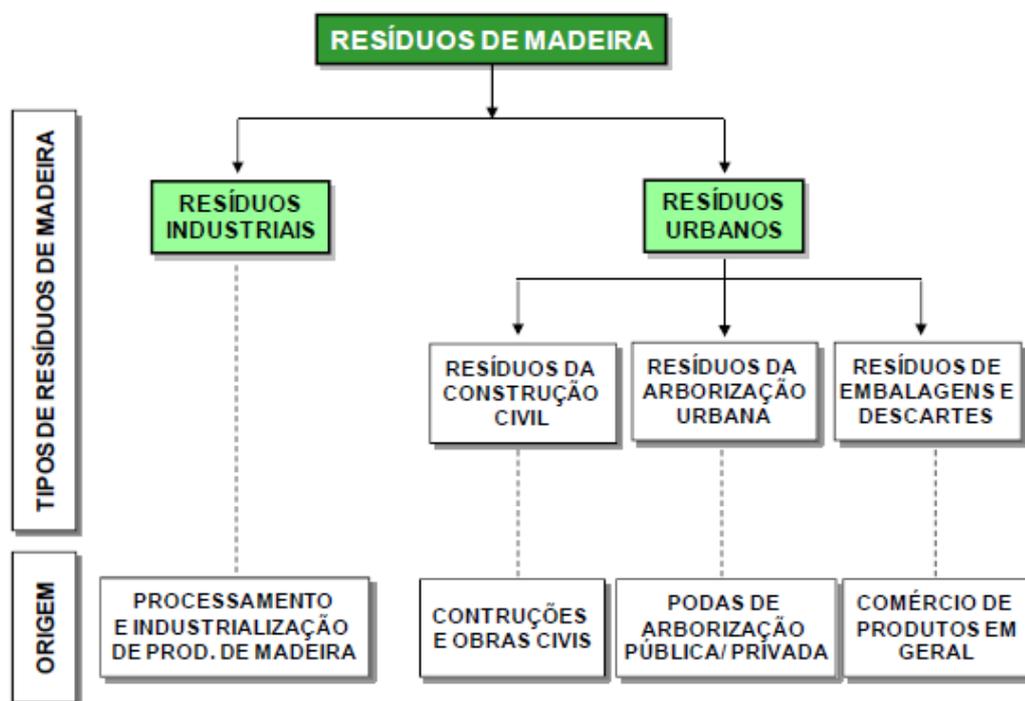


Figura 1.2. Classificação dos tipos de resíduos de madeira, segundo MMA (2009).

Os resíduos industriais de madeira se classificam em serragem, cepilho, sólidos de madeira, cascas e outros e são gerados desde o transporte da madeira em tora à indústria, até seu manuseio e processamento, finalizando no produto acabado (MMA, 2009). A serragem é originada da operação de serras, podendo ser seca ou úmida. A maravalha é gerada pelas plainas nas instalações de serraria/beneficiamento, estando disponível exclusivamente no estado seco (WANDER, 2001).

Os resíduos de madeira na indústria de celulose e papel são comumente utilizados como biomassa na co-geração de energia. Entre eles destacam-se a casca oriunda do descascamento das toras para processo e de resíduos de madeira na forma de cavaco “com casca” que pode ser adquirido no mercado ou gerado a partir de resíduos da colheita florestal. Diversas empresas deste segmento também aproveitam o lodo industrial (que contém fragmentos e fibras de madeira) na compostagem para produção de adubo (MMA, 2009).

Apesar da relevante atividade silvicultural no país, quando se trata da indústria moveleira há poucos estudos que indiquem a quantificação de resíduos gerados em seu processo produtivo, necessitando de mais aprofundamento sobre o tema (LIMA e SILVA, 2005). Em Brasília, segundo CAPACITEC (2000), a produção de resíduos no setor mobiliário está em torno de 10%, principalmente na forma de serragem e pedaços de madeiras e não tem, na maioria das vezes, uma utilização definida.

Outra fonte de geração de resíduos de madeira é a construção civil. De acordo com Miranda et al. (2009), os resíduos de madeira representam cerca de 31% de todo o volume de resíduo de construção gerado numa obra de um edifício residencial. Se considerada somente a fase de execução estrutural, podem chegar a representar 42% dos resíduos gerados durante o processo em questão.

No segmento da construção civil no País, os resíduos madeireiros, via de regra, misturados a outros resíduos sólidos tem como destino final o aterro sanitário. Em alguns aterros, principalmente nas regiões Sul e Sudeste, há pequena reciclagem de resíduos da construção civil, mas a madeira não é recuperada nestas usinas e permanece como dejetos nos aterros. O fator limitante para a reciclagem do resíduo madeireiro da construção civil é a contaminação com outros materiais como concreto/argamassa, metais (pregos, arames, grampos, parafusos, dobradiças, etc.) e ainda agentes desmoldantes (MMA, 2009).

Contribuir para estruturar um mercado que reutiliza madeiras significa fomentar o uso correto e sustentável das fontes urbanas desperdiçadas. Não existe reciclagem sem

que exista um mercado consolidado para o uso das matérias secundárias, e a madeira produzida do descarte urbano é passível de ser utilizada na sua totalidade, como fonte de combustível alternativo (SPADOTTO e RIBEIRO, 2006).

d) Café

O café é o segundo maior produto negociado no mundo, depois do petróleo, e, portanto, no seu processamento há uma grande quantidade de resíduos gerados (DIAS et al., 2014). O Brasil é o maior produtor mundial, cuja safra de 2016 foi de 3.082.000 toneladas. (CONAB, 2017).

Apesar de não haver plantações de café no Distrito Federal, em Brasília há a distribuidora Café do Sítio Indústria e Comércio LTDA que gera resíduos de café oriundos de Minas Gerais. A palha ou o resíduo gerado durante o beneficiamento de café é composto de epicarpo (casca), mesocarpo (polpa ou mucilagem), endocarpo (pergaminho) e película prateada (MATIELO, 1991). O pergaminho, conhecido como “casquinha” por ser uma película anatômica que envolve o grão, é obtido quando a despolpa é feita por via úmida (BRUM, 2007).

e) Sorgo

Existem diversos tipos de sorgo, com peculiaridades que os classificam para usos distintos. Assim, dentre eles, destacam-se o sorgo biomassa ou sorgo lignocelulósico, para a produção de biomassa e de energia a partir da queima desta biomassa, e o sorgo sacarino, com o qual se produz etanol e também biomassa. Por possibilitarem plantio totalmente mecanizável e processamento utilizando a mesma tecnologia industrial desenvolvida para a cana-de-açúcar, essas culturas têm despertado interesses do setor sucroalcooleiro e energético. Nesse ponto, merece destaque o fato de que o bagaço do sorgo sacarino apresenta poder calorífico equivalente ao bagaço de cana, sendo bastante eficiente na cogeração de energia (MIRANDA e MAY, 2016).

O sorgo tem ciclo curto (4 meses) e é uma espécie de gramínea que produz açúcares no colmo de forma similar à cana-de-açúcar, com alta conversão de energia solar em energia química. O potencial energético da biomassa (caldo, bagaço, palhada e grãos) é alto, e toda a energia do sorgo sacarino pode ser transformada com a tecnologia atual (DURÃES et al., 2012).

Assim, o sorgo biomassa tem sido cotado como uma das mais importantes alternativas para a geração de energia através da queima da massa vegetal em caldeiras,

associadas a termelétricas ou em usinas sucroenergéticas, em função da sua elevada capacidade produtiva, em curto espaço de tempo, e do poder calorífico mediano, gerado pela queima de sua biomassa, considerando que, na média, 1 kg de biomassa de sorgo biomassa com 50% de umidade gera 1.800 kcal (MIRANDA e MAY, 2016).

Por fim, os benefícios do reaproveitamento energético desses resíduos são inúmeros, tanto em nível social quanto ambiental e econômico. A mudança do sistema de destinação final dos resíduos leva à redução do volume anual a ser aterrado ou disposto de forma inadequada, reduzindo igualmente as áreas requeridas para a implantação de novos aterros sanitários e trazendo outros benefícios indiretos, como a geração de emprego e renda, e evitando ainda a possível supressão de vegetação e mudança no relevo, entre outros problemas. Além disto, reduz-se conseqüentemente a quantidade de lixo gerado, evitando a contaminação dos cursos d'água. A utilização dos resíduos para a geração de energia oferece como vantagem, ainda, a obtenção de energia renovável, reduzindo a dependência de energia fóssil (IPEA, 2012).

2.3. Caracterização dos resíduos lignocelulósicos

As matérias-primas lignocelulósicas são uma das fontes renováveis mais abundantemente encontradas na natureza, sendo compreendidas, majoritariamente, pelos materiais agroindustriais, pelos resíduos urbanos e pelas madeiras de angiospermas e gimnospermas (SZENGYEL, 2000).

A partir desses materiais, pode-se, por exemplo, extrair adesivos e produzir: compostos aromáticos leves e combustível sólido sem enxofre, a partir da lignina; gomas vegetais para a produção de espessantes, adesivos, emulsificantes, estabilizantes e outros produtos químicos, como precursores de polímeros, a partir da hemicelulose; ácido levulínico, um precursor de solventes, lubrificantes, entre outros produtos químicos; e glicose, com todos os seus derivados (etanol, ácidos orgânicos e solventes orgânicos), a partir da celulose (KAMM e KAMM, 2004), além de outros usos diversos.

De acordo com Durán et al. (1998), os materiais lignocelulósicos são formados por estruturas duras e fibrosas, compostas majoritariamente pelos polissacarídeos celulose e hemicelulose e caracterizam-se pelo seu baixo conteúdo de proteínas e digestibilidade. Quanto ao aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos como alimento, os mesmos autores afirmam que a maior dificuldade está na barreira física formada pela lignina, que impede o aproveitamento da celulose na forma nativa, sendo

necessários pré-tratamentos para diminuir o teor de lignina. No entanto, isto nos permite inferir que em se tratando da utilização desses resíduos como combustíveis adensados, essa característica representa uma importante vantagem, pois a lignina pode funcionar como um ligante entre as partículas, por exemplo.

A literatura dispõe dados sobre as propriedades de diversos tipos de biomassa, determinadas a partir de ensaios com protocolos bem estabelecidos em laboratórios de todo o país. Várias propriedades intrínsecas da biomassa são utilizadas para classificá-la e determinar a sua potencialidade como combustível, tais como a umidade, a distribuição granulométrica, a densidade aparente e energética, os teores de carbono fixo, materiais voláteis, cinzas, lignina, extrativos, poder calorífico e composição química elementar. A seguir uma breve revisão sobre essas importantes propriedades.

2.3.1. Teor de umidade

O teor de umidade pode ser definido como a quantidade de água contida na biomassa em relação a sua massa seca (base seca) ou úmida (base úmida) (NOGUEIRA, 2007). O teor de umidade é uma propriedade importante nos processos em que a biomassa é utilizada para fins energéticos e sua variação torna difícil o controle. (BRITO E BARRICHELO, 1978).

As formas mais comuns de determinação envolvem o aquecimento da amostra em forno, por um tempo suficiente para ocorrer a total evaporação. Medindo-se a massa da amostra antes e depois da secagem, pode-se determinar o teor percentual de água na amostra, ou seja, a umidade. Há várias metodologias para essa determinação. Algumas envolvem o uso de fornos elétricos, com ou sem circulação de ar ou de fornos caseiros de micro-ondas (SOUZA et al., 2002).

Apesar de o tempo de permanência na estufa variar para cada material, esse tempo pode ser utilizado como um tempo inicial para medidas, e que deverá ser ajustado para cada caso, até a obtenção de uma massa constante. Quando a diferença da massa do conjunto entre duas pesagens consecutivas for menor do que 0,1% da massa do material (TAPPI, 2002), pode-se considerar que não há mais umidade, e que as variações de massa são devidas a erros experimentais, ou seja, o material atingiu a massa constante (MORAIS et al., 2010).

As biomassas em geral apresentam elevados teores de umidade, por isso, devem sofrer um processo de secagem antes de serem submetidas a qualquer processo de conversão energética, pois, conforme explica Barros (2013), o teor de umidade tem

influencia na capacidade de autoignição da biomassa, assim como no poder calorífico, uma vez que, durante a combustão parte da energia do combustível é desperdiçada na evaporação da água, e, conseqüentemente, não fica disponível para a sua utilização energética.

A umidade do combustível é um fator limitante na combustão da biomassa, devido à sua influência no poder calorífico. O limite térmico (auto-sustentação da combustão) para a maioria dos combustíveis de biomassa é em torno de 65% base úmida. Acima desse ponto, é liberada energia insuficiente para a combustão satisfazer a evaporação e a produção de calor (JENKINS et al., 1998). Assim, como alguns tipos de biomassa apresentam umidade muito alta, o que dificulta sua utilização como combustível e reduz a quantidade de energia disponível para conversão em calor, para adequar a umidade da biomassa a um processo de conversão determinado, faz-se necessária uma secagem preliminar (KLAUTAU, 2008).

2.3.2. Granulometria e densidade a granel

Na ampla maioria dos processos industriais, as técnicas envolvidas para caracterizar as propriedades físico-geométricas (forma e tamanho dos objetos sólidos) estão baseadas na definição de parâmetros conhecidos, tais como os fatores de forma esfericidade e circularidade, e da classificação das partículas baseada em seu tamanho, o conhecido conceito de composição granulométrica (MASSARANI, 1986).

Assim, um conglomerado de partículas sólidas granulares polidispersas se caracteriza por apresentar basicamente várias classes de tamanhos de partículas. A determinação das características granulométricas ou de distribuição de tamanhos de um conglomerado de partículas sólidas granulares comumente é realizada em laboratório. A literatura reporta três métodos principais: o método que envolve o uso de equipamentos eletrônicos (como a microscopia eletrônica), o método físico de sedimentação e a análise por meio de peneiras padronizadas de abertura de furos conhecida e colocadas uma em cima da outra de forma gradativa (CORTEZ et al., 2011). Neste último obtêm-se diferentes frações de dimensões, em peso, de acordo com a característica dos sólidos que compõem a biomassa. (SÁNCHEZ, 2010).

Uma variável que está diretamente relacionada com a granulometria do material é a densidade a granel. Segundo Alesi et al. (2017), esta é uma característica importante quando se trata de espaço que o resíduo irá ocupar, pois quanto menor a massa específica do material, maior a quantidade de resíduos para um mesmo volume (espaço)

e assim maior será o gasto com o transporte e armazenamento do mesmo uma vez que será necessário um espaço maior no veículo e no depósito.

De tal forma, a densidade a granel é definida então como a razão entre a massa do resíduo e o volume ocupado pelo mesmo com os poros e os vazios existentes entre as partículas dos resíduos quando estes são colocados formando uma camada (PÉREZ et al., 2016).

2.3.3. Análise imediata

A análise imediata de um combustível fornece a percentagem de material volátil, carbono fixo e teor de cinzas. Em outras palavras ela fornece a percentagem do material que se queima no estado gasoso (material volátil) e no estado sólido (carbono fixo), bem como dá uma indicação do material residual (cinzas) (BRITO e BARRICHELO, 1978).

Os materiais voláteis podem ser conceituados como as substâncias que são desprendidas da biomassa como gases durante a perda de massa no processo de pirólise. Segundo McKendry (2002), o teor de voláteis é quantificado medindo-se a fração de massa da biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 850°C. Os voláteis tem papel importante durante a ignição e nas etapas iniciais de combustão da biomassa (CORTEZ et al., 2011).

Define-se carbono fixo como a quantidade de carbono presente na matéria, expresso em porcentagem. De acordo com Tabarés et al. (2000), quanto a biomassa para uso como combustível, o carbono fixo é o componente mais significativo e é o principal contribuinte para produzir energia durante a combustão.

Materiais combustíveis que tenham altos teores de carbono fixo e teores de materiais voláteis mais baixos tendem a se queimar mais lentamente, necessitam de um longo período de permanência na fornalha para a queima total, quando comparados com combustíveis com baixo índice de carbono fixo (BRAND, 2010).

Para completar a análise imediata da biomassa, existem as cinzas, que constituem o material inorgânico próprio do combustível. Este é distribuído através do combustível, e é algumas vezes referente ao material disperso atômicamente. É composto por silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe) (KLAUTAU, 2008). Russomano (1987) conceitua “cinzas” como materiais inertes que não participam da combustão ou se acumulam nos cinzeiros

dos equipamentos térmicos, exigindo sua remoção, ou são carregados pelos gases de exaustão, incrustando-se no interior da chaminé ou poluindo o ambiente.

A presença de contaminantes inorgânicos na biomassa depende dos locais de origem e pode ter origem biológica, detritica ou ser influenciada pelo ambiente. Depende de diversos fatores, a nível fisiológico, morfológico, genético e ambiental podendo, assim, variar muito o conteúdo inorgânico e o teor em cinzas das biomassas (MONTI et al., 2008).

2.3.4. Poder calorífico

A qualidade da biomassa para geração de bioenergia é conhecida pela quantidade de calor (energia) gerada por unidade de massa. O poder calorífico superior é um dos parâmetros importantes para diferenciar uma biomassa de outra quanto ao potencial para geração de energia (PROTÁSIO et al., 2012).

O poder calorífico define-se como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da madeira seca a 0% de umidade (JARA, 1989), e pode ser dividido em superior (PCS) e inferior (PCI).

O poder calorífico superior representa a quantidade de calor liberada durante a combustão com a água na forma condensada. O PCS pode ser obtido de duas maneiras: através de uma bomba calorimétrica (ou calorímetro), que mede a variação da temperatura da água provocada pela queima completa da amostra do combustível e consiste em colocar uma quantidade de biomassa dentro do equipamento, o qual dará o valor do PCS; ou pela Análise Elementar, onde é possível relacionar o PCS de uma biomassa com a quantidade de ligações químicas envolvendo seus elementos. Conhecendo-se a fração mássica dos componentes da biomassa, então, conseqüentemente, é possível calcular o PCS (KLAUTAU, 2008; NOGUEIRA e LORA, 2003; VAN WYLEN et al., 1998).

Já o poder calorífico inferior é definido como a quantidade de calor liberado durante a combustão considerando que a água está no estado de vapor. O PCI é calculado a partir do PCS, porém considerando o teor de umidade que está presente no combustível, ou seja, corresponde a quantidade de calor útil para acontecer a queima da biomassa esta análise retrata melhor a qualidade do combustível (CALEGARI et al., 2005); VAN WYLEN et al., 1998). Em instalações industriais, a temperatura dos gases de saída geralmente é maior que a temperatura de condensação, portanto o calor latente não é utilizado. Por isso, o PCI é de maior aplicação (CORTEZ et al., 2011).

Existe ainda o poder calorífico útil (PCU) ou líquido, que é a quantidade de calor liberado pela queima, de modo que a água proveniente da queima esteja em estado gasoso (volume variável). No PCU é descontada a energia necessária para evaporar a água referente à umidade da madeira (LIMA, 2010).

O teor de umidade e a composição química, principalmente a lignina e os extrativos da madeira, influenciam no poder calorífico da biomassa. Quanto maior o teor de extrativos e de lignina, maior será o poder calorífico superior (JARA, 1989). Segundo Protásio et al. (2012), há relatos na literatura de que altos teores de extrativos totais e altos teores de lignina podem influenciar positivamente no poder calorífico dos materiais. Já quanto maior o teor de cinzas menor o poder calorífico dos materiais lignocelulósicos, pois os minerais não participam do processo de combustão (BRAND, 2010).

Embora o Sistema Internacional de Unidades estabeleça como padrão para medida de energia o Joule (J), no Brasil utiliza-se também, para combustíveis sólidos, o kcal/kg ou cal/g e para combustíveis gasosos, o kcal/m³.

Russomano (1987) a partir da análise do PCS classificou alguns combustíveis em alto, médio e baixo poder calorífico, a saber: maior que 33,49MJ/kg (gás natural, GLP, gasolina, querosene, óleo diesel); entre 33,49 e 16,74 MJ/kg (biogás, álcool, carvão mineral e vegetal) e menor que 16,74 MJ/kg (xisto), respectivamente.

Torres (2013) avaliando a biomassa florestal no norte de Portugal elaborou um quadro que permite classificar a qualidade da produção de calor conforme o poder calorífico inferior determinado (Tabela 1.1).

Tabela 1.1. Classificação da biomassa florestal de acordo com o Poder Calorífico Inferior, segundo Torres (2013).

Excelente	PCI > 21 MJ/kg	Bom	PCI > 19 MJ/kg
	% cinzas < 1		% cinzas < 1,5
Muito bom	PCI > 20 MJ/kg	Regular	PCI > 18 MJ/kg
	% cinzas < 1,5		% cinzas < 2

2.3.5. Análise elementar

Através da análise elementar, obtêm-se as frações em peso dos elementos químicos constituintes da biomassa. A Tabela 1.2 mostra alguns valores de referência encontrados por diversos autores para as biomassas de interesse neste trabalho.

Tabela 1.2. Valores de referência para análise elementar de diferentes resíduos agroindustriais.

	C	H	O	N	S	Autor
Palha de milho	45,4	6,7	45,1	0,9	0,3	Horst (2013)
Serragem de madeira	48,1	6,5	44,2	0,8	0,2	Horst (2013)
Maravalha de eucalipto	48,2	6,36	45,04	0,07	0,08	Protásio et al. (2012)
Maravalha de pinus	49	6,65	43,76	0,09	0,11	Protásio et al. (2012)
Processamento de café	46,5	6,38	39,86	2,10	0,23	Protásio et al. (2012)
Pergaminho do café	44	5,4	49,9	0,7	-	Brum et al. (2008)
Colheita do milho	45,2	6,43	39,32	1,99	0,22	Protásio et al. (2012)
Sabugo de milho	47,6	5,0	44,6	0,0	-	Raveendran et al. (1995)
Haste de feijão	44,3	6,6	48,1	0,7	0,3	Ramos e Paula (2011)
Palha de feijão	41,5	5,9	52,0	0,6	-	Oliveira (2009)

Onde: C= carbono; H= hidrogênio; O= oxigênio; N= nitrogênio; S= enxofre.

Além dos elementos acima citados (a composição química), a análise elementar também fornece a razão entre as populações de átomos de H/C e O/C. Essas relações permitem o cálculo do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI), pois existe correlação entre o PCS e as razões H/C e O/C. Além disso, conhecendo-se a relação H/C é possível calcular o PCI (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008).

A composição elementar da madeira varia pouco com a espécie, podendo-se admitir que ela contenha, em base seca, cerca de 50% de carbono, 6% de hidrogênio, 44% de oxigênio e entre 0,1 e 0,5% de nitrogênio (BRITO e BARRICHELO, 1981). O teor de carbono da biomassa é menor que o do carvão mineral e do petróleo, enquanto o teor de oxigênio é maior (CORTEZ et al, 2011).

Altos teores de carbono e hidrogênio são características importantes para a seleção de resíduos lignocelulósicos para a produção de bioenergia, em razão do valor energético desses elementos e da correlação positiva com o poder calorífico, enquanto que altos valores de oxigênio e nitrogênio decrescem o poder calorífico (HUANG et al., 2009; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011-b). Segundo Nordin (1994) a alta proporção entre oxigênio e hidrogênio diminui o valor energético do material combustível. Além disso, é desejável que a biomassa apresente baixos teores de nitrogênio e enxofre, devido a poluição ambiental que podem ocasionar quando em excesso.

Dourado et al. (2017) observaram uma correlação linear de Pearson significativa e positiva entre o poder calorífico superior e o teor de carbono e entre o poder calorífico superior e o teor de hidrogênio. Isso indica que há uma tendência de maiores valores de PCS estarem associados a maiores valores de carbono e hidrogênio. Conforme explicam os autores, essa relação já era esperada, uma vez que, o carbono é o principal constituinte da biomassa vegetal e o hidrogênio é um elemento altamente energético e contribui ativamente para a quantidade de energia liberada na combustão completa da biomassa vegetal. A correlação linear encontrada entre o PCS e o teor de oxigênio também foi significativa, mas negativa, o que indica que essas variáveis são inversamente proporcionais, ou seja, maiores valores de PCS estão associados a menores valores de oxigênio.

2.3.6. Análise química

Assim como a forma e o tamanho da parede celular dos materiais lignocelulósicos variam de espécie para espécie, sua composição química apresenta-se distinta entre representantes lignocelulósicos. Igualmente chamada de análise somativa da biomassa, é constituída principalmente de três polímeros: celulose, hemicelulose e lignina, numa proporção aproximada de 50:20:30, no caso da madeira. Os demais componentes, presentes em menor quantidade, são compostos de baixo peso molecular chamados extrativos, encontrados notadamente na casca e englobando terpenos, ácidos graxos, compostos aromáticos e óleos vegetais (KLAUTAU, 2008).

A combinação de celulose e hemicelulose é chamada holocelulose (SANTOS, 2008). A celulose é o componente mais abundante nos materiais lignocelulósicos e corresponde cerca de 50% da massa seca total. Trata-se de um polímero linear, possuindo porções amorfas e cristalinas. As polioses ou hemiceluloses são polissacarídeos ramificados e de menor massa molar que a celulose. Estas são compostas por vários açúcares como a glicose, manose, galactose e xilose. O teor de hemiceluloses em diferentes tipos de materiais lignocelulósicos pode variar de 20 a 25% (POLIZELI et al., 2005).

Os polímeros da análise somativa são componentes essenciais na pirólise da biomassa, sendo a base para o entendimento da sua conversão térmica. Alguns autores dividem a pirólise da biomassa em estágios individuais de acordo com a pirólise de cada um desses três componentes (YANG et al., 2007).

A lignina é a substância aromática mais abundante na biosfera e um dos maiores constituintes dos vegetais (LI et al., 2009) Além da proteção contra a ação de microorganismos nas plantas vasculares, a lignina é responsável pela resistência mecânica, pelo transporte de nutrientes, água e metabólitos (SANTOS, 2008). Assim, a função principal da lignina é prover sustentação do material lignocelulósico. Ela é formada por uma complexa estrutura de polímeros amorfos e possui característica hidrofóbica. Além disso, auxilia no sequestro de carbono (SOUZA, 2014).

Segundo Hatfield e Fukushima (2005), mesmo após mais de 50 anos de estudos, e após a definição e a aprovação de vários procedimentos para determinar lignina em plantas, ainda não há um método definitivo e sem ambiguidades para essa determinação. Entre os métodos revisados, há métodos não invasivos, como NIR e RMN; métodos indiretos, em que um agente oxidante, como cloro ou permanganato, destrói a lignina, e, por meio do cálculo da diferença em relação à massa inicial, determina-se seu teor; métodos de solubilização de lignina, em que se usa tioglicolato ou acetilbrometo para dissolver a lignina e medir sua concentração em espectrofotômetro; e o método direto de determinação, conhecido como lignina de Klason, no qual se emprega uma solução diluída de ácido sulfúrico para dissolver todos os carboidratos, permanecendo somente a lignina insolúvel, que é filtrada, e é verificada sua massa.

A lignina e os extrativos apresentam baixo grau de oxidação e alto calor de combustão em comparação com a celulose e as hemiceluloses (KUMAR et al., 1992). Os extrativos são definidos como compostos que podem ser extraídos de materiais lignocelulósicos, tanto por solventes polares quanto por apolares, que não são componentes estruturais da parede celular (PINO et al., 2007; SILVÉRIO et al., 2006) . São geralmente formados a partir de graxas, ácidos graxos, álcoois graxos, fenóis, terpenos, esteróides, resinas ácidas, resinas, ceras, e alguns outros tipos de compostos orgânicos. Estes compostos existem na forma de monômeros, dímeros e polímeros (SANTOS, 2008)

Os extrativos podem variar quantitativa ou qualitativamente, oscilando, em materiais provenientes de madeiras, de 2% a 5%, podendo alcançar níveis de 15% em algumas espécies tropicais (MIYAUCHI et al., 2005; ZHANG et al., 2007). No processo de isolamento da lignina, os extrativos devem ser previamente removidos para se evitar a formação da condensação de produtos com a lignina, tendo-se também a necessidade de remover qualquer ácido ou solvente, tais como álcool, acetona, etc. (KLOCK et al., 2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Coleta das biomassas residuais

As biomassas residuais analisadas foram provenientes de atividades agroindustriais no Distrito Federal. Os resíduos agrícolas foram coletados em cooperativas no DF, sendo a principal a COOPA/DF que congrega 120 produtores associados e localiza-se no km 07 da BR 251, Planaltina-DF. Nesta cooperativa foram coletados derivados de milho (palhada, sabugo, quirela e restos de processamento) e quirela de sorgo (Figura 1.3).



Figura 1.3. Coleta dos resíduos na COOPA/DF.

Na Fazenda Água Limpa - FAL, pertencente à Universidade de Brasília (UnB), foram coletados caules (haste) e vagem de feijão, denominado palhada. A madeira residual de atividade madeireira foi oriunda da empresa Landy Madeiras, uma das mais tradicionais do segmento no DF. Já os resíduos de madeira de construção civil, foram coletadas na cooperativa Sonho de Liberdade, localizada na cidade Estrutural/DF.

Os resíduos de café foram trazidos diretamente de uma fazenda em Varginha/MG, a qual fornece os grãos do tipo arábico para a empresa Café do Sítio, instalado no Núcleo Bandeirante/DF.

Na Tabela 1.3 é apresentada a nomenclatura utilizada para cada resíduo com a respectiva descrição, bem como na Figura 1.4 encontram-se a ilustração dos mesmos. Alguns derivados do milho foram misturados para formar novas amostras e diversificar as possibilidades de resultados. Os resíduos foram armazenados em sacos de rafia com capacidade de 60kge levados para o Laboratório de Tecnologia da Madeira da FAL/UnB.

Tabela 1.3. Descrição das biomassas utilizadas e as respectivas nomenclaturas adotadas.

DESCRIÇÃO DA BIOAMSSA	NOMENCLATURA UTILIZADA
Caules e folhas de milho	“Milho Palhada”
Sabugo de milho	“Sabugo”
Quirela de milho	“Quirela”
Quirela misturada com palhada de milho	“Quirela + Palha”
Restos de milho oriundos do processo de peneiramento	“Milho Processo”
Quirela de sorgo	“Sorgo”
Caule e vagem de feijão	“Feijão”
Película e casca de café	“Café”
Serragem e maravalha de serraria	“Madeira Madeireira”
Restos de madeira da construção civil	“Madeira Construção Civil”



Figura 1.4. Resíduos *in natura* coletados.

3.2. Preparo das amostras

O preparo das amostras para adequá-las as normas dos procedimentos laboratoriais foi realizada no próprio Laboratório de Tecnologia da Madeira da Fazenda

Água Limpa. Primeiramente as amostras de cada tipo de resíduo foram divididas em três repetições, para efeito de casualidade, resultando em 30 tratamentos.

Em seguida, as amostras foram moídas em um moinho de facas, de laboratório, da marca Marconi modelo MA680 e malha de 0,85mm (20Mesh). A moagem permite o aumento da relação superfície/volume e permite a uniformização e homogeneização das partículas.

3.3. Teor de umidade

Inicialmente verificou-se a massa úmida e a massa seca da biomassa *in natura* com pesagem em balança de precisão de 0,001g e secagem em estufa de circulação forçada, previamente aquecida à $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, até a massa da amostra permanecer constante, conforme as normas NBR 8112 (ABNT, 1986) (cancelada sem substituição) e EN 14774-2 (DIN, 2009). A partir desses dados foi possível calcular a umidade de cada amostra na condição de campo, e posteriormente após serem moídos, através da Equação 01:

$$TU = \frac{M_u - M_{0\%}}{M_{0\%}} \times 100 \quad \text{Equação (01)}$$

Onde o TU é teor de umidade (%), M_u é a massa inicial da amostra úmida (g) e $M_{0\%}$ é a massa final da amostra seca (g).

3.4. Caracterização dos resíduos

A caracterização dos resíduos foi realizada no Laboratório de Produtos Florestais – LPF, do Serviço Florestal Brasileiro - SFB, em Brasília/DF, por meio dos seguintes ensaios: análise granulométrica, análise imediata e poder calorífico.

3.4.1. Análise granulométrica

A classificação granulométrica foi feita para o material *in natura* após moagem e baseou-se na norma NBR – NM 248 (2003), que consistiu em montar um rol de seis peneiras com diâmetros de abertura de 10, 20, 35, 42, 65 e 100 Mesh, posicionadas em ordem decrescente do topo para a base, sendo o topo a peneira de 10 Mesh. Uma massa de 100g de cada resíduo foi colocada na peneira superior (a de maior abertura), tampada, e o conjunto colocado em um peneirador eletromagnético, onde as peneiras

foram agitadas durante 20 minutos (Figura 1.5). As frações retidas em cada peneira foram retiradas com um auxílio de um pincel e pesadas em balança semi-analítica com precisão de 0,001g.



Figura 1.5. Classificação granulométrica.

3.4.2. Análise imediata

Para proceder esta etapa, primeiramente uma amostra dos resíduos moídos foram classificadas no mesmo classificador descrito anteriormente utilizando peneiras com duas granulometrias diferentes resultando em partículas de 40Mesh e 60Mesh.

Assim, a análise imediata consistiu em quantificar os teores de cinzas, materiais voláteis e teor de carbono fixo conforme a norma NBR 8112 (ABNT, 1986), com adaptações. Para materiais voláteis utilizou-se 1g de amostra, a 0% de umidade, em cadinhos de cerâmica com tampa, inseridos em forno do tipo mufla à $900\pm 10^{\circ}\text{C}$. As amostras foram distribuídas em duplicatas e o teor de materiais voláteis determinado a partir da Equação 02.

$$Mv = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{Equação (02)}$$

Onde Mv é o teor de materiais voláteis (%); m_1 é a massa inicial do cadinho + amostra (g) e m_2 é a massa final do cadinho + amostra (g).

As cinzas foram determinadas em triplicata, a partir de 2g de amostra em cada cadinho, colocados em mufla por 5 horas à $700\pm 10^\circ\text{C}$. Assim, o teor de cinzas foi calculado através da Equação 03.

$$Cz = \frac{m_f - m_c}{m_a} \times 100 \quad \text{Equação (03)}$$

Onde Cz é o teor de cinzas (%), m_f é a massa do cadinho + massa do resíduo (g), m_c é a massa do cadinho (g) e m_a é a massa da amostra (g).

O teor de carbono fixo (Cf) contido nas amostras baseia-se nos dados de teores de cinzas (Cz) e materiais voláteis (Mv) através da Equação 04.

$$Cf = 100 - (Cz + Mv) \quad \text{Equação (04)}$$

3.4.3. Poder Calorífico

Determinou-se o PCS em uma bomba calorimétrica da marca PARR 6400 Calorimeter (Figura 6-A), através de metodologia adaptada da norma NBR 8633 (ABNT, 1984). A adaptação desenvolvida pelo Laboratório de Bioenergia do LPF/SFB consiste em compactar manualmente 1g de amostra em um equipamento de pressão hidráulica da marca SPECAC. As amostras se transformam em pequenos pellets que permaneceram em estufa (a 60°C) por 24 horas até o momento do ensaio (Figura 1.6-B).

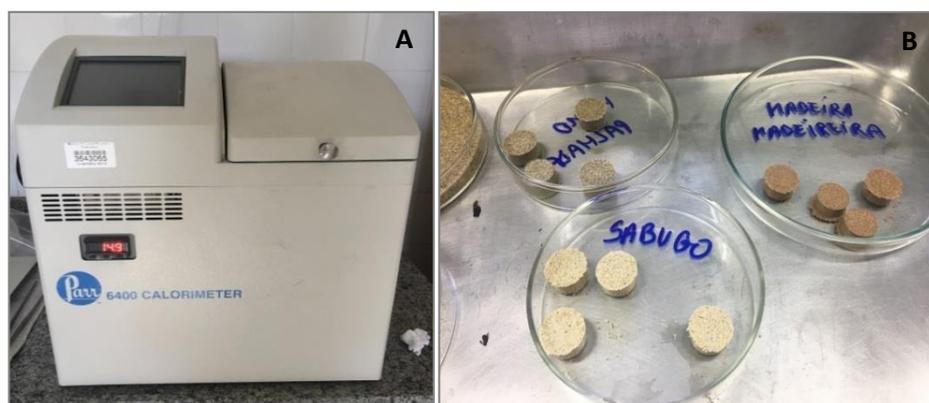


Figura 1.6. Ensaio de poder calorífico. A – calorímetro; B – pellets de ensaio.

Essa adaptação permite resultados mais precisos, pois possibilita um maior controle da umidade na amostra e melhora eficiência na queima da amostra na bomba

calorimétrica. O ensaio foi realizado em duplicada e a diferença entre as duas amostras era menor que 1%.

Foi necessária a transformação dos valores de poder calorífico superior para poder calorífico inferior. Esse cálculo foi feito utilizando-se percentual de hidrogênio encontrado na literatura conforme a Tabela 1.2 de acordo com a Equação 05.

$$PCI = PCS - 600\left(\frac{9xH}{100}\right) \quad \text{Equação (05)}$$

Onde: PCI é o poder calorífico inferior; PCS é o poder calorífico superior; e H é teor de hidrogênio.

Por fim, determinou-se o poder calorífico útil (PCU), através da Equação 06.

$$PCU = PCI (1 - Ubu) - 600xUbu \quad \text{Equação (06)}$$

Onde: PCU é o poder calorífico útil; PCI é o poder calorífico inferior e Ubu é o teor de umidade da amostra em base úmida.

3.5. Densidade aparente (granel)

A densidade a granel (kg/m^3) foi determinada para a amostra *in natura*, na condição de campo, a partir de uma adaptação das normas NBR 6922 (ABNT, 1981) e EN 15103 (DIN, 2010), onde se utilizou um cilindro de alumínio de volume conhecido, o qual foi preenchido até a marca delimitada com o resíduo, conforme Figura 1.7, e a massa obtida em uma balança de precisão de 0,1g. Dessa forma, a densidade a granel foi calculada a partir da relação da massa do material e o volume do recipiente.



Figura 1.7. Densidade a granel.

3.6. Densidade energética

A densidade energética foi calculada a partir do produto do poder calorífico útil (PCU) e a densidade a granel dos resíduos.

3.7. Análise química

Os ensaios para determinar o teor de extrativos, lignina e cinzas livres de extrativos foram realizados no Laboratório de Química do LPF/SFB.

3.7.1. Teor de Extrativos

Este procedimento seguiu a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), com adaptações do próprio laboratório. Consiste em preparar 5g de amostra em casulos de celulose tampados com algodão, acoplados na coluna de extração Soxhlet. Uma mistura de Etanol:Tolueno, na proporção 1:2, é colocada em balões de fundo chato e utilizada como solvente. O extrator (Figura 1.8-A) condensa o solvente acumulando os extrativos no fundo dos balões (Figura 1.8-B), que por sua vez, são levados para estufa por 2 horas a 115°C e em seguida pesados. O teor de extrativos é determinado através da Equação 07.

$$Te = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100 \quad \text{Equação (07)}$$

Onde T_e é o teor de extrativos (T_e) (%), m é a massa da amostra descontada a umidade (g), m_1 é a massa do balão de extração (g) e m_2 corresponde à massa do balão de extração (g).



Figura 1.8. Retirada dos extrativos dos resíduos. A – extrator; B- balões com extrativos.

3.7.2. Teor de cinzas sem extrativos

Este ensaio foi realizado para determinar os teores de lignina insolúveis das amostras, baseado na norma TAPPI T211 om-93. Utilizou-se 2g de amostras, em cadinhos previamente calcinados, colocados em mufla a 200°C, subindo gradativamente a temperatura até 525°C, permanecendo assim por 4 horas. A Equação 08 foi utilizada para calcular o teor de cinzas sem extrativos.

$$Cz = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100 \quad \text{Equação (08)}$$

Onde Cz é o teor de cinzas sem extrativos (%), m é a massa da amostra (g) a 0% de umidade, m_0 é a massa do cadinho (g) e m_1 corresponde a massa do cadinho + amostra calcinada a 525°C (g).

3.7.3. Teor de lignina ácida insolúvel e solúvel

Para a determinação dos teores de lignina insolúvel e solúvel, foram adotados os procedimentos Laboratory Analytical Procedure #003e #004, respectivamente (TEMPLETON e EHRMAN, 1995). Adicionou-se 3ml de ácido H_2SO_4 à 72% em tubos de ensaio, colocados em banho maria a 30°C e misturados a cada 15 minutos por 2 horas (Figura 1.9-A).

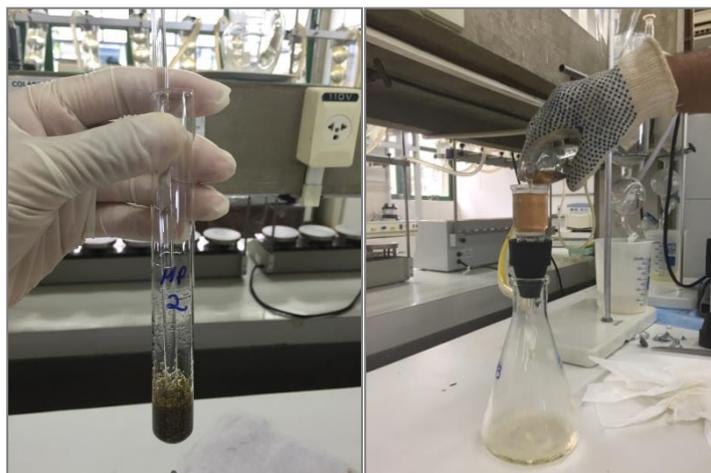


Figura 1.9. Processo de isolamento da lignina ácida solúvel e insolúvel. A – tubos de ensaio para banho-maria; B – cadinhos filtrantes.

Posteriormente, foram medidos 84ml de água deionizada e acrescentados aos tubo de ensaio, que foram tampados e autoclavados a 121°C por 1 hora. O conteúdo de cada frasco foi, então, filtrado a vácuo em cadinhos filtrantes (Figura 1.9-B), onde a parcela líquida de cada um foi transferida para kitassatos distintos para determinação dos teores de lignina ácida solúvel em espectrofotômetro UV/VIS. A parcela sólida retida no filtro foi levada para estufa para obtenção da lignina insolúvel. Assim, é possível obter o teor de lignina insolúvel através da Equação 09.

$$Li_{ins} = \frac{m_2 - m_1}{m} \quad \text{Equação (09)}$$

Onde, Li_{ins} é o teor de lignina insolúvel (%), m corresponde a massa da amostra descontada a umidade (g), m_1 é a massa do cadinho filtrante (g) e m_2 é a massa do cadinho filtrante + lignina insolúvel descontada as cinzas livres de extrativos (g) proporcionais à amostra e à massa de lignina obtida.

A lignina solúvel foi analisada por meio de um espectrofotômetro 700 plus, da marca FEMTO (Figura 1.10), onde são obtidos o valor de absorbância (medida a 205 nm) e o fator de diluição, tendo ácido sulfúrico a 4% como branco. O cálculo do teor de lignina solúvel deriva da Equação 10.

$$Li_{sol} = \frac{A}{110} \times F \times \frac{87}{1000} \times 100 \quad \text{Equação (10)}$$

Onde Li_{sol} é o teor de lignina solúvel (%), m é a massa da amostra (g) descontada a umidade, A é a absorbância lida pelo espectrofotômetro e F é o fator de diluição.



Figura 1.10.Espectrofotômetro utilizado.

3.7.4. Teor de lignina total

O teor de lignina total é o somatório entre a lignina insolúvel e a solúvel.

3.7.5. Teor de Holocelulose

O teor de holocelulose livre de extrativos foi calculado por diferença, onde se subtraiu de 100%, os teores percentuais lignina total e cinzas livres de extrativos, conforme a Equação 11.

$$TH = 100\% - Li_{tot} - Cz \quad \text{Equação (11)}$$

Onde TH é o teor de holocelulose (%), Li_{tot} é o teor de lignina total (%) e Cz é o teor de cinzas livre de extrativos (%).

3.8. Análise estatística

Para realização da análise estatística, adotou-se um delineamento inteiramente casualizado, composto por 10 tratamentos com 3 repetições cada. As variáveis de cada biomassa foram analisadas estatisticamente através da Análise de Variância (ANOVA). Comparações entre as médias de cada tratamento foram realizadas através do Teste de Tukey, a 5% de significância. Além disso, correlações e regressões simples utilizando o modelo linear e quadrático entre variáveis também foram determinadas. As análises foram realizadas no programa estatísticos Minitab 18.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Teor de umidade

A análise de variância dos teores de umidade mensurados dos resíduos *in natura*, ou seja, na forma como foram coletados, está informada na Tabela 1.4. A Tabela 1.5 apresenta a resposta da diferença significativa encontrada na ANOVA entre as biomassas, com as respectivas médias do teor de umidade.

Tabela 1.4. Análise de variância ANOVA do teor de umidade dos resíduos na condição *in natura*.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Resíduos <i>in natura</i>	9	155,37	17,264	3,7	0,007
Erro	20	93,3	4,665		
Total	29	248,68			

Onde: GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados e QM = Quadrado Médio.

Tabela 1.5. Médias de teor de umidade em base seca dos resíduos analisados, agrupadas conforme teste Tukey.

BIOMASSA	TU (%)	
Quirela	17,2	A
Milho Palhada	13,6	AB
Milho Processo	12,5	AB
Café	12,5	AB
Sorgo	12,5	AB
Madeira Madeireira	12,0	AB
Quirela + Palha	11,9	AB
Sabugo	11,7	AB
Madeira C. Civil	8,8	B
Feijão	8,6	B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

A umidade é um fator limitante na escolha do combustível (biomassa), não sendo permitindo valores acima de 50%, como afirma KLAUTAU (2008), pois a partir deste ponto é liberada energia insuficiente para a combustão e conseqüentemente para a produção de calor. Nos dados apresentados, a quirela de milho foi o resíduo que apresentou a maior umidade e o feijão a menor. Depois de moídos, o café, o sorgo e a quirela continuaram retendo mais umidade em relação aos demais resíduos.

Na literatura são encontrados diversos estudos que mensuraram o teor de umidade em resíduos semelhantes aos analisados. Lima (2004) e Vieira (2012) encontraram valores de umidade em sabugo de milho superiores a este trabalho, sendo 17,1% e 16,93%, respectivamente. Em contrapartida, Carvalho et al. (2016) encontrou teores de umidade de palha e sabugo de milho *in natura*, triturados, de 8,49% e 6,58%, respectivamente. Assim como o encontrado por Vieira et al. (2014) onde o sabugo apresentou um teor de umidade de 6,76% e de 6,87% para palha.

Calegari et al. (2005), caracterizando resíduos de madeira de serraria para energia, encontraram teores de umidade de 56,6% para serragem de *Pinus spp.*, 43,87% em serragem de *Eucalyptus spp.*, 16,12% em maravalhas e 57,8% em refilo/costaneira. Estes resíduos de serraria normalmente possuem teores mais elevados de umidade, diferente do material utilizado neste estudo que por ser proveniente de madeiras passou pelo processo de secagem.

Faria et al. (2016), analisando resíduos lignocelulósicos da cafeicultura identificaram um teor de umidade médio de 10,82% à base seca. Silva et al. (2005) em um levantamento sobre o teor de umidade de grãos, encontraram valores de umidade na colheita de 62% (base úmida) para o café; 23% para o milho e 26% para o sorgo e, após secagem o café, milho e sorgo apresentaram respectivamente 12%, 11% e 9%.

A desagregação das partículas através do processo de moagem pode facilitar a perda da umidade melhorando o rendimento energético da biomassa, pois, conforme Calegari et al. (2005), o teor de umidade da biomassa influenciou significativamente na quantidade de matéria seca e, conseqüentemente, na produção de calor.

Assim, quanto maior o valor da umidade presente na biomassa mais energia é necessária para iniciar o processo de queima, ou seja, mais energia é requerida para vaporizar a água e menos energia então é fornecida para a reação endotérmica (a queima) (VIEIRA, 2012).

Outro ponto a ser considerado em relação à importância do teor de umidade presente nos resíduos é quanto ao armazenamento, pois, quanto mais úmido o material mais susceptível ao ataque de fungos. Silagens com alta umidade são mais propensas à deterioração aeróbia (TAYLOR e KUNG, 2002), nestes materiais são maiores os riscos de proliferação de microrganismos indesejáveis, bem como a produção de substâncias potencialmente tóxicas.

4.2. Granulometria

A moagem visa, além da redução do tamanho das partículas, diminuir a porosidade das mesmas, modificar seu formato e misturar diferentes componentes resultando em um material mais homogêneo. A distribuição granulométrica dos resíduos após serem moídos encontra-se na Figura 1.11, contendo a relação entre o diâmetro dos orifícios das peneiras (em *Mesh*) e o percentual de biomassa retida em cada uma.

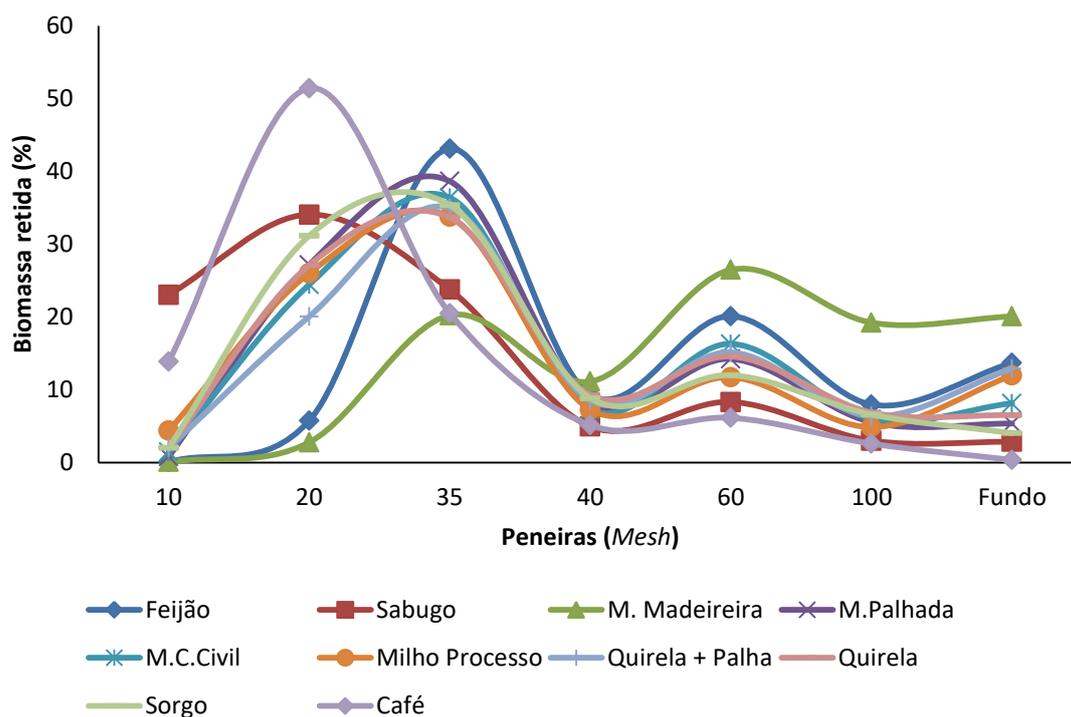


Figura 1.11. Distribuição granulométrica dos resíduos.

A maior retenção ocorreu com os resíduos de café, indicando maior granulometria que os demais, sendo composta por aproximadamente 51% de partículas com dimensões iguais ou superiores a 0,84mm, retidas na peneira de 20 *Mesh*. Também nessa mesma faixa granulométrica o sabugo apresentou sua maior retenção de partículas, com 34%. A madeira de madeira foi o único resíduo que apresentou pico de retenção granulométrica com menor diâmetro, acumulando 26% na peneira com abertura de 0,25mm (60 *Mesh*). Os demais resíduos apresentaram percentual de retenção intermediário na peneira de 35 *Mesh* (0,50 mm).

As diferenças na granulometria da biomassa após a trituração devem-se provavelmente às características iniciais (naturais/estruturais) dos resíduos. Aqueles que

apresentaram menor resistência à trituração produziram frações com menores granulometrias, o que poderá influenciar a densidade aparente da biomassa (PROTÁSIO et al., 2011-a).

4.3. Análise imediata

Nas Tabelas 1.6 e 1.7 são apresentados os resultados da análise de variância e do teste de Tukey, respectivamente, para os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo das diferentes biomassas, com 5% de significância. Houve diferença significativa nos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo ($p < 0,005$) entre os resíduos analisados. O detalhamento e as discussões acerca das propriedades que compõem a análise imediata estão nos subitens que se sucedem.

Tabela 1.6. Análise variância ANOVA dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos resíduos agroindustriais.

Variáveis	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Materiais voláteis	9	409,24	45,47	22,3	0,000
Erro	20	40,78	2,039		
Total	29	450,02			
Cinzas	9	509,03	56,55	86,13	0,000
Erro	20	13,13	0,65		
Total	29	522,16			
Carbono Fixo	9	821,04	91,22	42,58	0,000
Erro	20	42,85	2,14		
Total	29	863,88			

Onde: GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados e QM = Quadrado Médio.

Tabela 1.7. Teste de Tukey para as médias de teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) de cada biomassa.

RESÍDUO	MV (%)	CZ (%)	CF (%)
Quirela	83,62 A	2,07 EF	14,29 CD
Feijão	83,26 AB	9,03 B	7,70 E
Madeira Madeireira	81,51 AB	0,67 F	17,80 ABCD
Milho Processo	80,97 AB	4,35 DE	14,66 CD
Sorgo	80,07 ABC	15,62 A	4,30 E
Madeira C. Civil	80,06 ABC	2,46 EF	17,47 BCD
Quirela + Palha	79,15 BC	7,22 BC	13,62 D
Milho Palhada	76,23 CD	5,73 CD	18,02 ABC
Sabugo	74,22 DE	3,81 DE	21,97 A
Café	71,663 E	7,69 BC	20,64 AB

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

4.3.1. Materiais Voláteis

O comportamento das médias do teor de materiais voláteis em relação à média total (79,08%) consta na Figura 1.12, onde a linha central representa a média global para todas as amostras e as linhas vermelhas são os limites de decisão. Se um ou mais efeitos estiverem fora dos limites de decisão, é possível concluir que diferença entre a média do grupo e a média global é estatisticamente significativa.

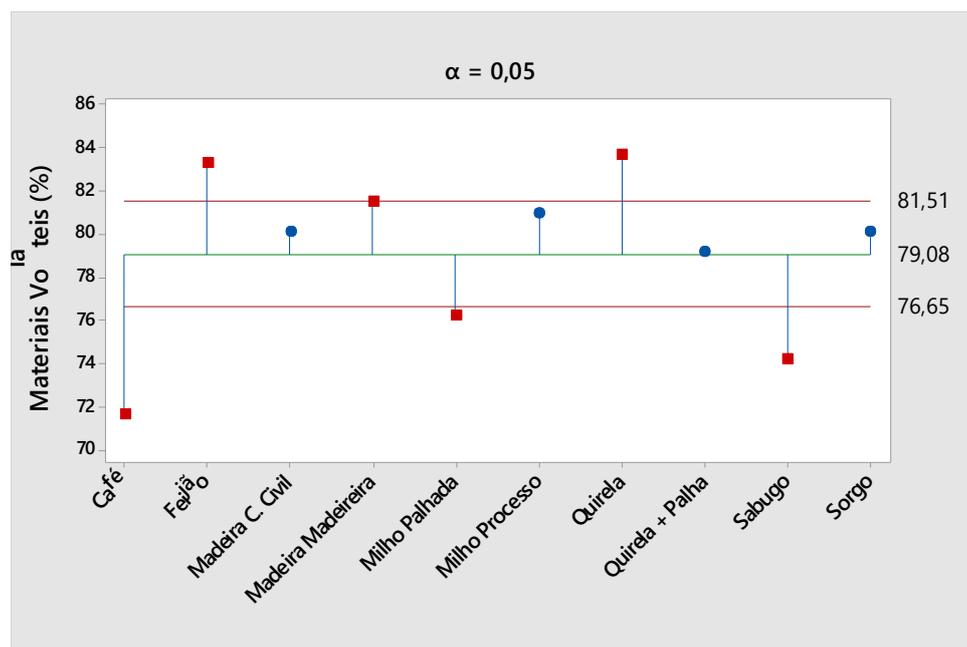


Figura 1.12. Teor de materiais voláteis das biomassas (%)

Segundo Obernberger e Thek (2004), é alta a quantidade de materiais voláteis nos combustíveis de biomassa, variando em geral entre 76 e 86 % (base seca), o que resulta em maior emissão de gases na combustão. Analisando a Figura 1.14, observa-se que o café foi a única biomassa analisada que apresentou média abaixo do mínimo mencionado pelos autores citados, com média de 71% de voláteis. O feijão e a quirela de milho foram os resíduos que apresentaram as maiores quantidades de voláteis, em torno de 83%.

Morais (2007) encontrou um teor de materiais voláteis para serragem de madeira de 89,02%, Vieira (2014) indicou um valor de aproximadamente 98% de materiais voláteis em sabugo de milho. Nakashima et al. (2014) encontrou um valor de 80,73% de voláteis em palha de milho. Um teor de voláteis de 82% a 83% em serragem de *Pinus* e *Eucalyptus* foi encontrado por Santos (2015).

Miranda (2011) estudando bagaço de sorgo encontrou teor de 81% de materiais voláteis, enquanto Oliveira (2016) encontrou um valor de 85% para o mesmo produto. Dantas (2013), caracterizando resíduos do milho para uso energético, determinou valores de materiais voláteis para caule; 83,99%, folhas; 83,09%, sabugo; 84,68% e palha, 85,90.

A biomassa com alto teor de materiais voláteis, na combustão produzirá maior quantidade de gases combustíveis podendo provocar diminuição no tempo de residência no aparelho de queima, e assim afetar, conforme Vieira (2014), o processo de combustão em geral. No entanto, um alto teor de voláteis facilita a ignição e a combustão, além de indicar a estabilidade da chama e a velocidade da combustão (SOUZA et al., 2016).

4.3.2. Teor de Cinzas

As cinzas correspondem à fração inorgânica do combustível e pode variar desde 1% (para madeira e biomassa lenhosa) até 40% (para biomassa herbáceas e resíduos agrícolas), em base seca, como é o caso da casca do arroz (FERNANDES, 2015). Os valores de cinzas determinados na análise imediata para os resíduos estudados encontram-se na Figura 1.13.

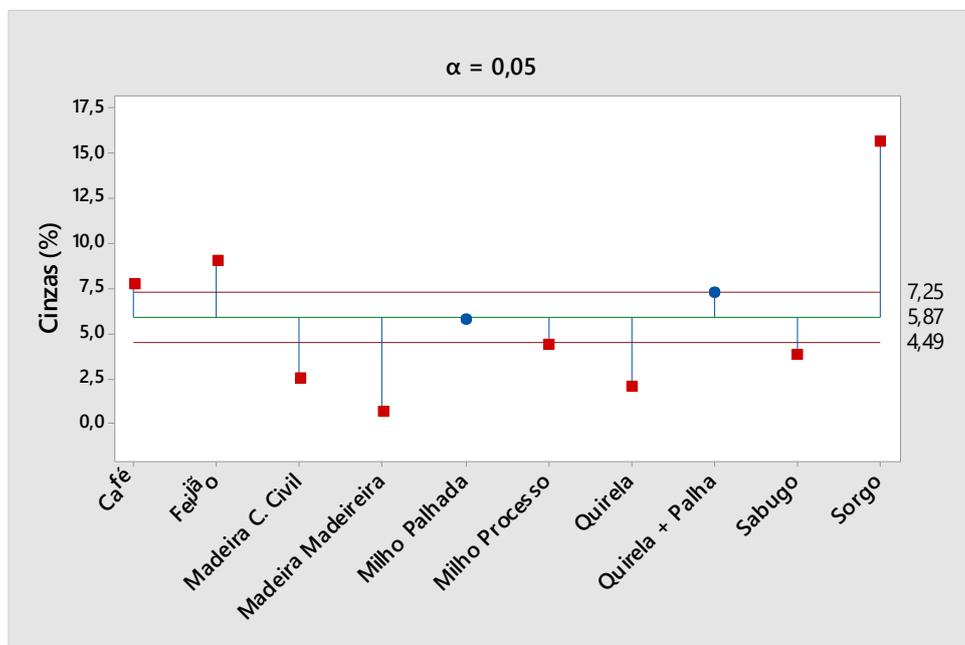


Figura 1.13. Teor de cinzas dos resíduos lignocelulósicos.

O sorgo apresentou um valor discrepante em relação aos demais, sendo 23 vezes maior que a madeira de madeireira cujo teor de cinzas foi o menor apresentado dentre

todas as biomassas analisadas. Sendo assim, sob este aspecto, a madeira de madeireira foi o resíduo que demonstrou-se mais apropriado.

Teores de cinzas elevados são mais esperados em culturas agrícolas porque os solos são compostos por areia, argilas e siltes e podem incorporados na biomassa após a colheita contribuindo para a presença de compostos inorgânicos (FERNANDES, 2015).

Complementando, segundo Vale et al. (2007) o teor de cinzas está relacionado com a presença de quantidades e de qualidades diferentes de minerais presentes na biomassa, assim minerais como cálcio, potássio, fósforo, magnésio, ferro, sódio, entre outros que fazem aumentar o teor de cinzas. Os autores encontraram um elevado teor de cinzas para resíduos de café (13,96%), superiores ao encontrado neste trabalho (7,69%), que pode ser proveniente da adubação, não só de potássio e fósforo, mas do cálcio usado como corretivo. Os mesmos autores encontraram valor de cinzas inferior para resíduos de madeira (maravalha) de 0,34%.

Dentre os componentes dos resíduos da cultura do milho analisados por Dantas (2013), o caule (2,08%), o sabugo (1,65%) e a palha (1,91%) destacaram-se na produção de combustível em relação à folha que apresentou 5,49% de cinzas. Vieira (2014) e Miranda (2011) encontraram valores de cinzas em bagaço de sorgo de 6,2%, e de 9,5%, respectivamente, ambos inferiores ao mensurado neste trabalho.

O resultado do teor de cinzas em madeira proveniente de construção civil foi de 2,46%, superior à média esperada para a madeira e a provável explicação é a presença de materiais contaminantes como argamassa, pregos, parafusos, agentes desmoldantes, tintas, entre outros, que podem ter elevado este parâmetro.

Klautau (2008) verificou que, o alto teor de cinzas em biomassa pode influenciar negativamente o poder calorífico. Da mesma forma, Jenkins et al. (1998) identificaram a existência de uma relação entre o poder calorífico e o conteúdo de cinzas dos combustíveis: o aumento de 1% na concentração de cinzas diminui o valor do conteúdo calorífico em $0,2 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

É também importante avaliar o teor de cinzas e a composição inorgânica de uma biomassa para garantir a sua adequação a cada processo de combustão e prevenir eventuais problemas operacionais ou ambientais (FERNANDES, 2015). Nesse sentido, segundo Pereira e Seye (2014), o excesso de cinzas pode gerar problemas como o entupimento de tubulação, o que requer maior atenção na manutenção dos equipamentos.

As cinzas não apresentam valor comercial, e são facilmente desprezadas, podendo levar à poluição, o que acarreta problemas a nível ambiental e na saúde humana. Por isso, têm sido feitos grandes esforços para acrescentar valor comercial a estes resíduos, utilizando-os como fonte primária ou secundária (aditivo ou no estado puro) em diferentes materiais (NOOR-UL-AMIN, 2014).

4.3.3. Carbono Fixo

O teor de carbono fixo é a massa de carbono restante depois da liberação da matéria volátil, excluindo o teor de cinzas e umidade (MCKENDRY, 2002). Tabarés et al. (2000) afirmam que o carbono contido na biomassa, incluindo a casca no caso da madeira, é maior que em resíduos de culturas agrícolas. O carbono fixo determinado em cada resíduo trabalhado consta na Figura 1.14.

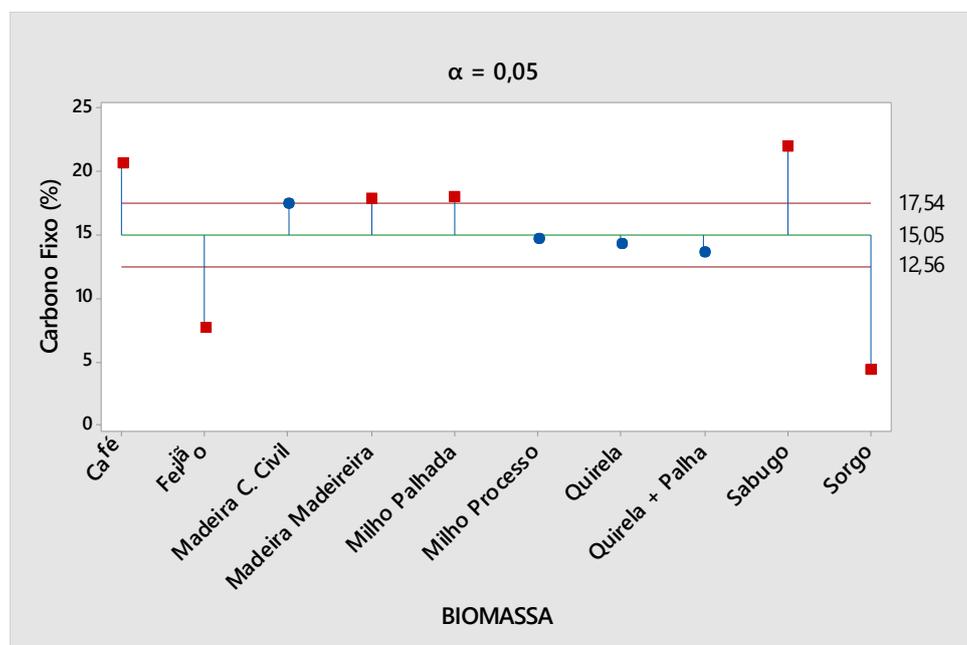


Figura 1.14. Teor de carbono fixo dos resíduos lignocelulósicos.

Como o teor de carbono fixo está inversamente relacionado com os teores de material volátil e de cinzas, isso explica o menor teor para a quirela de sorgo (4,3%) e o maior para sabugo (21,97%), seguido do café (20,65%).

Na literatura foram encontrados teores de carbono fixo inferiores aos mencionados na Figura 1.14, como: 18,32% para a o sabugo de milho, segundo Demirbas (2004); 13,67% também em sabugo e 12,19% em palhada de milho, conforme Dantas (2013). O teor de 4,3% de carbono fixo da quirela de sorgo foi inferior ao

encontrado em bagaço de sorgo analisado por Vieira (2014), com 8,6%. Horst (2013) indicou para serragem de madeira 14,22% de CF, enquanto Vale et al. (2007) encontraram 16,47% em maravalha, mais próximo ao determinado para madeira de madeireira neste trabalho (17,8%). Estes autores também verificaram um teor de carbono fixo de 10,31% em resíduos de café.

4.4. Poder Calorífico Superior e Útil

Quando se trata de avaliar o potencial energético de resíduos agroindustriais, o poder calorífico é uma variável indispensável. A Tabela 1.8 exibe a análise de variância deste parâmetro onde o p-valor foi menor que 5%, indicando que há diferença estatística. O poder calorífico pode ser expresso em diversas unidades, na Tabela 1.9 as médias de cada resíduo para poder calorífico superior e útil estão detalhadas nas duas unidades mais comumente utilizadas para medidas energéticas e o agrupamento a que pertencem segundo o Teste de Tukey.

Tabela 1.8. Análise de variância ANOVA do poder calorífico superior (PCS) e útil (PCU) dos resíduos analisados.

Fonte	GL	PCS		PCU	
		Valor F	Valor-P	Valor F	Valor-P
Biomassa	9	1523,1	0,000	2323,1	0,000
Erro	20				
Total	29				

Onde: GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados e QM = Quadrado Médio.

Tabela 1.9. Teste de Tukey entre as médias do poder calorífico superior (PCS) e útil (PCU) dos resíduos analisados.

RESÍDUO	PCS		PCU	
	(MJ.kg)	(kcal.kg)	(MJ.kg)	(kcal.kg)
Madeira Madeireira	20,68 A	4.944	17,05A	4.074
Madeira C Civil	19,80 B	4.732	16,25 B	3.883
Sabugo	18,52 C	4.426	15,83 C	3.782
Milho Processo	18,51 C	4.424	14,90 D	3.562
Milho Palhada	18,41 C	4.335	14,77 E	3.529
Quirela	18,27 D	4.335	14,00 G	3.345
Sorgo	17,85 E	4.266	14,32 F	3.421
Feijão	17,42 F	4.163	14,79 E	3.533
Quirela + Palha	17,40 F	4.159	14,10 G	3.370
Café	16,78 G	4.010	13,47 H	3.219

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Como observado na Tabela 1.9, a madeira de madeireira apresentou os maiores poder calorífico superior e útil, seguido da madeira de construção civil, o que já era previsto, pois, a madeira possui poder calorífico maior que diversos resíduos agrícolas. Calegari (2005), analisando entre outras biomassas, encontrou um PCS de refilo/costaneira de madeira de 21,39 MJ.kg, e para maravalha de 20,70 MJ.kg, semelhantes aos determinados no presente estudo em madeira de madeireira.

Os resíduos derivados de milho (sabugo, quirela, milho palhada e milho processo) foram o que apresentaram o maior agrupamento de médias de PCS, como consta na Tabela 1.9, sendo que o derivado de milho que mais se distanciou da média dos demais foi o quirela+palha. Segundo Rocha (2002), o sabugo de milho tem um PCS de 15,65 MJ.kg, inferior ao encontrado neste trabalho (18,52 MJ.kg). Para palhada de milho, os valores encontrados neste estudo foram similares aos encontrados por Reevendran et al. (2015) e Horst (2013). Ainda quanto aos resíduos de milho, Dantas (2013) encontrou valores de PCS semelhantes entre caule (4.348kcal/kg), folhas (4.365 kcal.kg), sabugo (4.476 kcal.kg) e palha (4.564 kcal.kg). O menor PCS foi o do resíduo de café (4.010 kcal.kg), semelhante ao encontrado por Vale et al. (2007) para casca de café (3.933 kcal.kg).

O teor de cinzas pode ter influenciado no poder calorífico superior apresentado pelas biomassas, pois a correlação entre ambos apresentou um $r^2 = 40,3\%$ e $p < 0,001$, logo, estatisticamente significativa. Da mesma forma, Browning (1963), citado por Cunha et al. (1989), afirma que o poder calorífico é mais alto quanto maior o teor de lignina e extrativos, porque os mesmos contêm menos oxigênio que os polissacarídeos presentes na holocelulose (celulose e hemicelulose). Neste trabalho também foram encontradas correlações negativas significativas estatisticamente entre o poder calorífico superior e os teores de lignina ($r = -0,83$; $p < 0,001$) e extrativos ($r = -0,63$; $p = 0,005$).

4.5. Densidade a granel

A Tabela 1.10 apresenta o resultado da análise de variância comparando a densidade a granel de todos os resíduos, indicando que houve diferença significativa entre os mesmos (o p-valor foi menor que 5%). A Figura 1.15 exhibe as médias para cada biomassa com as respectivas diferenças obtidas no Teste de Tukey.

Tabela 1.10. Análise variância ANOVA para densidade a granel.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Biomassa	9	8986	99846	49,38	0,000
Erro	20	4043	2022		
Total	29	9390			

Onde: GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados e QM = Quadrado Médio.

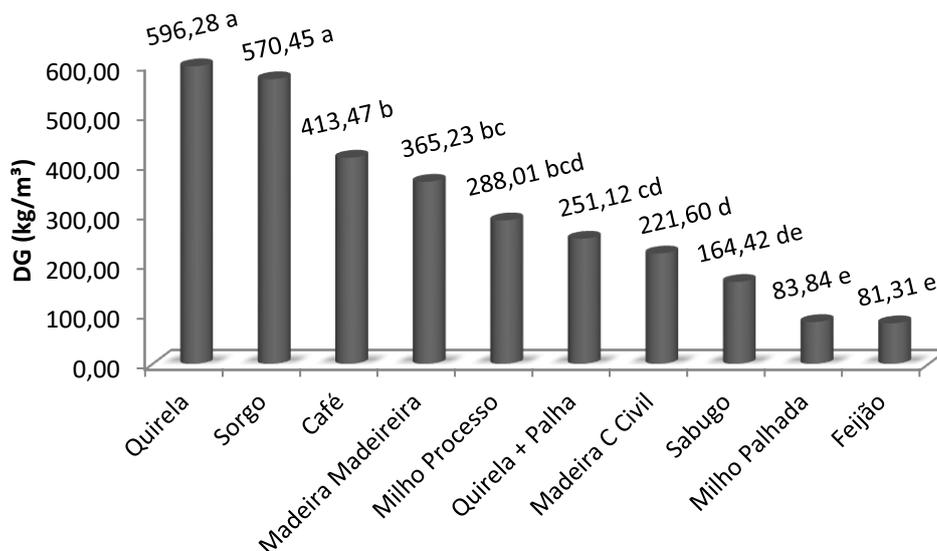


Figura 1.15. Densidade a granel dos resíduos.

Por serem compostos por resíduos de grãos triturados, a quirela de sorgo e de milho foram os que apresentaram a maior densidade granel. Ambos apresentaram distribuição granulométrica semelhante, pois, conforme explicam Dias et al. (2012), a densidade do granel é um parâmetro relacionado também com a granulometria do material, onde quanto menor o tamanho da partícula, menor a porosidade (quantidade de espaços vazios) ocasionando em uma maior densidade e quanto maior a granulometria menor a densidade como encontrado para a palhada de milho e de feijão.

Quanto à densidade a granel de serragem de madeira, podem ser adotados valores na faixa de 150 (madeiras leves) a 250 kg/m³ (madeiras pesadas), segundo Pinheiro et al. (2005). Dentre os resíduos de madeira analisados, apenas o de construção civil encaixa-se dentro da faixa sugerida pelo autor. O café apresentou maiores partículas em faixa granulométrica superior aos demais resíduos, porém, notou-se que isso não reduziu a densidade a granel do material. A provável explicação é a presença de restos de semente no resíduo analisado.

4.6. Densidade energética

Como mencionado anteriormente, a densidade energética é um parâmetro que avalia a quantidade de energia por unidade de volume que uma biomassa pode gerar. Dessa forma, esta propriedade é de suma importância na análise final da efetividade do uso de uma matéria-prima como combustível. As Tabelas 1.11 e 1.12 apresentam o resultado da análise de variância ANOVA e o teste de Tukey das médias de densidade energética de cada resíduo, respectivamente.

Tabela 1.11. Análise de variância ANOVA da densidade energética dos resíduos analisados.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Biomassa	9	292,21	32,46	42,24	0,000
Erro	20	15,37	0,76		
Total	29	307,58			

Onde: GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados e QM = Quadrado Médio.

Tabela 1.12. Teste de Tukey entre as médias de densidade energética.

Biomassa	Médias (GJ/kg)
Quirela	8,34 A
Sorgo	8,16 AB
Madeira Madeireira	6,22 BC
Café	5,56 CD
Milho Processo	4,29 CDE
Madeira C Civil	3,60 DE
Quirela+Palha	3,54 DE
Sabugo	2,60 EF
Milho Palhada	1,23 F
Feijão	1,20 F

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Verifica-se que a elevada densidade a granel da quirela e do sorgo resultou nas maiores densidades energéticas para essas biomassas. No sentido oposto, a baixa densidade a granel do milho palhada e do feijão gerou para esses tratamentos os menores valores de densidade energética. Dessa forma, percebe-se que a densidade a granel foi o parâmetro mais decisivo para esta propriedade energética do que o poder calorífico.

A baixa densidade energética da biomassa sólida, em comparação com o petróleo e o carvão mineral, resulta em custos elevados de transporte e armazenamento

(VIDAL e HORA, 2010). Por isso, a adoção de outras rotas de conversão é recomendável para elevar a densidade energética de biomassas residuais, como o adensamento e a pirólise.

4.7. Análise química

A avaliação da composição química de resíduos lignocelulósicos faz parte do grupo de variáveis de fundamental importância para a análise de uma matéria-prima como potencial produtora de energia, seja na forma *in natura*, de adensados ou carvão vegetal.

Na Tabela 1.13 estão apresentadas as análises de variância dos teores de extrativos, cinzas sem os extrativos, holocelulose e lignina (insolúvel, solúvel e total) e na Tabela 1.14 o resultado do teste de média. Pela metodologia utilizada, não foi possível obter os valores de cinzas sem extrativos (e conseqüentemente holocelulose) dos resíduos de quirela, quirela + palha, sorgo e milho processo, devido à alta quantidade de amido presente nesses materiais, o que impediu a filtragem, passo determinante para isolar a lignina.

Tabela 1.13. Análise de variância ANOVA do teor de extrativos, cinzas sem extrativos e holocelulose.

Variável	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Extrativos	9	874,3	97,14	76,83	0,000
Erro	20	25,29	1,264		
Total	29				
Cinzas sem extrativos	5	22,26	4,45	125,29	0,000
Erro	12	0,426	0,03		
Total	17				
Holocelulose	5	952,38	190,47	120,80	0,000
Erro	12	18,92	1,57		
Total	17				
Lignina insolúvel	5	1017,03	203,40	126,11	0,000
Erro	12	19,36	1,613		
Total	17				
Lignina solúvel	5	15,84	3,16	293,29	0,000
Erro	12	0,12	0,01		
Total	17				
Lignina total	5	848,23	169,64	113,03	0,000
Erro	12	18,01	1,50		
Total	17				

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Tabela 1.14. Teste de Tukey para as médias dos parâmetros da análise química.

RESÍDUO	Extrativos (%)	Cinzas / extrativos (%)	Holocelulose (%)	Lignina Ins.(%)	Lignina Sol. (%)	Lignina Total (%)
Madeira C Civil	3,12 f	0,79 cd	68,79 c	31,04 b	0,96 e	32,0 b
Milho Palhada	11,76 bc	2,09 c	81,42 b	17,71 c	2,95 b	20,67 d
Sabugo	9,75 cd	1,62 d	85,38 a	13,50 d	2,73 b	16,23 e
Madeira Madeireira	7,60 de	1,36 e	64,69 d	35,12 a	1,54 d	36,67 a
Café	24,36 a	4,25 a	79,41 b	21,0 c	3,83 a	24,83 c
Feijão	5,58 ef	2,65 b	79,62 b	20,66 c	2,36 c	23,02 d
Quirela	10,17 bcd	--	--	--	--	--
Quirela + Palha	13,33 b	--	--	--	--	--
Sorgo	10,91 bc	--	--	--	--	--
Milho Processo	12,28 bc	--	--	--	--	--

Onde: GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados e QM = Quadrado Médio.

O café apresentou o maior teor de extrativos e cinzas livres de extrativos, contrariando os resultados de Brum (2007) que afirmou que o pergaminho do café caracteriza-se quimicamente pelo seu alto teor de fibra bruta (celulose, lignina e hemiceluloses) e baixos teores de extrativos e cinzas. A autora definiu teores de celulose de 41,20%, lignina 20,49%, cinzas 1,37% e hemiceluloses 34,77% para café. Brahan e Bressani (1978) estudando também a composição do pergaminho de café obtiveram um valor similar ao presente trabalho para lignina (24,5%), e outro inferior em relação às cinzas (0,5%).

No estudo de Brum (2007), o pergaminho mostrou maior potencial no processo de aproveitamento, por apresentar maiores rendimentos em relação à polpa. A autora concluiu ainda que os teores de lignina encontrados na polpa e pergaminho são comparáveis aos de madeira.

Os elevados teores de lignina encontrados nos resíduos de madeira de madeireira e de construção civil já eram previsíveis, tendo em vista que a madeira é rica em lignina. Como há uma relação inversa entre lignina e holocelulose, era de se esperar que estes mesmos resíduos apresentassem os menores teores de holocelulose.

Em comparação aos teores de extrativos de madeiras como as coníferas que variam de 5 a 8% e as folhosas que variam de 2 a 4% (BRITO, 1985), os teores encontrados, exceto madeira de construção civil, podem ser considerados altos. A presença de altos teores de extrativos é uma característica vantajosa para produção de energia devido ao elevado poder calorífico desses componentes (GUO et al., 2010).

A holocelulose e a lignina são consideradas os principais componentes moleculares da biomassa. Para a produção de energia, maiores teores de lignina e menores teores de holocelulose são desejáveis (BUFALINO et al., 2013), como pode ser observado nos resíduos de madeira analisados.

A análise química de palha de milho realizada por Romão (2015) apontou valor superior ao encontrado neste trabalho para teor de extrativos (17,22%), e inferiores em relação à lignina total (12,77%), holocelulose (69,37%) e cinzas (0,64%). Silva et al. (2010) também chegaram a um teor de lignina próximo a 12% em palha de milho. Este último autor também analisou o sabugo de milho onde constou 20,3% de lignina.

Segundo Silva et al. (2009), a lignina é um material polifenólico, amorfo, hidrofóbico, de baixa densidade e abrasividade atua como cimento, agente enrijecedor, impermeabilizante e protetor contra microrganismos no interior de fibras vegetais. A baixa quantidade desse material encontrado nos resíduos com maior quantidade de amido, explica a vulnerabilidade destes observada em relação ao ataque de fungos e insetos. Tal fato também justificado por esses resíduos conservarem mais umidade em relação aos demais, mesmo depois de moídos.

A quirela de sorgo, assim como a quirela de milho, é utilizada na silagem por ser um alimento de alto valor nutritivo e que apresenta alta concentração de carboidratos solúveis essenciais para adequada fermentação láctica. Portanto, seu uso energético ainda é incipiente devido à elevada umidade, alto teor de cinzas e pouca lignina (o mesmo conclui-se para quirela + palha e milho processo). Essa característica, no entanto, possibilita o uso dessas quirelas como aglutinante no processo de adensamento de outras biomassas vegetais para produção energética.

Em contrapartida, o sorgo biomassa é promissor para a indústria energética, apresentando um PCS de 4.298,40 kcal/kg (EMBRAPA, 2014), um teor de carbono de 68,3% (MIRANDA, 2011), e uma quantidade de lignina na ordem de 18,60% (SANTOS, 2012) a 23,20% (FREITA et al., 2016), similares aos da cana-de-açúcar.

5. CONCLUSÃO

De maneira geral, os resíduos que apresentaram características aceitáveis para serem utilizados como fonte de energia foram: madeira de madeireira, madeira de construção civil, palha de milho e sabugo de milho. O feijão foi satisfatório, com ressalvas para o teor de cinzas apresentado.

Os teores de cinzas, apesar de elevados, apresentaram resultados acima das expectativas, pois quando se trata de resíduos agrícolas, é comum a presença de outros materiais contidos no solo, ou adquiridos em outros processos, que podem interferir nos resultados.

Os resíduos de milho possuem grande potencial para aproveitamento energético e já foram estudados por diversos autores, sendo o caule, a palha, o sabugo e os demais derivados desses componentes, os mais indicados para esse fim. A quirela de milho, por outro lado, amplamente utilizada como alimento animal, não apresentou aptidão como fonte de energia devido ao excesso de amido, sendo indicada para uso como aglutinante (assim como a quirela de sorgo).

Os resíduos de café podem ter seu rendimento na geração de energia afetado pelo teor de cinzas e pela umidade. Entretanto, sua densidade a granel pode elevar substancialmente o potencial desse resíduo por unidade volumétrica.

Capítulo 2: Pellets de resíduos agrícolas

1. INTRODUÇÃO

Após analisar as características de cada biomassa coletada, neste capítulo serão abordados os aspectos relacionados à transformação destes em forma de pellets. O processo de peletização diminui o teor de umidade e aumenta a densidade energética do material. Como efeito do adensamento, diminuem-se também os custos relativos ao frete, ampliando as possibilidades de comércio internacional.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Adensamento de biomassa

A energia com base na biomassa pode ser classificada como primária, existente no estado natural da matéria-prima - como na madeira e nos resíduos agrícolas- ou em energia secundária, existente no estado não natural da biomassa - como no carvão vegetal e na eletricidade. Em razão dos baixos níveis energéticos da biomassa em seu estado bruto, apenas pequena parte da energia primária é destinada ao consumo final. A maior parcela é consumida em centros de transformação, como refinarias e usinas, em que são convertidas em fontes secundárias e geralmente estão prontas ao consumo (VIDAL e HORA, 2010).

A transformação energética da biomassa de madeira está alicerçada nos processos físicos, químicos, termoquímicos e biológicos (VIDAL e HORA, 2010). Assim, a biomassa pode ser convertida em diferentes tipos de biocombustíveis que consequentemente são transformados em energia térmica, mecânica ou elétrica, conforme a Figura 2.1.

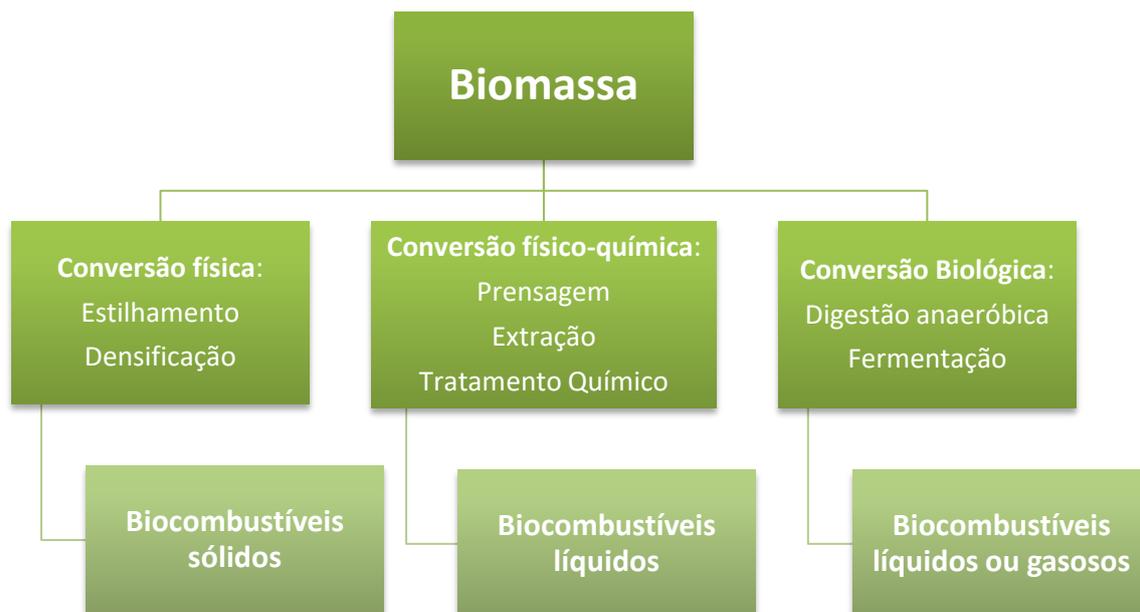


Figura 2.1. Processos de conversão energética da biomassa. Fonte: BARROS (2013).

O processo físico de densificação, ou adensamento, envolve o uso de pressão mecânica, com ou sem presença de agente aglomerante, capaz de reduzir o volume da matéria prima e aumentar seu conteúdo energético por unidade de volume (WERTHER et al, 2000). Essa técnica resulta em benefícios como: conveniência para a manipulação e armazenamento; maior controle sobre o processo de combustão, elevando sua eficiência e diminuindo os níveis de emissões dos particulados e gases poluentes como CO, os quais podem ser carregados ao ambiente; e aumento da densidade energética do material (MORAES et al, 2017).

Além disso, o adensamento é um processo que pode oferecer boas vantagens para o transporte e a estocagem. Os combustíveis densificados podem ser facilmente utilizados em mecanismos de combustão direta, co-combustão, gaseificação e pirólise (VINTERBACK, 2002; KALIYAN e MOREY, 2009)

No entanto, embora os combustíveis compactados apresentem diversas qualidades energéticas e operacionais como as mencionadas, há de serem observados vários fatores que podem afetar sua qualidade para utilização, dentre eles: a composição química, poder calorífico, distribuição granulométrica, umidade, conteúdo de cinzas e comportamento térmico (MARAVÉ, 2013).

A ciência de compactação de biomassa ainda é muito pouco compreendida, havendo diversos trabalhos de natureza empírica com validade muito limitada, específica para certos tipos de biomassas. As biomassas apresentam uma diversidade

muito grande quanto ao teor de fibras, cinzas, umidade, densidade, dentre outros, o que exige tratamentos diferenciados para certos grupos de biomassas (MORAES et al., 2017).

Dois produtos oriundos do processo de adensamento que já estão devidamente estabelecidos no mercado internacional são os briquetes e os pellets. Estes últimos foram criados em função da demanda por um novo tipo de combustível compactado com alta densidade energética, para o transporte a maiores distâncias, otimização do armazenamento e principalmente para o uso em equipamentos de queima mais modernos (PROTÁSIO et al., 2015). Os briquetes serão tratados no capítulo mais adiante.

2.2. O conceito de pellets de biomassa

Os “pellets” são pequenas pelotas cilíndricas de madeira, compactadas e densas (COUTO et al., 2008) que podem ser produzidos a partir de diversos tipos de biomassa vegetal (Figura 2.2). O formato atual mais comum é de pequenos cilindros de 6,0 a 10,0 mm de diâmetro, a partir da matéria-prima processada nas plantas industriais estacionárias que são comprimidas a alta pressão e temperatura. Nos países de língua inglesa são chamados de “*wood pellets*”, indicando que a matéria prima utilizada é madeira.

Os pellets de madeira já são considerados um dos maiores produtos de biomassa sólida comercializados internacionalmente. Possuem baixo teor de umidade, permitindo elevada densidade energética, que se traduz em eficiência térmica nas conversões energéticas. Sua geometria regular e cilíndrica permite ótima fluidez e facilita a automatização de processos, comerciais e industriais, de queima do produto. Além disso, é um produto de fácil manuseio, transporte e ocupa pouco espaço na armazenagem (GARCIA, 2017).



Figura 2.2. Pellets de madeira. Fonte: www.biomassaworld.com

2.3. Histórico da produção de pellets

Após a crise do petróleo, ocorrida na década de 70, diversos países direcionaram recursos e linhas de pesquisa para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia (MENDES et al., 2005). Com a necessidade de se obter um combustível alternativo para atender a demanda do mercado, a biomassa passa a ser valorizada no cenário energético mundial.

Para melhorar a eficiência no uso da biomassa, no início da década de 80 uma indústria na Suécia criou os primeiros pellets de madeira. Entretanto, como relata Garcia (2018), ninguém tinha experiência na produção nem no tipo de equipamento que seria utilizado para queimar este novo tipo de combustível. A baixa qualidade dos pellets fabricados na época (teor de cinzas de até 17%) e a ineficiência dos equipamentos de combustão levaram ao fechamento da primeira planta industrial de pellets em 1986. Além disso, Wang e Yan (2005) relatam que a estabilização do preço do petróleo nos anos seguintes também contribuiu para uma diminuição da sua utilização.

Posteriormente, já nos anos 90, outras empresas aprimoraram a técnica, até que em 1992 o governo Sueco fixou uma alta taxa sobre os combustíveis fósseis, alavancando de vez o mercado dos pellets na Suécia e em toda a Europa. Outro fator para este impulsionamento, segundo Gonçalves (2016), foi o interesse de diversos países nas alterações climáticas, passando a promover o uso deste tipo de fonte energética através de tarifas verdes, educação e apoios.

Na América do Norte a indústria de pellets começou a ganhar força a partir de um produto surgido no noroeste do Pacífico chamado Woodex, feito a partir de resíduos de serraria, que foi comercializado como combustível derivado de carvão. Embora esta

empresa tenha falhado, várias outras continuaram produzindo pellets e comercializando como combustível e cama para animais (SPELTER e TOTH, 2009).

No Brasil, essa forma de energia renovável só apareceu anos depois. E, por aqui, o surgimento dos pellets está mais relacionado à necessidade de agregar mais valor aos resíduos das indústrias madeireiras (GARCIA, 2014). Apesar de serem crescentes os estudos e testes de produção de pellets a partir de diversas matérias primas do País, a ausência de normas brasileiras sobre qualidade de pellets e uma regulação dos preços de mercado dificultam o desenvolvimento do setor e a competitividade dos pellets nacionais no exterior.

2.4. Panorama atual da produção, comércio e logística de pellets no mundo.

Nunes et al. (2016) afirmam que a Europa é a principal produtora de pellets e que, entre os anos 2008 e 2010, aumentou em 20,5% a produção e em 43,5% o consumo e que, em termos mundiais, o mercado cresceu 110% entre o ano de 2006 e 2010.

Este continente produz cerca de 50% e consome cerca de 75% da produção global, o que representou 22,2 milhões toneladas de pellets em 2016. Do montante consumido neste ano, 65% foi usado para aquecimento e 35% para produção de energia. Os maiores usuários de pellets da Europa são o Reino Unido, Itália, Dinamarca, Alemanha, Suécia, Bélgica, França e Áustria. Espera-se que a demanda se expanda para 25 milhões de toneladas em 2018 (USDA, 2017). A Tabela 2.1 apresenta a produção, oferta e demanda de pelles produzidos na Europa de 2010 a 2018.

Tabela 2.1. Produção, oferta e demanda de pellets de madeira na Europa (Em megatoneladas - Mt).

Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Estoque inicial	467	696	713	642	506	948	1.279	1.761	1.661
Produção	9.180	9.470	10.650	12.200	13.100	14.100	14.800	15.100	15.600
Importação	2.510	3.110	4.360	6.090	6.540	7.170	8.000	8.500	9.000
Exportação	72	68	90	132	105	141	118	200	200
Consumo	11.400	12.500	15.000	18.300	19.100	20.800	22,200	23.500	25.000
Estoque final	696	713	642	506	948	1.279	1.761	1.661	1.061
Capacidade de Produção									
Nº de plantas			497	516					
Capacidade	14.840	15.000	15.980	17.000	18.500	19.000	19.500	20.000	20.500

Fonte: USDA – EU Biofuels Annual 2017.

A Alemanha é o terceiro maior produtor de pellets de madeira do mundo, depois dos Estados Unidos e Canadá. Atualmente, possui cerca de 70 instalações de produção de pellets com um total da capacidade de produção anual de 3,5 Mt. Em 2016, a produção foi de 2,0 Mt, 90% dos quais foram produzidos a partir de resíduos da indústria madeireira. A maioria dos aglomerados de madeira produzidos na Alemanha são utilizados para aquecimento (USDA, 2017).

Portugal possui atualmente 25 unidades de produção de pellets com capacidades produtivas que vão de 4.000 até 125.000 toneladas anuais. De 2013 a 2016 foram produzidos anualmente, em média, 850.000 toneladas de pellets. O mercado de exportação deste País tem um peso importantíssimo no volume comercial, representando nos últimos 5 anos, 75 a 85% das vendas. Os principais mercados de exportação são o Reino Unido, Dinamarca, Bélgica, Países Baixos, Luxemburgo, assim como Espanha (ANPEB, 2018).

Por ser o maior consumidor de pellets do mundo, a Europa ainda necessita importar pellets para abastecer seu mercado interno. Desde 2008, a demanda por pellets superou significativamente a produção doméstica na Europa. As principais origens de importação de biomassa são do Canadá, Estados Unidos e a Rússia (Tabela 2.2).

Tabela 2.2. Principais fornecedores de pellets para a União Europeia (Em megatoneladas - Mt).

Ano	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Estados Unidos	1.000	1.760	2.770	3.890	4.280	4.900
Canadá	1.160	1.340	1.960	1.250	1.470	1.680
Rússia	477	645	702	826	786	842
Ucrânia	150	217	165	136	149	165
Bielorrússia	101	112	116	122	158	145
Outros	226	283	374	314	317	364
Total	3.110	4.360	6.090	6.540	7.170	8.100

Fonte: USDA – EU Biofuels Annual 2017.

Desse modo, o mercado russo de pellets é fortemente dependente das exportações, principalmente para a Europa e Coreia do Sul. Cerca de 80% do produto é transportado pelos mares saindo do porto de São Petersburgo. Entretanto, o futuro da indústria russa de pellets não é claro. O aumento da demanda pelos pellets de madeira local é incerto e a indústria continuará a ser orientada para a exportação. O crescente interesse da União Europeia pelos pellets de madeira continuará sendo um importante incentivo para a Rússia aumentar a produção. No entanto, a fim de fazer pleno uso

destas oportunidades, a Rússia precisará fazer grandes investimentos para modernizar sua produção e instalações (PROSKURINA. et al., 2015).

O Reino Unido é um grande importador de pellets de madeira, com volumes relativamente baixos de pellets produzidos domesticamente. Os EUA exportaram cerca de 54% dos pellets para o Reino Unido, seguido da União Europeia que exportou 27% e do Canadá 18%. Houve um notável aumento de pellets de madeira importados para o Reino Unido entre 2008 e 2015, o que levou a um desenvolvimento necessário na infraestrutura da cadeia de suprimentos necessária para demanda de importação. A Drax Power Station, a maior usuária de pellets de madeira do Reino Unido, contribuiu significativamente nesta infraestrutura, incluindo o investimento em 4 portos do Reino Unido (Liverpool, Hull, Tyne e Immingham) e desenvolvimento de vagões ferroviários especializados para maximizar o volume de pellets que podem ser movidas em um trem, reduzindo o uso de combustível (DECC, 2015).

O aumento da produção e consumo de pellets de madeira no Canadá é impulsionado principalmente demanda internacional, bem como políticas domésticas potencialmente novas. O governo federal anunciou planos para eliminar gradualmente o uso de eletricidade a carvão no Canadá até 2030 como parte de sua estratégia global de energia limpa. Em 2010, o Canadá tinha cerca de 2 Mt de capacidade de produção produzindo 1,3 Mt e exportando 1,2 Mt. Em 2012, a capacidade de produção havia aumentado para cerca de 3 milhões de toneladas. Só em 2015 e 2016, 1 Mt de nova capacidade anual foi adicionado (USDA, 2017).

No fim de 2016, a indústria americana de pellets atingiu uma capacidade de produção operacional de 13,7 Mt. A produção de pellets de madeira tem apresentado um crescimento constante desde 2004, com um aumento exponencial no Sul dos EUA (FOREST2MARKET, 2015). Os principais consumidores de pellets de madeira produzidos nos EUA são os mercados de exportação, contabilizados em cerca de 63% em 2015. A parcela restante é consumida internamente no aquecimento residencial. Estima-se que mais de 13 milhões de aquecedores de madeira estão em uso operacional nos EUA (USDA, 2017). Atualmente a maior parte das fábricas de pellets está localizada principalmente nas regiões produtoras de madeira na América do Norte (Figura 2.3).

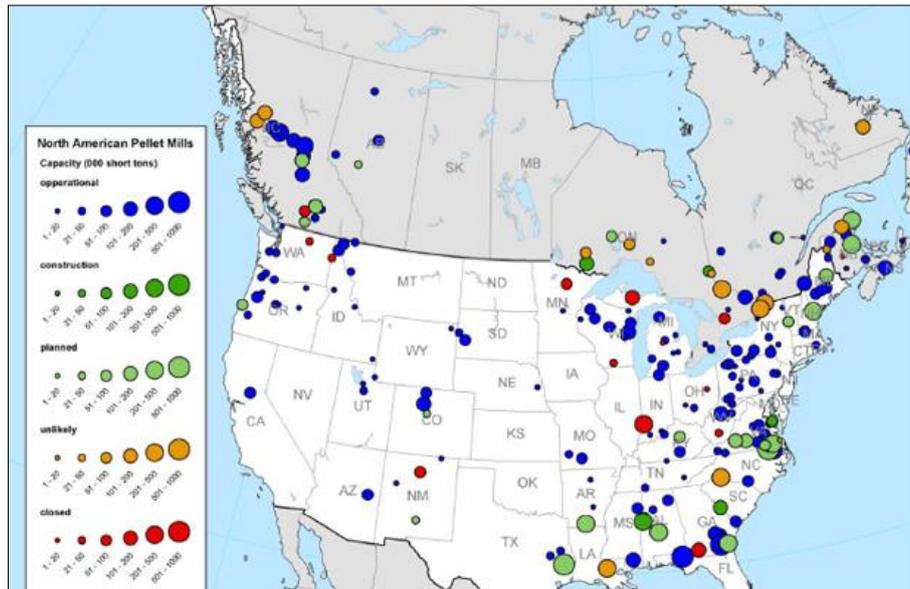


Figura 2.3. Localização geográfica dos moinhos de pellets na América do Norte. Fonte: USDA (2017).

A América Latina tem setores florestais e agrícolas bem estabelecidos, com grande potencial técnico para produção de pellets a partir de florestas plantadas, resíduos de madeira e resíduos agrícolas. Contudo, hoje, apenas Argentina, Brasil e Chile produzem pellets a nível industrial para o mercado nacional, enquanto o número de exportações ainda é insignificante. Outros países latinos com potencial tangível para produzir pellets são o México e a Colômbia (FAO, 2016).

Segundo Garcia et al. (2017), as plantas industriais de pellets existentes no Brasil são relativamente jovens, foram criadas a partir de 2004 e 69% delas surgiram depois de 2012. Os autores afirmam que existe uma defasagem de mais de 23 anos do mercado de pellets no Brasil em relação à Europa e a América do Norte. O efeito desse atraso pode ser percebido quanto à tecnologia das peletizadoras utilizadas na produção dos pellets (as importadas são mais eficientes que as nacionais), no conhecimento adquirido sobre esse biocombustível e na sua utilização no mercado interno e externo (GARCIA et al., 2016). A Tabela 2.3 apresenta um levantamento das empresas produtoras de pellets no Brasil até 2016. A maioria das empresas brasileiras está concentrada nas regiões Sul e Sudeste, que possuem as maiores plantações de pinus e eucalipto.

Tabela 2.3. Capacidade e produção de pellets no Brasil por empresa.

Nº	Indústria	Cidade	Capacidade (t/ano)	Produção (t/ano)	Biomassa	Situação
1	Briquepar	Telêmaco Borba/PR	7.000	4.800	<i>pinus</i>	Ativo
2	PelletsBraz	Porto Feliz/SP	12.000	4.800	<i>pinus</i>	Ativo
3	Energia Futura	Benedito Novo /SC	9.000	4.800	<i>pinus</i>	Ativo
4	BR Biomassa	Maringá/PR	22.500	0	<i>pinus</i>	Inativo
5	Ecopel	Itaju/SP	22.500	0	<i>pinus</i>	Inativo
6	Koala Energy	Rio Negrinho/SC	60.000	30.000	<i>pinus</i>	Ativo
7	Wood Tradeland	Tunas/PR	24.000	0	<i>pinus</i>	Inativo
8	EcoxPellets	Bandeirantes/PR	37.500	0	<i>pinus</i>	Inativo
9	Piomade	Farroupilha/RS	3.750	2.400	<i>pinus</i>	Ativo
10	Biopellets	Lins/SP	30.000	2.000	<i>pinus</i>	Ativo
11	Timber S.A	Piên/PR	45.000	6.000	<i>pinus</i>	Ativo
12	Resisul Pellets	Itapeva/SP	3.000	2.400	<i>pinus</i>	Ativo
13	Iemol Pellets	S.JoãoB.Vista/SP	3.000	2.000	<i>pinus</i>	Ativo
14	Araupel Pellets	Quedas Iguaçu/PR	6.000	5.000	<i>pinus</i>	Ativo
15	Vale Tibagi	Telêmaco Borba/PR	7.000	5.000	<i>pinus/eucalipto</i>	Ativo
16	Chamape Pellets	Vale Real/RS	3.000	1.800	<i>pinus</i>	Ativo
17	Tanac Pellets	Rio Grande/RS	80.000	0	acácia negra	Projeto
18	Pellets Nordeste	Recife/PE	60.000	0	capim elefante	Projeto
19	Línea Paraná	Sengés/PR	30.000	0	<i>pinus</i>	Em espera
20	Raízen Pellets	Jaú/SP	120.000	0	bagaco de cana	Em espera
21	Forespel	São José Ausentes/RS	100.000	0	<i>pinus</i>	Projeto
22	Incobio Pellets	Concórdia/SC	12.000	4.000	<i>pinus</i>	Ativo
23	Cosan	Jaú/SP	175.000	0	palha/bagaco	Em espera
Total			200.750	75.000		

Fonte: Escobar (2016); baseado em ABIPEL (2016).

O consumo de pellets de madeira no Brasil está se desenvolvendo lentamente. A maior parte do consumo acontece em pequena escala e está relacionado às necessidades de energia térmica para aquecimento em padarias, hotéis, parques aquáticos, ginásios de natação, lavanderias industriais e indústrias de alimentos, entre outros. Essas aplicações consomem cerca de 95% do total nacional de produção de 75.000 t/a (ABIPEL, 2016).

O comércio internacional de pellets brasileiros ainda não atingiu números significativos principalmente devido a infraestrutura de transporte e armazenamento pouco desenvolvida. O transporte de pellets do campo para o porto marítimo é dependente do transporte rodoviário, especialmente para longas distâncias. Ferrovias e rede hidroviária no Brasil são escassas e as estações de carregamento são frequentemente distantes e precariamente equipadas (ESCOBAR, 2016). A produção de pellets nas proximidades dos portos equipados poderia reduzir custos de transporte e aumentar a competitividade do Brasil no mercado internacional.

2.5. A técnica de peletização

Os pellets para serem fabricados passam por várias etapas até chegar ao mercado. A Figura 2.4 apresenta um esquema dos principais processos que envolvem o fabrico de pellets de biomassa, desde a colheita da matéria prima até a comercialização do biocombustível. Nem todas as etapas são necessárias, irá depender do tipo de matéria prima a ser trabalhado. Segundo Jenkins (2010), há oito estágios-chave na produção de pellets de madeira: armazenamento (da matéria-prima e dos pellets), limpeza, secagem, moagem, peletização, resfriamento, peneiração e distribuição.



Figura 2.4. Principais etapas do processo de produção de pellets.

Etapa 1: colheita da matéria prima.

A maioria dos pellets produzidos nos Brasil e no mundo é proveniente de resíduos de madeira. Porém, em países agrários, como o Brasil, pellets de resíduos agrícolas podem ser bastante promissores. No entanto, DIAS et al. (2012) afirmam que nem todas as biomassas agrofloretais são adequadas para a produção de pellets, principalmente devido a elementos minerais responsáveis pela formação de cinzas residuais. A palha de arroz, por exemplo, possui cerca 16% de teor de cinzas (FERRO et al., 2007), considerado impróprio para combustão devido ao alto teor de sílica, o que pode causar corrosão e desgaste excessivo nos queimadores. Ainda assim, Ludwing et al. (2012) verificaram a viabilidade no aproveitamento de casca de arroz em uma usina termelétrica, através de uma adaptação para destinar adequadamente as cinzas geradas.

ECOHEATER (2012 c) menciona que antes de implantar uma fábrica de pellets é de máxima importância verificar as características da biomassa a ser tratada, sob diferentes aspectos:

- Forma física da biomassa, a qual poderá necessitar de várias operações de fragmentação (picagem, moagem, entre outras) ou pré-compactação (enfardamento) antes de ser realmente processada;
- Umidade inicial, pois os custos de secagem (fornalha, secador e combustível) podem representar cerca de 25% dos custos totais de produção;
- PCI do produto, sendo que a princípio, só compensa transformar matérias apresentando um poder calorífico não inferior a 4,5 kW/kg em base seca;
- Teor em cinzas estruturais e/ou por contaminação (areia, por exemplo);
- Disponibilidade da biomassa o ano todo e/ou a possibilidade de estocagem para operar fora do período de disponibilidade (entressafra);
- Garantia de fornecimento a preços competitivos durante um período superior ao prazo de retorno do investimento; e
- Localização da fonte de matéria-prima em um raio em princípio não superior a 50 km do local de processamento (custo de transporte de material geralmente volumoso).

Etapa 2: armazenamento inicial.

Nem sempre a matéria-prima é manipulada assim que chega no pátio, na maioria dos casos o material precisa ser estocado por um tempo até entrar no processo de compactação. Nesse armazenamento inicial é importante observar e medir imediatamente a umidade do material. O local deve ser amplo e arejado, pois neste momento inicia-se uma pré-secagem do material equilibrando a temperatura com o ambiente evitando perda do material por contaminação por fungos e outros microrganismos.

Estudos realizados por Pastre (2002) identificou alta concentração de fungos e bactérias na matéria-prima com teor de umidade acima de 23%, indicando que ela não deve ficar muito tempo no pátio de estocagem e os trabalhadores expostos a esta área devem usar máscaras de proteção.

Etapa 3: trituração.

A biomassa pode estar em dimensões que sejam incompatíveis com o equipamento de compactação, sendo assim necessária a trituração para redução do tamanho. Os resultados do processo de trituração geralmente são pequenas partículas da biomassa original, de consistência próxima ao pó ou pedaços de alguns centímetros. Caso o teor de umidade do material esteja elevado (por exemplo, no processamento de biomassa verde), pode existir a necessidade de secagem em estufas ou mesmo ao sol antes da trituração (DIAS et al., 2012).

Esta etapa também é importante para garantir a uniformização do material, melhorando a qualidade do produto na compactação, pois, conforme relata Shaw (2008), são necessárias partículas finas e médias para uma melhor compactação do biocombustível. Uma boa trituração antes do processo de peletização aumenta a produtividade da prensa, a vida útil dos roletes e matrizes, e conseqüentemente reduz os custos de manutenção e de reposição de peças.

Garcia (2010) menciona que usualmente utiliza-se um moinho industrial para triturar o material que padroniza as partículas em tamanhos menores que 3,0mm (no caso da madeira). Os moinhos de martelos são os mais empregados, mas existem ainda outros tipos como o moinho de facas, de esferas ou mesmo o picotador/triturador.

Dependendo da característica físico-química do material de entrada, pode-se obter na saída do triturador um material seco e quebradiço ou um material levemente pastoso. Nesse último caso, não é recomendável que a biomassa úmida e triturada seja armazenada em condições de temperatura ambiente. Essa massa vegetal deve ser submetida imediatamente aos processos subseqüentes, especialmente à secagem, para evitar a degradação por ação de microrganismos ou condições climáticas, levando à alteração das características químicas e físicas (DIAS et al., 2012).

Etapa 4: Secagem da matéria-prima

A umidade é um parâmetro muito importante no processo de peletização, e necessita de controle e equilíbrio para obter bons resultados. Em se tratando de resíduos agrícolas, geralmente tem-se materiais mais úmidos, sendo a secagem um processo essencial não apenas em função do processo de compactação, mas também para evitar a proliferação de microrganismos.

O processo de secagem pode ser efetuado de forma natural, com a vantagem da redução dos custos energéticos, entretanto, requer um tempo prolongado, ocupando

grandes espaços e com dificuldades na regulação (controle) do teor de umidade (BARROS, 2013).

Nos processos industriais de grande porte a secagem é a etapa que consome mais energia na produção de pellets. A Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa (ABIB) descreve que este setor inclui dois equipamentos principais: uma fornalha pirolítica e um secador industrial. A energia térmica proveniente da fornalha aquece o secador de tambor rotativo. Devido às elevadas temperaturas envolvidas, a umidade existente na matéria-prima vaporiza (sendo liberada para a atmosfera) enquanto a matéria-prima seca é transportada para a unidade de peletização (silo de armazenamento de matéria-prima seca). O índice máximo de umidade permissível na entrada da peletizadora é estimado ao redor de 12-14%. Como a matéria-prima costuma apresentar um conteúdo de umidade superior a 50%, torna-se necessário antes da sua utilização, reduzir o valor de umidade através de sistemas de secagem.

Os sistemas mais sofisticados garantem secagens rápidas e controladas, mas influenciam consideravelmente nos custos de investimentos e se justificam apenas para grandes volumes de produção. A escolha por um dos sistemas depende de avaliações econômicas (DIAS et al., 2012).

Dias et al. (2012) também mencionam que para matérias-primas úmidas, como a palha de coco, bagaço de cana, capim, a secagem, torna-se essencial e pode ser efetuada utilizando os gases de combustão do pré-aquecimento do fluido térmico, fornalha ao ar livre ou qualquer outra técnica que reduza o teor de umidade.

Etapa 5: o processo de peletização.

Segundo Couto et al. (2004), a prensa de peletização (“peletizadora” ou “peletizadeira” ou granulador ou, simplesmente, extrusora) consiste de um rolo e de uma matriz feitos em aço. Há dois tipos de equipamentos para produção de pellets: 1) peletização com matriz de disco (mais comum); e 2) peletização com matriz de anel (Figura 2.5).

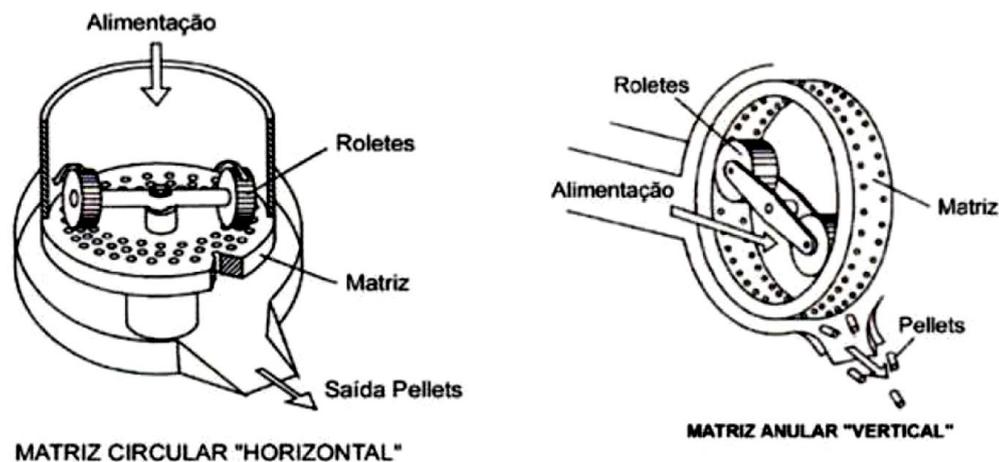


Figura 2.5. Matrizes usadas no processo de peletização. Fonte: ECOHEATER (2012 b).

Assim, esta operação consiste na prensagem da matéria-prima, por ação de rolos, seguida da extrusão através de uma matriz perfurada com orifícios circulares. Na saída da matriz a matéria prensada é cortada por facas ajustadas a uma medida, de forma a obter-se um produto final com as dimensões pretendidas (BARROS, 2013).

De um modo geral, este processo ocorre a temperaturas elevadas, que podem atingir 110-130°C, consequência da fricção e da pressão na ordem dos 210 a 450 MPa, causadas pela força dos rolos sobre a matriz (NIELSEN et al, 2009).

Posteriormente, deve ser assegurado o processo de arrefecimento, para que a lignina da biomassa endureça e os pellets adotem a sua forma rígida típica. Se nesta etapa resultar a produção de quantidades significativas de finos, então os pellets devem ser peneirados e os finos reenviados novamente para a fase de peletização (BARROS, 2013). O processo de resfriamento e acomodação é crítico para os pellets porque estão relacionados à resistência e durabilidade dos mesmos. Portanto, é o ambiente que permite que a lignina se solidifique, reforçando as estruturas internas dos pellets (GARCIA, 2010).

Em geral, nenhum aditivo é utilizado para a ligação entre partículas. A coesão, que ocorre internamente entre partículas, é causada pelo calor, gerado pela compressão, que amolece e reorganiza a lignina da madeira entre as fibras ligando-as naturalmente (LETHIKANGAS, 2001). Entretanto, produtos adesivos podem ser adicionados para minimizar a quebra dos pellets durante o transporte. Outros aditivos podem ser aplicados para melhorar as características químicas, tais como o caulino ou o óxido de cálcio, que limitam atrito (MACIEJEWSKA et al., 2006).

Etapa 6: embalagem e distribuição.

Após sua produção, os pellets estão prontos para serem utilizados. As embalagens podem ser sacos de 5,0 kg, 10,0 kg, 20,0 kg, 50,0 kg ou fardos industriais de 500,0 e 1000,0 kg (GARCIA, 2010) e então comercializados no atacado e varejo. Também podem ser armazenados em silos e transportados em caminhões graneleiros convencionais ou em caminhões-tanque (como os combustíveis líquidos) próprios para essa finalidade, chamados *blowerlorry*, que direcionam este combustível sólido para os silos ou tanques dos consumidores finais por meio de uma mangueira especial (BNDES, 2011).

Para a exportação, o transporte de grandes quantidades é feito a granel através de grandes navios cargueiros. Atenção especial deve ser dada à durabilidade dos pellets que deve ter qualidade suficiente para evitar a formação de finos no compartimento do navio, pois podem gerar explosão (HEINIMO e JUNGINGERB, 2009).

2.6. Parâmetros que influenciam na produção dos pellets

No processo de produção estão relacionados fatores como densidade a granel e durabilidade mecânica dos materiais (DUCA et al., 2014). Porém, o teor de umidade, teor de cinzas e o poder calorífico superior, são considerados como as principais características qualitativas em relação ao potencial energético da biomassa (FURTADO et al., 2012). Tais parâmetros são essenciais para identificar qual queimador será utilizado e a quantidade de energia disponível, durante a transformação da biomassa em energia térmica (CAMARGO et al., 2017).

Assim sendo, o teor de umidade é essencial no processo de compactação. A água facilita a gelatinização do amido, fragmentação de proteína e a solubilização de fibras durante a densificação. A gelatinização aumenta a velocidade de enzimas (amilases) para quebrar as ligações de amido, assim, convertendo-a em carboidratos mais simples e mais solúveis (JORDÃO, 2016). Entretanto, o excesso da mesma pode levar à compactação e entupimento na alimentação do maquinário (DEMIRBAS et al., 2004).

Geralmente, para madeira, a tolerância em umidade situa-se entre 12 a 14%. Caso a umidade seja superior a este nível, os pellets apresentarão rachaduras e se desagregarão, voltando ao estado da matéria-prima. Caso o teor de umidade seja insuficiente, não há possibilidade de compactação e o material passará como pó através da matriz, sem peletizar (ECOHEATER, 2012a). Niedziółka et al. (2015) corroboram

afirmando que a biomassa proveniente de plantas que serão submetidas a compactação, por pressão, deve possuir umidade dentro do intervalo de 8-15%.

Do mesmo modo, Dias et al. (2012) afirmam que dependendo do tipo de matéria-prima e do processo de compactação existe, uma faixa de umidade na qual o material pode ser peletizado adequadamente. Umidade em excesso pode provocar explosões devido à formação de vapor, mas a matéria-prima muito seca dificulta os mecanismos de ligação entre as partículas. Segundo estes autores, diversos estudos recomendam que o valor ótimo de umidade deve estar entre 5 e 10%.

A temperatura de compactação também exerce uma função muito relevante nas propriedades finais do produto e no consumo energético durante a compactação. Com o aquecimento, é possível obter produtos mais estáveis com menor dimensão, se comparados com materiais de mesma composição, porém compactados sem aquecimento. Alguns estudos mostram que a temperatura máxima não deve ultrapassar 220°C, porém essa temperatura depende da matéria-prima, pré-tratamento, tempo e teor de água (DIAS et al., 2012).

O tamanho das partículas não deve ser superior a 95% do diâmetro dos furos da matriz. Partículas maiores ficarão entre os rolos e a matriz, gerando sobrecarga de pressão nestas peças. Além disso, a prensa precisará de muito mais energia, o que reduz sua capacidade e aumenta os custos de produção (ECOHEATER, 2012 a).

Densidade é um parâmetro importante na compactação: quanto maior a densidade, maior a razão energia/volume. Somado a isso, produtos de alta densidade são desejáveis em termos de transporte, armazenamento e manuseio. Existem dois tipos de densidade aparente: a densidade de um pellet único e a densidade de um aglomerado de pellets, também chamada densidade a granel. A primeira é importante no controle de qualidade do produto, enquanto a segunda é relevante para transporte, armazenamento e venda dos briquetes e dos pellets (DIAS et al., 2012).

Existe ainda a densidade energética, que representa a quantidade de energia que pode ser liberada após a combustão completa de determinado volume de combustível, ou seja, os pellets com maior densidade energética liberam uma maior quantidade de energia por unidade volumétrica durante a sua queima, além de viabilizar o transporte dos mesmos a longas distâncias (PROTÁSIO et al., 2015).

O índice de durabilidade é um parâmetro de qualidade definido como a capacidade de materiais densificados em permanecer intactos quando manuseados ou durante o armazenamento e transporte (TUMULURU et al., 2011).

Um pellet de baixa durabilidade pode indicar a possibilidade de ter dificuldades de armazenamento e transporte, bem como questões de saúde e ambientais, porque tende a se desintegrar facilmente devido a adsorção de umidade ou devido a queda ou fricção. Durante o armazenamento, enquanto os pellets estão empilhados, há força de compactação aplicando-se verticalmente sobre eles. Outro desgaste sofrido é durante seu manuseio, onde existem algumas fricções. O atrito pode ser entre camadas de pellets ou entre pellets e outras superfícies (OVEISI-FORDIIE, 2011).

Ainda segundo o autor mencionado acima, a revisão da literatura indica que a medição da durabilidade de pellets de madeira é um processo que ainda não está bem desenvolvido. Não existe um único equipamento ou método que possa medir a durabilidade de pelotas de maneira repetitiva. Além disso, as propriedades da biomassa variam dependendo da fonte de matéria-prima. Assim, prever a durabilidade do pellet tornou-se um desafio.

Os testes mais utilizados no mundo para determinar a durabilidade são: Tumbler (rotacionador retangular de aço inoxidável), Dural tester (tritador que produz e aplica um impacto nos pellets.), Ligno tester (os pellets são expostos a choques causados por correntes de ar que induzem as partículas a colidir umas contra as outras e nas paredes do equipamento), Holmen tester (um sistema pneumático que simula um tratamento mais rigoroso de pellets) e Drop test (simula a queda dos pellets em uma torre de 5 metros). No Brasil, uma técnica utilizada é o tamboramento, utilizada para carvão vegetal, e que permite também obter o teor de finos da amostra.

Segundo o site da empresa Lippel[®], fabricante de usinas de pellets, como resultado da secagem e compactação, os pellets apresentam um teor de umidade máximo de 8%, uma densidade de mais de 650 kg por metro cúbico e uma capacidade de gerar energia entre 4,9 e 5,4 KWh por quilograma. Regra geral, 2 kg de pellets de madeira substituem cerca de 1 litro de óleo combustível.

2.7. Normas e certificação

A normatização é utilizada sempre como um meio para se alcançar a qualidade exigida pelo cliente, mantendo ou melhorando a qualidade dos produtos oferecidos (CAMARGO, 2013).

No Brasil não há normas para padronização e caracterização de pellets de madeira ou demais resíduos. Adotam-se algumas normas brasileiras específicas para briquetes e carvão vegetal que são adaptadas para o uso de pellets. Assim, utiliza-se

como critérios e referencial as normas europeias e americanas (CAMARGO et al, 2017), sendo os principais o sistema de classificação *ENplus* e a série ISO 17225.

Uma vez que as normas ISO foram produzidas a partir do Acordo de Viena, elas também se tornam automaticamente padrões europeus, pelo que recebem a designação EN ISO. Assim, segundo o Departamento de Agricultura da Irlanda, nos próximos anos, a maioria das normas EN sobre biocombustíveis sólidos será substituída pelas normas EN ISO (COFORD, 2007).

Anteriormente, na Europa, poucos países possuíam normas específicas para os biocombustíveis sólidos. A Tabela 2.4 apresenta alguns dos parâmetros estabelecidos pelas principais normas de países europeus.

Tabela 2.4. Especificações técnicas de pellets segundo as normas austríaca, sueca, alemã, italiana e francesa.

Parâmetros	ÁUSTRIA (ONORM M7135)	SUÉCIA (SS 18 71 20 ¹)	ALEMANHA (DIN PLUS ²)	ITÁLIA (CTI- R 04/5 ³)	FRANÇA (ITEBE ⁴)
Diâmetro (mm)	4≤Ø≥20	Máx 4/ Máx6	4≤Ø≥10	6≤Ø≥8/ 10≤Ø≥25	6/ 8-10
Comprimento (mm)	Máx 100	-	≤5. Ø	-	10-30/10-15
Densidade a granel (kg/m ³)	>600	≥500/ ≥600	>600	600-720/ ≥500	>650
Finos <3mm (%)	Máx1	≤0,8/ ≤1,5	Máx1	-	-
Teor de umidade (%)	<10	≤10	<12	<10/ ≤15	<10
Teor de cinzas (%)	≤ 0,5 (base seca)	≤1,5/ ≤0,7	<1,5	<1,5	<10
PCI (MJ/kg)	≥18 (base seca)	≥16,9	17,5 a 19,5	>16,9/ >16,2	>4052
Durabilidade (%)	≥95,0	≥95,0	≥95,0	≥97,7 / ≥95,0 / ≥90,0	-

¹Esta norma possui 3 grupos, os valores variam de acordo com cada grupo de classificação.

²Esta norma possui 5 classes de tamanho, os valores variam de acordo com cada classe.

³Esta norma possui 4 categorias, de acordo com a origem e adição de aditivos.

⁴Referente a fogão e caldeira.

Com consciência dessa limitação, em 2010 foi criada a primeira norma europeia de certificação de biocombustíveis sólidos, com uma parte exclusiva para os pellets, a EN 14961:2010: Biocombustível Sólido - Especificações e Classes do Combustível, Parte 2 – Pellets de madeira para uso não industrial. Formou-se um Conselho Europeu de Pellets (EPC – European Pellet Council) com o objetivo de promover a utilização dos pellets e implementar um sistema europeu de certificação de pellets *ENplus*. A EN 14961-2 determinava especificações e classes de qualidade de pellets de material lenhoso para utilização não industrial e fornecia princípios de classificação claros para estes pellets (BARROS, 2013).

Entretanto, com o desenvolvimento da indústria e a introdução da norma ISO 17225-2 - em substituição a norma EN 14961-2 - uma nova versão (3.0) do Manual de *ENplus* foi publicada, em agosto de 2015, e trouxe mudanças importantes como por exemplo, as classes de qualidade de pellets (Tabela 2.5). As classes de qualidade *ENplus* A1, *ENplus* A2 e *ENplus* B são baseadas nesta nova norma, apesar de que, os requisitos do produto estabelecidos pela *ENplus* ultrapassam os da ISO 17225- 2 em algumas propriedades. Cada classe de qualidade tem um logotipo de qualidade único que deve ser sempre usado em combinação com o Selo de Certificação. A combinação do logotipo de qualidade e do Selo de Certificação é denominada Selo de Qualidade (Figura 2.6), que devem aparecer nos pellets ensacados (EPC, 2015).

Tabela 2.5. Valores limite dos parâmetros mais importantes dos pellets do Manual de Certificação *ENplus*.

Propriedade	<i>ENplus</i> A1	<i>ENplus</i> A2	<i>ENplus</i> B	Norma de Ensaio
Diâmetro (mm)	6±1 ou 8±1			ISO 17829
Comprimento (mm)	3,15 < L ≤ 40			ISO 17829
Umidade (%)	≤ 10			ISO 18134
Cinzas (%)	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0	ISO 18122
Durabilidade mecânica ¹ (%)	≥ 98,0	≥ 97,5		ISO 17831-1
Finos < 3,15mm (%)	≤ 1,0 ² (≤ 0,5 ³)			ISO 18846
PCI (kWh/kg)	≥ 4,6 ⁴			ISO 18125
Densidade aparente (kg/m ³)	600 ≤ DA ≤ 750			ISO 17828

¹ No ponto de carregamento do veículo de transporte (caminhão, navio) no local da produção

² À porta da fábrica ou aquando do carregamento de um camião para entrega a clientes finais

³ À porta da fábrica, aquando do enchimento de sacos de pellets ou de Big Bags selados

⁴ Igual ≥ 16,5 MJ/kg tal e qual



Figura 2.6. Exemplos de Selos de Qualidade para as classes de qualidade *ENplus* A1, *ENplus* A2 e *ENplus* B. Fonte: EPC, 2015.

Cabe ressaltar que a norma ISO 17225-2 refere-se a pellets fabricados a partir de material lenhoso. Os pellets produzidos a partir de materiais não-lenhosos constam na norma ISO 17225-1. Os tipos de madeira indicados na Tabela 2.5 estão detalhados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6. Tipos de madeira permitidos na produção de pellets segundo a *ENplus*. Fonte: EPC, 2015.

ENplus A1	ENplus A2	ENplus B
1.1.3 Madeira de tronco	1.1.1 Árvore inteira sem raízes 1.1.3 Madeira de tronco	1.1 Madeira virgem da floresta, plantações e outros
1.2.1 Resíduos e subprodutos não tratados quimicamente da indústria de processamento da madeira	1.1.4 Resíduos de exploração florestal 1.2.1 Resíduos e subprodutos não tratados quimicamente da indústria de processamento da madeira	1.2.1 Resíduos e subprodutos não tratados quimicamente da indústria de processamento da madeira 1.3.1 Madeira usada não tratada quimicamente

A Tabela 2.7 apresenta mais especificamente algumas das normas vigentes sobre biocombustíveis sólidos publicadas no CEN (Comitê Europeu de Normalização) e ISO que são utilizadas como parâmetro no processo de fabricação de pellets.

Tabela 2.7. Normas publicadas no CEN e ISO sobre Biocombustíveis Sólidos.

EN ISO 18847:2016	Determinação da densidade de partículas de pellets e briquetes
EN ISO 18846:2016	Determinação do teor de finos em quantidades de pellets
EN ISO 18135:2017	Amostragem
EN ISO 18134-1:2015	Determinação do teor de umidade - Método seco de forno - Parte 1: Umidade total - Método de referência
EN ISO 18125:2017	Determinação do poder calorífico
EN ISO 18123:2015	Determinação do conteúdo de material volátil
EN ISO 18122:2015	Determinação do teor de cinzas
EN ISO 17831-1:2015	Determinação da durabilidade mecânica de pellets e briquetes - Parte 1: Pellets
EN ISO 17829:2015	Determinação do comprimento e diâmetro dos pellets
CEN / TR 15149-3:2014	Determinação da distribuição de tamanho de partículas
EN ISO 16948:2015	Determinação do teor total de carbono, hidrogênio e nitrogênio

Segundo Aspinall e Worthy (2015), além de desenvolver o *ENplus* para regular a qualidade dos pellets de madeira, a Europa e as principais empresas de serviços públicos europeus desenvolvem sistemas de certificação para garantir a sustentabilidade das pellets de madeira. Em 2013, a UE promulgou o Regulamento da UE sobre madeira para proibir a entrada ilegal de madeira nos mercados da UE. Nesse mesmo ano, muitas das principais empresas de serviços públicos europeus formaram a “Sustainable Biomass Partnership” (Parceria de Biomassa Sustentável) para harmonizar os padrões nacionais de sustentabilidade e desenvolver um padrão universal. Em prol desse objetivo, a SBP lançou seis padrões, cada um governando um elemento diferente da cadeia de suprimentos:

- O Padrão 1 harmoniza vários regulamentos de produção florestal e de madeira da UE para produtores de pellets de madeira, aqueles que supervisionam a produção de matéria-prima lenhosa em pellets de madeira;
- O Padrão 2 também fornece aos produtores requisitos adicionais para garantir a sustentabilidade da matéria-prima;
- O Padrão 3 oferece orientação para organismos de certificação, terceiros que investigam pellets de madeira e verificam sua sustentabilidade, além de fornecer um procedimento de certificação consistente
- O Padrão 4 explica que os requisitos da cadeia de custódia, de modo que as entidades em toda a cadeia de fornecimento, incluindo os comerciantes e processadores, possam garantir a sustentabilidade das pellets de madeira à medida que desce a cadeia de fornecimento;
- O Padrão 5 detalha os requisitos para a coleta de dados que acompanham os pellets de madeira sustentáveis à medida que se movem pela cadeia de fornecimento; e
- O Padrão 6 fornece ao gerador os requisitos para o cálculo de balanços de energia e carbono.

O Canadá adotou o sistema europeu e instituiu no país o certificado *CANplus*. Os programas de certificação *CANplus* e *ENplus* são gerenciados pela Associação de Pellets de Madeira do Canadá (WPAC). Ambos os padrões são idênticos. Isso significa que as auditorias de certificação para o *CANplus* e *ENplus* podem ser feitas simultaneamente para que o produtor possa receber as duas certificações de uma só vez.

O sistema de certificação ENplus não compete com outros esquemas de certificação florestal mas reconhece os certificados PEFC, FSC, ou equivalentes, incluindo os certificados de cadeia de custódia.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Confeccção dos pellets

Os resíduos de biomassa, descritos no Capítulo 1, foram inicialmente moídos para atingirem um perfil granulométrico homogêneo e tiveram suas umidades determinadas após a moagem.

O equipamento utilizado para a produção dos pellets foi uma peletizadora laboratorial da marca Eng-Maq, modelo 0200V, com potência de 7,5 a 10 CV, matriz plana horizontal estática com 6 mm de diâmetro e capacidade para produção de 110 kg/h⁻¹ (Figura 2.7-a). Foram produzidos aproximadamente 2kg de pellets de cada repetição de todos os tipos de resíduos (Figura 2.7-b).



Figura 2.7. Peletizadora utilizada. À esquerda (a) o equipamento comercializado pelo fabricante (Foto: Eng-Maq). À direita (b) a máquina funcionando durante a execução deste trabalho. Foto: autora.

Com exceção do resíduo de café e do sabugo de milho, os demais tiveram a umidade ajustada antes da compactação, adicionando-se água e misturando-se manualmente. Por isso, a umidade foi determinada antes e depois da formação dos

pellets. Após a peletização, os produtos ficaram expostos à temperatura ambiente por 15 dias (Figura 2.8).



Figura 2.8. Pellets produzidos eram expostos à temperatura ambiente para estabilização. Foto: autora.

3.2. Densidade aparente e granel

Então, escolheu-se aleatoriamente 50 unidades de pellets de cada repetição para determinação da densidade aparente sólida, através do método estereométrico, ou seja, determinação do volume pela fórmula do cilindro, a partir da mensuração do comprimento e do diâmetro, com o auxílio de um paquímetro digital e da massa com o uso de uma balança analítica de sensibilidade 0,001g (Figura 2.9), de acordo com a norma ISO 17225-6 (ISO, 2014).



Figura 2.9. Ensaio de densidade aparente dos pellets. Foto: autora.

Para determinação da densidade a granel dos pellets tomou-se como base uma adaptação das normas EN 15103 (DIN, 2010) e NBR 6922 (ABNT, 1983a), com auxílio de um cilindro de alumínio com capacidade máxima de 2 litros e uma balança com sensibilidade de 0,01g. Dividindo a densidade a granel dos pellets ($DG_{pellets}$) pela dos resíduos *in natura* ($DG_{resíduo}$) foi possível obter a taxa de compactação (TC), conforme a Equação 01.

$$TC = \frac{DG_{pellets}}{DG_{resíduo}} \quad \text{Equação (01)}$$

3.3. Resistência à compressão diametral

O ensaio da determinação da resistência à compressão diametral dos pellets foi desenvolvido em uma máquina universal da marca EMIC, com célula de carga de 300 kN, pertencente ao Laboratório de Tecnologia da Madeira, da Universidade de Brasília. Os testes foram realizados com velocidade de 0,3 mm/min, e executados em 15 amostras por repetição, com base na norma COPANT 30:1-011.

3.4. Durabilidade e teor de finos

O teste de tamboramento utilizado para carvão vegetal foi adaptado para determinar a durabilidade mecânica e friabilidade dos pellets. Amostras de 500g foram colocadas em um tambor de ferro acoplado a um motor com rotacionamento mecânico de 35rpm durante 20 minutos. Após este período, as amostras foram retiradas e classificadas em uma peneira de 3,0 mm, de onde foram obtidas as massas que ficavam retidas. A durabilidade mecânica foi calculada pela Equação 02 e o teor de finos das amostras foi determinado pela Equação 03.

$$Du (\%) = (m_{ap}/m_i)*100 \quad \text{Equação (02)}$$

Em que: $D_u(\%)$ é o percentual de durabilidade (%), m_i é a massa inicial (g) e m_{ap} é a massa após o tamboramento (g).

$$F(\%) = 100 - Du (\%) \quad \text{Equação (03)}$$

Em que: $F(\%)$ é o percentual de finos (%).

3.5. Análise de combustão

A análise da perda de massa frente ao aumento de temperatura durante a combustão dos pellets foi baseado no estudo de Quirino e Brito (1991), que desenvolveram um conjunto de teste, como é chamado pelos autores, formado pela balança (sensibilidade de 0,05g), um combustor, um termômetro digital e um registrador de temperatura com seus respectivos termopares e cabos de compensação (Figura 2.10). Para ignição foi utilizado 20 ml de álcool 96,0°GL, colocado em um recipiente de alumínio. Uma adaptação foi feita reposicionando o recipiente de alumínio com álcool, que originalmente ficava sobre a balança, e que com a adaptação fica suspenso sob o combustor contendo a amostra, porém não sobre a balança. Desta forma é possível retirar o recipiente com álcool tão logo a amostra entre em combustão.

Convencionou-se adotar amostras de 100g de pellets para serem queimadas até a menor massa constante (Figura 2.11). A temperatura e a massa consumida eram anotadas a cada 30 segundos. Para assegurar a confiabilidade dos dados, todos os ensaios foram filmados com câmera em tripé permitindo a revisão dos mesmos, caso fosse necessária.



Figura 2.10. Conjunto de teste de combustão onde: 1 - Registrador de temperatura; 2 - balança digital; 3 - anteparo do combustor sob duas bandejas; 4 - termopar; 5 - placa de alumínio do álcool; e 6 - suporte da placa. Foto: autora.



Figura 2.11. Detalhe do ensaio de combustão de pellets demonstrando a queima da biomassa na grelha e no sistema combustor. Foto: autora.

Este teste permite elaborar curvas de temperatura x tempo x massa, resultando no índice de combustão (ICOM), de acordo com a Equação 04.

$$ICOM = \frac{A \times B}{100 \times C} \quad \text{Equação (04)}$$

Em que: A = porcentagem do tempo de teste no qual a temperatura permanece acima de 150°C, tomada em relação ao tempo total; B = porcentagem da temperatura máxima atingida no teste, em relação à temperatura de 150°C; C = porcentagem da massa total consumida gerando temperaturas acima de 150°C.

3.6. Poder calorífico e densidade energética

O poder calorífico superior (PCS) dos pellets foi determinado na bomba calorimétrica C 2000 basic da IKA Calorimeter através de metodologia adaptada da norma NBR 8633 (ABNT, 1983b) do Laboratório de Tecnologia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da UnB. Antes, os pellets precisaram ser moídos conforme a norma TAPPI 257 (TAPPI, 1992). O poder calorífico inferior (PCI) foi calculado conforme a Equação 05, onde o H é o percentual de hidrogênio presente no material, em base seca.

$$PCI = PCS - (600 \times 9H)/100 \quad \text{Equação (05)}$$

Por consequente, determinou-se o poder calorífico útil através da Equação 06, onde Ubu é o teor de umidade à base úmida.

$$PCU = PCI (1 - Ubu) - 600 \times Ubu \quad \text{Equação (06)}$$

Dessa forma, pode-se calcular a densidade energética a granel (DEg) dos pellets, através do produto entre a densidade a granel (DG) e do poder calorífico útil (PCU), como consta na Equação 07. Da mesma forma, pode-se obter a densidade energética sólida (DEs), através do produto entre a densidade aparente (DA) com o poder calorífico útil (PCU) (idem ao anterior) (Equação 08).

$$DEg = DG \times PCU \quad \text{Equação (07)}$$

$$DEs = DA \times PCU \quad \text{Equação (08)}$$

Por fim, os pellets foram classificados através das propriedades físicas e mecânicas comparando os resultados obtidos com os exigidos na certificação *ENplus*.

3.7. Análise estatística

Para realização da análise estatística, adotou-se um delineamento inteiramente casualizado, composto por 9 tratamentos com 3 repetições cada. As variáveis de cada tipo de pellet foram analisadas estatisticamente através da Análise de Variância (ANOVA). Comparações entre as médias de cada tratamento foram realizadas com auxílio do Teste de Tukey, a 5% de significância. Além disso, correlações e regressões simples utilizando o modelo linear e quadrático entre variáveis também foram determinadas. As análises foram realizadas no programa estatísticos Minitab 18.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As biomassas analisadas apresentaram desempenho satisfatório durante o processo de peletização, exceto o resíduo de madeira de madeireira que não foi possível peletizar. A possível explicação encontrada para o insucesso no procedimento é a contaminação da amostra no momento da coleta ou a presença de algum composto químico utilizado pela indústria moveleira no acabamento. Resíduos com mais amido,

como a quirela e o sorgo, foram os que apresentaram maior dificuldade de peletização e resultaram em pellets mais quebradiços.

4.1. Propriedades físicas

A matéria-prima lenhosa para ser peletizada geralmente precisa apresentar teor de umidade menor que 17% (GARCIA, 2008), entretanto, neste trabalho com resíduos agrícolas, observou-se que é possível peletizar com umidade acima deste valor.

Em alguns casos houve necessidade de ajuste da umidade para produção dos pellets de resíduos agrícolas, adicionando-se água, gradativamente, com o auxílio de um borrifador, até atingir um ponto que permitia a formação do pellet.

Neste trabalho, o resíduo de café e de sabugo foram os únicos que não precisaram de ajuste de umidade durante o processo de peletização, sendo possível obter pellets na umidade em que a matéria-prima se encontrava. Os demais casos necessitaram de acréscimo de água. A Tabela 2.8 contém os teores de umidade antes e depois da peletização de todos os resíduos analisados.

Tabela 2.8. Teores de umidade em base seca do resíduo antes e depois de peletizado.

Biomassa	Umidade antes de peletizar (%) (ajuste)	Umidade após peletizar (%)
Feijão	17,53	10,63
Milho Palhada	18,39	9,88
Café	12,53	16,31
Madeira C. Civil	10,81	7,51
Madeira Madeireira	Não peletizou	Não peletizou
Milho Processo	20,95	12,74
Sorgo	18,5	11,29
Sabugo	11,70	8,53
Quirela + Palha	25,43	11,71
Quirela	22,89	13,7

Nota-se que apenas a madeira de construção civil, café e o sabugo foram peletizadas com teores de umidade indicados como adequados por Niedziółka et al. (2015), que menciona uma faixa de 8-15%. Jacinto (2017) peletizando diferentes misturas de resíduos agrícolas verificou que para formar de pellets contendo falha de pinhão manso, grimpá de araucária e poda de macieira precisaram atingir mais de 23% de umidade. Além disso, o autor verificou que os materiais com maior teor de lignina

necessitaram de maior umidade para que ocorresse a peletização, pois a umidade diminui a temperatura necessária para a lignina alcançar a transição vítrea. Neste trabalho não foram encontradas relações significativas entre o teor de umidade e a lignina.

Uma particularidade observada no resíduo de café foi o aumento da umidade após os pellets prontos. Durante o processo de peletização, o café foi o resíduo que mais liberou vapor e originou pellets mais densos. Durante o período de estabilização a temperatura ambiente, a natureza higroscópica desse material fez com que estes absorvessem umidade alterando a consistência do material, tornando-se mais “moles” e com aspecto mais quebradiço.

Na Tabela 2.9 estão apresentadas as médias referentes às propriedades físicas dos pellets em função da matéria-prima.

Tabela 2.9. Médias do diâmetro, comprimento, volume, massa seca, umidade, densidade aparente e taxa de compactação dos pellets com os respectivos desvio-padrões.

Matéria prima	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Massa seca (g)	Umidade * (%)	Densidade aparente unitária (kg/m ³)	Taxa de compactação
Milho	6,15 d	17,93 b	0,55 a	9,88 f	1136 b	8,41 a
Palhada	(0,1)	(2,42)	(0,01)	(1,82)	(91,61)	(0,7)
Sorgo	6,49 a	16,53 c	0,44 cd	11,29 d	887 e	0,94 c
	(0,12)	(3,91)	(0,03)	(2,09)	(65,0)	(0,1)
Quirela + Palha	6,24 c	18,03 b	0,52 abc	11,71 d	1048 c	2,57 bc
	(0,16)	(3,75)	(0,02)	(11,71)	(89,0)	(0,1)
Sabugo	6,1 d	18,45 b	0,57 a	8,53 g	1139 b	4,43 b
	(0,08)	(2,56)	(0,03)	(1,03)	(71,0)	(0,3)
Milho Processo	6,4 b	21,84 a	0,54 ab	12,74 c	930 d	1,74 c
	(0,22)	(6,22)	(0,05)	(2,22)	(88,9)	(0,1)
Madeira C Civil	6,22 c	14,61 d	0,39 d	7,51 h	932 d	2,44 bc
	(0,22)	(3,6)	(0,06)	(0,95)	(176,0)	(0,5)
Café	6,14 d	18,26 b	0,51 abc	16,31 a	1107 b	1,45 c
	(0,14)	(1,8)	(0,00)	(1,53)	(73,8)	(0,1)
Quirela	6,48 a	16,46 c	0,44 bcd	13,7 b	928 d	0,89 c
	(0,25)	(3,75)	(0,02)	(0,7)	(107,7)	(0,0)
Feijão	5,79 e	18,26 b	0,51 abc	10,63 e	1176 a	8,31 a
	(0,13)	(3,24)	(0,04)	(1,3)	(102,8)	(2,4)

*Umidade após armazenamento de 15 dias.

Os pellets apresentaram diâmetros conforme o esperado e na prática as médias não se diferem, pois estão de acordo com o diâmetro dos orifícios da matriz utilizada que foi de 6 mm, estando apenas o feijão abaixo dessa medida. Segundo Mahapatra et al. (2010), a alteração dos diâmetros dos pellets pode ser explicada pela migração de

vapor de água do centro para a superfície, preenchendo espaços vazios, e isso interrompe as ligações formadas durante a peletização.

As matérias-primas compostas por maior quantidade de amido, como o sorgo e a quirela de milho, formaram pellets com os maiores diâmetros. Wang et al. (2008) analisando pellets de sorgo e trigo com função alimentícia indicaram que o amido é o componente geralmente responsável pela expansão. Ele é constituído por amilose (fração linear) e amilopectina (fração ramificada), as quais afetam a expansão distintamente.

Quanto ao comprimento dos pellets, foi possível observar que houve variações significativas no processo de fabricação, sendo os resíduos de milho processo e a madeira de construção civil os que se destacaram pelas maiores e menores dimensões, respectivamente. Um estudo de Lethikangas (2001) mostrou que há uma relação entre o teor de umidade e o comprimento dos pellets, indicando que a umidade estaria funcionando como um elemento “ligante”.

A densidade aparente unitária variou de 887 a 1176 kg.m³. Jacinto (2017) observou que os pellets produzidos com pinus, falha de pinhão, grimpã de araucária e poda de maçã apresentaram densidade unitária que variou muito entre os tratamentos, com valores entre 520 kg.m³ até 1310 kg.m³.

Altas densidades sólidas são desejáveis para os pellets, uma vez que otimiza o transporte a maiores distâncias e o espaço em locais de armazenamento, quando comparado a outros combustíveis tradicionais, reduzindo assim os gastos (OLIVEIRA, 2016).

A densidade a granel fornece informações relevantes para a logística e transporte do material, sendo assim, o aumento da densidade a granel dos pellets facilita o armazenamento e seu manuseio. Camargo (2013) indica que através da densidade a granel pode-se obter o grau de compactação de um material com relação ao outro. Segundo Pinto et al. (2015), a norma ISO EN 15103 exige o mínimo de 600 kg.m³ para densidade a granel. Neste trabalho, mais da metade dos pellets apresentaram valores abaixo do adequado mencionado pela norma (Figura 2.12).

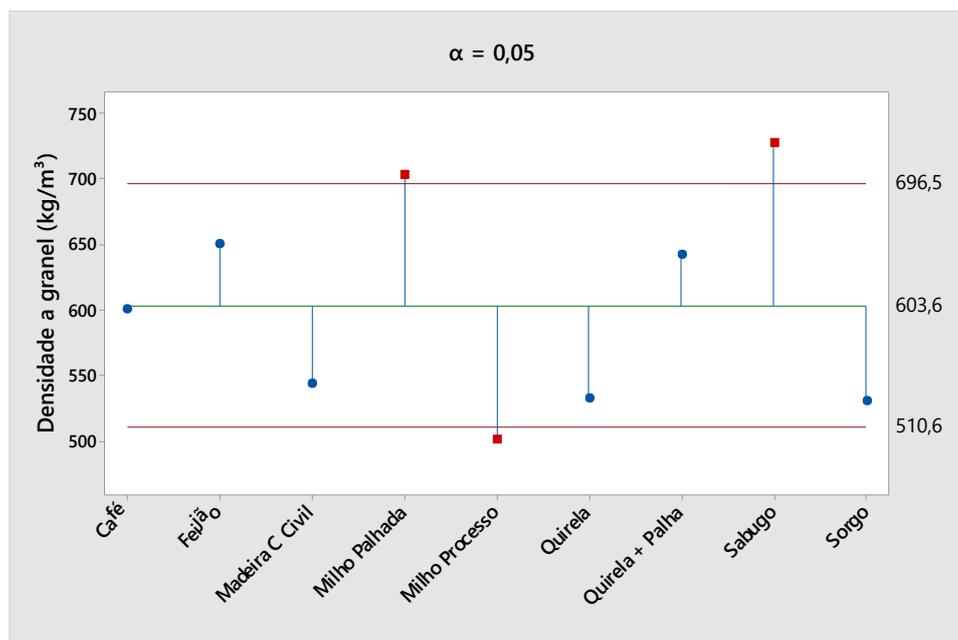


Figura 2.12. Densidade a granel dos pellets produzidos.

Como observado na Figura 2.12, os pellets de milho processo apresentaram a menor densidade a granel e os de sabugo a maior. Magalhães et al. (2016) verificaram que em pellets de capim elefante houve um aumento da densidade a granel em função do aumento do teor de umidade das partículas, o que não foi observado neste trabalho. Os autores concluíram ainda que nenhum pellet de capim elefante atingiu o limite mínimo da norma reguladora. Camargo (2013) testando pellets produzidos com resíduos de madeira verificou que a densidade a granel variou 645,6 a 675,1 kg/m³. Já Barros (2013) encontrou valores que variaram de 602 kg/m³ a 611 kg/m³ para pellets de cortiça.

A palhada de milho e a palhada de feijão foram as matérias-primas com menor densidade a granel, apresentando valores abaixo de 100 kg/m³, o que resultou em maiores taxas de compactação, corroborando com a afirmação de Protásio et al. (2011): quanto menor a densidade a granel da biomassa, melhor será a acomodação das partículas e, portanto, maior será o aumento percentual da sua densidade após a compactação.

No que se refere ao resíduo de café, a taxa de compactação encontrada por Faria et al. (2016) variou de 3,54 a 6,40, acima do valor encontrado neste trabalho (1,45). Oliveira (2016) encontrou taxas de compactação variou de 2,53 (eucalipto) a 4,13 (bagaço de cana).

Além da densidade, o grau de compactação está relacionado à granulometria da matéria-prima utilizada, pois quanto menor o tamanho da partícula, menor a porosidade, ou seja, mais espaços vazios entre as partículas, e vice-versa. No entanto, na prática,

notou-se que os resíduos com as menores e maiores dimensões de partículas (madeira de construção civil e café, respectivamente) apresentaram taxas com valores próximos em entre si e abaixo da média entre todos os resíduos analisados.

A utilização de diferentes composições entre resíduos lignocelulósicos se mostram aptos para produção de pellets resultando em um biocombustível de qualidade (OLIVEIRA, 2016).

4.2. Propriedades mecânicas

Os valores médios das propriedades mecânicas dos pellets estão expressas na Tabela 2.10 com os respectivos coeficientes de variação.

Tabela 2.10. Propriedades mecânicas dos pellets analisados.

Pellets	Durabilidade (%)	Teor de Finos (%)	Compressão diametral (kgf)
Madeira C Civil	79,69 ab (8,4)	20,31 ab (8,5)	104,77 b (13,2)
Café	94,74 a (5,23)	5,26 b (5,2)	54,54 bc (5,0)
Feijão	93,99 a (11,2)	6,01 b (1,7)	208,67 a (56,1)
Palhada de Milho	94,98 a (0,4)	5,02 b (0,4)	71,88 bc (5,0)
Milho Processo	95,08 a (3,3)	4,92 b (3,3)	84,92 bc (50,1)
Quirela	82,63 ab (7,0)	17,37 ab (7,0)	16,87 c (2,1)
Quirela+Palha	93,23 a (4,3)	6,77 b (4,3)	44,45 bc (17,9)
Sabugo	94,17 ab (3,6)	5,83 b (3,6)	80,80 bc (15,1)
Sorgo	75,54 b (10,4)	24,46 a (10,4)	13,31 c (2,3)

O tamanho das partículas pode apresentar uma relação inversa com a durabilidade do pellet (KALIYAN e MOREY, 2009), o que foi observado no caso do café e do sabugo, onde ambos exibiram os maiores percentuais de partículas finas (menores que 0,42 mm) e alta durabilidade.

Pellets de capim-elefante obtidos por Magalhães et al (2016) apresentaram percentuais de durabilidade que variaram de 86,8 a 97,6%, Pereira (2014) verificou que durabilidade de pellets de eucalipto aumentou de 93,98 pra 99,18% com a adição de

lignina Kraft, que proporcionou maior ligação entre as partículas e diminuição da porcentagem de finos gerada.

Correlações entre durabilidade com umidade ($r=0,14$), densidade a granel ($r=0,31$) e compressão diametral ($r=0,36$) foram realizadas e resultaram em relações não significativas. Contudo, a densidade aparente estabeleceu uma forte relação e influenciou significativamente na durabilidade dos pellets (Figura 2.13).

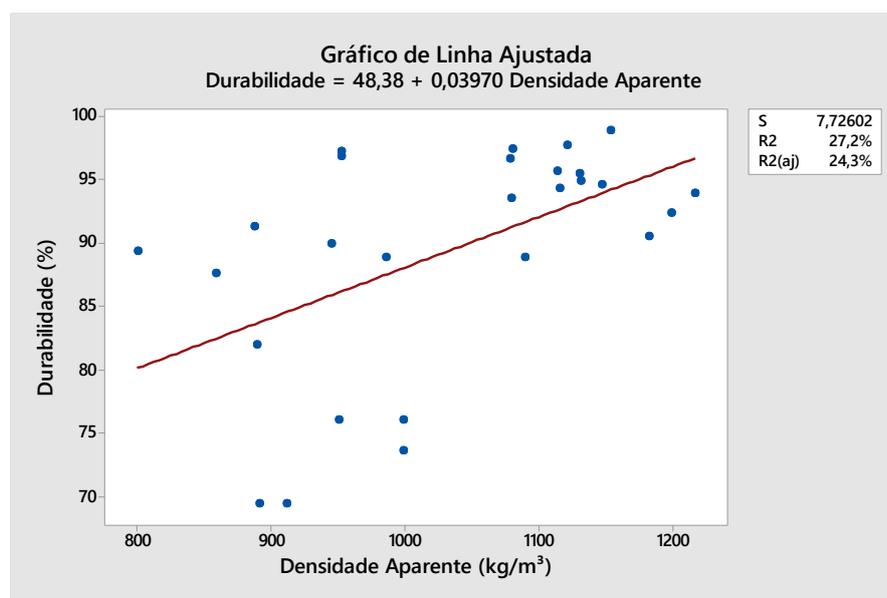


Figura 2.13. Análise de regressão entre durabilidade e densidade aparente dos pellets.

Importante ressaltar que equipamentos para medições de durabilidade têm princípios diferentes para a medição, o que pode trazer resultados diferentes do esperado. O ensaio de tamboramento, utilizado neste trabalho, é semelhante ao teste Tumbler, porém, apresentou algumas desvantagens na execução, como por exemplo, a vedação inadequada que permite o vazamento de partículas finas, que apesar de não ter comprometido o ensaio, causou desperdício de amostras. Segundo Oveisi-Fordiie (2011), o Tumbler é um teste de baixa resolução e seus resultados não seriam confiáveis ou realistas.

Segundo Kaliyan e Morey (2009) a umidade das partículas pode afetar as características mecânicas como durabilidade e teor de finos, além de funcionar como um lubrificante que minimiza o atrito dentro da prensa resultando em menor consumo de energia no processo. No entanto, no que se refere a pellets de resíduos agrícolas a umidade não influenciou estatisticamente na durabilidade ($p=0,498$) nem na compressão diametral ($p= 0,082$).

De acordo com Zamorano et al. (2011) a resistência à compressão dos pellets está relacionada com as forças de adesão entre as partículas. Então, provavelmente, quanto maior a quantidade de lignina, mais pontos de contato entre as partículas que compõe os pellets, maior a adesão e, portanto, maior a resistência. Entretanto, não foi observada correlação significativa entre a compressão diametral e o teor de lignina. Por outro lado, a compressão diametral foi influenciada diretamente pela densidade aparente e pela taxa de compactação, como se observa nas Figuras 2.14 e 2.15.

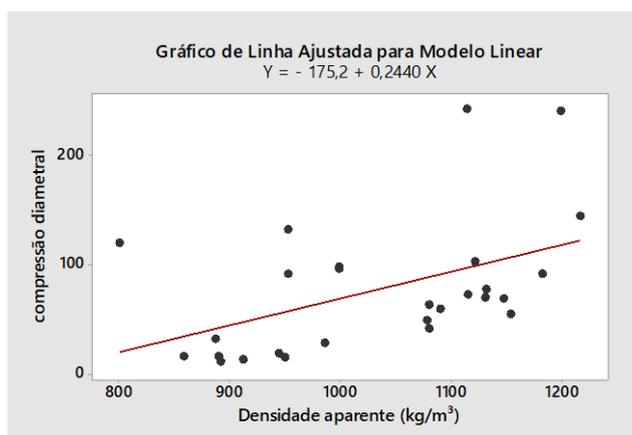


Figura 2.14. Relação entre compressão diametral e densidade aparente dos pellets.

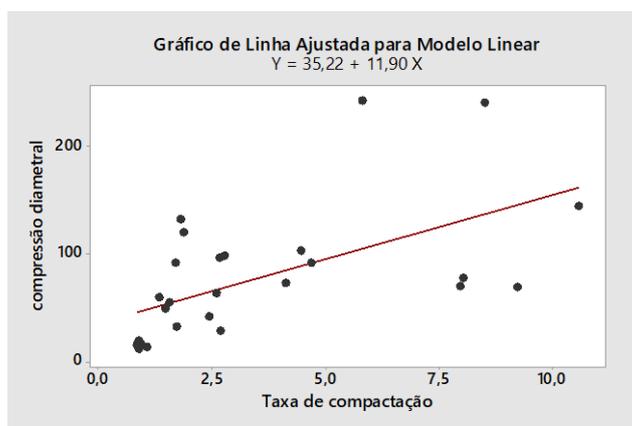


Figura 2.15. Relação entre compressão diametral e taxa de compactação dos pellets.

A alta compressão diametral obtida nos pellets de feijão oferece uma maior resistência a impactos, choques, atritos, principalmente durante seu manuseio e transporte. Oliveira (2016) analisando pellets de bagaço de cana e de eucalipto encontrou pellets com menor variação na compressão diametral: de 30,7 a 112,5 kgf.

4.3. Poder calorífico e combustão

Poder calorífico e combustão são parâmetros investigados distintamente, porém estão diretamente relacionados entre si, pois, o poder calorífico é a quantidade de

energia a ser liberada por unidade de massa durante o processo de combustão. O poder calorífico superior, inferior e útil dos pellets consta na Tabela 2.11.

Tabela 2.11. Poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e útil (PCU) dos pellets de biomassa.

Pellet	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	PCU (MJ/kg)
Madeira C Civil	20,4	19,1	18,1
Sabugo	18,6	17,2	16,9
Café	18,4	17,2	16,1
Milho Processo	18,4	16,8	16,1
Milho Palhada	18,4	16,8	16,1
Quirela + Palha	18,3	16,8	16,3
Sorgo	17,9	16,1	15,7
Quirela	17,8	16,3	14,9
Feijão	17,4	16,2	16,0

Camargo (2013) analisando pellets de madeira de *Pinus spp* e *Eucalyptus* verificou que as médias de PCS atingiram 20,3 MJ/kg, semelhante ao obtido nos pellets de madeira de construção civil deste trabalho. Jacinto (2017) testando pellets contendo diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpã de araucária e poda de maçã chegou a um PCS médio de 19,8 MJ/kg. Segundo o autor, não houve influência da inclusão do pinus nas misturas nas variações observadas para o poder calorífico.

Oliveira (2016) cita que o poder calorífico inferior encontrado por vários autores para diversas biomassas lignocelulósicas varia entre 14,8 e 17,5 MJ/kg. A autora verificou que o processo de peletização resultou em aumento do poder calorífico inferior dos pellets produzidos, com ganhos de até 1,34 MJ/kg para os pellets compostos por metade bagaço de cana e metade serragem de eucalipto, e que esse aumento é perceptível conforme se acresce o percentual de serragem na composição.

A combustão é um processo que envolve reações homogêneas e heterogêneas e que ocorre através de uma sequência de fases de um processo termoquímico. A Figura 2.16 apresenta os gráficos que demonstram a perda de massa dos pellets durante a queima, em função do tempo e da temperatura.

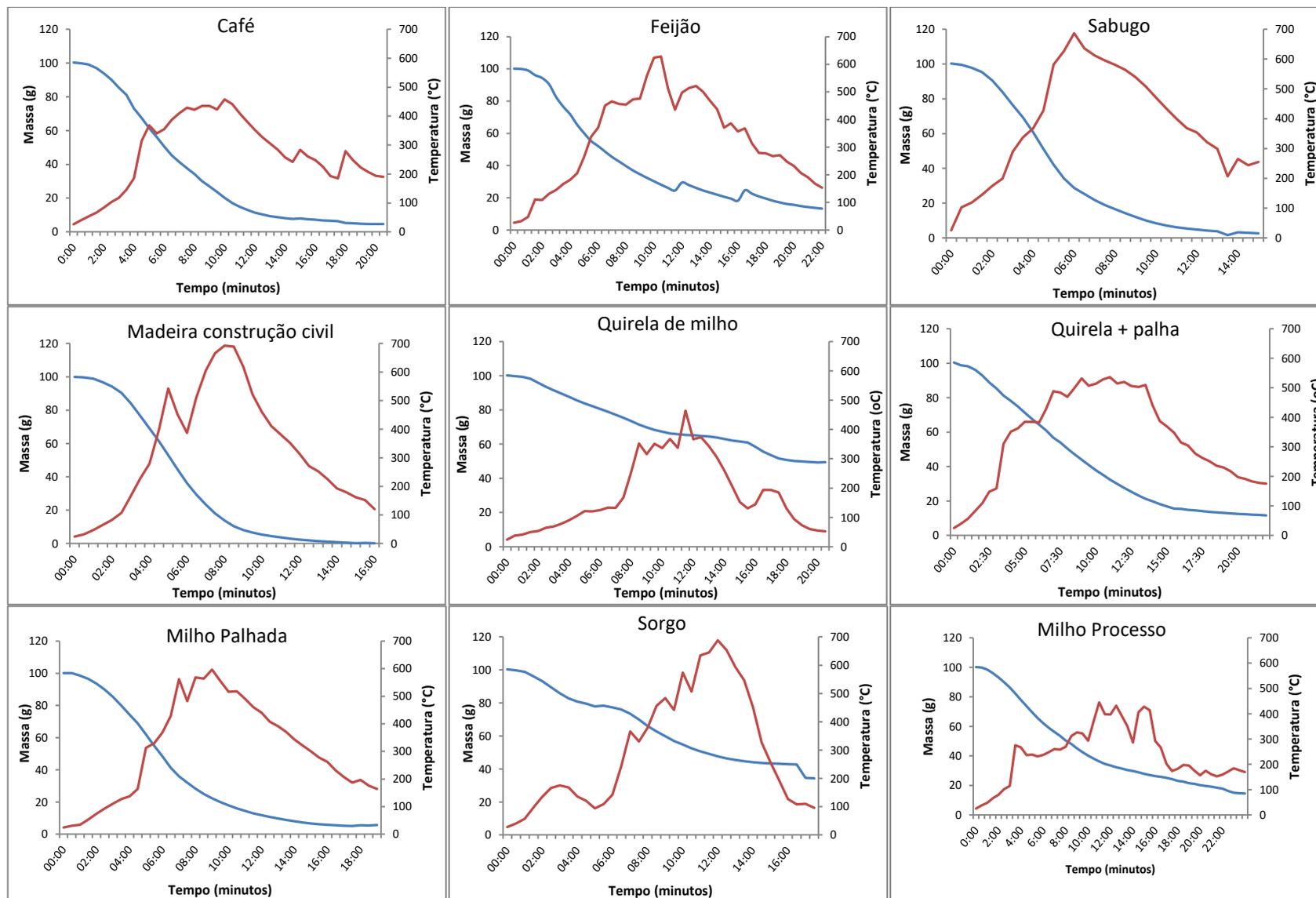


Figura 2.16. Consumo de massa (linha azul) dos pellets durante a queima em função do tempo e da temperatura (linha vermelha).

O comportamento observado em relação à temperatura máxima fornece informações acerca da dinâmica de combustão do material, permitindo um melhor dimensionamento do sistema de queima dos equipamentos utilizados para geração de aquecimento (RABAÇAL, 2010). Na Tabela 2.12 pode-se observar o quantitativo de massa consumida em percentual e em kg/m²/h, a temperatura máxima atingida durante a queima, o tempo de duração total do ensaio de combustão e o resultado do índice de combustibilidade de cada tipo de pellet.

Tabela 2.12. Percentual total de massa consumida, quantitativo de massa consumida por metro quadrado, temperatura máxima atingida, tempo de duração da combustão e índice de combustibilidade (ICOM) de cada tipo de pellet.

Pellets	Massa consumida	Massa consumida (kg/m ² /h)	Temperatura máxima	Tempo de combustão	ICOM
Madeira C Civil	99,85%	24,51	692,1°C	00:16:00	1,57
Sabugo	97,31%	26,21	686,7°C	00:15:00	1,69
Café	95,40%	18,73	457,6°C	00:20:30	0,94
Milho Palhada	94,40%	20,45	596,3°C	00:19:00	1,95
Feijão	86,75%	17,85	628,2°C	00:22:00	2,52
Milho Processo	85,50%	16,36	444,7°C	00:24:00	2,17
Quirela + Palha	88,35%	17,90	536°C	00:23:30	1,96
Sorgo	65,64%	21,85	687,7°C	00:17:30	1,89
Quirela	50,53%	18,72	464,1°C	00:20:30	2,37

O sabugo, o milho palhada, a madeira de construção civil e o café foram os que demonstraram o maior percentual de massa consumida nos menores tempos, com destaque para a madeira de construção civil cuja combustão ocorreu antes dos três primeiros minutos e manteve chama forte constante. No entanto, o rápido consumo mássico em pouco tempo fez com que decaísse o índice de combustão para esses pellets.

Analisando o desempenho da combustão em kg/m²/h verifica-se que alguns pellets foram mais eficientes no consumo de biomassa. Ou seja, simulando a utilização desse material em maior escala, seria necessária uma quantidade maior de pellets de madeira de construção civil e de sabugo do que pellets de processo mistura, feijão e quirela + palha para gerar energia durante o mesmo período de tempo.

Segundo Quirino e Brito (1991), quanto maior for o ICOM espera-se que o material forneça a mais alta temperatura, com maior tempo de permanência na zona de combustão ativa e que consuma a menor quantidade de massa possível. Sendo assim, o melhor resultado obtido pelo índice de combustibilidade neste trabalho foi com pellets de feijão. Isto pode ser explicado pelo fato desses pellets terem apresentado alta taxa de compactação, maior resistência à compressão diametral, maior densidade aparente e alta durabilidade, o que resultou em pellets com baixa porosidade, configurando um resultado eficiente do efeito da compactação.

Não foram encontradas relações estatisticamente significativas entre o índice de combustibilidade e a durabilidade, taxa de compactação, densidade aparente unitária e densidade a granel. Entretanto, as equações de regressão quadrática demonstraram que o teor de umidade (p-valor < 0,001) e a compressão diametral (p-valor = 0,028) influenciaram significativamente este índice, como se observa nos gráficos da Figura 2.17.

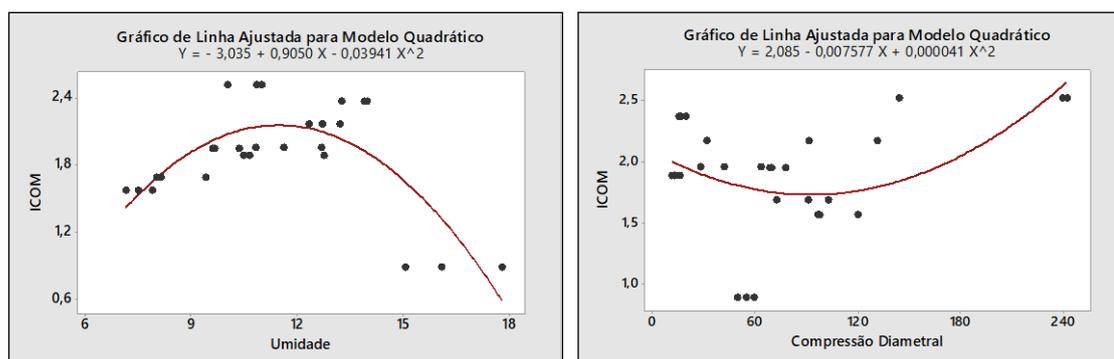


Figura 2.17. Análise de regressão demonstrando as relações entre o índice de combustão com o teor de umidade e compressão diametral dos pellets.

Michels et al. (2015) observaram um ICOM de 2,89 em biomassa de sabugo de milho, com maior temperatura atingida, maior biomassa consumida e maior tempo de ensaio comparado às outras biomassas estudadas pelos autores (crambe e bocaiúva). Neste trabalho, o sabugo em forma de pellet teve o segundo melhor desempenho em consumo de biomassa, porém o curto tempo da combustão total reduziu o ICOM desta biomassa.

No diz que diz respeito aos pellets de quirela de milho, é importante destacar que apesar do elevado índice de combustibilidade obtido em relação aos demais, o consumo total de massa durante a combustão foi o mais ineficaz devido à presença de maior teor

de umidade e amido (assim como nos pellets de sorgo), o que dificultou o alcance da ignição e manutenção da chama, resultando em uma combustão incompleta, com maior sobra de material (Figura 2.18-A e 2.18-B). Os de sabugo obtiveram o menor tempo médio, apresentando chama e temperatura altas e mais de 97% da massa consumida (Figura 2.18-C). Já os pellets de quirela+palha, apesar da ignição rápida, queimaram mais lentamente e com chama baixa (Figura 2.18-D), assim como o milho processo.



Figura 2.18. Resíduos do processo de combustão dos pellets de sorgo (A), de quirela de milho (B), de sabugo (C) e de quirela+palha (D).

Segundo Tabarés et al. (2000), o processo de combustão da biomassa é mais complexo que de outros combustíveis (como o metano, a gasolina, etc.), uma vez que ela apresenta uma composição físico-química complexa e muito variável devido às diferentes matérias-primas existentes.

A queima dos materiais lignocelulósicos consiste em um conjunto de reações químicas complexas acompanhadas pela transferência de calor e massa e se desenvolve basicamente em três estágios principais. O primeiro estágio ocorre entre a temperatura ambiente e 250°C, quando o material absorve calor, liberando a umidade em forma de vapor de água e os materiais voláteis (extrativos) presentes no material. Em seguida,

tem início a desvolatilização onde ocorre a decomposição da biomassa, na ausência de O_2 , até uma temperatura de aproximadamente $230^\circ C$. Os componentes de cadeia longa são quebrados em compostos de cadeia curta. Finda esta fase de reações endotérmicas, caracterizadas pela absorção de calor, seguem-se as reações exotérmicas, onde ocorre a liberação de calor, na presença de oxigênio (GARCIA; 2010; PINTO, 2011; BARROS, 2013).

A análise da combustão requer ainda uma pesquisa mais profunda para se determinar a composição química dos gases (O_2 , CO, NO, NO_x , SO_2 , entre outros) e das cinzas (óxidos como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO, MgO, CaO, Na_2O , K_2O , TiO_2 e P_2O_5). Olsson (2006), analisando a combustão de pellets de uso residencial na Europa, observou que a queima flamejante de pellets de madeira emite grandes quantidades de metoxifenóis com um efeito antioxidante, enquanto a combustão incandescente emite benzeno e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos em baixas concentrações.

Liu et al. (2010) destacam que os pellets, por terem formatos uniformes, baixa umidade e elevado poder calorífico superior, podem ter alimentação automatizada com facilidade. Por isso, são mais estáveis na queima e proporcionam combustão com baixas emissões gasosas.

4.4.Densidade energética

A Tabela 2.13 apresenta as médias da densidade energética a granel e sólida, agrupadas conforme o teste de Tukey, demonstrando que houve diferença significativa entre os pellets. Os pellets de sabugo e o milho palhada devido à elevada densidade a granel resultaram em densidades energéticas a granel mais elevadas. Portanto, há uma correlação direta entre densidade a granel e densidade energética, que na prática se traduz em possibilitar o transporte de mais energia no mesmo espaço do caminhão ou navio cargueiro, barateando o custo final do serviço e tornando esse biocombustível mais competitivo (GARCIA et al., 2018).

Os pellets apresentaram densidade energética aparente sólida superior à densidade energética a granel. Além do sabugo e do milho palhada, os pellets de feijão e madeira de construção civil também apresentaram os melhores resultados. Em contrapartida, os pellets de sorgo, quirela e processo mistura foram classificados com as menores densidades energéticas a granel e sólida, o que se deve às baixas densidades.

Baixas densidades foram também apresentadas pelos pellets de madeira de construção civil, no entanto, o alto poder calorífico elevou a densidade energética neste tratamento.

Tabela 2.13. Valores médios da densidade energética a granel e sólida (unitária) dos pellets.

Pellets	Densidade energética a granel (GJ.m³)	Densidade energética sólida (unitária) (GJ.m³)
Sabugo	12,3 A	19,3 A
Milho Palhada	11,3 AB	18,3 AB
Quirela + Palha	10,4 ABC	17,0 BC
Feijão	10,4 ABC	18,8 AB
Madeira C Civil	9,8 BC	16,9 BC
Café	9,7 BC	17,9 B
Sorgo	8,3 C	13,9 D
Quirela	8,0 C	13,9 D
Milho Processo	8,0 C	15,0 C

As médias de densidade energética a granel obtidas neste trabalho estão próximas às encontradas por Camargo (2013) para pellets de madeira, que variaram de 10 a 12 GJ.m³, assim como o determinado por Garcia (2010) também em pellets de madeira com média de 11,2 GJ.m³. A densidade energética a granel dos pellets de sorgo foi inferior ao obtido por Santos et al. (2017), estabelecido em 10,8 GJ.m³. Liu et al. (2013) observaram densidade aparente sólida de 1.250 kg/m³ e 1.350 kg/m³ para pellets produzidos com partículas de bambu e casca de arroz.

O processo de peletização proporcionou um aumento da densidade energética em comparação às composições dos resíduos *in natura*. Na Figura 2.19 se observa que apenas as biomassas de quirela de milho e sorgo apresentaram densidade energética menor na forma de pellets, resultado das baixas taxas de compactação. Por outro lado, o milho palhada e o feijão apresentaram incrementos energéticos superiores a 800% após peletizados, devido à baixa densidade a granel na condição *in natura*, o que se reverteu em uma baixa densidade energética nos mesmos.

Faria et al. (2016) encontram um aumento entre 262% e 551% de energia ao avaliarem pellets de película prateada, casca de café e madeira de eucalipto. Neste trabalho, o incremento energético nos pellets de café foi da ordem de 160%.

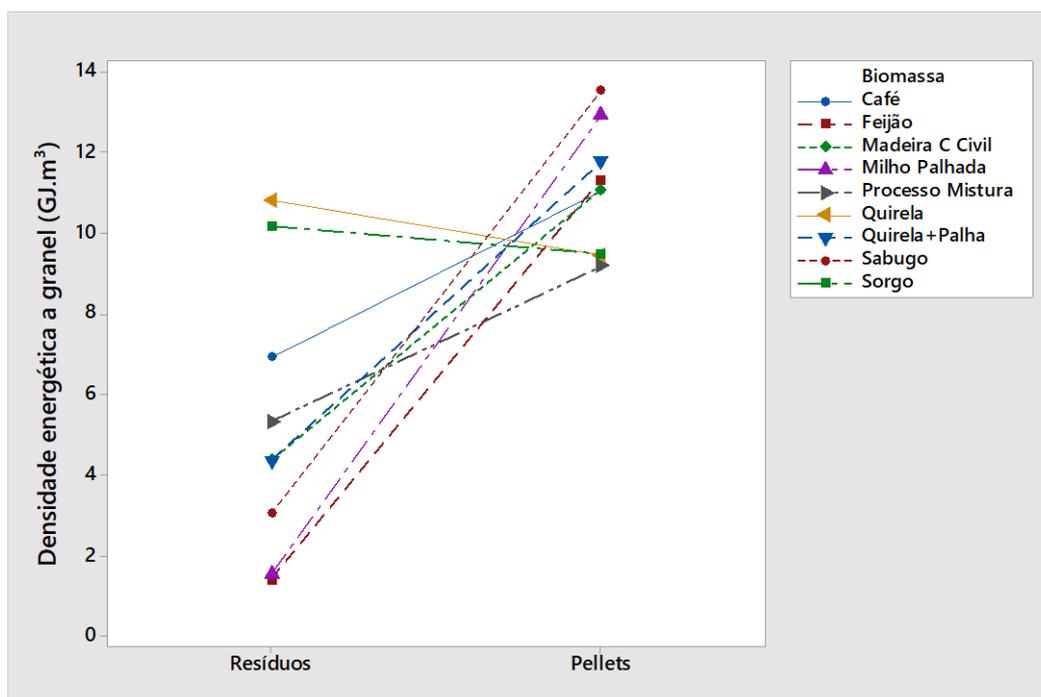


Figura 2.19. Comparativo da densidade energética dos resíduos *in natura* e dos pellets.

Assim, os pellets com maior densidade energética são desejáveis porque liberam, durante a sua queima, maior quantidade de energia por unidade volumétrica, ou seja, a quantidade de energia transportada ou armazenada em um mesmo volume é aumentada quando tem-se pellets com maiores densidades energéticas (PEREIRA, 2014).

4.5. Classificação de acordo com as normas internacionais.

Com a ausência de normas regulamentadoras e certificações brasileiras, é preciso basear-se nas normas internacionais como parâmetro para definir a qualidade dos pellets produzidos no país. Assim, é preciso considerar que no Brasil ainda é emergente a técnica de peletização, e muito do que se desenvolve no País é adaptado à tecnologia nacional disponível e matérias-primas diversificadas. Garcia (2010) menciona que o alinhamento dos padrões e dos métodos apropriados para os testes dos pellets são necessários para todos os países com o intuito de facilitar os processos e procedimentos de exportação.

De acordo com Hahn (2004) há, basicamente, dois critérios para se julgar a qualidade dos pellets: a composição química e as características físicas. Na Tabela 2.14,

as características físicas de todos os tipos de pellets produzidos estão classificadas de acordo com sua adequação ou não ao certificado *ENPlus*, o mais utilizado na Europa e baseado na norma ISO 17225-2.

Tabela 2.14. Classificação dos pellets produzidos segundo a certificação *ENPlus*.

Pellet	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Densidade de a granel (kg/m ³)	Teor de umidade (%)	Durabilidade (%)		Finos <3mm (%)
					A1	A2 e B	
Palhada de milho	S	S	S	S	N	N	N
Sorgo	S	S	N	N	N	N	N
Quirela + Palha	S	S	S	N	N	N	N
Sabugo	S	S	S	S	N	N	N
Milho Processo	S	S	N	N	N	N	N
Madeira C Civil	S	S	N	S	N	N	N
Café	S	S	S	N	N	N	N
Quirela	S	S	N	N	N	N	N
Feijão	N	S	S	N	N	N	N

S: sim, está em conformidade com a norma.

N: não, não está em conformidade com a norma.

O comprimento dos pellets foi o único parâmetro que todos os pellets atingiram o mínimo exigido pela *ENPlus*, e quanto ao diâmetro, apenas os pellets de feijão apresentaram inferioridade. Metade dos pellets foram satisfatórios quanto a densidade a granel e apenas três em relação à umidade. Nenhum dos pellets atingiu os valores aceitáveis de durabilidade e teor de finos.

O sistema de certificação *ENplus* define três classes de qualidade para pellets e todas referem-se a pellets de diferentes tipos de madeira, sendo o uso de madeira de demolição e de madeira tratada quimicamente proibido em qualquer classe de qualidade, excluindo assim, os pellets de madeira de construção civil produzidos neste trabalho.

A Tabela 2.15 é mais abrangente e apresenta a classificação dos pellets de acordo com cinco normas de países distintos. O diâmetro dos pellets de feijão não foi atendido nas normas italiana e francesa, os demais pellets se adequaram em todas as normas. Quanto ao comprimento, todos os pellets foram satisfatórios nas normas

austríaca, alemã e francesa. As normas italiana e sueca não definem limites mínimos de comprimento.

As normas sueca, alemã e italiana são menos exigentes em relação a densidade a granel, por isso, todos os pellets se enquadraram nas especificações exigidas. Os teores de umidade dos pellets de palhada de milho, sabugo e madeira de construção civil foram condizentes com todas as normas europeias. A madeira de construção civil foi o único material cujos pellets apresentaram PCI adequado à todas normas, em contrapartida, os pellets de sorgo foram os únicos não abrangidos pelos limites de PCI em nenhuma norma.

Tabela 2.15. Classificação dos pellets produzidos conforme a norma ONORM M7135 (Áustria), SS187120 (Suécia), DIN PLUS (Alemanha), CTI-R 05/5 (Itália) e ITEBE (França).

Pellet	Diâmetro (mm)					Comprimento (mm)					Densidade a granel (kg/m ³)					Teor de umidade (%)					PCI (MJ/kg)					Durabilidade (%)					Finos <3mm (%)					
	ONORM M7135	SS 18 71 20	DIN PLUS	CTI- R 04/5	ITEBE	ONORM M7135	SS 18 71 20	DIN PLUS	CTI- R 04/5	ITEBE	ONORM M7135	SS 18 71 20	DIN PLUS	CTI- R 04/5	ITEBE	ONORM M7135	SS 18 71 20	DIN PLUS	CTI- R 04/5	ITEBE	ONORM M7135	SS 18 71 20	DIN PLUS	CTI- R 04/5	ITEBE	ONORM M7135	SS 18 71 20	DIN PLUS	CTI- R 04/5	ITEBE	ONORM M7135	SS 18 71 20	DIN PLUS	CTI- R 04/5	ITEBE	
Palhada de milho	S	S	S	S	S	S	-	S	-	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	N	N	N	N	S	N	S	S	S	S	-	N	N	N	N	S
Sorgo	S	S	S	S	S	S	-	S	-	S	N	S	S	S	N	N	N	S	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	-	N	N	N	N	N
Quirela + Palha	S	S	S	S	S	S	-	S	-	S	S	S	S	S	N	N	N	S	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	S	-	N	N	N	N	S
Sabugo	S	S	S	S	S	S	-	S	-	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	N	S	N	S	S	N	N	N	N	S	-	N	N	N	N	S
Milho Processo	S	S	S	S	S	S	-	S	-	S	N	S	S	S	N	N	N	S	N	N	N	N	N	S	N	S	S	S	S	S	-	N	N	N	N	S
Madeira C Civil	S	S	S	S	S	S	-	S	-	S	N	S	S	S	N	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	N	N	N	N	N	-	N	N	N	N	N
Café	S	S	S	S	S	S	-	S	-	S	S	S	S	S	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N	S	S	S	S	S	S	-	N	N	N	N	S
Quirela	S	S	S	S	S	S	-	S	-	S	N	S	S	S	N	N	N	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N	-	N	N	N	N	N
Feijão	S	S	S	N	N	S	-	S	-	S	S	S	S	S	S	S	N	S	S	S	N	N	N	N	S	N	N	N	N	S	-	N	N	N	N	S

S: sim, está em conformidade com a norma.

N: não, não está em conformidade com a norma.

- : não há definição na norma.

A durabilidade dos pellets de palhada de milho, milho processo e de café atendeu as especificações de todas as normas, exceto a francesa que não define faixa de limites para este parâmetro. Assim como para a *ENPlus*, o teor de finos foi inadequado na maioria das normas. A norma francesa é única menos exigente quanto a este parâmetro e permitiu que apenas os pellets de sorgo, madeira de construção civil e quirela não se adequassem.

Segundo Garcia et al. (2017), a maior parte das indústrias peletizadoras brasileiras (92,3%) são de pequeno porte e a tecnologia dos equipamentos nacionais, em sua maioria, não alcançam estas especificações de qualidade internacional e, por isso, não conseguem obter o selo exigido para as exportações (DIAS et al., 2012; GARCIA, et al., 2016).

Com relação ao grau de exigência, o mercado europeu na parte residencial é extremamente criterioso quanto aos parâmetros de qualidade, se comparado com o setor industrial (CAMARGO, 2013). Assim, Viak (2000) defendeu que devem haver padrões de qualidade para dois grupos de pellets:

- Pellets para uso em pequena escala: qualidade superior, com baixa quantidade de finos e de cinzas e comprimento uniforme para não causar problemas técnicos nas estufas residenciais.

- Pellets para uso em larga escala: a quantidade de finos, de cinzas e o comprimento são de pouca importância, porque robustos sistemas industriais conseguem superar essas limitações.

De qualquer maneira, é imprescindível o estabelecimento de normas de qualidade para os diferentes tipos de biomassa e uso. Além de conferir ao consumidor e ao produtor mais confiabilidade ao produto, a adequação de normas para diferentes tipos de pellets pode colaborar com o aperfeiçoamento dos equipamentos industriais para que os fabricantes possam atender as diferentes demandas do mercado.

5. CONCLUSÃO

De maneira geral, os resíduos apresentaram aptidão para serem adensados em forma de pellets, com exceção da madeira de madeireira. No entanto, alguns apresentaram desempenho superior aos demais por reunirem características físicas e mecânicas satisfatórias e pela facilidade de manuseio, são eles: palhada de milho, feijão e sabugo.

O processo de densificação foi mais eficiente para a palhada de milho, pois resultou na mais elevada taxa de compactação e maior incremento energético. Além dessas características positivas, os pellets produzidos com este material apresentaram baixo teor de finos, alta durabilidade e alta densidade a granel.

Os pellets fabricados com palhada de feijão foram os mais resistentes no teste de compressão diametral. Também demonstraram uma elevada taxa de compactação e incremento energético semelhante à palhada de milho. Já os pellets de sabugo obtiveram a maior densidade aparente unitária e maior densidade a granel.

O comportamento higroscópico dos pellets de café deve ser avaliado, pois foi o produto que mais apresentou variação de umidade.

A maior concentração de amido dos resíduos de quirela de sorgo e milho geraram pellets quebradiços, com elevados teores de finos e baixos índices de durabilidade, resistência à compressão diametral e incremento energético.

Verificou-se também que os pellets provenientes da mistura de quirela com palhada de milho trouxeram resultados melhores do que os apresentados no tratamento apenas com quirela de milho.

Capítulo 3: Briquetes de resíduos agrícolas

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda a possibilidade de transformação dos resíduos agrícolas em briquetes. O conhecimento sobre o estado da arte que envolve a tecnologia de adensamento em forma de briquetes é fundamental para compreender as vantagens deste tipo de conversão energética. Além disso, é de suma importância analisar o lastro que este tipo de biocombustível tem adquirido no ramo energético mundial e por que a adoção deste método constitui uma enorme vantagem para o aproveitamento da biomassa residual em agroindústrias.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Histórico da produção de briquetes

A aglomeração manual de finos de alguns materiais já era conhecida desde os tempos remotos na China e na Inglaterra, quando utilizavam ligantes de origem mineral, vegetal e até animal, para a formação de adensados (OLIVEIRA, 2016). Segundo Grover e Mishra (1996), historicamente, a tecnologia de briquetagem de biomassa foi desenvolvida em duas direções distintas. A Europa e os Estados Unidos buscaram e aperfeiçoaram a prensa de pistão/pistão alternativo, enquanto o Japão inventou e desenvolveu de forma independente a tecnologia de prensa de parafuso (rosca).

Na Europa, a história dos briquetes de fabricação mecanizada tem início na França, em 1842, com o engenheiro E. Marsais utilizando finos de carvão mineral como matéria-prima. A ideia do processo ganhou força em 1848, na indústria naval americana, quando o capitão William Easby recebeu uma patente do método para transformar finos de carvão em aglomerados. Segundo Lynch e Rowland (2005), em uma breve descrição do processo, Easby menciona: “A utilidade e a vantagem da descoberta são que por este processo, um artigo de pequeno valor ou quase sem valor pode ser convertido em um valioso artigo de combustível para vapores, forjas, culinárias e outras finalidades, economizando o que seria perdido”. Em poucas palavras, Easby patenteou toda a indústria de briquetagem de carvão e também declarou a justificativa para a sua existência.

Depois de 14 anos da patente de Easby, a palavra *briquette* surgiu na cidade de Paris, na França, sendo uma mistura de turfa, água e argila plástica (CARVALHO e BRINCK, 2004). A palavra briquete deriva tanto de "brique" (tijolo, em francês) quanto da palavra inglesa "break" (quebra).

Assim, o primeiro uso dos cilindros de alta pressão foi para compactar carvão em briquetes e, em 1900, a briquetagem de carvão era uma grande indústria na Europa e nos Estados Unidos. Os muitos prédios enormes que abrigavam as prensas refletiam o alto volume de briquetes produzidos. Durante a década de 1920, a fabricante americana Allis-Chalmers começou a construir máquinas de rolo duplo para compactar sólidos finos em grânulos e flocos e, com o desenvolvimento de pistões hidráulicos, a empresa usou o projeto básico de seus granuladores e descamação para fabricar um compactador duplo (KURTZ e BARDUHN, 1960 *apud* LYNCH e ROWLAND, 2005).

No entanto, Dantas et al. (2012) afirmam que a iniciativa de Easby não teve grande visibilidade em função da falta de interesse provocada pela grande disponibilidade de lenha e de petróleo e da pouca preocupação ambiental existente na época. Posteriormente, houve o encarecimento dos combustíveis fósseis e o aparecimento de inúmeros problemas ambientais, surgindo assim a necessidade de uma nova fonte de energia que contornasse todos esses problemas. O briquete foi a matriz energética-ambiental que se encaixou nesse perfil, passando a ser visto como uma real alternativa energética.

A tecnologia de briquetagem por extrusão de parafuso foi inventado e desenvolvido no Japão em 1945. Em abril de 1969, havia 638 fábricas no Japão envolvidas na fabricação de briquetes de serragem, conhecidos como "Ogalite" (GROVER e MISHRA, 1996).

Desse modo, com o processo já disseminado por toda a Europa, chegou ao Brasil a partir da Alemanha. Conforme Carvalho e Brink (2004), na década de 60 surgiram as primeiras iniciativas de utilização deste processo no Brasil, na Companhia Siderúrgica Belgo Mineiro – CSBM - na usina de João Monlevade, MG, com a instalação de um equipamento da empresa alemã Humboldt, para briquetagem de finos de carvão vegetal.

Em suma, a produção de briquetes já é bastante conhecida no exterior, principalmente nos EUA e Europa, através da briquetagem de carvão vegetal. No entanto, no Brasil ainda não existe uma tradição industrial na produção de briquetes de carvão vegetal ou de resíduos lignocelulósicos (MARCHIORI, 2006), apesar dos recentes avanços na indústria brasileira.

2.2. Conceitos fundamentais

Briquetes são produtos originados a partir do processo chamado de briquetagem, que é uma forma de compactação de biomassa com o uso de prensas ou pressão, com ou sem aquecimento, gerando blocos geralmente cilíndricos. A maioria dos processos de fabricação de briquetes utilizam resíduos florestais e industriais como matéria-prima, por isso, são comumente chamados de “lenha ecológica”. Os briquetes produzidos com resíduos agroindustriais podem, ainda, ser chamados de “biobriquetes”.

Através do processo de briquetagem é possível conseguir um combustível com homogeneidade granulométrica, maior densidade e resistência à geração de finos. O aumento na densidade proporcionado pelo processo de compactação é capaz de produzir um combustível com maior concentração energética por unidade de volume, aliado à resistência adquirida, conferindo viabilidade técnica e econômica no manuseio e transporte (FONTES et al., 1984), capaz de competir diretamente com outros combustíveis sólidos.

O princípio da briquetagem envolve os mecanismos que permitem a ligação entre as partículas da biomassa. Os compostos ligantes que já estão presentes na matéria-prima podem ser ativados pelas elevadas pressões e temperaturas alcançadas no processo de compactação. Pode ser o caso da lignina, presente nas células da biomassa, que amolece entre 100 e 190°C e age como uma cola entre as partículas. Os mecanismos de emaranhamento e a ativação de forças de valência e de Van Der Waals acontecem pela forte aproximação e deformação das partículas provocada pelas pressões de compactação. Mesmo depois da compactação, as partículas da matéria-prima ainda são perceptíveis (FELIPPETTO, 2008).

Segundo Costa e Moraes (2011), o briquete substitui eficientemente os produtos derivados do petróleo, o GLP (gás liquefeito de petróleo), a lenha, o carvão vegetal, a eletricidade ou o gás natural.

Segundo Quirino e Brito (1991) os briquetes possuem no mínimo cinco vezes mais energia que os resíduos de madeira, além de ter um poder calorífico, em base volumétrica, superior até ao da lenha. Para eles a briquetagem é um processo vantajoso em relação ao armazenamento de material, pois ocorre uma grande redução de volume do material, ou seja, um armazenamento de energia maior em um menor espaço para estocagem.

Além disso, a briquetagem permite a obtenção de um produto não só compactado, mas com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados, bem como resistente ao apodrecimento ou a degradação devido a lignina que impermeabiliza a superfície do briquete (RODRIGUES, 2010).

Quanto a sua forma de utilização, além do uso residencial, Fernandes et al (2012) destacam que estes biocombustíveis são utilizados em hotéis que possuem sistema de aquecimento de água, lavanderias internas, clubes que utilizam piscinas e saunas. No meio agrícola podem ser utilizados em abatedouros, secadores de soja, milho e outros cereais e em torradores de café, farinha de milho e mandioca. E ainda, no ambiente urbano o material pode ser aplicado em recauchutagens de pneus, tinturarias, padarias, pizzarias e em diversos segmentos que utilizam caldeiras no processo produtivo.

Dessa forma, é possível listar uma série de vantagens no uso dos briquetes em relação a outros combustíveis, como lenha e carvão, tais como:

- Aumento do conteúdo calorífico do material por unidade de volume, chegando a ser 2,5 vezes maior que a lenha;
- Baixo teor de umidade (10 a 12%) comparado à lenha (25 a 35% de teor de umidade) (QUIRINO, 2000), e por essa razão a temperatura se eleva mais rapidamente;
- O formato homogêneo facilita o transporte, manipulação e armazenamento, possibilitando a manutenção de estoques regulares com disponibilidade o ano inteiro, além de permitir maior flexibilidade de movimentação no manuseio;
- Maior higiene e melhor aparência, ideal para a indústria alimentícia (ABREU, 2005);
- Redução da mão-de-obra no manuseio, pois facilita a automação;
- Por utilizarem subprodutos de outras atividades como matéria-prima, o custo de fabricação tende a ser menor, contribuindo para a redução da dependência dos combustíveis fósseis.

Entretanto, a indústria de briquetagem ainda apresenta alguns empecilhos, como a dificuldade em atingir um preço competitivo com o carvão vegetal e com a lenha. Outro obstáculo, segundo Dias et al. (2012) é a ausência de incentivos governamentais (no caso do Brasil) e de normas regulamentadoras de produção e uso.

O uso de matérias primas alternativas também pode trazer certos entraves, como características indesejáveis para a combustão ou no processo produtivo, ocasionando maior desgaste das peças, aumentando os custos de manutenção dos equipamentos. Nos casos de matérias-primas agrícolas, a dependência da sazonalidade da produção com

possibilidade de escassez também pode ser uma questão que deve ser analisada previamente. Além disso, algumas biomassas são mais vulneráveis à umidade, o que pode gerar um custo adicional e elevado com secagem (DIAS et al., 2012).

Diante dos cenários positivos e negativos, Dias et al. (2012) mencionam um cenário de oportunidades no mercado dos briquetes, pois trata-se de uma atividade que estimula o aumento do uso de energias renováveis no Brasil e em outros países. Afirmam ainda que há uma ampla diversidade de usos, sempre com novas possibilidades de matérias primas a serem utilizadas, e pode ser uma forma de comercialização de energia elétrica, gerando competitividade.

2.3. Mercado consumidor de briquetes

Os segmentos de mercado para briquetes podem ser diferenciados para uso doméstico, institucional e industrial, e para exportação. A maioria das empresas de briquetes nos países em desenvolvimento fornece briquetes a um mercado regional/local, e apenas algumas empresas são orientadas para a exportação. Os mercados mais acessíveis para briquetes produzidos a partir de resíduos não carbonizados são indústrias intensivas em energia que usam lenha para suas operações, como fabricação de tijolos, fábricas de cimento e outras indústrias similares. Outros mercados para briquetes não-carbonizados são cozinhas industriais, como restaurantes, escolas e hospitais. Já os briquetes de carvão são direcionados principalmente para residências e cozinhas industriais em áreas rurais e urbanas (ASAMOA et al., 2016).

Dias (2002) estabelece uma correlação entre o maior uso de pellets ou de briquetes ao grau de desenvolvimento dos países. Segundo o autor, os briquetes são mais usados em países em desenvolvimento, onde predominam os fornos mais rústicos e, por isso, menos eficientes. Já os pellets seriam mais usados nos países desenvolvidos, nos quais o seu uso é automatizado, inclusive nas residências.

Por questões históricas, culturais e comerciais, o produto ligno-celulósico adensado que se desenvolveu no Brasil foi o briquete e não o pellet. Ainda assim, no Brasil, não existem estatísticas da indústria da briquetagem nem da estrutura de custeio ou da lucratividade, seja empresarial, associativa ou governamental. Os três estados que mais produzem briquetes comerciais são Paraná, Santa Catarina e São Paulo. Nestas regiões, há evidências de um mercado de concorrência perfeita, onde há muitos compradores e muitas usinas briquetando e onde o mercado seria tomador de preço. Já em regiões como o Pará, onde existem muitas serrarias, os briquetes são mais usados

para cogeração própria das serrarias, produção de carvão para guserias e descartados no meio ambiente (GENTIL, 2008).

Não existem dados oficiais no Brasil, mas baseado em executivos de mercado, estima-se que 70% das 60 usinas de briquetagem grandes e pequenas do Brasil, estejam associadas com serrarias, principalmente nos maiores centros de desdobro primário de toras, como seja Pará, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia (BIOMASSA e BRIQUETES, 2007).

Em um levantamento realizado por Felfli et al. (2011), cerca de metade dos fabricantes de briquetes declararam concentrar suas vendas em um mercado regional, com uma limitação de distância entre a usina e o mercado consumidor de 300km, pois além dessa distância as vendas são economicamente inviáveis. No entanto a outra metade dos produtores declarou vender sua produção de briquetes por todo o país e para o exterior como é o caso de quatro empresas que declararam exportar sua produção para os Estados Unidos e a Europa.

Embora as vantagens do uso de briquetes sejam inúmeras, o mercado dificulta sua expansão, com preços instáveis, variando seus custos de matéria-prima para matéria-prima dependendo de sua disponibilidade, quantidade produzida, entre outros fatores, e sem escala de produção (LOURENÇO et al., 2017).

Além disso, é preciso considerar que os briquetes precisam ser compatíveis com a tecnologia usualmente utilizada pela indústria e nas residências. Segundo a FAO (1990), em termos de qualidade de combustão, os briquetes não oferecem vantagens significativas que possam persuadir os consumidores a gastar dinheiro em novos aparelhos, em contraste com a eletricidade ou o GLP, por exemplo, para os quais os consumidores se mostraram prontos para trocar aparelhos. Alguns consumidores industriais podem estar preparados para fazer ajustes em suas caldeiras e os consumidores domésticos podem mudar seus padrões de alimentação de combustível se, em ambos os casos, puderem ver uma vantagem financeira. Os briquetes devem, portanto, ser compatíveis com os aparelhos existentes, com pouca ou nenhuma modificação, para que possam ter sucesso na comercialização.

2.4. Princípios da técnica de briquetagem

A briquetagem é um processo físico que consiste na aglomeração de partículas finas por meio de pressão, com o auxílio ou não de aglutinantes, permitindo a obtenção de um produto não só compactado, mas com forma, tamanho e parâmetros mecânicos

adequados (OLIVEIRA, 2016). Assim, esse processo pode ser desenvolvido utilizando diversos tipos de resíduos agrícolas, industriais e urbanos. Em princípio, todos os tipos de resíduos agro-industriais ligno-celulósicos podem ser utilizados para fabricar briquetes (CAIRES, 2010).

Esta é uma prática antiga e uma das técnicas consideradas, em termos gerais, como tecnologia de compactação. A compactação ocorre dentro de moldes matrizes, em orifícios entre cilindros rotativos ou processos similares. A briquetagem pode requerer ou não a aplicação de pressão, adição de ligantes e tratamento térmico posterior (FILIPPETO, 2008). O processo típico de produção de briquete inclui as seguintes etapas: a) moagem, b) secagem e c) compactação. A Figura 3.1 apresenta um exemplo de processo básico de briquetagem. O fluxo completo será explicado no sub-item posterior.

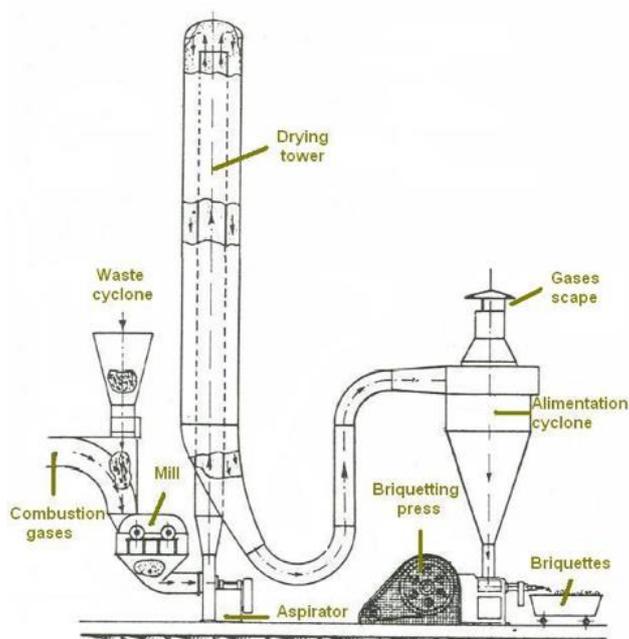


Figura 3.1. Estrutura básica para fabricação de briquetes. Fonte: (SOLANO et al., 2016)

Existem diversos tipos de briquetadeiras, podendo utilizar temperatura ou não. A principal diferença entre os sistemas está no tipo de prensa utilizada. Há dois tipos de prensas para produção de briquetes: as que atuam por pressão e as que atuam por extrusão, e seus principais subtipos estão descritos a seguir:

Prensa de pressão:

- Prensa de pistão hidráulico: é um equipamento que usa um pistão acionado hidráulicamente; o material a ser compactado é alimentado lateralmente por

uma rosca sem fim. Uma peça frontal expulsa o briquete quando se atinge a pressão desejada. A pressão aplicada é geralmente menor que em outros métodos produzindo briquetes de menor densidade (QUIRINO, 2000; LUCENA et al., 2008). Um exemplo deste tipo de briquetadeira está representado na Figura 3.2.

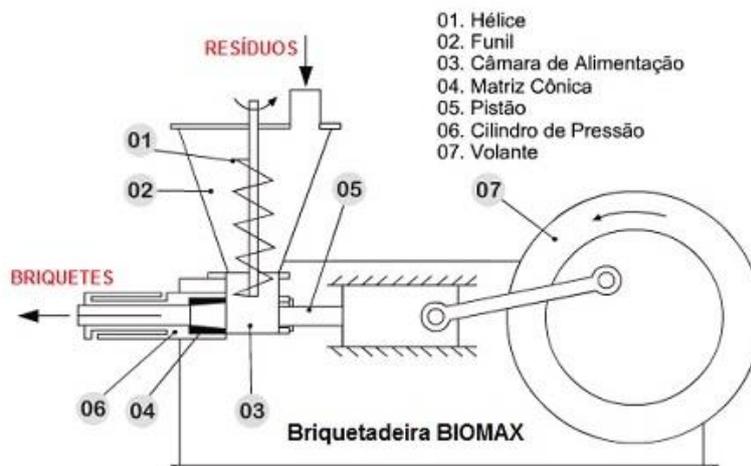


Figura 3.2. Exemplo de uma briquetadeira do tipo prensa por pressão hidráulica.
Fonte: <https://www.biomaxind.com.br/>

Prensa por extrusão:

- Prensa de pistão mecânico: é normalmente movida por energia elétrica e a matéria-prima é alimentada e compactada em uma matriz por meio de um pistão que se movimenta alternadamente. Os briquetes apresentam geralmente forma cilíndrica, com diâmetro entre 50 e 100 mm. O problema típico deste tipo de prensa é o desgaste da matriz e do pistão (FILIPPETTO, 2008) (Figura 3.3).

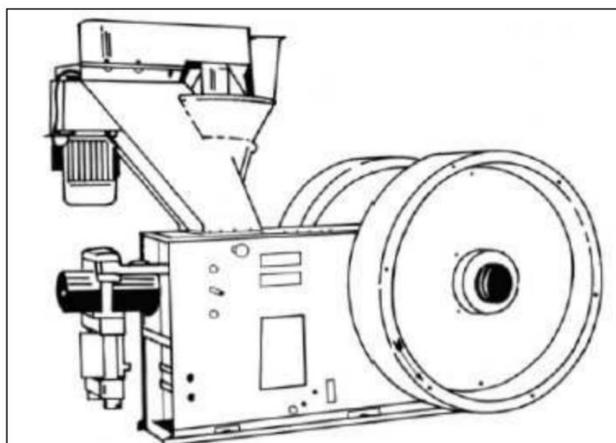


Figura 3.3. Prensa de pistão mecânico (ERIKSSON e PRIOR, 1991).

- Prensa de rolos: consiste de dois rolos do mesmo diâmetro, girando horizontalmente em direções opostas em eixos paralelos. A biomassa compactada é forçada a passar pela abertura entre os rolos obtendo-se assim pequenas bolsas, que é o produto adensado. É um dos sistemas que menos consome energia o que reduz o custo da briquetagem. Entretanto, o produto é menos denso, o que pode ser inviável se a carbonização for desejada (DIAS et al., 2012).

- Prensa extrusora de rosca (prensa de rosca sem fim): o trabalho de adensamento é realizado por uma rosca que transporta e empurra a matéria-prima através de uma matriz, onde a matéria-prima sofre a extrusão formando o briquete (FILIPPETTO, 2008) (Figura 3.4). Segundo o autor, existem basicamente três tipos de prensas de rosca: prensa com rosca cônica, prensa com rosca cilíndrica e matriz aquecida e prensa de rosca dupla. Dias et al. (2012), ressaltam que as vantagens da extrusora de rosca são a alta qualidade do briquete (melhor armazenamento e ignitibilidade) e operação com baixos ruídos. A desvantagem é o alto cisalhamento da rosca e o alto consumo de energia elétrica.

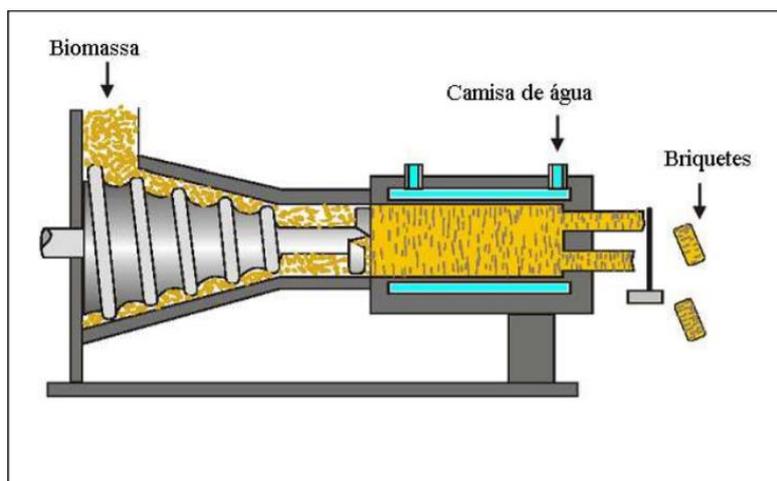


Figura 3.4. Prensa extrusora do tipo rosca cônica (BHATTACHARYA et al., 1989).

A extrusão em altas pressões e temperaturas oferece um produto homogêneo, sem aglomerantes, a temperaturas de 150° a 200°C. A alta temperatura é obtida pelo atrito dentro das câmaras de compressão antes da extrusão, liquefazendo a lignina do material. Ao resfriar, a lignina se transforma em aglomerante natural. No final do processo, o material solidifica-se, resultando em um briquete com elevada resistência mecânica (OLIVEIRA, 2016).

Grover e Mishra (1996) explicam que as duas tecnologias estão bastante difundidas pelo mundo, entretanto, enquanto os briquetes produzidos por uma prensa de pistão são completamente sólidos, os briquetes de prensa de rosca, por outro lado, possuem um orifício concêntrico que oferece melhores características de combustão devido a uma área específica maior. Os briquetes de prensa de parafuso também são homogêneos e não se desintegram facilmente. Tendo uma alta taxa de combustão, estes podem substituir o carvão na maioria das aplicações e em caldeiras.

Entretanto, Filippetto (2008) ressalta que é necessário resolver alguns problemas técnicos para tornar estas máquinas realmente competitivas. Fundamentalmente os dois inconvenientes importantes das briquetadeiras de parafuso são o rápido desgaste da rosca e a maior energia necessária para compactar a matéria-prima em comparação com a energia gasta nas prensas de pistão. Várias otimizações já foram desenvolvidas, mas muitos aprimoramentos ainda são necessários para melhorar a eficiência desses equipamentos.

2.5. Processo industrial de briquetagem

O processo industrial de produção de briquetes envolve diversas etapas que variam de acordo com o tipo de matéria-prima utilizada. De maneira geral, as principais etapas estão descritas no fluxograma da Figura 3.5.

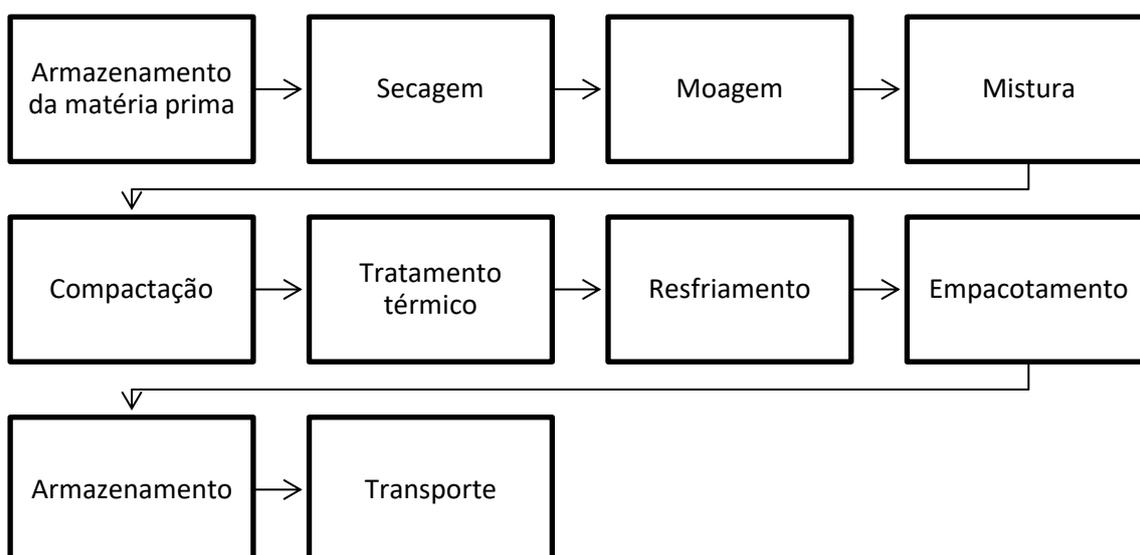


Figura 3.5. Fluxograma de um processo industrial de briquetagem.

A cadeia produtiva dos briquetes começa na origem da matéria-prima, e no caso dos resíduos agrícolas, é no campo após colheita. Mas o processo industrial tem início com o armazenamento da matéria-prima no pátio da indústria. Nesse primeiro passo é fundamental o bom acondicionamento em local arejado para evitar a contaminação por fungos e outros microrganismos, pois o material costuma chegar com alta umidade. Além disso, durante o armazenamento também pode ocorrer uma breve pré-secagem da biomassa a temperatura ambiente, o que contribui no processo de secagem que vem logo em seguida.

A umidade é uma variável importante no adensamento da biomassa, pois facilita a gelatinização do amido, a fragmentação de proteína e a solubilização de fibras durante a densificação (DEMIRBAS et al., 2004). No entanto, em excesso, a umidade pode dificultar a compactação e causar o entupimento na alimentação do maquinário. Por isso, a secagem é um passo importante para a maioria dos casos de briquetes fabricados com resíduos agroindustriais.

Existem várias técnicas de secagem para reduzir o teor de umidade, desde a simples e econômica secagem ao sol até sistemas mais sofisticados como o forno rotatório. Os secadores empregados para biomassa são do tipo direto e indireto. Nos secadores diretos o ar quente ou os gases, são intimamente misturados com os materiais e nos indiretos o calor é transferido para os materiais através de superfícies metálicas sem a mistura com os fluxos de ar ou de gases quentes (DIAS et al., 2012).

A moagem é a etapa sucessora e necessária na maioria dos casos, pois o equilíbrio no tamanho das partículas é determinante na qualidade e na durabilidade dos briquetes. Mesmo que o resíduo por natureza apresente dimensões apropriadas para compactação, Dias et al. (2012) registram que durante a moagem ocorre também a quebra da lignina, aumentando a área de contato, proporcionando ligações mais fortes após a compactação e, conseqüentemente, um produto mais resistente.

Nos casos em que se utilizam aglutinantes ou reagentes, a etapa da compactação deve ser precedida pela mistura. Esse procedimento é fundamental para que ocorra a distribuição uniforme do aglutinante em todo o material, podendo ser acompanhada ou não de tratamento térmico. A mistura é importante mesmo nos casos em que não há adição de aglutinante, pois envolve o balanceamento granulométrico, homogeneizando o preparo. Além disso, durante a mistura pode-se fazer o equilíbrio da umidade, pois durante a moagem, devido o aumento da temperatura pelo atrito, é comum o material perder ainda mais umidade. Nos resíduos secos, em alguns casos, também há necessidade de incremento de água.

A compactação é a briquetagem propriamente dita, utilizando-se o equipamento escolhido, como os descritos no item 2.4. A grande diversidade de composição da biomassa e a complexidade do material demandam muitas adaptações que, às vezes, são feitas em escala piloto ou mesmo na planta de briquetagem (GROVER e MISHRA, 1996). Para evitar a fratura devido a choques térmicos e também permitir o manuseio dos briquetes, logo após sua formação, os mesmos podem ser imediatamente submetidos a um aquecimento e em seguida resfriados lentamente (OLIVEIRA, 2016).

As etapas finais que se sucedem envolvem o empacotamento, geralmente em sacos de 15 kg ou 35 kg, que permanecem empilhados em sala de armazenamento até sua expedição, transporte e entrega ao cliente, encerrando assim a cadeia completa do briquete.

Autores como Thek e Obernberger (2002) e Hirsmark (2002) afirmam que o frete é um dos fatores mais pesados na composição dos custos da fabricação do briquete. As indústrias de briquetagem precisam fazer estudos logísticos para saber o ponto ideal de custos e distâncias. Tanto do produto entregue, como da matéria-prima comprada de terceiros. Quando a usina de briquetagem é da própria produtora da matéria-prima, então o custo do frete da matéria-prima é desprezível e o briquete se tornaria mais competitivo.

Em suma, a matéria-prima pode chegar à indústria com elevada umidade, heterogênea, com baixa densidade, contaminada biologicamente ou com materiais estranhos como tinta e vernizes assim como apresentar granulometria não adequada. Quando o fluxo termina, o briquete é um produto adensado, limpo de materiais estranhos, com umidade na faixa apropriada, com tamanho e dimensões específicas conforme a decisão do cliente. (TRIPATHI, 1998; PEREIRA, 2006; HIRSMARK, 2002).

2.6. Parâmetros que influenciam na qualidade dos briquetes

São diversas as variáveis que influenciam na qualidade do biocombustível adensado. Devem-se avaliar as propriedades intrínsecas do próprio resíduo como densidade, granulometria e composição química; variáveis do processo de compactação como pressão e temperatura; e propriedades analisadas após a compactação como volume, durabilidade, compressão diametral e combustão. Variáveis como umidade, densidade a granel, materiais voláteis, cinzas, poder calorífico podem ser avaliadas quando os resíduos estão tanto na condição *in natura* quanto após adensamento.

Para se obter um briquete de boa qualidade, a escolha do aglutinante (quando necessário) e do resíduo utilizado é fundamental (COSTA et al., 2010). Os aglutinantes,

também chamados de ligantes, são utilizados quando o material a ser aglomerado não possui resistência à compressão e ao impacto, após a compactação. Quanto menor for a quantidade de partículas finas, menor será a quantidade de aglutinante necessária para gerar um briquete de boa qualidade (CARVALHO et al., 2018).

Os mesmos autores explicam que briquetes produzidos com aglutinantes são normalmente comprimidos em baixas pressões, de modo a evitar uma nova fragmentação das partículas. Quando é necessário produzir briquetes sem aglutinantes, o sucesso da operação depende de como ocorreu a cominuição ou a deformação plástica das partículas. Tal dependência deve-se à necessidade das partículas estarem situadas o mais próximo possível uma das outras, compensando assim a ausência de uma substância aglutinante. Muitos materiais orgânicos e inorgânicos podem ser briquetados sem a utilização de aglutinantes. As forças, que mantêm esses cristais unidos, não são necessariamente fortes, nem específicas, devendo apenas fazer com que os cristais individuais estejam suficientemente próximos uns dos outros (CARVALHO et al., 2018).

Dependendo do tipo de matéria-prima e do processo de compactação existe uma faixa de teor de umidade na qual o material pode ser compactado adequadamente. Um excesso de umidade pode provocar explosões devido à formação de vapor. Por outro lado, uma matéria-prima muito seca dificulta os mecanismos de ligação entre as partículas (FILIPPETTO, 2008). Apesar de algumas literaturas especificarem uma faixa de limites mínimo e máximo de umidade, devido a alta variedade de biomassas utilizadas como matéria-prima, não é recomendável determinar uma faixa de maneira generalizada.

A exposição, mesmo que por curto período, à chuva ou a condições de alta umidade podem afetar negativamente a qualidade dos briquetes. Quando os produtos são obtidos sem a utilização de ligantes são, geralmente, resistentes à umidade, mas quando a compactação ocorre na presença de ligantes solúveis à água como, por exemplo, amido, ou contém muitos materiais porosos, a presença de umidade pode fragilizar o briquete (DIAS et al., 2012).

A granulometria dos resíduos também influencia na qualidade do briquete, ou seja, quanto menor a partícula melhor o processo de densificação e maior a resistência mecânica (BRUGNERA, 2016). Além disso, segundo Kaliyan e Morey (2009), o tamanho das partículas influencia tanto na densidade a granel das biomassas quanto na durabilidade e resistência dos briquetes.

Como a compactação visa aumentar a densidade (aparente e a granel) do material, este parâmetro é um dos que merece mais atenção. Quanto maior a densidade, maior a razão energia/volume. A densidade aparente é influenciada tanto pelas demais propriedades físicas como tamanho das partículas e umidade, quanto pelas variáveis do processo, como pressão e temperatura. Segundo Nakashima et al. (2014) a densidade a granel é essencial para a viabilidade econômica, pois favorece a sua densidade energética e reduz os custos relacionados ao seu transporte e estocagem.

A prensagem proporciona resistência aos briquetes. É realizada por meio da ação de prensas que aplicam altas pressões e temperaturas a massa de resíduos e ao ligante. Esta etapa define a forma final do briquete, de acordo com a presa utilizada (OSHIRO, 2016).

A resistência à compressão determina a capacidade de empilhamento na estocagem. O teste de tamboramento, ou índice de quebra e abrasão, determina a resistência à abrasão provocada durante o transporte e o manuseio natural dos briquetes. Todos estes testes medem certos aspectos de qualidade (DONATO e TAKENATA, 2016). No entanto, segundo Quirino e Brito (1991) esses resultados devem ser interpretados com cuidado porque são influenciados pelo tamanho e pela forma dos briquetes, e, ainda, pelas propriedades dos materiais a partir dos quais são produzidos.

A variação volumétrica é uma propriedade que deve ser observada com cuidado após o processo de compactação, pois normalmente é inversamente proporcional à resistência mecânica dos briquetes (PROTÁSIO et al., 2011).

A durabilidade é uma propriedade que está intimamente ligada à qualidade física de biocombustíveis sólidos, pois são susceptíveis ao cisalhamento que pode levar à formação de partículas finas durante o transporte, transbordo e armazenamento. Pode ocorrer a formação de poeira que prejudica a escolha do produto pelo consumidor e afeta a saúde do trabalhador. Somado a isso, a poeira pode prejudicar os sistemas de alimentação de caldeiras e levar a combustão heterogênea (DIAS et al., 2012).

Normalmente os resíduos agrícolas são formados por misturas heterogêneas e complexas de constituintes orgânicos e inorgânicos, o que faz com que a análise química dessas biomassas seja indispensável na sua caracterização, segundo apontam Santos et al. (2011), uma vez que a sua composição química influencia diretamente no processo de combustão.

2.7. Normas e classificação

Inicialmente, as normas referentes à confecção de briquetes foram elaboradas e implementadas isoladamente em países como Áustria, Alemanha e Suécia, porém o estabelecimento de normas individualmente acarretou em diferenças significativas em diversos parâmetros de qualidade. Isso dificultou o atendimento dos requisitos por países exportadores que visavam ao mercado europeu, por isso, o Comitê Europeu de Normalização (CEN) promoveu um movimento para uniformização das normas em todo o continente (DIAS et al., 2012), assim como no caso dos pellets.

Atualmente o principal padrão referente a qualidade dos briquetes está inserido na norma ISO/DIN 17225 que trata sobre biocombustíveis sólidos, na série 3 – briquetes de origem lenhosa; e série 7 – briquetes de origem não-lenhosa.

A produção, transporte e manuseio de biocombustíveis são partes muito importantes da cadeia de suprimentos. Em geral, estas questões são abordadas na série EN 15234 sobre "garantia de qualidade do combustível", especificamente na parte 3 sobre briquetes de origem lenhosa para uso não industrial.

Outras normas tratam pontualmente de certas propriedades:

- ISO/CD 17831-2 - Métodos para a determinação da durabilidade mecânica de pellets e briquetes - Parte 2: Briquetes;
- EN 14961- 3:2011 - Especificações e classes de combustível - Parte 3: Briquetes de madeira para uso não industrial;
- EN 15234- 3:2012 - Garantia de qualidade de combustível - Parte 3: Briquetes de madeira para uso não industrial;
- EN 15210- 2:2010 - Determinação da durabilidade mecânica de pellets e briquetes - Parte 2: Briquetes;
- EN 16127:2012 - Determinação do comprimento e diâmetro dos pellets e cilíndricos briquetes.

Dessa forma, os briquetes fabricados comercialmente devem estar em conformidade com as normas vigentes para atender os sistemas de certificação, sendo o principal deles a *ENPlus*. Esta norma de classificação apresenta duas classes de qualidade de briquetes conforme a matéria-prima utilizada: A1 e A2. A primeira refere-se a briquetes produzidos a partir de madeira e resíduos de madeira não tratados, e a segunda, além dessas matérias primas, abrange resíduos de extração de madeira e

árvores inteiras sem raízes. As Tabelas 3.1 e 3.2 contêm os requisitos essenciais e seus valores limite nas respectivas classes de qualidade deste certificado.

Tabela 3.1. Propriedades dos briquetes analisados pela *ENPlus**.

Propriedade	Unidade	EN plus A1	EN plus A2
Umidade	m - % ^b	≤ 12	≤ 15
Conteúdo de cinzas	M-% ^a	≤ 1,0	≤ 1,5
Densidade de partículas	g/cm ³ ^b	≥ 1,0	≥ 0,9
Valor calórico	MJ/kg ^b (kWh/kg)	≥ 15,5 (≥ 4,3)	≥ 15,3 (≥ 4,25)
Azoto	m -% ^a	≤ 0,3	≤ 0,5
Enxofre	m -% ^a	≤ 0,04	≤ 0,04
Cloreto	m -% ^a	≤ 0,02	≤ 0,02

^{a)} seco

^{b)} como entregue

* Disponível em www.enplus-briquettes.eu/

Tabela 3.2: Elementos permitidos para briquetes de madeira com certificação *ENPlus*.

Propriedade	Unidade	EN plus A1	EN plus A2
Arsênico	mg/kg ^{a)}	≤ 1	
Cádmio	mg/kg ^{a)}	≤ 0,5	
Cromo	mg/kg ^{a)}	≤ 10	
Cobre	mg/kg ^{a)}	≤ 10	
Conduzir	mg/kg ^{a)}	≤ 10	
Mercúrio	mg/kg ^{a)}	≤ 0,1	
Níquel	mg/kg ^{a)}	≤ 10	
Zinco	mg/kg ^{a)}	≤ 100	

^{a)} material seco

* Disponível em www.enplus-briquettes.eu/

O tamanho dos briquetes certificados deve ser indicado na notificação do produto. Segundo DEPI, 2016, a forma dos briquetes na *ENplus* deve ser nomeada de acordo com a Figura 3.6.

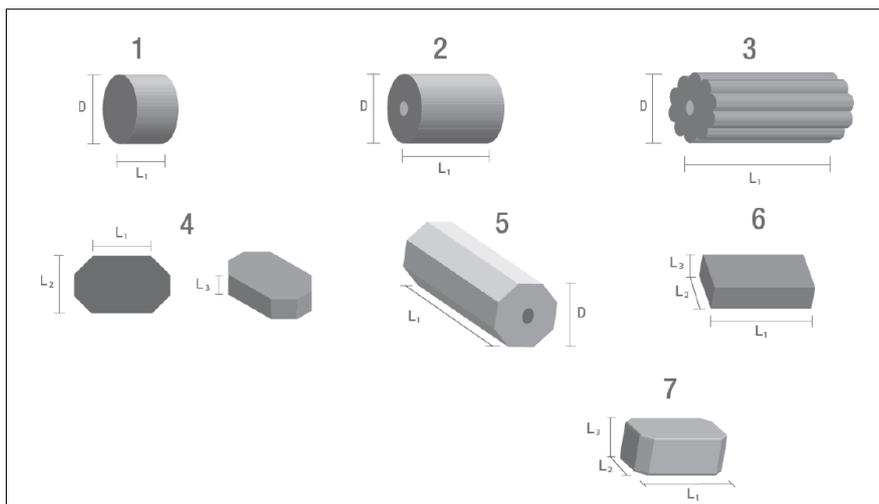


Figura 3.6. Classificação de briquetes por tamanho. Onde: D = diâmetro; L_1 = comprimento; L_2 = largura; L_3 = altura.

No Brasil, não há normas específicas para análise de propriedades de briquetes. Rangel et al. (2018) em uma pesquisa bibliométrica para quantificar estudos sobre padrões de qualidade de pellets e briquetes no Brasil, comprovaram a ausência de padrões e conformidades bem estabelecidos, dificultando a entrada no mercado internacional, necessitando com urgência de subsídios técnico-normativos para certificação internacional.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Confeção dos briquetes

Os briquetes foram produzidos no Laboratório de Bioenergia do Serviço Florestal Brasileiro (SFB), tendo como matéria-prima os resíduos descritos no capítulo 1, respeitando-se o número de repetições. O equipamento utilizado foi uma briquetadeira da marca Lippel modelo LB 32, desenvolvida para testes de briquetagem em laboratórios de pesquisa, que visam permitir a produção de pequenas amostras e em pequenas quantidades para análises de combinações de resíduos e testes de qualidade.

O sistema é composto por um cilindro metálico por onde atuam dois pistões, um que promove a compactação e outro que expulsa do briquete. Esse cilindro é aquecido por uma resistência elétrica e nele é instalado um sensor de temperatura. O sistema permite aquecimento acima de 200°C e pressões acima de 1200 kgf/cm^2 (Figura 3.7).



Figura 3.7. Briquetadeira utilizada. À direita o detalhe do cilindro compactador.

Utilizou-se 40g de cada amostra adotando-se uma pressão de 80 kgf/cm² e temperatura de 120°C durante 5 minutos sendo resfriado por aproximadamente 15 minutos pela ventoinha embutida na saída do cilindro. As biomassas foram briquetadas *in natura*, sem utilização de aglutinantes. Não houve ajuste de umidade, exceto o resíduo de café que passou por uma prévia secagem em estufa de circulação de ar fechado, a 60°C por 40 minutos aproximadamente. Devido à baixa quantidade de lignina nos resíduos: milho processo, quirela de milho, quirela + palha, sorgo e café; estes foram misturados com o resíduo de madeira de madeira para conseguir obter os briquetes, na proporção de 50% de cada, pois sem a mistura não foi possível formar os briquetes. Foram, então, produzidos 12 briquetes por repetição, sendo 10 tratamentos com três repetições cada, resultando em 360 briquetes confeccionados no total (Figura 3.8).



Figura 3.8. Briquetes produzidos.

3.2. Densidade aparente

O primeiro ensaio consistiu na determinação da densidade aparente unitária, através do método estereométrico, ou seja, o volume foi calculado considerando-se a forma cilíndrica (comprimento e diâmetro) com o auxílio de um paquímetro (com precisão de 0,01mm) e a massa obtida com o uso de uma balança analítica de sensibilidade de precisão 0,01g. O diâmetro de cada briquete foi resultante da média de três posições: base, meio e topo. Dessa forma, obteve-se também a densidade aparente unitária dos briquetes, através da divisão entre a massa (g) e o volume (cm³).

A determinação do teor umidade baseou-se na norma EN 14774-2 (DIN, 2009), em que a umidade foi obtida a partir da diferença de massa da amostra antes e após a secagem em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$, conforme a Equação 01.

$$TU = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad \text{Equação (01)}$$

Onde: TU – teor de umidade (%); Mu – massa úmida do briquete (g); Ms – massa seca do briquete (g).

3.3. Resistência à compressão diametral

O ensaio da determinação da resistência à compressão diametral foi realizado em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC do Laboratório de Tecnologia da Madeira, da Universidade de Brasília (Figura 3.9).



Figura 3.9. Ensaio de resistência à compressão diametral.

3.4. Durabilidade e teor de finos

O teste de durabilidade foi realizado conforme adaptação da norma ISO 17831-1 e na metodologia sugerida pelo Laboratório de Bioenergia do LPF/SFB que consistiu em utilizar um tambor de ferro adaptado a um motor com rotacionamento a 35 rpm. O ensaio durou 20 minutos e foram utilizados 8 briquetes de cada repetição. Após o rotacionamento, os briquetes foram retirados em uma peneira de 9 $mesh$ (ou 2 mm de diâmetro), sendo obtidas as massas inicial (mi) e a massa de partículas menores que 2mm (mr), após o ensaio (Figura 3.10). Sendo assim, obteve-se a durabilidade e o teor de finos conforme as Equações 02 e 03.

$$Du (\%) = 100 - \left(100 \times \frac{mr}{mi}\right) \quad \text{Equação (02)}$$

$$F(\%) = \frac{mr}{mi} \times 100 \quad \text{Equação (03)}$$



Figura 3.10. Briquetes sendo retirados do tambor após o rotacionamento e peneirados para obtenção dos finos (à direita).

3.5. Ensaio de combustão

A análise de combustão seguiu o mesmo procedimento descrito no Capítulo 2 para pellets, conforme o procedimento de Quirino e Brito (1991) (Figura 3.11). No caso dos briquetes, devido a menor quantidade de material disponível, utilizou-se as amostras resultantes do ensaio de durabilidade. A quantidade de álcool utilizada foi de 80 ml,

sendo o recipiente mantido no sistema até o término da combustão, para evitar variações da massa na sua retirada.



Figura 3.11. Briquetes durante o ensaio de combustão.

3.6. Densidade energética

Neste trabalho, a densidade energética dos briquetes foi calculada utilizando-se o poder calorífico útil determinado para os resíduos. Isso porque, conforme explicam Almeida et al. (2015), o processo de briquetagem é físico, e consiste somente no aumento da densidade por meio da compactação. As variáveis do processo não alteram a composição química da madeira que deu origem aos briquetes e, por conseguinte, não alteram o poder calorífico e composição química dos briquetes em relação à matéria-prima que deu origem aos mesmos. Sendo assim, a densidade energética foi o resultado do produto entre a densidade aparente dos briquetes e o poder calorífico útil dos resíduos.

3.7. Análise estatística

Para realização da análise estatística, adotou-se um delineamento inteiramente casualizado, composto por 10 tratamentos com três repetições cada. As variáveis de cada tipo de briquete foram analisadas estatisticamente através da Análise de Variância (ANOVA). Comparações entre as médias de cada tratamento foram realizadas através do Teste de Tukey, a 5% de significância. Além disso, correlações e regressões simples utilizando o modelo linear entre variáveis também foram determinadas, além de uma estatística descritiva das características físicas. As análises foram realizadas no programa estatísticos Minitab 18.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades físicas

Os briquetes podem ter tamanhos e formas diversas, dependendo do tipo da prensa utilizada. Na Tabela 3.3 está apresentada, de maneira geral, a estatística descritiva das propriedades físicas englobando as dimensões dos briquetes produzidos.

Tabela 3.3: Estatística descritiva de todos os briquetes produzidos.

Variável	Média	DesvPad	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
Diâmetro (mm)	32,98	0,25	0,78	32,62	32,98	33,51
Altura (mm)	35,92	1,27	3,56	34,04	35,7	39,37
Volume (cm ³)	30,66	1,01	3,32	28,46	30,56	32,98
Umidade (%)	10,04	0,61	6,13	8,75	10,06	10,94
Densidade aparente (kg/m ³)	1275,3	36,8	2,88	1200,8	1278,2	1353,7

Devido à natureza laboratorial deste trabalho, os briquetes produzidos possuem dimensões inferiores aos briquetes industriais, os quais podem apresentar diâmetro entre 50 a 100 mm e comprimento entre 250 a 400 mm, segundo Dias et al. (2012), podendo variar de acordo com a demanda do cliente, ou para atender especificações internacionais.

Todos os parâmetros relativos às propriedades físicas dos briquetes apresentaram diferença significativa na análise de variância ANOVA, como consta na Tabela 3.4 com os respectivos valores de F. A diferença entre os grupos é apresentada na Tabela 3.5, onde observa-se o agrupamento das médias conforme o teste de Tukey.

Tabela 3.4: Análise de variância das propriedades físicas dos briquetes.

FV	GL	Valor de F				
		Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm ³)	Umidade (%)	Densidade aparente (kg/m ³)
Briquetes	9	32,3*	33,3*	41,4*	65,7*	36,2*
Erro	50					
Total	59					

*Significativo a 5% de erro de pelo teste de Tukey.

Tabela 3.5: Médias com agrupamento usando método de Tukey e desvio padrão das propriedades físicas dos briquetes.

Briquete	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (g)	Volume (cm ³)	Umidade (%)	Densidade aparente (kg/m ³)
Café	33,3 a (0,17)	35,4 cd (0,55)	35,7 ab (0,28)	30,6 d (0,16)	9,7 d (0,39)	1276,3 bc (19,19)
Feijão	32,7 d (0,06)	34,3 e (0,13)	34,8 c (0,05)	28,8 f (0,22)	10,8 a (0,07)	1338,7 a (10,73)
Madeira C Civil	32,7 d (0,03)	38,1 a (1,01)	35,6 ab (0,65)	32,0 ab (0,83)	9,8 d (0,22)	1222,3 d (14,81)
Madeira Madeireira	32,8 d (0,01)	37,2 ab (0,82)	36,2 a (0,18)	31,3 bc (0,68)	9,0 e (0,17)	1257,1 c (30,0)
Milho Palhada	32,7 d (0,02)	36,2 bc (0,32)	35,3 bc (0,11)	30,4 de (0,26)	9,7 d (0,12)	1274,5 bc (11,12)
Milho Processo	33,1 abc (0,02)	35,5 cd (0,23)	35,4 bc (0,05)	30,6 d (0,16)	10,4 bc (0,12)	1277,5 bc (8,8)
Quirela	33,3 a (0,08)	34,8 de (0,32)	35,2 bc (0,07)	30,3 de (0,18)	10,8 a (0,10)	1287,8 b (7,04)
Quirela + Palha	33,0 bc (0,21)	35,6 cd (0,53)	35,3 bc (0,21)	30,7 cd (0,23)	10,2 c (0,21)	1271,2 bc (14,08)
Sabugo	33,2 ab (0,12)	37,2 ab (0,30)	36,1 a (0,15)	32,2 a (0,10)	9,5 d (0,17)	1228,3 d (5,4)
Sorgo	33,0 c (0,08)	34,9 de (0,28)	35,6 ab (0,07)	29,8 e (0,15)	10,6 ab (0,09)	1319,7 a (6,13)

*Médias que não compartilham uma mesma letra são significativamente diferentes.

** Teste de Tukey com índice de confiança de 95%.

A densidade aparente é uma propriedade importante para analisar a qualidade do produto e dependerá da distribuição granulométrica. Os briquetes de feijão (que na forma residual foi o que apresentou o maior equilíbrio entre partículas finas e grossas) e de sorgo (cujo resíduo obteve elevada densidade a granel) foram os que tiveram as maiores densidades aparente, e em contrapartida os menores volumes. Quanto aos briquetes de madeira, Dias et al. (2012) citam que, normalmente, estes possuem densidade aparente que varia entre 500 e 1200kg/m³, faixa inferior ao encontrado neste trabalho.

No entanto, diversos trabalhos apresentaram resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo. Barros (2012) também verificou densidades aparentes elevadas em briquetes de resíduos agrícolas: 1177,2kg/m³ (resíduo de coco); 1404,3kg/m³ (sabugo de milho) e 1344,5kg/m³ (casca de maracujá). Em briquetes de resíduos de café, Leite et al. (2011) observaram densidade aparente superior a 1000kg/m³ e no trabalho de Protásio et al. (2012) foi identificada uma densidade

aparente de 1292kg/m^3 , sendo superior a densidade aparente do mesmo briquete carbonizado e torreficado testado pelos autores.

Outros briquetes de resíduos agrícolas produzidos por Ramos e Paula et al. (2011), com umidade a 12% e 150 Bar (ou $152,9\text{ kgf/cm}^2$) de pressão, resultaram em densidades menores, como por exemplo briquetes de pergaminho de café (946kg/m^3); caule (888kg/m^3) e vagem (944kg/m^3) de feijão; caule (846kg/m^3), palha (822kg/m^3) e sabugo (869kg/m^3) de milho.

Oshiro (2016) testando briquetes a partir de diversos resíduos agrícolas (como grãos de soja, milho, sabugo, palha, quirela, aveia, trigo, vagem, casca de amendoim e de feijão) verificou que a umidade média apresentou um valor de 12,64 %, enquanto que para maravalha a umidade média foi de 18,14 %. Enquanto Felfli et al. (2011) encontraram um teor de umidade em briquetes de casca de café de 13,1%.

O teor de umidade da matéria-prima é um parâmetro que deve ser controlado durante todo o processo até a formação do produto final. Um grande desafio no manuseio de resíduos agrícolas é encontrar a umidade ideal para cada tipo de biomassa, que permita a obtenção de um produto final desejável e eficiente. Gonçalves (2010) menciona estudos que recomendam um teor de umidade de 8 a 12% para matéria prima de eucalipto. No entanto, quando se trata de resíduos agrícolas, a faixa de teor de umidade ideal para compactação do material pode não ser o mesmo recomendado pela literatura para resíduos madeireiros.

Karunanithy et al. (2012) afirmam que as biomassas devem ter um teor de umidade entre 7 e 14% para que sejam produzidos briquetes de qualidade, ou seja, com alta densidade e alta durabilidade para transporte, manuseio e armazenamento.

No entanto, Barros (2012) verificou o efeito de diferentes umidades (U) e granulometrias de diversos resíduos agrícolas na produção de briquetes e concluíram que resíduos como o coco ($U_{bs} = 14,25\%$), sabugo de milho ($U_{bs} = 7,50\%$) e casca de maracujá ($U_{bs} = 7,50\%$) - todos de granulometria menor que 40 *Mesh* - briquetaram com umidades superiores e inferiores às recomendadas pela literatura (8% a 12%).

Neste trabalho, a faixa de umidade em que os resíduos se encontravam antes da briquetagem variou entre 8,6% a 17,2% e após a briquetagem, a umidade passou a variar entre 9,5 a 10,8%. O gráfico da Figura 3.12 demonstra a diferença de umidade das matérias primas antes a após o processo.

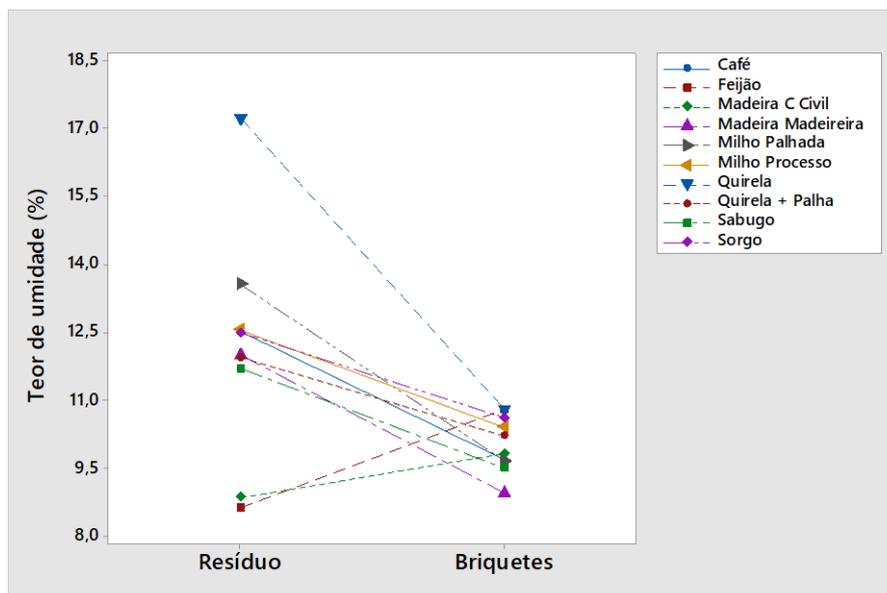


Figura 3.12. Teor de umidade das matérias primas antes e após o processo de briquetagem.

O teor de umidade mais discrepante foi do resíduo de quirela (17,2%), e apesar do insucesso na formação de briquetes compostos unicamente por essa biomassa, pressupõe-se que a causa não está relacionada com a elevada umidade deste resíduo, mas sim com a baixa quantidade de lignina, pois, outros resíduos com composições químicas similares - como milho processo, quirela + palha e sorgo - também não briquetaram mesmo dispondo de umidades mais adequadas, sendo necessária a mistura com resíduo de madeira.

4.2. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas são parâmetros importantes que ajudam a avaliar a qualidade do briquete bem como a capacidade de empilhamento em estocagem. No entanto, segundo Quirino e Brito (1991) esses resultados devem ser analisados com cuidado porque são influenciados pelo tamanho e pela forma dos briquetes e, ainda, pelas propriedades dos materiais a partir dos quais são produzidos.

No aferimento da resistência mecânica, a ANOVA mostrou que o efeito do tipo de biomassa usada no briquete foi significativo (p -valor $<0,05$). A Figura 3.13 apresenta as médias da força máxima obtida em cada tipo de briquete a partir do ensaio de compressão diametral, agrupadas conforme o resultado do teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

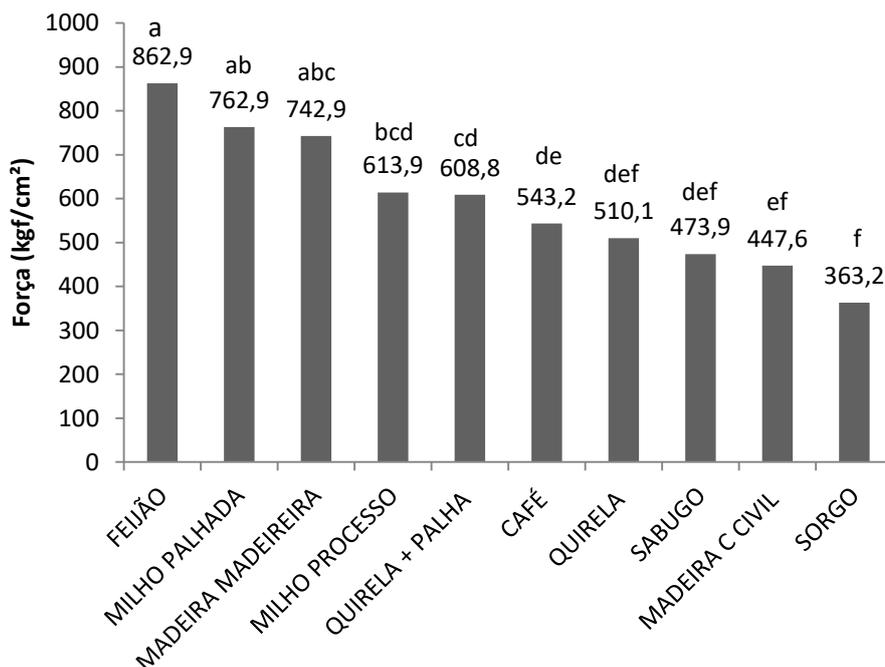


Figura 3.13. Força máxima obtida no ensaio de compressão diametral dos briquetes confeccionados.

Como exposto na Figura 3.13, os briquetes de feijão foram os que apresentaram maior resistência à força aplicada e os de sorgo a menor. Souza (2014) verificou que não houve diferença significativa na compressão diametral entre briquetes de serragem de cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.) com granulometrias diferentes, apesar das médias terem variado entre 558 a 753kgf/cm².

Apesar de não ter sido analisada a relação entre a distribuição granulométrica dos resíduos com a resistência à força submetida durante a compressão diametral, um destaque deve ser dado ao fato de os resíduos de feijão terem sido os mais homogêneos, sendo sua distribuição granulométrica a mais equilibrada entre partículas mais finas (51%) e mais grossas (49%).

Não foi encontrada correlação estatisticamente significativa entre a densidade aparente dos briquetes com a resistência a compressão diametral ($p > 0,05$), ao contrário do que foi observado por Protásio et al. (2011) para briquetes de casca de café que apresentaram maior resistência à tração por compressão diametral e força máxima tendo como um dos fatores ocasionais a maior densidade aparente. No entanto, constatou-se uma relação significativa ($p < 0,05$) entre a densidade a granel dos resíduos (após serem moídos) com a compressão diametral dos briquetes, resultando uma correlação negativa ($r = -0,56$), o que indica que quanto maior a densidade a granel menor tende a ser a força

suportada pela compressão, conforme se observa nas linhas de tendência do gráfico da Figura 3.14.

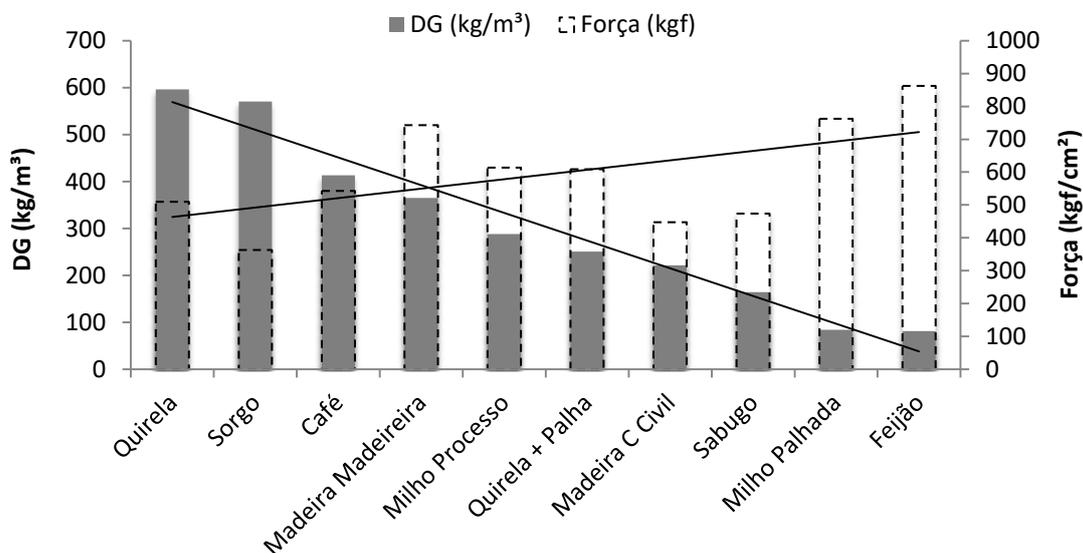


Figura 3.14. Relação entre a densidade a granel (DG) dos resíduos e força de resistência dos briquetes durante a compressão diametral.

Foram constatadas relações significativas e inversamente proporcionais do resultado da compressão diametral com outras propriedades físicas, porém, inferiores à mencionada na Figura 14, sendo elas o diâmetro ($r=-0,49$) e o volume ($r=-0,39$). A umidade, pelo contrário, não influenciou significativamente a propriedade mecânica em questão ($p > 0,05$).

Leite et al. (2011), também observaram diferenças significativas neste parâmetro para os briquetes confeccionados com casca de café, apresentando média de 250 kgf/cm² de força. Dionizio (2017), testando briquetes de resíduos de café, madeira de construção civil, madeira de madeireira, palha de feijão e sabugo, carbonizados e com aglutinante, verificou que não houve interferência do aglutinante na compressão paralela, que variou de 18 a 81 kgf/cm².

Nakashima et al. (2014) verificaram que palha de milho com granulometria grossa resultaram em briquetes frágeis e com ruptura nas faces transversais, no entanto, os briquetes de palha de milho com granulometria fina apresentaram-se mais estáveis porém com resistência mecânica inferior aos demais briquetes testados pelos autores (capim elefante e braquiária).

4.3. Durabilidade e teor de finos

Durabilidade e teor de finos são duas propriedades inversamente proporcionais que estão diretamente relacionadas com a qualidade dos briquetes, principalmente quanto ao armazenamento e transporte. Como ambas são determinadas a partir das mesmas variáveis, o resultado da ANOVA e o desvio padrão são os mesmos para as duas, conforme as Tabela 3.6 e 3.7.

Tabela 3.6. Análise de Variância quanto à durabilidade e teor de finos dos briquetes.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Briquetes	9	184,8	20,53	3,88	0,006
Erro	20	106	5,29		
Total	29	290,8			

Tabela 3.7. Médias agrupadas dos briquetes conforme o teste de Tukey a 5% de probabilidade para durabilidade e teor de finos.

BRIQUETES	Durabilidade (%)	Desv. Pad	Teor de finos (%)	Desv. Pad
Feijão	98,37 a	0,20	1,63 b	0,20
Milho palhada	98,06 a	0,19	1,94 b	0,19
Café	96,37 ab	1,83	3,57 ab	1,83
Madeira madeireira	96,42 ab	0,36	3,58 ab	0,36
Milho processo	95,59 ab	1,99	4,41 ab	1,99
Quirela	95,43 ab	1,01	4,56 ab	1,01
Quirela + palha	94,82 ab	2,60	5,18 ab	2,60
Sabugo	93,09 ab	2,17	6,91 ab	2,17
Sorgo	92,04 ab	3,50	7,96 ab	3,50
Madeira c civil	90,12 b	4,73	9,88 a	4,73

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

A durabilidade mecânica é o principal parâmetro utilizado para descrever a qualidade física de biocombustíveis sólidos densificados (CARROLL e FINNAN, 2012). Os briquetes de feijão e de milho palhada foram os que apresentaram maior durabilidade e, conseqüentemente, a menor percentagem de finos.

Segundo Karunanithy et al. (2012), a produção de finos em até 5% da massa do briquete após uma desfragmentação, seria considerada como nível aceitável e para valores acima de 5%, prejudicial ao processo produtivo. Diante dos resultados obtidos neste trabalho, apenas os briquetes de sabugo, sorgo e madeira de construção civil demonstraram estarem acima do limite aceitável mencionado pelos autores.

Vários fatores podem influenciar na durabilidade dos briquetes, tais como umidade, densidade aparente, pressão e temperatura. Na análise de regressão, não foi

detectada nenhuma relação significativa entre a durabilidade com a umidade e com o diâmetro ($p > 0,05$). Silva et al. (2017) verificaram que briquetes de *Eucalyptus* sp com umidades de 10 e 12% não apresentaram diferença significativa entre si quanto à resistência mecânica, porém, resultaram em um maior valor de tensão máxima (indicação de resistência do material) em briquetes com umidade a 15%. Nos briquetes de *Pinus* sp testados pelos autores a resistência mecânica foi diferente significativamente entre as três umidades analisadas.

No entanto, a durabilidade correlacionou-se positivamente com a densidade aparente ($r = 0,40$) e com a resistência mecânica ($r = 0,69$), indicando que à medida que estes parâmetros aumentam a durabilidade também tende a aumentar. Considerando que o teor de finos é uma medida inversamente proporcional à durabilidade, a densidade aparente e a resistência mecânica conseqüentemente apresentaram correlações negativas significativas com este parâmetro.

Kaliyan e Morey (2009) revelaram que partículas de tamanhos menores resultaram em briquetes de maior durabilidade para diversas matérias-primas, em virtude da melhor acomodação e adesão das partículas menores nas biomassas compactadas.

4.4. Combustão

Os ensaios de combustão dos briquetes tiveram em média a duração de 40 minutos e atingiram temperatura média de 850°C. O ensaio mais demorado foi o dos briquetes de milho processo, porém com menor temperatura máxima e os briquetes de maior percentual de massa consumida pela queima foram os de feijão. A Tabela 3.8 apresenta os tempos totais de duração de cada ensaio, o percentual de massa consumida, a temperatura máxima atingida, a taxa de perda de massa e o índice de combustibilidade.

Tabela 3.8. Tempo total, massa consumida, temperatura máxima atingida e taxa de perda de massa dos briquetes durante o ensaio de combustão.

Briquetes	Tempo total (min)	Massa consumida (%)	Temperatura máxima (°C)	Taxa de perda de massa (g/min)	ICOM
Café	36	89,2	919,4	6,78	1,02
Madeira Madeireira	35	95,0	845,3	8,46	0,69
Sabugo	37,5	94,6	918,1	7,22	0,69
Madeira C Civil	37,5	96,7	845,3	7,95	0,78
Quirela + Palha	53	92,4	816,8	5,24	1,10
Quirela	48	93,4	889,8	5,25	0,65
Sorgo	41,5	90,5	840,0	5,65	1,08
Feijão	38	87,0	870,2	7,17	1,17
Milho Processo	45,5	88,7	755,7	5,94	0,91
Milho Palhada	35,5	89,6	828,9	7,92	0,72

Analisando a taxa de perda de massa, verifica-se que os briquetes formados a partir de resíduos com menor quantidade de lignina foram os que consumiram menos massa por minuto (quirela + palha, quirela, sorgo e milho processo). A madeira de madeireira é o resíduo que possui maior teor de lignina total, resultando em briquetes que queimaram o maior percentual de massa no menor tempo. Pinto (2016) analisando a combustão de briquetes de resíduos de feijão e feijão + café encontrou uma taxa de perda de massa de 1,84 e 2,41, respectivamente. A autora atribui essa diferença ao elevado teor de materiais voláteis do café.

A partir dos índices de combustibilidade (ICOM) obtidos, verifica-se que o briquete com melhor desempenho, segundo este critério, é o de feijão, assim como no caso dos pellets. O que indica este resíduo ser, dentre os analisados, o com maior capacidade de manter temperatura elevada durante a queima em tempo satisfatório como combustível adensado. Isso também demonstra que a taxa de compactação do resíduo de feijão foi eficiente tanto para o formato de pellets quanto briquetes.

Protásio et al. (2015) analisando o ICOM de casca de café a granel e como briquetes (sem aditivo), verificaram que ambos atingiram o mesmo índice (0,46), no entanto, o briquete de casca de café foi o combustível que apresentou menor perda de massa após a ignição e a maior estabilidade térmica. A casca de café a granel foi o material em que se observou maior perda de massa após a ignição. Isso evidencia a melhoria da combustibilidade da biomassa com o processo de compactação, que aliado ao aumento da densidade energética do combustível, propicia o uso industrial e doméstico dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura.

Paula et al. (2011) avaliando briquete de resíduos lignocelulósicos, encontraram para briquete de madeira do cafeeiro ICOM de 0,58. Para briquetes de pergaminho de café, os autores encontraram ICOM de 0,45. Quirino e Brito (1991) explica que se os briquetes geram bastante energia (quantidade de calor) durante o teste, em contrapartida, consomem muita massa para gerar essa energia, e, desta forma o seu ICOM não será elevado.

No gráfico da Figura 3.15, observa-se um comparativo do consumo mássico de todos os briquetes analisados em função do tempo. Em seguida, na Figura 3.16 está apresentado o comportamento de cada tipo de briquete durante a combustão em função do tempo e da temperatura.

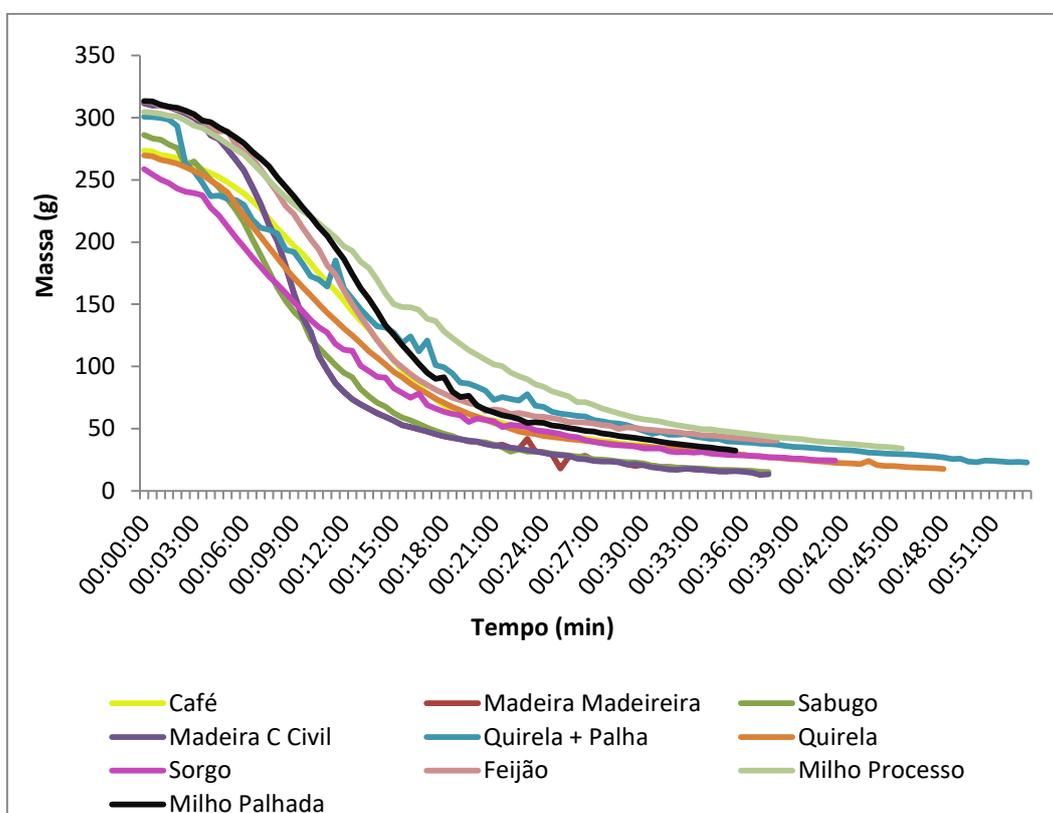


Figura 3.15. Perda de massa dos briquetes ao longo do tempo durante o ensaio de combustão.

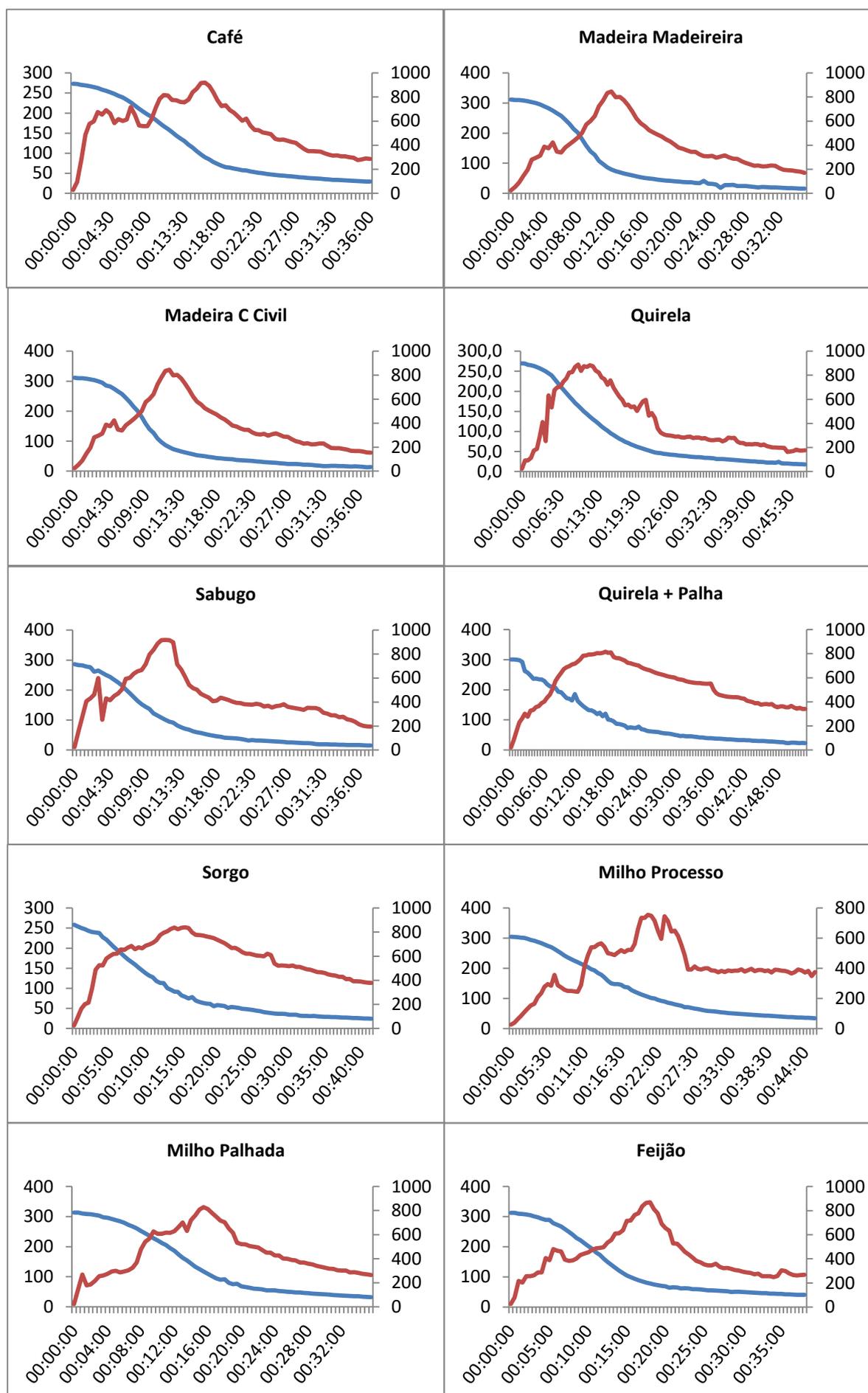


Figura 3.16. Ensaios de combustão dos briquetes indicando a perda de massa (linha azul) e a variação da temperatura (linha vermelha).

4.5. Densidade energética

Em termos de caracterização para fins energéticos, a densidade energética é um dos parâmetros que melhor avalia o desempenho de um combustível sólido. Para Quirino e Brito (1991), a partir da densidade aparente do briquete é que se determina a quantidade de energia ou calor acumulada neste material com volume definido. As Tabelas 3.9 e 3.10 apresentam os resultados da análise de variância contendo a diferença entre as médias determinadas para os dez tratamentos.

Tabela 3.9. Análise de variância da densidade energética dos briquetes confeccionados.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Briquetes	9	38,42	4,26	94,21	0,000
Erro	20	0,90	0,04		
Total	29	39,32			

Tabela 3.10. Médias de densidade energética agrupadas usando o método de Tukey e seus respectivos desvios-padrões.

Briquetes	Média (GJ.m ³)	DesvPad
Madeira Madeireira	21,43 A	0,07
Madeira C Civil	19,86 B	0,17
Feijão	19,80 B	0,25
Sabugo	19,44 BC	0,51
Milho Processo	19,03 CD	0,17
Sorgo	18,90 CD	0,12
Milho Palhada	18,82 D	0,07
Quirela	18,03 E	0,21
Quirela + Palha	17,84 EF	0,05
Café	17,27 F	0,06

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

O poder calorífico útil mais elevado dos resíduos de madeira foi a causa dos resultados de densidade energética terem sido maiores nos briquetes confeccionados com esses materiais (Tabela 1.9 do Capítulo 1). As maiores densidades aparentes foram apresentadas pelos briquetes de feijão e sorgo que se converteram em densidades energéticas intermediárias. A relação oposta foi verificada por Souza e Vale (2016) ao observarem que o comportamento da densidade energética se mostrou semelhante ao comportamento da densidade aparente, onde, de uma forma geral, maiores valores de densidade aparente determinaram maiores valores da densidade energética.

Correlações entre densidade energética e propriedades físicas e mecânicas auxiliam na identificação das suas principais influências e corroboram para o aprimoramento da eficiência energética de um biocombustível sólido. As análises de regressão com durabilidade, densidade aparente e resistência à força não foram significativas com a densidade energética ($p > 0,05$). No entanto, a umidade ($P=0,02$; correlação = $-0,42$) apresentou relação estatisticamente significativa no modelo linear com aquele parâmetro.

Souza e Vale (2016) também avaliaram briquetes produzidos com resíduos florestais e com resíduos agrícolas e verificaram uma superioridade dos briquetes de biomassa florestal em relação aos de resíduos agrícolas. Briquetes de cumaru chegaram a $19,5\text{GJ.m}^3$ e briquetes de tauari a $18,8\text{GJ.m}^3$. Por outro lado, com resíduos agrícolas, em briquetes de bagaço de cana obteve-se $18,0\text{GJ.m}^3$ e $17,3\text{GJ.m}^3$ em briquetes de torta de pinhão manso.

Barros (2012), analisando a densidade energética em briquetes de resíduos, encontrou valores inferiores aos encontrados neste trabalho relacionados ao sabugo de milho, ainda que com duas granulometrias distintas, sendo $17,45\text{MJ.m}^3$ (40 *Mesh*) e $14,13\text{MJ.m}^3$ (12 *Mesh*).

Em briquetes de resíduos de café, Protásio et al. (2012) concluíram que os briquetes *in natura* apresentaram densidade energética mais elevada do que os carbonizados, sendo $23,5$ e $22,8\text{GJ/m}^3$ respectivamente, em virtude da alta densidade aparente dos briquetes *in natura*.

Os briquetes de casca de café testados por Protásio et al. (2011) apresentaram a maior densidade energética ($23,7\text{GJ.m}^3$), em relação aos briquetes de resíduos de milho ($17,6\text{GJ.m}^3$) e de eucalipto ($17,4\text{GJ.m}^3$). Após a compactação, os autores observaram um aumento de aproximadamente 179%, 321% e 322% na densidade energética de casca de café moída, serragem de eucalipto e resíduos da colheita de milho, respectivamente.

Foi identificado neste trabalho que após a briquetagem, o resíduo de feijão apresentou um incremento na densidade energética em mais de 16 vezes em relação à condição do resíduo *in natura*, seguido da biomassa de palhada de milho (Figura 3.17). Isto é resultado da baixa densidade a granel desses resíduos e elevada densidade aparente dos seus briquetes, o que ressalta a importância da compactação desses resíduos.

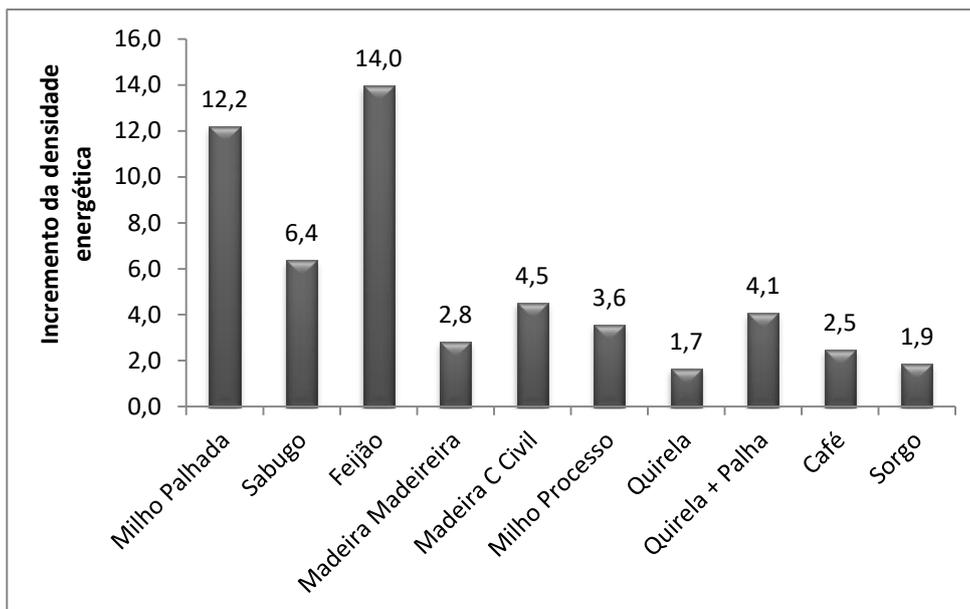


Figura 3.17. Incremento na densidade energética após a transformação dos resíduos em briquetes.

Almeida et al. (2015) verificaram um aumento de 2,67 vezes na quantidade de energia por unidade de volume dos briquetes de *Cupressus lusitanica* Mill em relação à madeira desta mesma espécie, inferior ao determinados nos briquetes de madeira madeireira e madeira de construção civil analisados aqui.

Os resíduos de milho palhada e feijão foram os que apresentaram menor densidade a granel, originando densidades energéticas igualmente baixas, por isso o incremento energético após a briquetagem foi maior.

4.6. Normas e padrões de qualidade de briquetes

Tendo em vista a uniformização das normas europeias e da ausência de normas brasileiras, os briquetes foram classificados conforme os parâmetros descritos nas duas categorias da certificação *ENplus*, conforme a Tabela 3.11.

Devido a diversidade de formas e tamanhos de briquetes, o manual de certificação *ENplus* não estabelece limites para propriedades como diâmetro, largura e comprimento, apenas que o formato seja mencionado pelo fabricante.

Sendo assim, os briquetes das biomassas estudadas encaixam-se satisfatoriamente nos padrões da certificação *ENplus* quanto ao poder calorífico, teor de umidade e densidade aparente. Quanto ao teor de cinzas, todos os briquetes resultaram em percentuais acima do limite, exceto os de madeira de madeireira. Outras análises

seriam necessárias para verificar outras propriedades analisadas pelo sistema de classificação, como os elementos químicos permitidos.

Tabela 3.11. Classificação dos briquetes produzidos conforme a certificação *ENplus* da Comissão Européia.

Briquetes	Poder calorífico		Teor de cinzas		Umidade		Densidade Aparente	
	<i>ENplus</i> A1	<i>ENplus</i> A2	<i>ENplus</i> A1	<i>ENplus</i> A2	<i>ENplus</i> A1	<i>ENplus</i> A2	<i>ENplus</i> A1	<i>ENplus</i> A2
Café	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Feijão	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Madeira C Civil	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Madeira Madeireira	Sim							
Milho Palhada	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Milho Processo	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Quirela	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Quirela + Palha	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Sabugo	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Sorgo	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim

O poder calorífico e o teor de cinzas referem-se aos ensaios realizados na condição de resíduos, antes da briquetagem, pois, ressalta-se que o processo é apenas físico e devido à ausência de agentes ligantes, não houve alterações dessas propriedades após a briquetagem.

5. CONCLUSÃO

As biomassas residuais testadas apresentaram bom desempenho quanto a capacidade de se submeterem ao processo de briquetagem sem adição de aglutinantes, com destaque para os briquetes de madeira madeireira, feijão, madeira de construção civil e milho palhada que conseguiram formar briquetes firmes, sem rachaduras e sem precisar de misturas.

O sabugo, apesar de ter proporcionado a formação de briquetes rígidos e sem fissuras, estufaram e desenvolveram fungos na superfície após 4 meses de produzidos. Tal questão sugere que seja analisada sua expansão volumétrica e a possibilidade de tratamento térmico após a densificação para evitar proliferação de microorganismos.

Os briquetes de feijão foram os que mais se destacaram em relação aos demais, devido seu melhor desempenho nos parâmetros: densidade aparente, resistência à compressão diametral, durabilidade, índice de combustibilidade e incremento na densidade energética. Sendo assim, apesar de ser um resíduo com poder calorífico superior abaixo da média dos demais, o processo de adensamento da palhada de feijão em forma de briquetes apresentou-se altamente vantajoso no aproveitamento desses resíduos como combustível sólido.

Capítulo 4: Análise de viabilidade econômica da produção de pellets e briquetes.

A agroindústria brasileira tem adquirido grande importância econômica e estratégica para o desenvolvimento do país, o que vem exigindo estudos mais complexos sobre diversas vertentes. Após analisar os aspectos técnicos da fabricação de pellets e briquetes a partir de resíduos, neste capítulo serão abordadas algumas análises com viés econômico e financeiro para verificar a viabilidade de implantação de um projeto fabril para estes produtos.

1. INTRODUÇÃO

As atividades agrícolas sempre tiveram grande importância no cenário econômico nacional, e com o passar dos anos este ramo cresceu abraçando as inovações tecnológicas e se modernizou para atender exigências de novos mercados. No entanto, a economia mundial torna-se cada vez mais incerta e dinâmica, exigindo um constante remodelamento dos empreendimentos.

Nesse sentido, surgem diversas alternativas estratégicas para tornar as agroempresas mais competitivas e resistentes ao mercado dinâmico globalizado, como a diversificação rural. Conforme afirmam Padilha et al. (2010), a diversificação consiste numa estratégia empresarial que busca produzir novos produtos ou serviços que sejam destinados a diferentes mercados. As razões para a adoção de estratégias de diversificação por muitas empresas estão relacionadas ao aproveitamento de oportunidades em negócios de elevado potencial de crescimento ou em negócios que de alguma forma permitam um melhor desempenho do negócio central.

Dessa forma, a diversificação traz maior segurança às unidades produtivas quanto às oscilações de determinada atividade e do mercado. Juntamente com a agregação de valor é a alternativa que proporciona o maior aumento de renda (SIMONETTI et al., 2011).

A sua adoção pode gerar ganhos econômicos diretos e indiretos vinculados, principalmente, à redução dos custos de produção, à obtenção de vantagens ambientais e à redução do impacto econômico oriundo de diversas crises no setor rural. Assim, a

diversificação é a melhor forma de evitar as incertezas e vulnerabilidades referentes ao clima, mercado, pragas e doenças (PELINSKI et al., 2006), por exemplo.

Por sua vez, quando se tem uma propriedade diversificada, que tem como produção principal a agroindústria, por exemplo, tem-se uma diversificação vertical, com agregação de valor dos produtos e com uma integração e sustentabilidade maior da própria propriedade (PELINSKI et al., 2006).

Walquil et al. (2013) também corroboram com o conhecimento de que as transformações no agronegócio têm sido intensas nos últimos anos, especialmente em questões que perpassam meio ambiente, incrementos tecnológicos e a necessidade de maior agregação de valor aos produtos voltados aos mercados internos e externos.

Segundo os mesmos autores, agregação de valor é frequentemente considerado o principal mecanismo propulsor de desenvolvimento econômico associado às agroindústrias rurais, e que também pode ser verificada a partir de outra perspectiva, associada à reestruturação das cadeias produtivas e redução dos custos de transação. Nesse enfoque, a agregação de valor passa a ser uma estratégia de desenvolvimento rural interessante quando os atores sociais possuem o controle sobre os principais elos da cadeia produtiva (produção das matérias-primas, fabricação dos alimentos, administração das unidades, comercialização direta, etc.).

Conforme definição dada pelo IBGE (2006), agroindústria rural se refere às atividades de transformação e beneficiamento de produtos agropecuários de origem animal ou vegetal, que foram realizadas em instalações próprias, comunitárias ou de terceiros, a partir de matéria-prima produzida no próprio estabelecimento agropecuário ou adquirida de outros produtores, desde que a destinação final do produto tivesse sido dada pelo produtor.

Nesse sentido, a instalação de uma agroindústria de beneficiamento insere-se dentro do contexto que envolve a diversificação da propriedade rural. Quando se trata de produtos subutilizados ou não aproveitados, como é o caso dos resíduos agrícolas, o benefício é ainda maior, pois além de agregar valor, o empreendimento investe na sustentabilidade.

A sustentabilidade tem ganhado destaque devido à crescente conscientização da necessidade de melhoria nas condições ambientais, econômicas e sociais. Mais que os benefícios à sociedade, a adoção de mecanismos sustentáveis tem sido estrategicamente pensada como uma forma de diferenciação de produtos e também para a inserção em alguns mercados (SILVA, 2012).

Esta é uma tendência que atinge também o setor agrícola. No entanto, a busca por uma agricultura sustentável envolve uma grande variedade de intrincados sistemas e a superposição de variáveis interdependentes (MARCATTO, 2002). De tal modo, nota-se a abrangência do termo sustentabilidade, que vai além de simplesmente não degradar o ambiente, incorporando questões de qualidade de vida, competitividade empresarial, resultados positivos, tecnologias limpas, utilização racional dos recursos, responsabilidade social, entre outros (SILVA, 2012).

Assim, é imprescindível que a ideia de sustentabilidade vá além das questões ambientais. Deve abranger aspectos comerciais e sociais de modo a se tornar atrativo para as grandes empresas, especialmente do agronegócio, onde se tem fortemente a utilização de insumos nocivos ao meio ambiente e práticas produtivas que causam danos.

Logo, a sustentabilidade tem sido uma questão chave no mercado competitivo. Devido à necessidade de minimizar os grandes impactos causados, sobretudo, na agricultura, muitas empresas têm incorporado ações sustentáveis às suas estratégias, seja por pressão da opinião pública, seja por busca pela vantagem competitiva (ROMEIRO, 2007). Assim, iniciativas que busquem a produção agrícola de forma sustentável, são bem-vindas, para que sejam minimizados os problemas enfrentados pelos produtores (SILVA, 2012), como a disposição de rejeitos.

Uma das ferramentas da gestão ambiental utilizada por empresas geradoras de resíduos é a logística reversa. Segundo Daher et al. (2006), logística reversa é um termo bastante genérico. Em seu sentido mais amplo, significa todas as operações relacionadas com a reutilização de produtos e materiais. Em meados dos anos 90, autores como Stock (1992) introduziam uma abordagem da logística reversa como a logística do retorno dos produtos, redução de recursos, reciclagem, e ações para substituir alguns materiais, reutilização de materiais, disposição final dos resíduos, reaproveitamento, reparação e refabricação de materiais.

De acordo com Revlog (2012), as três principais razões que levam as empresas a atuarem mais fortemente na Logística Reversa são: (1) Legislação Ambiental, que força as empresas a retornarem com seus produtos e cuidar do tratamento necessário; (2) benefícios econômicos do uso de produtos que retornam ao processo de produção, em detrimento dos altos custos do correto descarte do lixo; e (3) a crescente conscientização ambiental dos consumidores.

É importante notar que, embora a logística reversa envolva aspectos de recuperação, difere da mera gestão de resíduos, que objetiva a coleta e tratamento, sem que nenhum produto novo seja produzido eficientemente e efetivamente. Logística reversa se concentra na adição de novo valor a um produto que já tenha sido utilizado (KINOBE et al. 2012).

Para Cavé (2011), a reutilização dos resíduos sólidos é realizada por meio da logística reversa, para a qual os produtos usados são de responsabilidade dos produtores, aliado a setores criados para o tratamento especializado e parcerias com o setor público. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/10) corrobora para que não apenas o governo, mas os produtores e até os consumidores são responsáveis pela destinação e tratamento correto do seu material obsoleto, através do processo de logística reversa, ou seja, uma responsabilidade compartilhada entre sociedade, iniciativa privada e poder público pelo ciclo de vida dos produtos.

Neste contexto, o briquete (assim como os pellets) se mostra como um forte aliado no combate à destinação inadequada de resíduos no meio ambiente, agregando maior valor ao estudo da logística reversa, um tema que deve fazer parte da estrutura e do planejamento estratégico das empresas agrícolas, pois as exportações, principalmente, aumentam quando é identificado esse tipo de preocupação ecológica (PACIERE, 2009).

2. COMPARAÇÃO ENTRE OS PELLETS E BRIQUETES PRODUZIDOS.

É importante que as comparações entre os produtos gerados neste trabalho sejam realizadas para melhor visualização dos resultados na prática. O principal parâmetro que permite a comparação em termos de produção energética a ser dimensionado aqui é a densidade energética. Na Figura 4.1, o gráfico permite a comparação entre as biomassas *in natura*, como pellets e como briquetes.

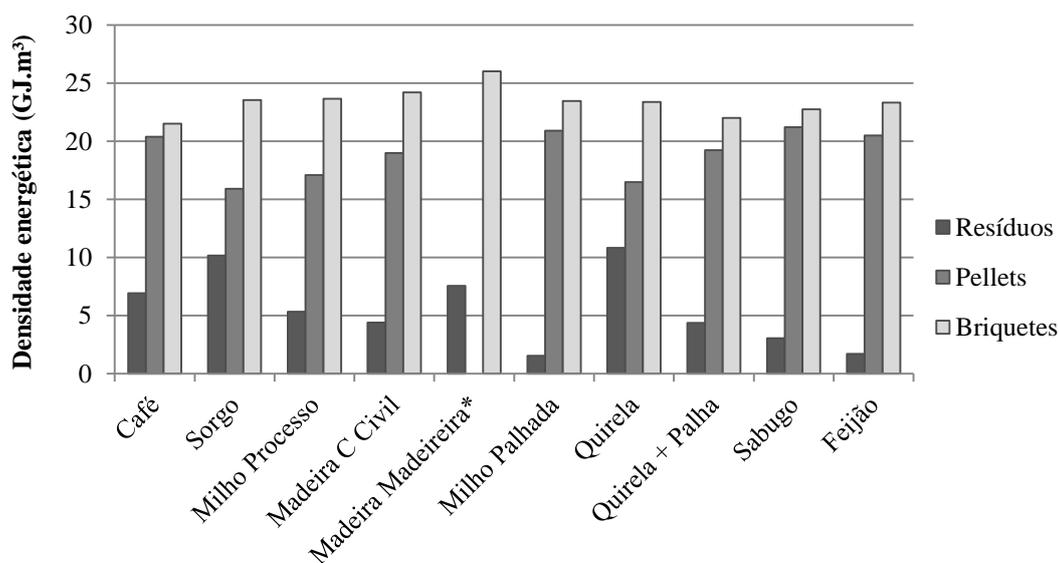


Figura 4.1. Comparativo da densidade energética nas três formas analisadas.

**A madeira de madeireira não formou pellets.*

Notoriamente a compactação elevou consideravelmente a densidade energética em todos os resíduos, principalmente na condição de briquetes. Logo, justifica-se os investimentos para transformação dos resíduos em produtos adensados como insumo energético. No entanto, é preciso considerar, ainda, outras variáveis que analisam a viabilidade econômica da implantação de um sistema de conversão de biomassa, tais como: custos de instalação, fabricação e manutenção, eficiência energética, logística, competitividade de mercado, entre outros.

Em uma comparação entre os pellets e briquetes através do índice de combustibilidade (ICOM), constata-se que os pellets apresentaram melhor desempenho (Figura 4.2). Os índices mais elevados indicam que durante a combustão os pellets são capazes de manter temperatura na zona de combustão por mais tempo com menor consumo mássico.

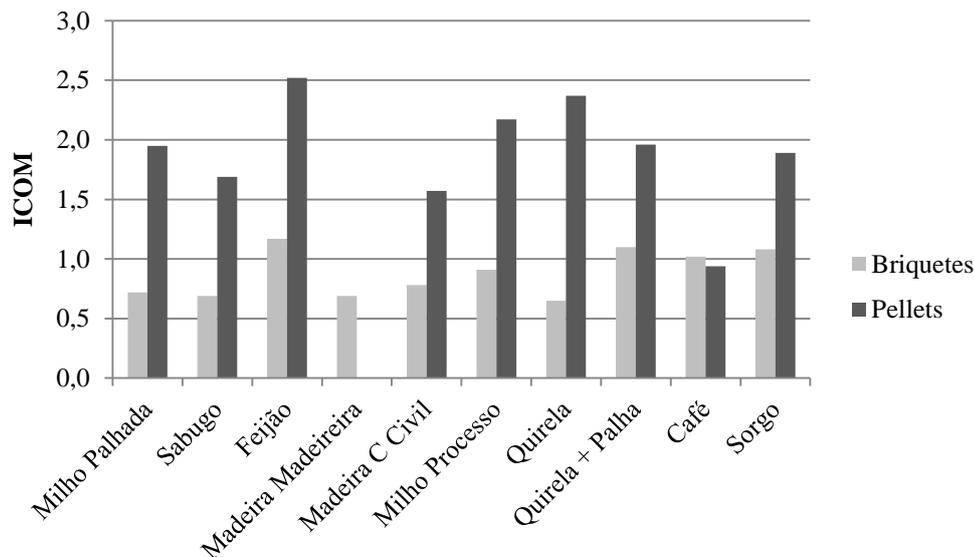


Figura 4.2. Comparativo entre os índices de combustão (ICOM) dos pellets e briquetes por tipo de matéria-prima.

No entanto, a escolha entre ambos deve se basear mais quanto à finalidade, sendo que os pellets costumam ser mais utilizados para uso doméstico e em menor escala e os briquetes para uso industrial, em maior escala.

3. CONSIDERAÇÕES METODOLÓGICAS DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE PELLETS E BRIQUETES

Segundo Barbosa (2008), para a implantação de uma fábrica de produção de pellets há necessidade de se proceder a vários investimentos, passando pela compra de terreno e construção de infraestruturas, equipamentos de produção e sua instalação, ferramentas e utensílios. Há ainda a necessidade do investimento em equipamentos de recolha e transporte de matéria-prima. O mesmo requisito refere-se à uma fábrica de briquetes.

Neste trabalho, tem-se como intuito incentivar com que os próprios empreendimentos agrícolas reaproveitem os resíduos gerados pelas culturas trabalhadas, reduzindo custos importantes como aquisição da matéria-prima e do terreno. Quéno (2015) ressalta a forte influência do preço da matéria prima na formação do VPL (valor presente líquido) e o alto risco que pesa sobre a lucratividade do negócio. Da mesma forma, para Sander (2011), o transporte da matéria-prima (resíduos) até a fábrica torna-se oneroso em função da baixa relação densidade/volume e, portanto, da baixa concentração energética por unidade de volume. Sendo assim, no caso de resíduos lignocelulósicos, a distância máxima economicamente viável é de 150 km.

Apesar de desconsiderar a aquisição de terreno, algumas premissas devem ser consideradas quanto à área disponível. Barbosa (2008) avalia que o terreno necessário para a implantação de uma fábrica de produção de adensados divide-se em três partes essenciais: uma área para o armazenamento de matéria-prima que permita o abastecimento contínuo da linha de produção; uma área para a instalação dos equipamentos da linha de produção; e por fim, uma área para o armazenamento da produção antes de se proceder à sua distribuição ou utilização.

A quantidade de matéria-prima disponível será o determinante para definir a área necessária, a capacidade de produção e os equipamentos a serem utilizados. A maior parte das indústrias de pellets pelo mundo é pequena, devido ao modelo de negócio baseado, primordialmente, em resíduos da indústria madeireira (RASGA, 2013). No Brasil, as empresas produtoras de pellets são geralmente de pequeno a médio porte, entre 500 e 1800 toneladas geradas por mês (QUÉNO, 2015).

Nesta prospecção será considerada a instalação de uma fábrica de pellets ou briquetes de pequeno a médio porte como atividade complementar em uma empresa rural produtora de resíduos. As fabricantes de máquinas mencionam uma faixa de capacidade mínima e máxima, pois dependerá da densidade da biomassa utilizada. Para permitir a comparação entre os produtos, considerou-se neste trabalho a possibilidade de aumento em 33% da capacidade instalada tanto para briquetadeiras quanto pelletizadoras, sendo a mínima de 2t/hora e a máxima de 2,5t/hora.

O levantamento baseou-se em trabalhos similares de projeção de fábricas de briquetes e pellets no Brasil nos últimos 12 anos. Além dessas referências, os orçamentos foram obtidos de pesquisas em sites especializados no mercado de agronegócio e de fabricantes de equipamentos.

3.1. Investimento inicial

Inicialmente é necessária a construção do espaço físico. Silva et al. (2006) consideram que uma briquetadeira que produza 1 t/hora requeira um espaço de 25m² para os equipamentos e 160m² para um galpão de estocagem com capacidade para armazenar 3000 sacos de 50kg. O custo da construção civil no Distrito Federal atualmente, segundo a SIDUSCON-DF, é de R\$1.283,55. Sendo assim, para uma fábrica que produza 2 t/hora, seria necessário uma área de 345m², que custaria em torno

de R\$442.824,75, incluindo mão-de-obra, material, despesas administrativas relacionadas à salários e encargos sociais e equipamentos como o aluguel de betoneira.

Para uma fábrica de pellets (1 t/h de capacidade), Sander (2011) estimou um espaço de 80m² para maquinário e 120m² para o galpão, o resultaria um custo aproximado de R\$ 256.000,00 para a construção. Como ambas as plantas são semelhantes, pode-se adotar as duas dimensões mencionadas para qualquer linha de produção desejada.

Além disso, deve-se considerar ainda nesta fase inicial a limpeza do terreno (escavações ou aterros), licenças, pavimentação de entorno e outras atividades periféricas.

3.2. Equipamentos

As linhas de produção de pellets e briquetes são semelhantes e envolvem um número de equipamentos e operações que dependerão do tamanho da planta industrial desejada. Segundo Schmidt (2015), a estrutura básica para o desenvolvimento desse tipo de projeto deve incluir: silo úmido e silo seco, moinho triturador, peneira giratória para classificação da biomassa, secador rotativo com fornalha, briquetadeira/peletizadora e embaladora. Geralmente inclui-se também, o resfriador, esteiras transportadoras, moegas de recepção e descarga, e misturador. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam exemplos de planta industrial para fabricação de pellets e briquetes, respectivamente, e os equipamentos básicos que as compõem, com capacidade de produção similar à estimada neste trabalho, onde se observam as semelhanças entre as duas plantas.

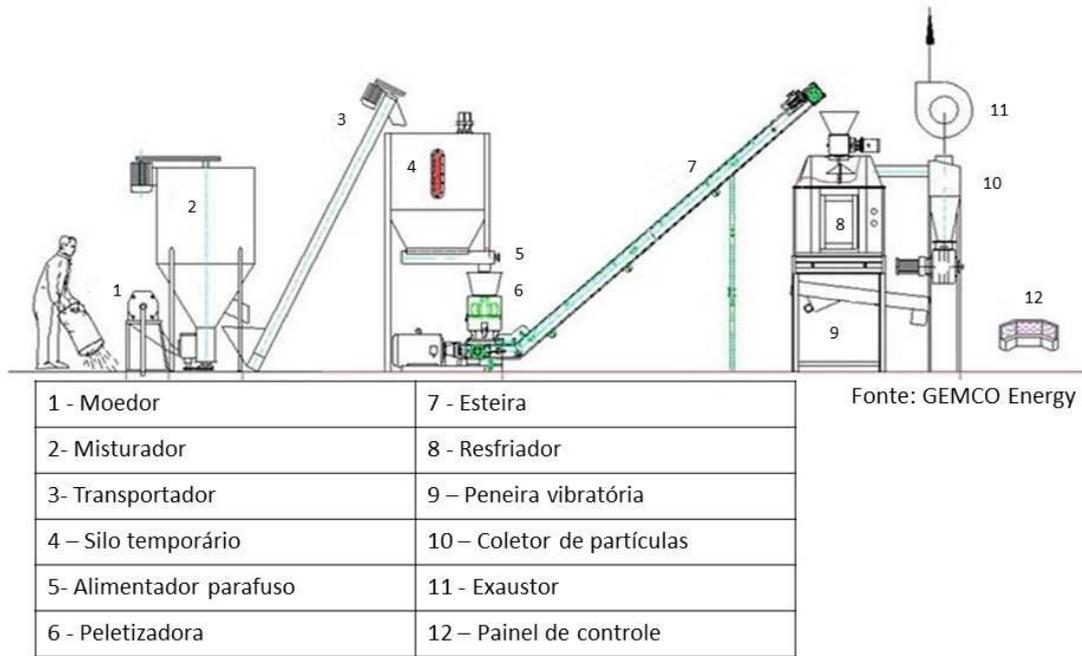


Figura 4.3. Exemplos de equipamentos que podem ser utilizados em uma planta industrial de pellets.

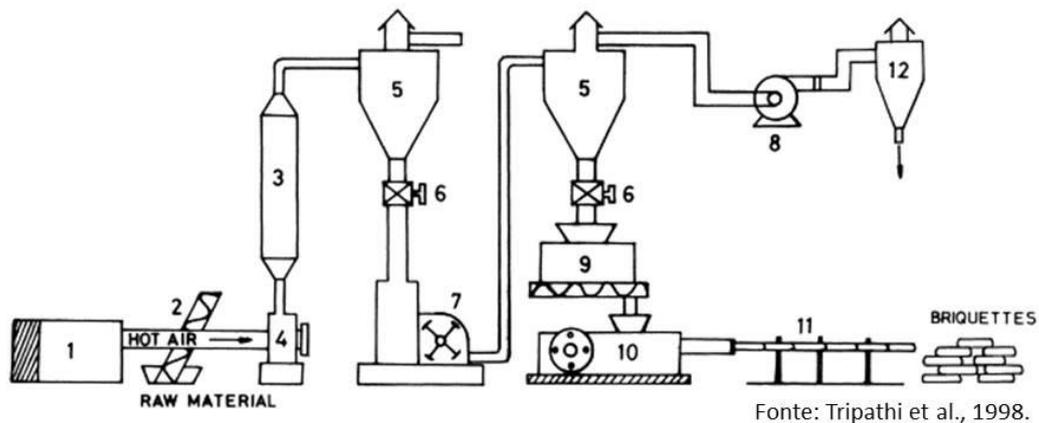


Figura 4.4. Exemplos de equipamentos que podem ser utilizados em uma planta industrial de briquetes.

No levantamento realizado por Schmidt (2015), os custos com aquisição de equipamentos básicos de uma fábrica de briquetes com capacidade de produção de 2ton/hora, foram estimados em R\$366.550,00, sendo necessário considerar ainda uma injeção de capital de giro de R\$20.000,00 inicialmente. No entanto, neste valor não estão incluso os equipamentos complementares.

Rasga (2013) apresentou um orçamento mais detalhado, no valor de R\$4.826.604,00 para uma fábrica de pellets com capacidade de produção de 3 t/hora. Em outro orçamento mais intermediário encontrado na literatura, Tavares (2013) levantou um investimento em um parque fabril completo de briquetagem no valor de R\$ 744.000,00, para uma fábrica com capacidade de 2ton/dia.

Atualmente no mercado brasileiro há briquetadeiras de pequeno porte com capacidade para produzir de 300 a 500kg/h e de médio/grande porte que produzem de 1.300 a 2.200Kg/h, e peletizadoras produzem de 10 a 200kg/h e outras que atingem 22.000 a 30.000kg/h.

Segundo a Receita Federal a depreciação de maquinários e utensílios é de 10%, considerando 10 anos de vida útil, e de 4% para edifícios, considerando a vida útil de 25 anos.

3.3. Mão-de-obra

Os custos de mão-de-obra associados à linha de produção de pellets dividem-se por várias tarefas, que implicam um trabalho contínuo durante o tempo de funcionamento da fábrica. A mão-de-obra necessária para laborar numa linha de produção é tanto maior quanto a dimensão da fábrica, ou seja, aumenta com a sua capacidade de produção. Outro fator que implica uma maior quantidade de trabalhadores é o número de turnos em que a fábrica opera, podendo atuar em até um máximo de três turnos diários de oito horas cada, sendo o custo da mão-de-obra mais elevado devido aos adicionais noturnos (BARBOSA, 2008).

Sendo assim, caso a fábrica decida ampliar a jornada de trabalho (hipótese levantada neste trabalho), também pode ser adotado 2 turnos de 8 horas cada, o que implicaria em um aumento do número de funcionários atuando em revezamento.

Considerando que a fábrica de pellets ou briquetes seria uma atividade agregada a um empreendimento já existente, é possível aproveitar a mão de obra administrativa disponível, sendo necessário contratar apenas os funcionários que atuarão na linha de produção. Como o processo é, em sua maior parte, automatizado, a mão-de-obra é

reduzida. Sendo assim, para uma linha de produção de médio porte que opere 8 horas por dia, seis dias na semana, seriam necessários no mínimo 3 funcionários, um para manusear a matéria-prima, um operador de briquetadeira/peletizadora e um embalador. Ainda que o empreendimento utilize a produção para autoconsumo, o embalador se faz relevante, pois o material precisa ser armazenado. Sander (2011) considera que sejam necessários dois operadores de briquetadeira/peletizadora.

Oliveira (2016) menciona que os custos com mão-de-obra são calculados sobre uma base salarial de R\$ 2.500,00 por funcionário, por turno (incluindo impostos e encargos sociais). Com isso, o autor calcula que estas despesas representem um custo de R\$27,47/ton em uma linha de briquetagem de 1 ton/h, e R\$15,11/ton em uma produção de 2 t/h. Na estrutura de pessoal deve-se considerar ainda: férias, FGTS, 13º salário e o pró-labore. Dependendo do regime de produção, deve-se incluir também o adicional noturno.

3.4. Custo de manutenção

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

Barbosa (2008) indica que também estão associadas despesas relativas à substituição de peças de rápido desgaste, substituição de óleos de lubrificação, avarias, entre outras. Estes custos variam com o tipo de equipamento e com o material a ser processado. No entanto, para uma linha de produção de pellets o autor conclui que os custos de manutenção são aproximadamente 4 €/ton.

Além disso, consideram-se custos de manutenção, todas as despesas necessárias ao funcionamento da fábrica como água, utensílios e ferramentas, combustíveis, taxas, seguros, contador, segurança, despesas administrativas se for o caso (material de escritório, internet, telefone) e energia, que precisa ser analisada com detalhes a seguir.

3.5. Consumo de energia elétrica

Os maiores consumos de energia verificam-se no processo de secagem, no processo de moagem e no processo de prensagem da biomassa. No entanto, segundo o levantamento do BNDES (2011), a demanda exata de energia depende das condições de produção: tamanho das partículas do insumo, teor de umidade, tecnologia e escala da

planta. Nesse sentido, Gentil (2008) indica o uso de descartes moveleiros e as serragens mais secas como preferência para a fabricação de briquetes, pois, 76,63% de toda energia para sua fabricação é usado para a secagem.

Assim, com base na potência dos equipamentos, pode-se estimar de maneira aproximada o consumo de energia em uma linha de produção. Partindo-se da premissa de que uma peletizadora que produza 2000kg/dia possua motor com potência de 40 CV (o equivalente a 30kWh), calcula-se que a máquina consumirá cerca de 5.760 kWh mensalmente, trabalhando 192 h/mês. Tomando-se como base que, segundo a Companhia de Eletricidade de Brasília (CEB), o custo da energia elétrica no Distrito Federal atualmente é de 0,452R\$/kWh, e a alíquota do PIS, CONFINS e ICMS em outubro/2018 foi de 0,65%, 2,97% e 18%, respectivamente, obteve o seguinte cálculo conforme Bauer e Silva (2013):

$$0,452/ 1- (0,0065 + 0,0297 + 0,25) = 0,452/0,7138 = 0,633R\$/kWh$$

Em funcionamento, o consumo equivale a:

- 192 h/mês = 5.760 kWh/mês = **R\$ 3.646,00**
- 384 h/mês = 11.520 kWh/mês = **R\$ 7.292,00**

Segundo a fabricante BIOMAX, uma briquetadeira com capacidade de 2 t/h possui um motor com 100 CV, o consumo de energia elétrica seria de 75 kWh, representando uma despesa de R\$6.836,40 mensalmente.

Em uma linha de produção básica os equipamentos que mais consomem energia elétrica são o secador, o moinho e a peletizadora ou briquetadeira. Tendo por exemplo um secador com capacidade de saída de até 2000 kg/h e potência instalada de 36,8 kWh (50 CV), a demanda de energia será de aproximadamente 7.065 kWh/mês. Da mesma forma, um moinho ou picador capaz de produzir de 0 a 25 m³/hora (60 CV) deverá consumir 8.478 kWh/mês.

Estima-se que esses três equipamentos sejam responsáveis por 80% do consumo de eletricidade, ou seja, juntos somam aproximadamente 21.300 kWh/mês e 255.600 kWh/ano, funcionando 8 horas por dia. Acrescentando os 20% dos demais equipamentos, tem-se um consumo em torno de 25.500 kWh/mês para o sistema completo. Barbosa (2008) afirma que a potência total instalada numa linha de produção de briquetagem pode variar entre 150 kW/ton/h e 250 kW/ton/h, sendo que o consumo de eletricidade pode variar entre 100 kWh/ton e 250 kWh/ton.

Consequentemente, a determinação da demanda mais precisa de energia depende de algumas condições de fabricação, como do tamanho das partículas da matéria-prima, do teor de umidade, da tecnologia e da escala de produção (RASGA, 2013).

3.6. Impostos

No Brasil os impostos são cobrados de acordo com o porte da pessoa jurídica. De tal modo que existem basicamente três formas de tributação:

a – *Simples*: conforme a Lei Complementar 123/2006, esta é a forma mais simplificada, tendo como base de apuração a receita bruta. Esta forma implica no recolhido mensal dos seguintes impostos: IRPJ, IPI, CSLL, COFINS, PIS/PASEP, contribuição para a seguridade social, ICMS e ISS. Enquadram-se as microempresas ou empresas de pequeno porte.

b – *Lucro presumido*: é a forma de tributação simplificada do Imposto de Renda das Pessoas Jurídicas (IRPJ) e Contribuição Social sobre o Lucro (CSLL). É regulamentado pelos artigos 516 a 528 do Regulamento do Imposto de Renda. Aplica-se à pessoa jurídica cuja receita bruta total, no ano-calendário anterior, tenha sido igual ou inferior a R\$78.000.000,00, desde que não esteja obrigada ao regime de tributação pelo lucro real.

c – *Lucro real*: se dá mediante a apuração contábil dos resultados, com os ajustes determinados pela legislação fiscal. Segundo a Lei 9.718/1998, estão obrigadas à apuração do Lucro Real as pessoas jurídicas cuja receita bruta total, no ano-calendário anterior, seja superior a R\$78.000.000,00.

Neste trabalho considerou-se a integralidade da carga tributária incidente sobre as atividades excluindo-se, portanto, os incentivos fiscais. Serão adotadas as alíquotas aplicadas à categoria lucro presumido, supondo-se que a empresa interessada em produzir os biocombustíveis sólidos faça parte de um grupo econômico intermediário.

A venda no mercado interno é fortemente impactada pelo alto custo tributário do Brasil; a incidência de impostos diretos como INSS, PIS, COFINS e o ICMS afetam diretamente o resultado final da operação. Caso a empresa adote o simples nacional, os impostos seriam reduzidos, trazendo um retorno maior, no entanto, pela natureza da atividade, isso limitaria os lucros empresa. Em todo o caso, é imprescindível uma avaliação contábil criteriosa para verificar se adoção é viável, pois, como explica Leão (2018), o ramo de atividades pode variar tanto, que o regime pode valer muito a pena para algumas indústrias e nem tanto para outras.

Caso os produtos sejam destinados à exportação, estarão beneficiados com alguns incentivos fiscais. Oliveira (2016) classifica esses incentivos como: imunidade quanto ao pagamento de IPI; imunidade quanto ao pagamento de ICMS; manutenção de créditos fiscais de IPI e ICMS nas compras de insumos de produtos exportados; isenção de PIS/PASEP e COFINS; isenção de impostos incidentes sobre operações financeiras relativas à exportação; ressarcimento do PIS/PASEP e COFINS; regime aduaneiro especial de *Drawback* (devolução de direitos de importação sobre matérias-primas em manufaturas a serem exportadas); e imunidade de CSLL nas exportações.

No entanto, Quéno (2015) acrescenta que a exportação exige um conjunto de outros custos e taxas portuárias (scanner, ISPS code, M.O. despachante, THC/Capatazia) somando um total de R\$50,00 por tonelada.

3.7. Produção residual necessária para atender a demanda de fabricação

A quantidade de biomassa necessária para produzir quantas toneladas se desejar de briquetes ou pellets depende primeiramente do teor de umidade que a matéria-prima possui. Como explica Oliveira (2016): quanto maior a umidade inicial do resíduo, maior é a quantidade de água que deve ser evaporada no processo de secagem, e menor será a quantidade de resíduos secos disponíveis para a fabricação de briquetes (ou pellets). O autor ainda indica como ideal a umidade máxima de 16%. Dentre as biomassas analisadas neste trabalho, apenas a quirela de milho apresentou percentual acima deste limite, com 17,2% de umidade, conforme exposto no Capítulo 1.

Oliveira (2016) também explica que para calcular quantas toneladas de um determinado resíduo são necessárias para produzir a quantidade desejada de briquetes é preciso primeiramente calcular a quantidade de água que será evaporada na secagem. Como não é possível, e nem necessário, retirar 100% da umidade, a redução será delimitada até o material atingir 10% deste teor. Sendo assim, com base na umidade dos resíduos, e considerando ainda, mais 10% de eventuais perdas de matéria-prima durante o processo, o quantitativo estimado de biomassa necessária para gerar 2 toneladas de adensados consta na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Estimativa da quantidade de resíduos necessários para produzir 2 toneladas de adensados.

Biomassa	T.U (%)	T.U (%) desejado	Quantidade de resíduos* (kg)
Milho Palhada	13,6	10	2.280
Milho Processo	12,5	10	2.256
Quirela + Palha	11,9	10	2.242
Quirela	17,2	10	2.358
Sabugo	11,7	10	2.238
Sorgo	12,5	10	2.254
Café	12,5	10	2.254
Feijão	8,6	10	1100
Madeira Madeireira	12,0	10	1122
Madeira C Civil	8,8	10	1100

*Incluindo 10% de perdas no processo.

A fornalha do secador pode ser abastecida com os mesmos resíduos a serem compactados, pois segundo Precci et al., (2001) os resíduos agrícolas são equivalentes à madeira quando comparados por seu poder calorífico, o que justifica seu uso como combustível mesmo que apresente energia de forma menos concentrada. Nesse caso, a quantidade de resíduos necessária deverá ser maior do que a estimada na Tabela 4.1, sendo necessário o cálculo da quantidade de calor necessária para evaporar a água presente na biomassa a ser seca. Segundo os preceitos físicos da calorimetria, esse cálculo pode ser realizado através da Equação 1.

$$Q_{total} = (m \times c \times (T_f - T_i)) + (m + Lv) \quad \text{Equação 1}$$

Onde: Q_{total} – quantidade de calor; m - massa (g); c - calor específico (1 cal/g°C); T_f – temperatura final; T_i – temperatura inicial; Lv – calor latente da vaporização (o da água é 540cal/g).

Entretanto, recomenda-se aqui a utilização de outras fontes como lenha ou carvão, pela praticidade no manuseio em relação aos resíduos *in natura*. Segundo Rios (2014), determinar uma quantidade padrão para o uso de lenha na secagem é um

desafio, pois depende de diversos fatores, que podem estar relacionadas à umidade da madeira, operação do secador, entre outros aspectos.

Tanimoto e Magalhães (s/d) monitoraram o consumo de lenha em um secador de grãos da marca Kepler Weber 60 t/h, por um período de 14 dias, funcionando 24 horas, chegaram a um consumo médio de aproximadamente 9 m³/dia. Se compararmos essa média com uma fornalha que funcione 8 horas/dia, então seriam necessários 3 m³ de lenha por dia. Segundo a cotação do IEA/Fundação Florestal/Florestar-SP, fechada em 08/2018, o preço da lenha de eucalipto para energia foi de R\$38,70/m³, o que geraria um custo de R\$116,00 por dia.

A partir dos dados da Tabela 4.1, é possível estimar a demanda de resíduos mensalmente e anualmente. E ainda, com base no fator residual encontrado na literatura para cada tipo de resíduo, chega-se a estimativa do quantitativo mínimo que cada cultura deve atingir para gerar a demanda residual necessária para manter a fábrica de pellets ou briquetes na menor capacidade (2 t/h). A Tabela 4.2 apresenta esses resultados, ressaltando-se que dentre os resíduos estudados, cinco são derivados de milho, portanto, foram condensados nos resultados desta tabela.

Ressalta-se que não foi possível lograr êxito na obtenção de pellets do resíduo de madeira de madeireira, e os resíduos de quirela de milho e sorgo não compactaram como briquetes sem adição de madeira. Portanto, briquetar esses resíduos implica em um custo adicional com aquisição de biomassa lenhosa, caso não haja esta disponibilidade no empreendimento.

Tabela 4.2. Estimativa da produção anual de resíduos para atender a demanda de 1 t/hora.

Biomassa	Demanda mensal (ton)	Demanda anual (ton)	Fator residual	Produção anual (ton)
Café	432.768	5.193.216	50% ¹	10.386.432
Milho*	2.183.808	26.201.088	57% ²	45.966.821
Sorgo**	432.768	5.193.216	--	--
Madeira de Madeireira	430.848	517.0176	10% ³	51.701.760
Madeira de C Civil	422.400	5.068.800	31% ⁴	16.350.968
Feijão	426.240	5.114.880	53% ⁵	9.650.717

* Resultados condensados dos resíduos: quirela, quirela + palha, milho palhada e sabugo.

** Não foram encontradas informações sobre o fator residual do sorgo.

¹IPEA (2012)

⁴Miranda et al (2009)

²Dias (2012)

⁵ABIB (2011).

³ CAPACITEC (2000): refere-se à indústria moveleira.

3.8. Indicadores de viabilidade econômica

O primeiro passo para a realização da avaliação econômica é a montagem do fluxo de caixa, isto é, a definição do fluxo de entradas e saídas de dinheiro durante o ciclo de vida planejado para o produto. A avaliação de alternativas de investimentos é desenvolvida a partir de fluxos de caixa operacionais. O fluxo de caixa utiliza de vários formatos de conhecimentos, sejam os explícitos e os tácitos, e seus resultados econômicos auxiliam na tomada de decisão. Esses resultados econômicos podem ser obtidos por meio da utilização de métodos de avaliação de investimentos, que por sua vez, necessitam da utilização de procedimentos específicos para auxiliarem no processo de tomada de decisão (RODRIGUES, 2014).

Assim, o fluxo de caixa de um projeto de investimento representa o saldo de tudo aquilo que entrará menos tudo o que sairá de recursos ao longo da execução do projeto. Segundo Rodrigues e Rosenfeld (s/d), o intervalo para o cálculo do fluxo de caixa depende da duração do ciclo de vida do produto. Um produto industrial, em geral é planejado para permanecer alguns anos no mercado e, por isso, o período utilizado é normalmente anual.

Nunes (2008) afirma que a análise de viabilidade é um estudo técnico de cunho financeiro que determinará o sucesso ou não de um projeto, através de previsões das entradas e saídas e diversos indicadores de viabilidade, como por exemplo: VPL (Valor Presente Líquido), TIR (Taxa Interna de Retorno), *Payback*, entre outros.

Segundo NOGUEIRA (2001), o valor presente líquido (VPL) é um indicador que permite avaliar a viabilidade econômica do projeto durante seu período de vida útil. O VPL representa, em valores monetários presentes, a diferença entre os recebimentos e os pagamentos de todo o projeto. Se o VPL for positivo, significa que foi recuperado o investimento inicial aplicado à taxa mínima de atratividade (TMA) (AFONSO JÚNIOR et al., 2006).

Gitman (2010) conceitua a TIR como sendo a taxa de desconto que iguala o VPL de uma oportunidade de investimento a zero. A empresa obterá esta taxa se aplicar recursos em um projeto e receber as entradas de caixa previstas. Para este autor, ao usar a TIR para tomada de decisão deve-se considerar os seguintes critérios: aceitar o projeto caso a TIR for maior que o custo de capital e rejeitar o projeto caso a TIR seja menor que o custo de capital.

Payback, que em português significa “retorno”, refere-se ao tempo de retorno do investimento inicial até o momento no qual o ganho acumulado se iguala ao valor deste investimento. Normalmente este período é medido em meses ou anos. Segundo Rezende e Oliveira (2001), não há um estabelecimento previamente definido do tempo necessário para que isso ocorra; quanto mais rápido os recursos investidos forem recuperados, mais conveniente ou mais viável economicamente é o projeto. Entretanto, sabe-se que todo e qualquer projeto necessita de um período para recuperação do investimento inicial, sendo esse período variável de atividade para atividade.

As análises de valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e *Payback* foram desenvolvidas no *software* Excel[®], bem como os fluxos de caixa e demais cálculos. Para calcular a TIR, compararam-se os fluxos de caixa dos cinco primeiros anos, considerando hipoteticamente uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 10%.

O *Payback* foi calculado conforme a Equação 2 indicada por Alves (2014):

$$Payback = \frac{\text{investimento inicial}}{\text{ganho no período}} \quad \text{Equação 2}$$

Para serem viáveis economicamente as empresas precisam maximizar seus resultados na atividade que desenvolve. Isso pode ocorrer de duas formas: através da maximização da produção para um dado custo total ou através da minimização do custo total para uma dada produção. Assim sendo os Custos Totais de produção (CT) formam o conjunto de despesas realizadas pela empresa para produzir uma determinada quantidade de produtos. Esses custos são divididos em Custos Fixos (CF) e Custos Variáveis (CV) (CHIAVENATO, 1980), de acordo com a Equação 3.

$$CT = CF + CV \quad \text{Equação 3}$$

A partir disso é possível calcular o Custo Total Unitário (CTU) do produto, onde se definirá a margem de lucro que será aplicada e conseqüentemente o preço de venda. O CTU consiste na razão entre o Custo Total da Produção e a quantidade produzida.

Além disso, determinou-se o Ponto de Equilíbrio (PE) através da Equação 4, indicada por SEBRAE (2018):

$$PE = \frac{CF}{RB - CV} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

CF = custo fixo;

RB= receita bruta;

CV= custos variáveis

3.9. Comercialização

Em cada cadeia produtiva (ou melhor, em cada elo específico de uma cadeia), diferentes formas de comercialização têm se mostrado mais ou menos adequadas às características dos produtos, agentes e instituições envolvidas. No caso da agroindústria rural, a heterogeneidade faz com que a definição do canal de comercialização mais adequado varie em função de múltiplos fatores. A escolha entre a venda direta para consumidores, cooperativas, governos ou intermediários revela-se uma equação complexa, na qual é necessário considerar a diversidade social, cultural, política, econômica e institucional dentro da qual as unidades operam (WAQUIL et al., 2013).

Para planejar a capacidade de produção, é necessário estimar a demanda de vendas. No entanto, por se tratar de um mercado relativamente novo no Brasil, a demanda por clientela ainda é um grande desafio para os produtores, uma realidade que requer a inclusão de despesas comerciais que envolvam marketing e publicidade e propaganda para divulgação dos produtos.

Gentil (2008) em sua pesquisa de levantamento de preço de briquetes comercializados no Brasil, afirma que o briquete de madeira, por ser um produto menos conhecido do que a lenha pelos entrevistados, ainda não tem mercado organizado, de preços estáveis e operando num mercado de concorrência não-perfeita. Por conta disso, o mercado de briquete ainda não seria tomador de preço. Cada região, produto, consumidor e economia local para o briquete têm preços e custos diferentes; daí acreditar-se nesta diversidade de informações, ora a favor da lenha e ora a favor do briquete.

Alguns resíduos *in natura* podem ser comercializados, mas sem grande valorização no mercado. Em uma pesquisa no site MF Rural é possível encontrar, por exemplo, resíduos de milho (grãos, refugo e sabugo triturados) sendo vendidos por no máximo R\$300,00 a tonelada, enquanto pellets são vendidos pelo preço médio de R\$ 565,00/tonelada e briquetes a R\$325,00/tonelada.

Uma importante questão que deve ser avaliada é que os biocombustíveis sólidos são comercializados por massa e não por energia. No entanto, o interessante no

consumo final é a quantidade de energia que o produto adquirido pode gerar. Nesse sentido, Tavares (2013) menciona que as biomassas secas possuem mais calor disponível e as úmidas menos, ainda que tenham o mesmo peso. Logo, segundo Gentil (2008), quanto menor o teor de umidade e o preço do briquete, assim como maior o seu poder calorífico superior, mais competitivo ele será no mercado. Para este autor, o fato de o consumidor comparar preço e não energia é um dos grandes entraves para o crescimento da produção e venda de briquetes e pellets. Sendo assim, o parâmetro correto na comparação dos preços entre dois biocombustíveis deveria ser a energia efetivamente disponibilizada, calculada através do poder calorífico do material.

3.10. Definição dos cenários

O briquete é um produto de valor agregado, baixa tecnologia e exige escala para ser economicamente viável. Em função disto indústrias de briquetes e de pellets chegam a trabalhar em até três turnos diários de oito horas para diluir os custos fixos (GARRISON e NOREEN, 2001; PEREIRA, 2006).

Desse modo, para facilitar a análise de viabilidade técnica e econômica foram montados 4 cenários que permitem visualizar algumas possibilidades tangíveis, com capacidades e jornada de produção distintos, conforme explica-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Descrição dos cenários prospectivos escolhidos para avaliar a produção de pellets ou briquetes.

	CENÁRIO 1 8 h/dia	CENÁRIO 2 8h/dia	CENÁRIO 3 16h/dia	CENÁRIO 4 16h/dia
Capacidade de produção	2t/hora 16t/dia 96t/semana 384t/mês 4608t/ano	2,5t/hora 20t/dia 120t/semana 480t/mês 5760 t/ano	2t/hora 32t/dia 192t/semana 768t/mês 9216t/ano	2,5t/hora 40t/dia 240t/semana 960t/mês 11520t/ano

4 RESULTADOS

4.1. Investimentos e Custos Fixos e Variáveis

A Tabela 4.4 apresenta a estimativa de investimento inicial necessário para instalação de uma fábrica de pellets ou briquetes com capacidade para produzir de 2.000 a 2.500 t/hora.

Tabela 4.4. Investimento inicial para implantação do parque fabril.

Investimento inicial	Orçamento	Fonte	Depreciação anual
Equipamentos	R\$ 606.650,00	Site MF Rural	10%
Instalação industrial	R\$ 25.000,00	Sander (2011)	
Obras civis	R\$ 442.407,00	Pesquisa própria	4%
Projeto de engenharia	R\$ 5.000,00	Tavares (2013)	
Projeto elétrico	R\$ 5.000,00	Tavares (2013)	
Utensílios	R\$ 5.000,00	Pesquisa própria	4%
Taxas	R\$ 70.000,00	Rasga (2013)	
Frete e montagens	R\$ 40.000,00	Tavares (2013)	
Treinamento de pessoal	R\$ 5.000,00	Pesquisa própria	
TOTAL	R\$ 1.204.457,00		

Os custos fixos (Tabela 4.5) envolvem os valores mensais destinados manutenção da mão-de-obra operacional e despesas administrativas, lembrando que demais funcionários de apoio administrativo não estão relacionados. Os custos fixos são os mesmos para a fabricação tanto de briquetes como pellets, no entanto, há diferenciação quanto ao regime produtivo, pois a duplicação do turno de trabalho também requer contratação do dobro de funcionários.

Tabela 4.5. Custos fixos mensais.

CUSTO FIXOS	Valor mensal	Fonte
Mão-de-obra		
Jornada de 8h -----	R\$ 7.500,00	Oliveira (2016)
Jornada de 16h -----	R\$ 15.000,00	
Seguros	R\$ 325,00	Tavares (2013)
Despesas comerciais	R\$ 4.000,00	Sander (2011)
Despesas bancárias	R\$ 120,00	Schmidt (2015)
Contador	R\$ 900,00	Pesquisa própria
TOTAL	R\$ 12.845,00	8h
	R\$ 20.345,00	16h

Quanto maior a produção maior serão custos variáveis, que abrange os gastos com manutenção do maquinário, embalagem, combustíveis, energia, lenha e frete. Além disso, há diferença entre os produtos quanto aos impostos aplicados, pois o percentual é sobre a venda, e ambos possuem preços distintos no mercado.

Quanto ao frete de entrega, Tavares (2013) indica que o custo seja de 26 a 30% do valor do produto, portanto, adotou-se o percentual de 26% em cima da média de

preço dos dois produtos. O pró-labore é de livre decisão do administrador, portanto, considerou-se seu aumento apenas de acordo com a jornada de produção. Desse modo, os custos variáveis atuarão de acordo com o cenário estabelecido conforme exposto da Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Custos variáveis mensais de acordo com o cenário desenvolvido.

Itens	CUSTO VARIÁVEL MENSAL (R\$)				Fonte	
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4		
Manutenção	1.250	1.250	2.500	2.500	Tavares (2013)	
Embalagem	9.984	12.480	19.968	24.960	MF Rural	
Combustível e lubrificantes	650	845	1.300	1.690	Sander (2011)	
Energia	16.000	20.800	16.000	41.600	Pesquisa própria*	
Pró-labore	4.000	5.200	8.000	8.000	Premissa da autora	
Lenha (fornalha)	2.784	3.619,3	5.568	7.238,4	Pesquisa própria**	
Frete de entrega	44.428,8	55.536	88.857,6	111.072	Tavares (2013)	
Impostos	Briquetes	21.964,8	27.456	43.929,6	54.912	Schmidt (2015)
	Pellets	38.184,9	47.731,2	76.369,9	95.462,4	
TOTAL		101.061,6	127.186,3	186.123,2	251.972,4	Briquetes
		117.281,7	147.461,5	218563,5	292.522,8	Pellets

*Conforme explicado no item 3.5.

** Conforme explicado no item 3.7.

4.2. Cenários

Com base nos preços pesquisados vigentes no mercado e nos custos determinados, pode-se desenhar o desempenho econômico e financeiro do projeto fabril de acordo com os cenários estabelecidos para cada tipo de produto. Para as receitas brutas, será considerado que no ano inicial a fábrica opere com 80% da sua capacidade chegando a 100% em 3 anos. Para todos os cenários, considera-se o funcionamento da fábrica durante 6 dias por semana e 12 meses ao ano.

Calculou-se também o custo fixo unitário (CFU), o custo variável unitário (CVU) e o custo total unitário (CTU) por tonelada, a partir dos quais é possível estabelecer o preço mínimo a ser cobrado por cada produto a fim de obter a

lucratividade. Assim, é possível projetar um fluxo de caixa, com base nas despesas e receitas inferidas, permitindo visualizar todas as entradas e saídas de valores anuais, no horizonte de 5 anos, considerando ainda a injeção de um capital de giro de R\$ 20.000,00.

Cenário 1:

Este cenário simula a fábrica operando 8 horas por dia, com 3 funcionários, produzindo 2 t/h, de pellets ou briquetes. A receita bruta estimada encontra-se na Tabela 4.7, já os custos unitários estão dispostos em seguida na Tabela 4.8.

Tabela 4.7. Projeção das receitas brutas da fábrica operando com capacidade progressiva no horizonte de 3 anos para o Cenário 1.

Produtos	ANO		
	1	2	3
BRIQUETES			
Capacidade operacional	80%	90%	100%
Produção (t)	3.686	4.147	4.608
Receita Bruta das vendas (R\$)	1.198.080,00	1.347.840,00	1.497.600,00
PELLETS			
Capacidade operacional	80%	90%	100%
Produção (t)	3.686	4.147	4.608
Receita Bruta das vendas (R\$)	2.082.816,00	2.343.168,00	2.603.520,00

Tabela 4.8. Custos unitários dos produtos de acordo com o Cenário 1.

Produto	Briquetes	Pellets
Custo Total Unitário	R\$ 296,63	R\$ 372,32
Custo Fixo Unitário	R\$ 33,45	R\$ 33,45
Custo Variável Unitário	R\$ 263,18	R\$ 305,42

O ponto de equilíbrio calculado para este cenário foi 54% para briquetes e de 13% para pellets. Assim, utilizando esses percentuais sobre a receita bruta mensal, conclui-se que seria necessário vender no mínimo R\$67.530,08 de briquetes ou R\$27.958,47 de pellets por mês para a empresa não ter nem lucro nem prejuízo. No entanto, ao analisar o fluxo de caixa anual, o investimento inicial não consegue ser recuperado com as vendas de briquetes, apenas de pellets, conforme a Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Fluxo de caixa do projeto fabril de pellets e briquetes de acordo com o Cenário 1.

FLUXO DE CAIXA - BRIQUETES - 2 tonelada/hora						
DESCRIÇÃO	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5	
Investimento inicial	-R\$ 1.204.457,00	0	0	0	0	
Saldo inicial	R\$ 20.000,00	-R\$1.353.256,20	-R\$ 1.483.819,88	-R\$ 1.497.570,76	-R\$ 1.511.321,64	
RECEITA DAS VENDAS (+)	R\$ 1.198.080,00	R\$ 1.347.840,00	R\$ 1.497.600,00	R\$ 1.497.600,00	R\$ 1.497.600,00	
TOTAL DE SAÍDAS (-)	-R\$ 1.366.879,20	-R\$1.478.403,68	-R\$ 1.511.350,88	-R\$ 1.511.350,88	-R\$ 1.511.350,88	
Custos fixos	-R\$ 154.140,00					
Custos variáveis	-R\$ 949.161,60					
Impostos	-R\$ 263.577,60	-R\$ 296.524,80	-R\$ 329.472,00	-R\$ 329.472,00	-R\$ 329.472,00	
Depreciação	R\$ 0	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	
SALDO	-R\$ 1.353.256,20	-R\$1.483.819,88	-R\$ 1.497.570,76	-R\$ 1.511.321,64	-R\$ 1.525.072,52	
FLUXO DE CAIXA - PELLETS - 2 tonelada/hora						
DESCRIÇÃO	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5	
Investimento inicial	-R\$ 1.204.457,00	0	0	0	0	
Saldo inicial	R\$ 20.000,00	-R\$ 663.162,12	-R\$ 17.369,96	R\$ 831.496,76	R\$ 1.680.363,48	
RECEITA DAS VENDAS (+)	R\$ 2.082.816,00	R\$ 2.343.168,00	R\$ 2.603.520,00	R\$ 2.603.520,00	R\$ 2.603.520,00	
TOTAL DE SAÍDAS (-)	-R\$ 1.561.521,12	-R\$ 1.697.375,84	-R\$ 1.754.653,28	-R\$ 1.754.653,28	-R\$ 1.754.653,28	
Custos fixos	-R\$ 154.140,00					
Custos variáveis	-R\$ 949.161,60					
Impostos	-R\$ 458.219,52	-R\$ 515.496,96	-R\$ 572.774,40	-R\$ 572.774,40	-R\$ 572.774,40	
Depreciação	R\$ 0	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	
SALDO	-R\$ 663.162,12	-R\$ 17.369,96	R\$ 831.496,76	R\$ 1.680.363,48	R\$ 2.529.230,20	

Observa-se neste cenário que apesar de ambos os produtos apresentarem um custo unitário abaixo do preço de mercado, a margem de lucro na venda de briquetes é insuficiente para cobrir os custos de manutenção e prover um retorno do valor investido. O fluxo de caixa para briquetes demonstrou que as despesas se acumulam e aumentam ao longo dos anos sem chance de adquirir saldo positivo, mesmo com o atingimento da capacidade máxima da fábrica.

Quanto aos pellets, a margem de lucro permite que sua produção apresente lucratividade a partir do terceiro ano, com retorno do investimento e manutenção autossuficiente de todo o sistema.

Cenário 2:

Nesta situação hipotética se analisa a possibilidade de atingir a capacidade máxima de produção, com o incremento de 30% da produtividade, chegando a 2,5 t/hora e 480 t/semana. A carga horária diária de trabalho seria de 8 horas com três funcionários. Sendo assim, as receitas ao longo de três anos ficam dispostas conforme a Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Projeção das receitas brutas da fábrica operando com capacidade progressiva no horizonte de 3 anos para o Cenário 2.

Produtos	ANO		
	1	2	3
BRIQUETES			
Capacidade operacional	80%	90%	100%
Produção (t)	4.608	5.184	5.760
Receita Bruta das vendas (R\$)	R\$ 1.497.600,00	R\$ 1.684.800,00	R\$ 1.872.000,00
PELLETS			
Capacidade operacional	80%	90%	100%
Produção (t)	4.608	5.184	5.760
Receita Bruta das vendas (R\$)	R\$ 2.603.520,00	R\$ 2.928.960,00	R\$ 3.254.400,00

Com isso, os custos unitários dispõem-se conforme Tabela 4.11 e o fluxo de caixa de acordo com a Tabela 4.12.

Tabela 4.11. Custos unitários dos produtos de acordo com o cenário 2.

	Briquetes	Pellets
Custo Total Unitário (CTU)	R\$ 289,23	R\$ 331,47
Custo Fixo Unitário (CFU)	R\$ 26,76	R\$ 26,76
Custo Variável Unitário (CVU)	R\$ 262,47	R\$ 304,71

Tabela 4.12. Fluxo de caixa do cenário 2.

FLUXO DE CAIXA PARA BRIQUETES - 2,5 tonelada/hora					
DESCRIÇÃO	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5
Investimento inicial	-R\$ 1.204.457,00	0	0	0	0
Saldo inicial	R\$ 20.000,00	-R\$ 1.352.832,59	-R\$ 1.453.769,46	-R\$ 1.408.690,32	-R\$ 1.363.611,19
RECEITA DAS VENDAS (+)	R\$ 1.497.600,00	R\$ 1.684.800,00	R\$ 1.872.000,00	R\$ 1.872.000,00	R\$ 1.872.000,00
TOTAL DE SAÍDAS (-)	-R\$ 1.665.975,59	-R\$ 1.785.736,87	-R\$ 1.826.920,87	-R\$ 1.826.920,87	-R\$ 1.826.920,87
Custos fixos	-R\$ 154.140,00				
Custos variáveis	-R\$ 1.182.363,59				
Impostos	-R\$ 329.472,00	-R\$ 370.656,00	-R\$ 411.840,00	-R\$ 411.840,00	-R\$ 411.840,00
Depreciação	-	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28
SALDO	-R\$ 1.352.832,59	-R\$ 1.453.769,46	-R\$ 1.408.690,32	-R\$ 1.363.611,19	-R\$ 1.318.532,06
FLUXO DE CAIXA PARA PELLETS - 2,5 tonelada/hora					
DESCRIÇÃO	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5
Investimento inicial	-R\$ 1.204.457,00	0	0	0	0
Saldo inicial	R\$ 20.000,00	-R\$ 490.214,99	R\$ 379.292,94	R\$ 1.502.644,08	R\$ 2.625.995,21
RECEITA DAS VENDAS (+)	R\$ 2.603.520,00	R\$ 2.928.960,00	R\$ 3.254.400,00	R\$ 3.254.400,00	R\$ 3.254.400,00
TOTAL DE SAÍDAS (-)	-R\$ 763.729,19	-R\$ 770.709,67	-R\$ 699.112,87	-R\$ 699.112,87	-R\$ 699.112,87
Custos fixos	-R\$ 154.140,00				
Custos variáveis	-R\$ 1.182.363,59				
Impostos	-R\$ 572.774,40	-R\$ 644.371,20	-R\$ 715.968,00	-R\$ 715.968,00	-R\$ 715.968,00
Depreciação	-	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28
SALDO	-R\$ 490.214,99	R\$ 379.292,94	R\$ 1.502.644,08	R\$ 2.625.995,21	R\$ 3.749.346,34

O incremento de 30% da capacidade produtiva neste cenário incidu em uma diminuição de 11% no custo unitário de produção de pellets e apenas 2,3% no custo de briquetes. Isto porque este acréscimo na linha de produção requer proporcionalmente mais despesas com material de embalagem, combustíveis e lubrificantes, energia elétrica, lenha para alimentar a fornalha e frete de entrega. Sendo assim, verificou-se no fluxo de caixa que este cenário ainda é insuficiente para adquirir um retorno econômico com a produção de briquetes, apenas com pellets, que já apresenta saldo positivo no segundo ano.

O percentual do ponto de equilíbrio no cenário 2 foi inferior ao cenário anterior, sendo de 43% para produção de briquetes e 10% para pellets. Em termos monetários os valores se equiparam em relação ao primeiro cenário, sendo de R\$66.763,51 e R\$27.882,23, para os respectivos produtivos, devido ao aumento da receita da bruta.

Cenário 3:

Neste cenário projeta-se a possibilidade de dobrar a jornada de trabalho diária para 16 horas, produzindo 2 toneladas/hora, consistindo em um dobro de funcionários na operação, o que eleva os custos fixos. Os custos variáveis também são dobrados, inclusive o pró-labore, que nos cenários anteriores desconsiderou-se qualquer alteração. Logo, as receitas brutas nesse prospecto estão estabelecidas na Tabela 4.13 e os custos unitários na Tabela 4.14, bem como o fluxo de caixa na Tabela 4.15.

Tabela 4.13. Projeção das receitas brutas da fábrica operando com capacidade progressiva no horizonte de 3 anos para o Cenário 3.

Produtos	ANO		
	1	2	3
BRIQUETES			
Capacidade operacional	80%	90%	100%
Produção (t)	7372,8	8294,4	9216
Receita Bruta das vendas (R\$)	R\$ 2.396.160,00	R\$ 2.695.680,00	R\$ 2.995.200,00
PELLETS			
Capacidade operacional	80%	90%	100%
Produção (t)	7372,8	8294,4	9216
Receita Bruta das vendas (R\$)	R\$ 4.165.632,00	R\$ 4.686.336,00	R\$ 5.207.040,00

Tabela 4.14. Custos unitários dos produtos de acordo com o cenário 3.

	Briquetes	Pellets
Custo Total Unitário (CTU)	R\$ 289,67	R\$ 331,91
Custo Fixo Unitário (CFU)	R\$ 26,49	R\$ 26,49
Custo Variável Unitário (CVU)	R\$ 263,18	R\$ 305,42

Tabela 4.15. Fluxo de caixa para o cenário 3.

FLUXO DE CAIXA PARA BRIQUETES - 2 tonelada/hora					
DESCRIÇÃO	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5
Investimento inicial	-R\$ 1.204.457,00	0	0	0	0
Saldo inicial	R\$ 20.000,00	-R\$ 1.457.915,40	-R\$ 1.576.325,48	-R\$ 1.461.109,96	-R\$ 1.345.894,44
RECEITA DAS VENDAS (+)	R\$ 2.396.160,00	R\$ 2.695.680,00	R\$ 2.995.200,00	R\$ 2.995.200,00	R\$ 2.995.200,00
TOTAL DE SAÍDAS (-)	-R\$ 2.669.618,40	-R\$ 2.814.090,08	-R\$ 2.879.984,48	-R\$ 2.879.984,48	-R\$ 2.879.984,48
Custos fixos	-R\$ 244.140,00				
Custos variáveis	-R\$ 1.898.323,20				
Impostos	-R\$ 527.155,20	-R\$ 593.049,60	-R\$ 658.944,00	-R\$ 658.944,00	-R\$ 658.944,00
Depreciação	-	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28
SALDO	-R\$ 1.457.915,40	-R\$ 1.576.325,48	-R\$ 1.461.109,96	-R\$ 1.345.894,44	-R\$ 1.230.678,92
FLUXO DE CAIXA PARA PELLETS - 2 tonelada/hora					
DESCRIÇÃO	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5
Investimento inicial	-R\$ 1.204.457,00	0	0	0	0
Saldo inicial	R\$ 20.000,00	-R\$ 77.727,24	R\$ 1.356.574,36	R\$ 3.197.025,08	R\$ 5.037.475,80
RECEITA DAS VENDAS (+)	R\$ 4.165.632,00	R\$ 4.686.336,00	R\$ 5.207.040,00	R\$ 5.207.040,00	R\$ 5.207.040,00
TOTAL DE SAÍDAS (-)	-R\$ 3.058.902,24	-R\$ 3.252.034,40	-R\$ 3.366.589,28	-R\$ 3.366.589,28	-R\$ 3.366.589,28
Custos fixos	-R\$ 244.140,00				
Custos variáveis	-R\$ 1.898.323,20				
Impostos	-R\$ 916.439,04	-R\$ 1.030.993,92	-R\$ 1.145.548,80	-R\$ 1.145.548,80	-R\$ 1.145.548,80
Depreciação	-	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28
SALDO	-R\$ 77.727,24	R\$ 1.356.574,36	R\$ 3.197.025,08	R\$ 5.037.475,80	R\$ 6.877.926,52

De acordo com a Tabela 4.14, observa-se que os custos unitários para produzir briquetes e pellets não diferenciaram em relação ao Cenário 2, ou seja, o aumento da jornada diária de trabalho não elevou a margem de lucro. Ainda assim, com aumento da produção diária e da receita bruta o fluxo de caixa apresentou alta recuperação a partir do segundo ano (Tabela 4.15). Quanto aos briquetes, os saldos anuais continuam negativos demonstrando a inviabilidade desta projeção para este produto.

Neste cenário, os pontos de equilíbrio da produção de briquetes e pellets atingiram os mesmos percentuais do Cenário 2, ou seja, 43% e 10%, respectivamente. A lógica do ponto de equilíbrio é a de que quanto maior o indicador, maior é o risco do negócio. Logo, para atingir o equilíbrio neste prospecto, seria necessário o montante de R\$ 106.959,86 em venda de briquetes e de apenas R\$ 44.283,00 de pellets por mês.

Cenário 4:

O contexto deste último cenário retrata a fábrica atuando na capacidade máxima projetada, ou seja, com incremento de 30% e produzindo durante 16 horas diariamente. Assim, seriam manufaturados 2,5 t/hora de briquetes ou pellets, atingindo o quantitativo de 960 t/mês. Com isso, as receitas brutas atingem patamares mais elevados, conforme a Tabela 4.16.

Tabela 4.16. Projeção das receitas brutas da fábrica operando com capacidade progressiva no horizonte de 3 anos para o Cenário 4.

Produtos	ANO		
	1	2	3
BRIQUETES			
Capacidade operacional	80%	90%	100%
Produção (t)	9.216	10.368	11.520
Receita Bruta das vendas (R\$)	R\$ 2.995.200,00	R\$ 3.369.600,00	R\$ 3.744.000,00
PELLETS			
Capacidade operacional	80%	90%	100%
Produção (t)	9.216	10.368	11.520
Receita Bruta das vendas (R\$)	R\$ 5.207.040,00	R\$ 5.857.920,00	R\$ 6.508.800,00

Este prospecto foi o que apresentou os menores custos totais unitários dos produtos analisados, influenciado principalmente pela queda dos custos fixos individuais (Tabela 4.17).

Tabela 4.17. Custos unitários dos produtos de acordo com o cenário 4.

	Briquetes	Pellets
Custo Total Unitário (CTU)	R\$ 283,66	R\$ 325,90
Custo Fixo Unitário (CFU)	R\$ 21,19	R\$ 21,19
Custo Variável Unitário (CVU)	R\$ 262,47	R\$ 304,71

Este cenário foi o que apresentou os menores pontos de equilíbrio para os dois produtos. Segundo SEBRAE (2018), quanto menor for o ponto de equilíbrio significa que a empresa possui os seus custos mais relacionados à operação (custos variáveis) do que à manutenção (custos fixos), ficando mais competitiva e com melhor rentabilidade. Sendo assim, para este indicador a produção de briquetes atingiu um valor de 34% (R\$105.745,36) e a produção de pellets 8% (R\$44.162,20).

Com isso, tem-se o fluxo de caixa para este cenário montado conforme a Tabela 4.18. O Cenário 4 foi o mais otimista em relação ao retorno econômico dos investimentos. Produzindo pellets é possível ter um saldo positivo logo no primeiro ano. Em relação aos briquetes, o saldo mantém-se negativo nos cinco primeiros anos, mas com menor prejuízo em relação aos demais cenários. Neste panorama foi identificada a possibilidade de atingir um saldo positivo na produção de briquetes a partir do 9º ano de atividade, sendo que não foi encontrado retorno econômico dentro dos primeiros 10 anos em nenhum dos demais cenários.

Tabela 4.18. Fluxo de caixa para o cenário 4.

FLUXO DE CAIXA PARA BRIQUETES – 2,5 tonelada/hora					
DESCRIÇÃO	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5
Investimento inicial	-R\$ 1.204.457,00	0	0	0	0
Saldo inicial	R\$ 20.000,00	-R\$ 1.457.065,80	-R\$ 1.516.219,88	-R\$ 1.283.341,96	-R\$ 1.050.464,04
RECEITA DAS VENDAS (+)	R\$ 2.995.200,00	R\$ 3.369.600,00	R\$ 3.744.000,00	R\$ 3.744.000,00	R\$ 3.744.000,00
TOTAL DE SAÍDAS (-)	-R\$ 3.267.808,80	-R\$ 3.428.754,08	-R\$ 3.511.122,08	-R\$ 3.511.122,08	-R\$ 3.511.122,08
Custos fixos	-R\$ 244.140,00				
Custos variáveis	-R\$ 2.364.724,80				
Impostos	-R\$ 658.944,00	-R\$ 741.312,00	-R\$ 823.680,00	-R\$ 823.680,00	-R\$ 823.680,00
Depreciação	-	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28
SALDO	-R\$ 1.457.065,80	-R\$ 1.516.219,88	-R\$ 1.283.341,96	-R\$ 1.050.464,04	-R\$ 817.586,12
FLUXO DE CAIXA PARA PELLETS – 2,5 tonelada/hora					
DESCRIÇÃO	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5
Investimento inicial	-R\$ 1.204.457,00	0	0	0	0
Saldo inicial	R\$ 20.000,00	R\$ 268.169,40	R\$ 2.228.482,20	R\$ 4.696.481,40	R\$ 7.164.480,60
RECEITA DAS VENDAS (+)	R\$ 5.207.040,00	R\$ 5.857.920,00	R\$ 6.508.800,00	R\$ 6.508.800,00	R\$ 6.508.800,00
TOTAL DE SAÍDAS (-)	-R\$ 3.754.413,60	-R\$ 3.897.607,20	-R\$ 4.040.800,80	-R\$ 4.040.800,80	-R\$ 4.040.800,80
Custos fixos	-R\$ 244.140,00				
Custos variáveis	-R\$ 2.364.724,80				
Impostos	-R\$ 1.145.548,80	-R\$ 1.288.742,40	-R\$ 1.431.936,00	-R\$ 1.431.936,00	-R\$ 1.431.936,00
Depreciação	-	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28	-R\$ 78.577,28
SALDO	R\$ 268.169,40	R\$ 2.228.482,20	R\$ 4.696.481,40	R\$ 7.164.480,60	R\$ 9.632.479,80

4.3. Indicadores econômicos

Com base nas análises anteriores de despesas e receitas necessárias para confeccionar os produtos, pode-se gerar indicativos econômicos como taxa de retorno interna (TIR) e valor presente líquido (VPL) com base na taxa mínima de atratividade (TMA) escolhida, como mostra a Tabela 4.19. Como a função “TIR” no Excel só funciona se houver pelo menos um valor positivo e um negativo nos saldos do projeto, não foi possível determinar este indicador para briquetes, visto que os saldos anuais foram negativos em todos os cenários.

Tabela 4.19. Indicadores financeiros para os cenários analisados.

		TMA	TIR	VPL
Cenário 1	Briquetes	10%	--	-R\$6.765.337,47
	Pellets	10%	28%	R\$1.521.192,66
Cenário 2	Briquetes	10%	--	-R\$6.444.206,52
	Pellets	10%	109%	R\$3.913.956,14
Cenário 3	Briquetes	10%	--	-R\$6.613.755,30
	Pellets	10%	101%	R\$9.959.304,96
Cenário 4	Briquetes	10%	--	-R\$5.971.468,09
	Pellets	10%	138%	R\$15.284.038,93

Em todos os cenários analisados o projeto para fabricação de pellets mostrou-se viável, tendo em vista que todos os valores de TIR calculados foram maiores que a TMA, tendo como pior hipótese o retorno dos investimentos em 28 meses, como observa-se na Tabela 4.20 contendo o resultado do *Payback* de cada cenário para produção de pellets.

Tabela 4.20. *Payback* dos cenários de produção de pellets.

	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3	CENÁRIO 4
<i>Payback</i> - Pellets	28 meses	16 meses	7 meses	5 meses

Quanto aos briquetes, para tornar a produção viável seria preciso reduzir a estrutura de forma a exigir um investimento inicial menor, pois seu preço de venda praticado atualmente no mercado é insuficiente para manter a sobrevivência do projeto, e menos ainda para gerar lucro. Tavares (2013) concluiu que a venda de briquetes a R\$325,00 por tonelada foi viável considerando a matéria-prima adquirida por

terceirizados, porém o autor não considerou o investimento inicial no fluxo de caixa, apenas a receita bruta das vendas.

Segundo Gentil (2008), os fatores mais preponderantes nos custos da briquetagem são: o transporte da matéria-prima/produto, salários/pró-labore, manutenção das máquinas e encargos de capital, de onde se conclui que os custos podem ser reduzidos por meio de uma competente gestão industrial. Para este trabalho, além dos pontos mencionados pelo autor, acrescentam-se as despesas com energia elétrica.

5. CONCLUSÃO

O intuito de utilizar as mesmas premissas de estrutura, capacidade, custos fixos e variáveis foi o de permitir uma comparação mais sólida entre os produtos. Verificou-se que os custos variáveis foram os mais influentes no custo total, sendo o frete de entrega, a carga tributária e o consumo de energia elétrica os maiores desembolsos.

Assim, concluiu-se que o prospecto fabril delineado, apesar de tecnicamente atender a produção para os dois tipos de produtos, economicamente não se aplica à produção de briquetes, mesmo analisando diferentes cenários. Dessa forma, para esse material indica-se uma planta de fabricação mais compacta e econômica, exigindo um investimento inicial menor para que seja recuperado nos cinco primeiros anos com as receitas das vendas.

Apesar de o investimento inicial ter sido preponderante para a inviabilidade em relação a briquetes, os custos variáveis também merecem atenção. Uma forma seria a possibilidade de a empresa adotar um regime de tributação mais simplificado, como o Simples Nacional, com alíquotas menores. Outro custo que pode ser ponderado é o frete de entrega. Para tanto, é necessário buscar possíveis compradores que estejam situados num raio próximo à fábrica.

É importante mencionar que todos os métodos dependem fortemente do preço de venda aceito pelo consumidor final, logo, no caso dos briquetes, sua melhor valorização no mercado é imprescindível para atingir a viabilidade nas projeções apresentadas.

Por outro lado, a produção de pellets mostrou-se viável em todos os panoramas analisados, graças ao preço de comercialização praticado no mercado. O ponto de equilíbrio para este produto se manteve estável e baixo em todos os cenários, assim como a taxa interna de retorno que se manteve bem acima da taxa mínima de atratividade estipulada. O Cenário 4, com maior jornada e capacidade de produção, foi o

que apresentou os resultados mais viáveis, com maior retorno dos investimentos em menos tempo.

Embora nesta análise os resultados tenham inviabilizado a briquetagem, ainda assim, pellets e briquetes são produtos economicamente viáveis principalmente quando são utilizados resíduos como matéria-prima. Desse modo, além de agregar valor a rejeitos agrícolas, a densificação em escala industrial pode representar uma atividade extra no empreendimento, diversificando as receitas e ampliando as possibilidades de mercado.

Para tanto, é fundamental que os produtores invistam na difusão dos benefícios da utilização de pellets e briquetes, de modo a atingir públicos cada vez mais amplos, visando à popularização do produto no Brasil e aumentando a demanda interna. Isso trará incentivos na melhoria da qualidade, exigindo com que normas de controle de qualidade e certificação sejam finalmente estabelecidas no país, corroborando para a conquista de mercados internacionais.

CONSIDERAÇÕES GERAIS FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho trouxe implicações importantes para a indústria de pellets e briquetes e para as agroindústrias no Brasil. Desse modo, espera-se com isso que novos estudos nestes segmentos surjam como complemento e ampliação dos conhecimentos adquiridos.

A não peletização dos resíduos de madeira de madeireira sugere a necessidade de uma investigação mais aprofundada em relação aos possíveis efeitos dos produtos utilizados no beneficiamento da madeira na indústria moveleira no processo de adensamento. Além disso, não foram identificadas as espécies madeireiras coletadas, o que pode ter influenciado neste resultado.

Sugere-se estudos sobre os efluentes gasosos emitidos durante a combustão dos pellets e briquetes produzidos a partir de resíduos agrícolas, pois com a diversidade dessas matérias-primas ainda são escassas as pesquisas a este respeito. Além disso, devido a essa heterogeneidade nas características intrínsecas a cada tipo de biomassa residual, é recomendável também a

Alguns resíduos podem apresentar elevada higroscopia, como foi o caso do café, observado neste trabalho, portanto, recomenda-se a secagem destes resíduos antes do procedimento de adensamento. Além disso, estudos de estabelecimento de curvas de equilíbrio higroscópico para o café e demais resíduos com esta característica são importantes para definir limites de umidade do produto e prevenir mudanças de acordo com a temperatura e umidade relativa do ar local.

Como os resíduos de quirela, quirela + palha, processo mistura e sorgo apresentaram quantidade de amido que impossibilitou a determinação do teor de lignina na análise química e não puderam ser briquetados sem a mistura com madeira, recomenda-se que outros testes sejam realizados testando diferentes temperaturas e pressões no processo de briquetagem dessas biomassas. Ademais, avaliar o potencial de utilização desses resíduos com elevado teor de amido como aglutinante natural é de enorme utilidade, pois pode contribuir no processo de compactação de outros tipos de resíduos, aumentando assim o rendimento no aproveitamento desses materiais.

Para todos os briquetes sugere-se posteriormente um estudo do comportamento dimensional, pois é importante verificar a estabilidade e integridade dos produtos durante seu transporte.

Cabe ressaltar que as empresas fabricantes das máquinas e equipamentos componentes das plantas de produção de pellets e briquetes precisam incrementar novas tecnologias que permitam adaptar-se às diferentes matérias-primas disponíveis, e não somente as oriundas de reflorestamento. Além disso, o elevado custo do aparato industrial pode

inviabilizar a produção em larga escala, como observado na análise econômica dos briquetes, desestimulando possíveis investidores.

Desse modo, com advento de novas pesquisas e desenvolvimento tecnológico acredita-se que o mercado desses bioprodutos alavanque em breve no Brasil e atinja mercados internacionais. Para tanto, é fundamental a organização de normas e certificações nacionais que exijam produtos com qualidade no padrão internacional, além de incentivos governamentais que possam amortizar os elevados custos com energia e transporte no país e, assim, atrair empresas a investirem no segmento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/silvicultura/preco-eucalipto>

ABREU, P. H. F. **Formas de aproveitamento do resíduo da madeira**. 2005. Monografia (Graduação) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2005. 46p.
AFONSO JÚNIOR, P. C.; OLIVEIRA FILHO, D. O.; COSTA, D. R. Viabilidade econômica de produção de lenha de eucalipto para secagem de produtos agrícolas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 28-35, 2006.

ALESI, L.S.; BOTARO, V.R.; PÁDUA, F.; YAMAJI, F.M.; TOMELERI, J.; SANTOS, L.R.O.; SILVA, D.; CHI, I.E. **Densidade a granel e caracterização química do línter de algodão *Gossypium hirsutum* L.** In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, Florianópolis, 2017.

ALMEIDA, C.C.F de.; BRAND, M.A.; BALDUINO, A.L.J.; CUNHA, A.B da. Qualidade energética da madeira e de briquetes produzidos a partir de *Cupressus lusitanica* Mill. **Scientia Forestalis**, v.43, n.108, p.1003-1011, 2015.

ALVES, F. **O que é e como calcular o payback?**, 2014. Disponível em: <<http://www.industriahoje.com.br/como-calcular-o-payback>> Acesso em 20/11/2018.

ASAMOAHA, B.; NIKIEMA, J.; GEBREZGABHER, S.; ODONKOR, E.; NJENGA, M. **A Review on production, marketing and use of fuel briquettes**, Resource Recovery and Reuse Series 7, 2006. 55p.

ASPINALL, M.; WORTHY, V.E. **Regulation of Europe-Bound US Wood Pellets**. (Artigo) Revista Biomass Magazine. Disponível em: <<http://biomassmagazine.com/articles/12065/regulation-of-europe-bound-us-wood-pellets>> Acesso em 23/04/2018.

Associação Brasileira de Indústrias da Biomassa - ABIB. **Inventário residual Brasil**. 2011. Disponível em: <<http://pt.calameo.com/accounts/200968>>.

Associação Brasileira das Indústrias de Pellets – ABIPEL. 2016. Disponível em <http://www.abipel.com.br/media/5468/ABIPEL-maio-2013.pdf> Acesso em 02/04/2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 8112**: Análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1986.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 8633**: Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 6922**: carvão vegetal: ensaios físicos de determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro; 1981.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR NM 248**: Agregados – determinação da composição granulométrica. 6p. 2003.

Associação Nacional de Pellets Energéticas de Biomassa - ANPEB. A produção e utilização de pellets em Portugal. Disponível em <http://www.anpeb.pt/pellets/a-producao-e-utilizacao-de-pellets-em-portugal/>

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES. VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B (Org.). Perspectivas do Setor de Biomassa de Madeira para a Geração de Energia - Papel e Celulose. *In: BNDES Setorial* 33 – 03/2011. Brasília, p. 261-314, 2011.

BARBOSA, M.T da. C. **Análise da utilização de biomassa e resíduos florestais para a produção de pellets**. 2008. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008. 103f.

BARROS, C.S.A. **Produção de pellets para valorização de resíduos provenientes da indústria corticeira**. Tese (Mestrado) - Universidade de Minho, Portugal. 2013. 142p.

BARROS, L.O. **Densidade Energética de Briquetes Produzidos a partir de Resíduos Agrícolas**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012. 46f.

BENABDALLHA, B. **Structure de lamatière ligneuse**. *In: Manuel de Foresterie*. Les Presses de l'Université Laval. Québec. p.1275-1413, 1996.

BHATTACHARYA, S.C. Fuel for thought. **Renewable energy world**, v. 7, No. 6, p.122- 130. 2004.

BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S.; SHRESTHA, R. M. State of the art for biomass densification. **Energy Sources**, New York, v. 11, n. 3, p. 161-182, 1989.

BIOMASSA E BRIQUETES. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br>>. Acesso em: 2007.

Blog Biomassa Bioenergia Pellets Energia. Post Processo Industrial de Produção de Pellets. <http://abibbrasil.wixsite.com>

BRAHAN J.E.; BRESSANI, R. **Composición química de la pulpa de café y otros subproductos**. *In: ELIAS, L.G. (Ed.). Pulpa de café: composición, tecnología y utilización*. Panamá: INCAP, 1978. p.19-29.

BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal**. Editora Interciência, 2010.

BRITO, J.O. **Química da madeira**. Piracicaba: ESALQ. 126 p. 1985.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, n.16, p.63-70, 1978.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia. *Série Técnica IPEF*, Piracicaba, v. 2, n. 5, p. 1-25, 1981.

BRUGNERA, A.B. **Estudo da Produção de Briquetes com Resíduos da Indústria de Carvão com Aglutinantes**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava – PR, 2016. 72p.

BRUM, S.S. **Caracterização e modificação química de resíduos sólidos do beneficiamento do café para produção de novos materiais**. Dissertação (Mestrado). Lavras : UFLA, 2007. 138 p.

BRUM, S. S.; BIANCHI, M.L.; SILVA, V.L da.; GONÇALVES, M.; GUERREIRO, M.C.; OLIVEIRA, L.C.A. Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café. **Quim. Nova**, Vol. 31, No. 5, 1048-1052, 2008.

BUFALINO, L.; MENDES, L. M.; TONOLI, G. H. D.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A. Relation of transverse air permeability with physical properties in different compositions of sugarcane bagasse particleboards. **Materials Research**, São Carlos, v. 16, n. 1, p. 150-157, 2013.

CAIRES, R. R. **Briquetagem de resíduos – biomassa**. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2010.

CALEGARI, L. FOELKEL, C. E. B.; HASELEIN, C. R.; ANDRADE, J. L. S.; SILVEIRA P.; SANTINI, E. J. Características de algumas biomassas usadas na geração de energia no Sul do Brasil. **Biomassa e Energia**. V.2, n.1, p. 37-46, 2005.

CAMARGO, B.S. **Avaliação das propriedades físicas, químicas e térmicas dos pellets de madeira**. 2013. Monografia (Graduação) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Itapeva, SP, 2013. 49f.

CAMARGO, B.S.; BRAGHINI JÚNIOR, A.; CAMARGO, S.K de. C.A.; CARASHI, J.C.; ARAÚJO, C.K de. C. Análise de pellets de madeira produzidos a partir de diferentes composições. *Anais... VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, Ponta Grossa, dez/2017.

CAPACITEC/FAP-DF – **Centro de Capacitação Tecnológica/Núcleo de Apoio Tecnológico do Setor Moveleiro**. 36p. 2000.

CARROLL, J. P.; FINNAN, J. Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. **Biosystems Engineering**, v. 112, n. 2, p. 151-159, 2012.

CARVALHO, E. A.; BRINCK, V. **CETEM: Briquetagem** – Cap. 15. CT2004-190-00 Comunicação Técnica elaborada para a 4ª Edição do Livro de Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro, p.613-636, 2004. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-190-00.pdf>>.

CARVALHO, E. A.; BRINCK, V.; CAMPOS, A.R de. **Capítulo 15: Aglomeração - briquetagem**. In: LUZ, A.B da.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. Tratamento de Minérios, 6ª ed., CETEM/MCT, Rio de Janeiro, p. 651-674, 2018.

CARVALHO, L.L.M.; ALMEIDA, R.M.R.G.; PIMENTEL, W.R.O.; SILVA, M.C.S. **Avaliação da hidrólise da palha e sabugo de milho para produção de etanol 2G.** In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Fortaleza/CE, 2016.

CAVÉ, J. Economia Política da Gestão de Resíduos Sólidos Municipais em Vitória (Espírito Santo). **Geografares**, v.9, n.2, p.168-202, 2011.

CHAGAS, E.; ARAÚJO, A.P.; TEIXEIRA, M.G.; GUERRA, J.G.M. Decomposição e liberação de nitrogênio, fósforo e potássio de resíduos da cultura do feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v.31, n.4, p.723-729, jul./ago. 2007.

CINELLI, B. A. **Produção de Etanol a partir da Fermentação Simultânea à Hidrólise do Amido Granular de Resíduo Agroindustrial.** 2012. 200p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

COFORD Wood Energy – Departamento de Agricultura, Alimentos e Marinha da Irlanda. Normas relativas a biocombustíveis sólidos. 2017. Disponível em <<http://www.woodenergy.ie/standardstechnicalspecifications/>> Acesso em 23/04/2018.

Comisión Panamericana de Normas Técnicas - COPANT. **Maderas:** método de determinación de la compresión perpendicular al grano, 466. COPANT, 1972.

Companhia Nacional de Abastecimento. Perspectivas para a agropecuária, volume 5 – Safra 2017/2018. Brasília, v.5, p. 1-112, 2017.

Companhia de Planejamento do Distrito Federal – CODEPLAN. **Safra 2012/13: produção recorde de grãos no brasil e na região geoeconômica de Brasília:** evolução no período 1990 a 2013. Org.: Júlio Miragaya, Francisca Paz e Giuliana Correa. Governo do Distrito Federal, 2013. 30p.

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. **A cultura do feijão.** Org.: Aroldo Antônio de Oliveira Neto e Candice Mello Romero Santos. – Brasília: Conab, 2018. 244p.

CONTI, J. B. On global climatic changes. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 16, p. 70-75, 2005.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia.** Editora Unicamp, 2ª ed., 2011. 734p.

COSTA, D. R. et al. Análise de briquetes de *Eucalyptus*. **Revista da madeira**, São Paulo, v. 123, p. 46-48, 2010.

COSTA, G, P; MORAES, J, T.A **Fabricação de briquetes como alternativa para destinação adequada dos resíduos de madeira na indústria moveleira no ES.** Vitória, 2011. 5p. Disponível em: <<http://faesa.br/SEA/>>.

COUTO, L.; MÜLLER, M.D., SILVA, A.G.J.; NARDOTO, L.J.C. Produção de pellets de madeira – o caso da Bioenergy no Espírito Santo. Disponível em: http://www.renabio.org.br/arquivos/p_producao_santo_31296.pdf . Acesso em: 26/03/2017. 7p.

COUTO, L.; MÜLLER, M.D.; DE SILVA JÚNIOR, A. G.; CONDE, L. J. N. Produção de Pellets de Madeira – O Caso da Bio-Energy no Espírito Santo. **Revista Biomassa & Energia**, Viçosa, Minas Gerais, v. 1, n. 1, p. 45-52, 2004.

CUNHA, M.P.S.C.; PONTES, C.L.F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z.B.; BARBOSA, A.P.R. **Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras**. In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, v.2, p. 93-121, São Carlos, 1989.

DAHER, C.E., SILVA, E. D. de L. S., FONSECA, A.P. Logística Reversa: oportunidade para redução de custos através do gerenciamento da cadeia integrada de valor. **Brazilian Business Review**, Vitória, v.3, n.1, p. 58-73, 2006.

DANTAS, A.P.; SANTOS, R.R dos.; SOUZA, S.C de. **O briquete como combustível alternativo para a produção de energia**. In: III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Goiânia/GO – 19 a 22/11/2012.

DANTAS, V.F.S. **Potencial energético dos resíduos da cultura do milho (*Zeamays L.*) e do epicarpo do pinhão manso (*Jatropha curcas L.*)**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013. 36p.

DEMIRBAS, A. Combustion Characteristics of Different Biomass Fuels, Progress in Energy and Combustion. **Science**, v.30, n.2, p.219-230, 2004.

DEMIRBAS, A.; SAHIN-DEMIKAS, A.; DEMIKAS, A. H. Briquetting properties of biomass waste materials. **Energy Sources**, Philadelphia, v.26, n. 1, p. 83-91, 2004.

Department of Energy and Climate Change - DECC. Amber Rudd's speech on a new direction for UK energypolicy. 2015. Disponível em <https://www.gov.uk/government/speeches/amber-ruddsspeech-on-a-new-direction-for-uk-energy-policy> Acesso em 02/04/2018.

Deutsches Institut für Normung - DIN EN 14774-2 - Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method. Alemanha, 2009.

Deutsches Institut für Normung - DIN EN 15103 - Solid biofuels - Determination of bulk density. Alemanha, 2010.

Deutsches Pelletinstitut GmbH – DEPI. **ENplus Handbook for the Quality Certification of Wood Briquettes**. Version 2.0, Mar/2016. 20p.

DIAS, J. **Utilização da biomassa: avaliação de resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2002.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e pletes a partir**

de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. EMBRAPA Agroenergia: Brasília, DF. *Documentos* 13. 2012. 130 p.

DIONIZIO, A.F. **Aproveitamento energético de resíduos agroindustriais no Distrito Federal.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017. 97f.

DONATO, C.J.; TAKENAKA, E.M.M. O Aproveitamento de Resíduos de Madeira para o Desenvolvimento Sustentável. **Periódico Eletrônico Fórum Amb. da Alta Paulista**, v. 12, n.04, p.67-80, 2016.

DOURADO, D.C.; TAVARES, E.L.; STROPARO, E.C.; SOUZA, K.V de.; HILLIG, E.; SCHIRMER, W.N. Avaliação das propriedades físico-químicas, n. de resíduos lignocelulósicos provenientes da produção do biodiesel. **Revista Espacios**, v. 38, n. 26, 2017. Disponível em < <http://www.revistaespacios.com/a17v38n26/a17v38n26p24.pdf>> Acesso em 12/09/2018.

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

DURÃES, F.O.M.; MAY, A.; PARELLA, R.A da C. **Sistema Agroindustrial do Sorgo Sacarino no Brasil e a Participação Público Privada:** Oportunidades, Perspectivas e Desafios. Documentos, Sete Lagoas-MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 76p.

DURÁN, N.; ZAMORA, P.P.; REYES, J. Hidrólise enzimática de casca de arroz utilizando-se celulasas. Efeito de tratamentos químicos e fotoquímicos. **Química nova**, v.21, n.2 , p.140-143, 1998.

ECOHEATER Energias Alternativas. Artigo EH01 – Dicas para peletizar. 2012. Disponível em <www.ecoheater.com.br/textos/artigo01.pdf> Acessado em 08/03/2018.a

ECOHEATER Energias Alternativas. Artigo EH02 – Matrizes e roletes. 2012. Disponível em www.ecoheater.com.br/textos/artigo02.pdf Acessado em 08/03/2018.b

ECOHEATER Energias Alternativas. Artigo EH04 – As Biomassa. 2012. Disponível em www.ecoheater.com.br/textos/artigo04.pdf Acessado em 08/03/2018. c

EMATER/DF. Programa Floricultura, 2008. Disponível em: <http://www.emater.df.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=66&Itemid=80>

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA/CERRADOS. Artigo: Embrapa inicia participação na Agrobrasília 2014. Revista AGRON, edição online, 2014. Disponível em <https://www.agron.com.br/publicacoes/noticias/ciencia-e-tecnologia/2014/05/16/039442/embrapa-inicia-participacao-na-agrobrasil-2014.html> Acesso em 14/02/2018.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Sorgo biomassa é ótima opção para geração de energia. 2014. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2246665/sorgo-biomassa-e-otima-opcao-para-geracao-de-energia>> Acesso em 04/03/2018.

ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990.

ESCOBAR, J.F. **O potencial da produção sustentável de madeira para energia no Brasil: O caso dos pellets de madeira**. 2016. (Tese de Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

European Pellet Council (EPC). **Manual ENplus**. Versão 3. 2015. Disponível em <http://www.enplus-pellets.eu/downloads/enplus-handbook/> Acesso em 23/04/2018.

FARIA, W.S.; PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P.F.; PEREIRA, B.L.C.; CARNEIRO, A. de C.O.; ANDRADE, C.R.; GUIMARÃES JR, J.B. Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em pellets para geração de energia térmica. **Coffee Science**, Lavras, v.11, n.1, p. 137-147, 2016.

FELFLI, F.F.; MESA P., J.M.; ROCHA, J.D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C.A.; PIPPO, W.A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v.35, n.1, p.236-242, 2011.

FERNANDES, C. R.P et al. **Produção de briquete industrial: energia limpa e sustentável**. In: III Congresso Brasileiro de Gestão. Goiânia: 2012.

FERNANDEZ, P.I.C. **Estudo da Biomassa Florestal Residual Consumida em Centrais Termoeletricas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015. 76f.

FERRO, W.P.; SILVA, L.G.A.; WIEBECK, H. Uso da Cinza da Casca de Arroz como Carga em Matrizes de Poliamida 6 e Poliamida 6.6. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 17, nº 3, p. 240-243, 2007.

FILIPPETTO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica de mercado**. 2008, 61f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos). Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, São Paulo, 2008.

FONTES, P. J. P. de; QUIRINO, W. F.; PASTORE JUNIOR, F.; FILGUEIRAS, S. M. S. **Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal**. Brasília: DPQ/IBDF, 1984.

Food and Agriculture Organization of The United Nations – FAO. **The briquetting of agricultural wastes for fuel**. 1990. Disponível em <http://www.fao.org/docrep/T0275E/T0275E00.htm#Contents>

Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. FAO Statistics. 2016. Disponível em <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> Acesso em 29/03/2018.

Forest2Market. Site. Disponível em <<https://www.forest2market.com/forest-products-newsletter>> acesso em 30/03/2017.

FREITA, C.M. FREITA, L.A.; ROVIERO, J.P.; TENÓRIO, E.M.F.; RABELO, S.C.; MUTTON, M.R.J. Caracterização de cinzas, lignina, celulose e hemicelulose em bagaço

de sorgo e cana-de açúcar. **Ciência & Tecnologia**: FATEC-JB, Jaboticabal (SP), v.8, número especial, 2016.

FURTADO, T. S.; FERREIRA, J.C.; BRAND, M.A.; NEVES, M.D. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, v. 36, n. 3, p. 577–582, 2012.

GARCIA, D.P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. 2010. Dissertação (Mestrado) - FEG/UNESP. Guaratinguetá, 2010.101f.

GARCIA, D.P. Artigo: Quando surgiu os pellets? *In*: Blog Pellets de Madeira. Disponível em <http://pelletsdemadeira.blogspot.com.br/2008/07/quando-surgiu-os-pellets.html> acessado em 26/03/2018.

GARCIA, D.P. Os desafios dos pellets de madeira: competitividade. **Revista Opiniões**, v. 12, p. 43-44, 2014.

GARCIA, D.P. Cresce a produção de pellets no Brasil. *Nota Técnica* – Revista O Papel, p. 83-85, 2017.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. O. Setor de pellets de madeira no Brasil. **Revista Ciência da Madeira**, v. 8, n. 1, p. 21-28. 2017.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Decomposição térmica de pellets de madeira por TGA. **Holos**, v. 1, n. 32, p. 327–339, 2016.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G.; PRATES, G.A.; PROTÁSIO, T de P. Qualidade dos pellets de biomassas brasileiras para aquecimento residencial: padrões da norma ISO 17225. **Ciência da Madeira**, v. 9, n. 1, p. 45-53, 2018.

GARRISON, R.; NOREEN, E. **Contabilidade Gerencial**. Ed. LTC. 9ª Edição. Rio de Janeiro. 2001.

GENTIL, L.V.B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008. 215p.

GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira**. 12.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

GONÇALVES, E.A.M. Consumo Europeu de Pellets e suas Variáveis Explicativas. 2016. Tese (Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente) - Faculdade de Economia, Universidade do Porto, Porto, 39p. 2016.

GONÇALVES, J. E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu – SP. 2010. 119f.

GROVER.; S. K. MISHRA. **Biomass briquetting**: technology and practices. Regional wood energy development program in Asia, Field Document 46, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Bangkok, Thailand, 1996.

GUO, X.; WANG, S.; WANG, K.; LIU, Q.; LUO, Z. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. **Journal of fuel Chemistry and Technology**, v. 38, n. 1, p. 42-46, 2010.

HAHN, B. **Pellets for Europe**. Existing Guidelines and Quality Assurance for Fuel Pellets. St. Pölten, Áustria, 2004, 20 p.

HATFIELD, R.; FUKUSHIMA, R. S.; Can lignin be accurately measured? **Crop Science**, v. 45, n. 3, p. 832-839, 2005.

HEINIMO, J.; JUNGINGERB, M. Production and trading of biomass for energy – An overview of the global status. Lappeenranta University of Technology, **Biomass and Bioenergy**, Finland, v.33, n.9, p. 1310-1320, 2009.

HIRSMARK, J. **Densified Biomass Fuels in Sweden**. 2002. Thesis (Master of Science), Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, 2002.

HORST, D.J. **Avaliação da produção energética a partir de ligninas contidas em biomassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2013.

HUANG, C.; Han, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Oxford, v. 29, p. 1793- 1797, 2009.

INFANTE. F. S.; VEIRAS, G. P. Aprovechamiento de la Biomassa Forestalproducida por laCadenaMonteIndustria. Parte I: Situação actual y evaluación de sistemas de tratamiento. **Revista CIS-Madera**, n. 10, p. 6-25, 2003.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Censo agropecuário de 2006**. Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). 2007. Disponível em: www.ibge.gov.br Acesso: 19/11/2018.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. Rio de Janeiro v.30 n.12 p.1-82 dezembro, 2017.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. IBGE prevê safra de grãos menor em 2018. Via endereço <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2013-agencia-de-noticias/releases/19474-ibge-preve-safra-de-graos-6-8-menor-em-2018.html>> Acessado em 01/02/2018.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas Relatório de Pesquisa**. Brasília, 2012. 134p.

International Organization for Standardization - ISO. **ISO 17225-6: 2014** – Solid biofuels – Fuels specification and classes - Part6 - Graded non-woody pellets. Brussels, 2014.

JARA, E.R.P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica, 1797)

JENKINS, B., BAXTER, L., MILES JR., T., MILES, T. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v.54, p.17–46, 1998.

JENKINS, D. **Wood Pellet Heating Systems** – The Earth scan Expert Handbook for Planning, Design and Installation. 1ª ed., Reino Unido, Editora Earth scan, 2010.

Seção .01 JORDÃO, E.B. Importância da hidratação durante o processo de extrusão. **Revista Aqua Feed**, São Paulo: Editora Stilo, 2016. Disponível em <https://www.editorastilo.com.br/colunistas/importancia-da-hidracao-durante-o-processo-de-extrusao/>

KALIYAN, N.; MOREY, R.V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v.33, n. 3, p. 337-359, 2009.

KAMM, B.; KAMM, M. Principles of biorefineries. **Applied Microbiological Biotechnology**, v. 64, n. 2, p.137-145, 2004.

KARUNANITHY, C.; WANG, Y.; MUTHUKUMARAPPAN, K.; PUGALENDHI, S. Physio chemical characterization of briquettes made from different feed stocks. **Biotechnology Research International**, v. 2012, n. 1, p. 1-12. 2012.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Forno a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos**. 2008. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba: 2008.

KLOCK, U., MUÑIZ, G. I. B. de, HERNANDEZ, J. A., ANDRADE, A. S de. **Química da Madeira**. (3 ed. Revisada). Universidade Federal Do Paraná - Setor de Ciências Agrárias - Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Curitiba, 2005.

KUMAR, M.; GUPTA, R. C.; SHARMA, T. Effect of carbonisation conditions on the yield and chemical composition of *Acacia* and *Eucalyptus* wood chars. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 3, p. 411-417, 1992.

LEÃO, T. O que é simples nacional para uma indústria? Blog Industrial Nomus, 14 de jun de 2018. Disponível em < <https://www.nomus.com.br/blog-industrial/o-que-e-o-simples-nacional-e-para-que-serve-em-uma-industria/>>

LEITE, E. R. S.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; VELOSO, W.; SILVA, C. H.; ROSADO, S. C. S. Influência da granulometria e umidade das partículas nas propriedades mecânicas e físicas dos briquetes de casca de café. In: 6º Congresso Internacional de Bioenergia, 2011, Curitiba. *Anais...* Curitiba: Centro de Eventos da FIEP, 16 a 19 de agosto de 2011.

LETHIKANGAS, P. Quality properties of pellet ised sawdust, logging residue sand bark. **Biomass and Bioenergy**, Uppsala, v.19, n.20, p.351-360, 2001.

LI, J.; YUAN, H.; YANG, J. Bacteria and lignin degradation. **Frontiers of Biology in China**, v. 4, n. 1, p. 29-38, 2009.

LIMA, E.A. Alternativa para estimar o preço da madeira para energia. Embrapa Florestas/*Comunicado Técnico*, 260, Colombo, 2010.

LIMA, E.G. de.; SILVA, D.A. da. Resíduos gerados em indústrias de móveis de madeira situadas no pólo moveleiro de arapongas-PR. **Floresta**, Curitiba-PR, v.35, n.1, 2005.

LIMA, G. B. G. **Utilização de Biomassa na Secagem de Produtos Agrícolas via Gaseificação com Combustão Adjacente dos Gases Produzidos**. 2004. Monografia (trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2004.

LIU, H.; QIU, G.; SHAO, Y.; RIFFAT, S. B. Experimental investigation on flue gas emissions of a domestic biomass boiler under normal and idle combustion conditions. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, Oxford, v. 5, n. 2, p. 88-95, 2010.

LIU, Z.; LIU, X.; FEI, B.; JIANG, Z.; CAI, Z.; YU, Y. The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. **Renewable Energy**, Oxford, v. 55, p. 1-5, 2013.

LOURENÇO, Y.B.C.; SOUZA, E.C de.; MARQUES, S.R.R.; BARBOSA JÚNIOR, V.C.; MEDEIROS, L.C.D de .; PIMENTA, A. **Discussões e avanços da produção de briquetes no brasil: uma revisão bibliográfica**. In: III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, Florianópolis, 2017.

LUCENA, D.A.; MEDEIROS, R.D.; FONSECA, U.T.; ASSIS, P.S. Aglomeração de moinha de carvão vegetal e sua possível aplicação em alto-forno e geração de energia. **Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.4, n.2, p.1-6, abr./jun. 2008.

LUDWIG, R.; ARAÚJO, A. de S.; PUTTI, F.F. Usina termelétrica a partir da casca de arroz. **Fórum Ambiental**, v.8, n.7, 2012.

LYNCH, A. J. ROWLAND, A. C. **The history of grinding**. Littleton: Society for mining, Metallurgy and Exploration, 2005. 209 p.

MACIEJEWSKA, A.; VERINGA H.; SANDERS J.; PETEVES S. D. Co-firing of Biomass with Coal: Constraints and Role of Biomass Pre-Treatment. Report N° EUR22461 EN. Institute for Energy. European Commission, Luxemburgo, 2006.

MAHAPATRA, A.K.; HARRIS, D.L.; DURHAM, D.L.; LUCAS, L.; TERRIL, T.H.; KOUAKOU, B.; KANNAM, G. Effects of moisture change on the physical and thermal

properties of sericea lespedeza pellets. **International Agricultural Engineering Journal**, Bangkok, v. 19, n. 3, p. 23-29, 2010.

MARAVÉ, A.G. **Optimization of the palletization process of agricultural wastes originating from olive farms for their application in domestic boilers**. 2013. Tese (Doutorado em Tecnologia de Meio Ambiente) - Universidade de Granada, Granada. 2013. 275f.

MARCATTO, C. Agricultura Sustentável: Alguns Conceitos e Princípios. Disponível em: <<http://www.ipcp.org.br/References/seAlimentando/Cartilha-agricultura>> .

MARCHIORI, J. **Aproveitamento de Resíduos de Madeira para Confecção de Briquetes**. Monografia – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2006.

MATIELLO, J. B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991. p. 320. (Coleção do Agricultor. Grãos).

MASSARANI, G. **Alguns aspectos da separação sólido-fluido**. In: FREIRE, J.T e GUBULIN, J.C. Tópicos especiais em sistemas particulados. Departamento de Engenharia Química, UFSC, v.2, 1986.

MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part1): overview of biomass. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002.

MENDES, N., WESTPHAL, F. S., LAMBERTS, R.; DA CUNHA NETO, J. A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.5, n.4, p. 47-68, 2005.

MICHELS, C.S.; PAULA, I.O de.; SILVA, R.L da. **Caracterização de biomassa residual por índice de combustão**. In: 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, São Paulo, 11 a 13 de novembro de 2015.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Pesca – MAPA. **Exportação**. 2016. Disponível em www.agricultura.gov.br Acesso em 14/05/2017.

Ministério de Minas e Energia - MME. Biomassa é a segunda maior fonte de energia em 2016. Disponível em http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_type=content&_101_urlTitle=biomassa-e-a-segunda-maior-fonte-de-energia-em-2016 Acessado em 22/03/2018.

Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos**. Consultor: Marcelo Wiecheteck. Projeto PNUD BRA 00/20, Curitiba, 2009. 40p.

MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELI, E. D. A Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, V.9, N.1, p.57-71. 2009.

MIRANDA, M. R. da S. **Bagaço do sorgo: estimativa de parâmetros cinéticos e pirólise analítica**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2011. 105 f.

MIRANDA, R.A.; MAY, A. Análise dos Custos de Produção do Sorgo Biomassa para a Geração de Energia Elétrica e Sorgo Sacarino para a Produção de Etanol e Energia. *Circular Técnica* (216), Embrapa: Sete Lagoas, Julho, 2016. 12p.

MIYAUCHI, T.; MORI, M.; ITO, K. Quantitative determination of benzalkonium chloride in treated wood by solid-phase extraction followed by liquid chromatography with ultraviolet detection. **Journal of Chromatography A**, v. 1095, n. 1-2, p. 74-80, 2005.

MONTI, A.; VIRGILO, N.; VENTURI, G. Mineral composition and ash content of six major energy crops. **Biomass and Energy**, n.32, p.216-223, 2008.

MORAES, S.L.; MASSOLA, C.P.; SACCOCCIO, E.M.; SILVA, D.P.; GUIMARÃES, Y.B.T. Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada. **Revista IPT - Tecnologia e Inovação**, v.1, n.4, 2017.

MORAIS, D.M de. **Briquetes de resíduos lignocelulósicos como potencial energético para a queima de blocos cerâmicos**: aplicação em uma indústria de cerâmica vermelha que abastece o Distrito Federal. 2007. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 230p. 2007.

MORAIS, J.P.S.; ROSA, M. de F.; MARCONCINI, J.M. Procedimentos para análise lignocelulósica. Embrapa Algodão/*Documentos*, n.236, Campina Grande, 2010. 54p.

MOURAD, A.L.; AMBROGI, V.S.; GUERRA, S.M.G. **Potencial de utilização energética de biomassa residual de grãos**. In: Encontro de energia rural, 2004.

NAKASHIMA, G.T.; MARTINS, M.P.; SILVA, D.A da.; CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F.M. Aproveitamento de resíduos vegetais para a produção de briquetes. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n.34, p.22-29, 2014.

NIEDZIÓŁKA, I.; SZPRYNGIEL, M.; KACHEL-JAKUBOWSKA, M.; KRASZKIEWICZ, A.; ZAWISLAK, K.; SOBCZAK, P.; NADULSKI, R. Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. **Renewable Energy**, v. 76, p. 312-317, 2015.

NIELSEN, N. P.K.; GARDNER, D. J.; FELBY, C. Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust. **Fuel**, Copenhagen, v.89, n.1, p.94-98, 2009.

NOGUEIRA, E. Análise de investimentos. In: BATALHA, M. O. **Gestão agroindustrial**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2001. v.1. 692 p.

NOGUEIRA, L.A.H., LORA, E.E.S.; Dendroenergia: fundamentos e aplicações. 2ª edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199p.

NOGUEIRA, M. F. M. **Biomassa Energética**: Caracterização da Biomassa. Palestra Proferida na I Escola de Combustão, Florianópolis – SC 2007.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. **Caracterização da biomassa vegetal**. In: BARRETO, E. J. F. (Coord.). Combustão e gaseificação da biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-53.
NOOR-UL-AMIN. A multi-directional butilization of diferente ashes. **RSC Adv.**, v. 4, n.107, p. 62769-62788, 2014.

NORDIN, A. Chemical and elemental characteristics of biomass fuels. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 6, p. 339-347, 1994.

NUNES, L.; MATIAS, J.; CATALÃO, J. Wood pellets as a sustainable energy alternative in Portugal. **Renewable Energy**, Vol. 85, p. 1011-1016, 2016.

NUNES, P. **Análise de viabilidade**, 2008. Disponível em: <
<http://www.knoow.net/cienceconempr/gestao/analiseviabilidade.htm>>

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical chatacterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. **Biomass end Bioenergy**, v.27, n.6, p.653-669, 2004.

OLIVEIRA, B.M. **Qualidade de pellets de bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto em diferentes composições**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016. 52f.

OLIVEIRA, C.M. **Biomassa bioenergia briquete wood pellets**. 1ª ed. Versão eletrônica. 2016. 542p.

OLIVEIRA, J.B. **Caraterização energética dos resíduos sólidos agroindustriais de usinas da região da grande Dourados**. 2016. Monografia (Graduação – Engenharia de Energia), Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados. 2016. 93f.

OLIVEIRA, L. K. **Desenvolvimento de materiais adsorventes de óleos a partir de resíduos da agroindústria e sua aplicação na ração de aves**. 2009. 74 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

OLSSON, M. **Residential biomass combustion - emissions of organic coumpounds to air from wood pellets and other new alternatives**. Thesis (PhD) - Departmente of Chemical and Biological Enginnering. (2006).

OSHIRO, T. L. **Produção e Caracterização de Briquetes Produzidos com Resíduos Lignocelulosicos**. Monografia (Graduação – Eng. Ambiental) – Universidade Tecnológica do Paraná, Londrina, 2016. 78f.

OVEISI-FORDIIE, E. **Durability of wood pellets**. (Tese) - Master of Science. University of British Columbia, Vancouver. 2011. 134p.

PANCIERE, B.M. A produção de briquetes como incentivo à sustentabilidade - aplicabilidade da logística reversa em madeireiras no município de Tomé-Açu. *In: XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Salvador, BA, Brasil, 06 a 09 de outubro de 2009.

PASTRE, O. **Analysis of the technical obstacles related to the production and utilization of fuel pellets made from agricultural residues**. EUBIA, 2002, 107p.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. *Cerne*, Lavras, MG, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; REZENDE, R. N.; ASSIS, C. O.; BALIZA, A. E. R. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 31, n. 66, p. 103-112, 2011.

PELINSKI, A.; AHRENS, D. C.; MILLÉO, R. D. S.; ZEMKE, E.; BENASSI, D. A.; RICHTER, A. S. A diversificação no incremento da renda da propriedade familiar agroecológica. *In: 4º Congresso Brasileiro de Agroecologia*, 2006.

PEREIRA, B. L. C. **Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico**. 2014. 73f. Dissertação (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2014.

PEREIRA, M. **Prevenção e manutenção de máquinas na Eco Industrial**. Trabalho de Graduação. Faculdade do Instituto Brasil. Anápolis. 2006.

PEREIRA, T. V.; SEYE O. Caracterização física-térmica de biomassa local. *IN: 8º ENEPEX*, Campo Grande, 2014.

PÉREZ, N. P.; DENTELLO, R.O.; MACHIN, E. B.; PEDROSO, D. T.; ANTUNES, J. S.; SILVEIRA, J. L. **Physical characterization of bagasse for use in fluidized bed Gasifiers associated with gas turbines in sugar cane industry**. *In: The Xilatin-American Congress Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2015*. Disponível em: www.researchgate.net/publication/302875867_Physical_characterization_of_bagasse_for_use_in_fluidized_bed_gasifiers_associated_with_gas_turbines_in_sugar_cane_industry Acesso em 07/03/18.

PINHEIRO, G.F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J.T. Densidade energética de resíduos vegetais. *Biomassa & Energia*, v.2, n.2, p. 113-123, 2005.

PINO, V.; AYALA, J. H.; GONZÁLEZ, V.; AFONSO, A. M. Determination of the alkyl - and methoxy-phenolic content in wood extractives by micellar solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry. *Talanta*, v. 73, n. 3, p. 505-513, 2007.

PINTO, A.A.S.; PEREIRA, B.L.C.; CÂNDIDO, W.L.; OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; CARVALHO, A.M.M.L. Caracterização de pellets de ponteira de eucalipto.

Ciência da Madeira *In*: II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira (CBCTEM), Belo Horizonte, setembro, 2015.

PINTO, J. **Características da cinza de combustão de biomassa em leito fluidizado**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2011.

PINTO, Q.M.A. **Análise do desempenho energético de briquetes de resíduos agroindustriais gerados no Distrito Federal**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade de Brasília. Brasília, 2016. 51f.

PIRES, A. J. V.; GARCIA, R.; CECON, P.R.; NEIVA, J.N.M.; SARMENTO, P. Amonização da quirera de milho com alta umidade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 28, n. 6, p. 1186-1193, 1999.

PIRES, P. F. F. **Qualidade do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), classe cores, proveniente da agricultura familiar e do mercado varejista destinado à alimentação escolar**. 2014. Dissertação (Mestrado em Segurança Alimentar e Nutricional) – Programa de Pós-Graduação em Alimentos e Nutrição, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2014. 108 f.

POLIZELI, M. L. T. M.; RIZZATTI, A. C. S.; MONTI, R.; TERENCEZI, H. F.; JORGE, J. A.; AMORIM, D. S. Xylanases from fungi: properties and industrial applications. **Appl. Microb. Biotechnol**, v.67, n.5, p.577-591, 2005.

PRECCI, R. L.; SOBRINHO, J. C.; SILVA, J. de. SOUZA e.; SILVA, J. N. da. **Fontes de energia para secagem**. Capítulo 4. Viçosa: UFV, 2001. p.112-132.

PROSKURINA, S., HEINIMÖ, J., MIKKILÄ, M., VAKKILAINEN, E. The wood pellet business in Russia with the role of North-West Russian regions: Present trends and future challenges. **Renew. Sustain. Energy Rev.** 51, 730–740, 2015.

PROTÁSIO, T. de P.; ALVES, I.C.N.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, V.O.; BALIZA, A.E.R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 273-283, 2011.a

PROTÁSIO, T. de P.; BUFALINO, L.; MENDES, R.F.; RIBEIRO, M.X.; TRUGILHO, P.F.; LEITE, E.R. da S. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.11, p.1252–1258, 2012.

PROTÁSIO, T. de P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011.b

PROTÁSIO, T. de P.; SIQUEIRA, H.F de.; LEITE, E.R. da S.; TRUGILHO, P.F.; SOUSA, L.K.F de.; GUIMARÃES JÚNIOR, J.B. **Combustão da biomassa cafeeira**. *In*: II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, Belo Horizonte, 20 a 22 de set., 2015.

PROTÁSIO, T. de P.; TONOLI, G.H.D.; GUIMARÃES JÚNIOR, M.; BUFALINO, L.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F. Correlações Canônicas entre as Características Químicas e Energéticas de Resíduos Lignocelulósicos. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 3, p. 433-439, 2012.

PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P.F.; SIQUEIRA, H.F de.; MELO, I.C.N.A de.; ANDRADE, C.R.; GUIMARÃES JÚNIOR, J.B. Caracterização energética de pellets *in natura* e torreficados produzidos com madeira residual de *Pinus*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 435-442, 2015.

QUIRINO, W. F. **Briquetagem de Resíduos Lignocelulósicos**. Laboratório de Produtos Florestais – LPF/IBAMA. Brasília, 2000. 10p. Disponível em <<http://mundoflorestal.com.br/arquivos/briquetagem.pdf>>

QUIRINO, W.F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília, Laboratório de Produtos Florestais - LPF/IBAMA, 2003.14p.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e Índice de Combustão de Briquetes de Carvão Vegetal**. Laboratório de Produtos Florestais - LPF/IBAMA. Brasília, 1991. 19p.

RABAÇAL, M. E. R. F. **Influência das características do combustível no desempenho energético e ambiental de caldeiras domésticas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2010. 94f.

RAMOS E PAULA, L. E.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

RAMOS E PAULA, L.E.; TRUGILHO, P.F.; REZENDE, R.N.; ASSIS, C.O.; BALIZA, A.E.R. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.33, n.66, p. 103-112, 2011.

RANGEL, I.C.; SILVA, F.F da.; SOUZA, C.L.M de.; ERTHAL JÚNIOR, M.; GRAVINA, A.; SHIMOYA, A. Normas e padrões para produção de biomassa compactada no mundo: em breve o Brasil terá a sua? **Acta Biomedica Brasiliensia**, v. 9, nº 1, p.17-35, 2018.

RASGA, R.O.S. **Pellets de madeira e sua viabilidade econômico-financeira na substituição do óleo BPF-A1 em pequenos e médios consumidores no Estado de São Paulo**. 2013. Dissertação (Mestrado – Agroenergia), Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2013. 165f.

RAVEENDRAN, K., GANESH, A., KHILAR, K. C. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. **Fuel**, v. 74, n.12, p. 12-22, 1995.

REVLOG. Grupo de Estudos de Logística Reversa. Disponível em: <https://www.rsm.nl/>. Acesso em: 20/10/2018.

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. Viçosa: Editora UFV, 2001. 389 p.

ROCHA, J. D. **Gaseificação da Biomassa: Histórico e Conceitos Básicos**. In: Tecnologia e Estado da Arte da Gaseificação de Biomassa, Universidade do Amazonas, Manaus, 8 e 9 de abril de 2002.

ROCHA, L. A. **Modernização e diferenciação social (o caso do programa de assentamento dirigido do Distrito Federal – PAD/DF)**. 1992. Dissertação (Mestrado) - Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. 203p.

RODRIGUES, K. F de C. **Sistematização e análise da avaliação econômica de projetos de desenvolvimento de produtos e serviços**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. 347f.

RODRIGUES, K. F de C.; ROSENFELD, H. **Análise de Viabilidade Econômica**. Integrated and Integration Engineering Group. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, s/d. 17p.

RODRIGUES, V. A. J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ROMAO, D.R. **Potencial de fibras de resíduo agrícola: palha de milho (*Zeamays* L.) para produção de celulose**. Monografia (Graduação) – Engenharia Florestal/UnB. 2015. 46p.

ROMEIRO, A. R. Perspectivas para Políticas Agroambientais. In: RAMOS, P. (Org.). Dimensões do Agronegócio Brasileiro: políticas, instituições e perspectivas. Brasília: MDA, p. 283-317, 2007.

RUSSOMANO, V. H. **Introdução à administração de energia na indústria**. São Paulo: Pioneira, 1987. 262 p.

SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Campinas, SP. Editora: Átomo, 2010, p. 189.

SANDER, R. **Viabilidade de implantação de unidade produtora de pellets no extremo sul da Bahia**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Florestal) – Departamento de Economia Rural, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. 35f

SANTOS, C.P.S.; GOMES, I.R.F.; COSTA, S.E de L.; CASTRO, R.V.O.; SANTOS, R.C dos. **Características de pellets produzidos com resíduos agrícolas**. In: II Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido – CONADIS, Campina Grande, 08 a 09/nov, 2017.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e na contração da madeira e no rendimento e densidade do**

carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília.

SANTOS; M. L.; LIMA, O. J.; NASSAR, E. J.; CIUFFI, K. J.; CALEFI, P. S. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 507-511, 2011.

SANTOS, M. S. R. **Estudo de pré-tratamentos de palha e sabugo de milho visando a produção de etanol 2G.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL. 2014. 75p.

SANTOS, T.N.; **Avaliação da biomassa de sorgo sacarino e palma forrageira para produção de etanol em Pernambuco.** 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, 2012. 95f.

SHAW, M. **Feedstock and process variables influencing biomass densification.** 2008. Tese (Mestrado). Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, 2008. 159f.

SILVA, C.A.; FELFLI, F.F.; PÉREZA, J.M.M.; ROCHA, J.D.; SIMÕES, A.F. Estudo da viabilidade técnico - econômica de uma fábrica de briquetes para fins de geração energética. *In: An. 6º Encontro de Energia do Meio Rural*, 2006.

SILVA, D.A.; DA RÓZ, A. L.; PIRES, A. A. F.; CARVALHO, A. M.; NAKASHIMA, G. T.; PÁDUA, F. A.; YAMAJI, F. M. A Influência da Umidade em Propriedades Mecânicas de Briquetes Produzidos com Resíduos de Madeira (*Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.). **Rev. Virtual Quim.**, n.9, v.3, p-1078-1086, 2017. Disponível em <<http://rvq.sbq.org.br/imagebank/pdf/v9n3a14.pdf>>

SILVA, D. B. Sustentabilidade no Agronegócio: dimensões econômica, social e ambiental. *Comunicação & Mercado/UNIGRAN*, v.1, n.3, p.23-34, 2012.

SILVA, J. de S., NOGUEIRA, R.M., ROBERTO, C.D. **Tecnologia de secagem e armazenagem para a agricultura familiar.** Viçosa, 2005. 138p.

SILVA, R.; HARAGUCHI, S.K.; MUNIZ E.C.; RUBIRA, A.F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, v. 32, p. 661-671, 2009.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; GOMIDE, J. L.; REIS, F. P.; PILÓ-VELOSO, D. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 30, n. 6, p. 1009-1016, 2006.

SIMONETTI, D.; PERONDI, M.A.; KIYOTA, N.; OLIVEIRA, J.R.; VALANDRO, K. Os processos de diversificação da agricultura familiar: uma revisão literária. *Synergismus scyentifica*, UTFPR, Pato Branco, v.6, n.1, 2011.

Sistema Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas – SEBRAE. Artigo: Ponto de equilíbrio, 2018. Disponível em: <http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/ponto-de-equilibrio,67ca5415e6433410VgnVCM1000003b74010aRCRD>

SMITH, E. An introduction to wood pelleting. Andritz Sprout - A Division of Andritz, Inc. Muncy, PA. 2004.

SOLANO, D.; VINYES, P.; ARRANZ, P. **The Biomass Briquetting Process: A Guideline Report.** UNDP/CEDRO, 2016. 72p.

SOUZA, F de.; VALE, A.T do. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 36, n. 88, p. 405-413, 2016.

SOUZA, F de. **Avaliação da qualidade de briquetes produzidos com seis biomassas agroflorestais por métodos não destrutivos.** 2014. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Florestal - Brasília, 2014. 163f.

SOUZA, G. B.; NOGUEIRA, A. R. A.; RASSINI, J. B. Determinação de matéria seca e umidade em solos e plantas com forno de microondas doméstico. *Circular Técnica 33*, São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2002, 9 p.

SOUZA, N.D de.; AMODEI, J.B.; XAVIER, C.N.; DIAS JÚNIOR, A.F.; CARVALHO, A.M de. Estudo de Caso de uma Planta de Carbonização: Avaliação de Características e Qualidade do Carvão Vegetal Visando Uso Siderúrgico. **Floresta e Ambiente**, v.23, n.2, 2016.

SOUZA, R. F. R. **Produção de etanol a partir de hidrolisado enzimático do bagaço da cana-de-açúcar por leveduras isoladas do bioma amazônico.** 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE. 2014. 66p.

SPADOTTO, C.A.; RIBEIRO, W.C. **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria.** Botucatu. FEPAF, 2006. 319 p.

SPELTER, H.; TOTH, D. North America's wood pellet sector. Research Paper FPL-RP-656. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 21p.

STOCK, J. R. **Reverse Logistics.** Illinois: Council of Logistics Management, 1992.

SZENGYEL, Z. **Ethanol from wood: cellulase enzyme production.** Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Química, Lund University, Suécia, 2000.

TABARES, J. L. M. et al. Feasibility study of energy use for densificated lignocellulosic material (briquettes). **Fuel**, n. 79, p. 1229-1237, 2000.

TANIMOTO, K. M.; MAGALHÃES, P. A. do N. R. Viabilidade do uso de resíduos de pré-limpeza no processo de secagem de grãos. p. 1–15, [s.d.]. Disponível em <<http://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/VIABILIDADE%20DO%20USO%20DE%20RESIDUOS%20DE%20PRE%20LIMPEZA%20NO%20PROCESSO%20DE%20SECAGEM%20DE%20GRAOS.pdf>>

Technical Association of The Pulp and Paper Industry - TAPPI. Test methods **T 257 cm-85**: sampling and preparing wood for analysis. Atlanta: Tappi Technology Park, v.1, 1992.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry - TAPPI. **T 204 om-88**: solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: Tappi Technology Park, 1996. v.1.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry - TAPPI. **T 421 om-02**: moisture in pulp, paper and paperboard. 2002, 3 p.

TAYLOR, C. C.; KUNG, J. The effect of *Lactobacillus buchneri* on the fermentation and aerobic stability of high moisture corn in laboratory silos. **Journal of Dairy Science**. v. 85, p. 1526–1532. 2002.

TEMPLETON, D., EHRMAN, T. Determination of Acid-Insoluble Lignin in Biomass. **National Renewable Energy Laboratory (NREL)**, 1-14, 1995.

THEK, G.; OBERNBERGER, I. **Wood pellet production costs under Austrian and comparison to swedish framework conditions**. Proceedings of the 1st Conference on Pellets. Stockholm, Sweden. 2002.

TORRES, L. O. Caracterização da biomassa florestal de interesse energético existente no sul da Galiza e norte de Portugal. Actividade 3 – Logística do aproveitamento da biomassa para fins energéticos (RESUMO). Universidade de Vigo, dezembro, 2013.

TRIPATHI, A. K., IYER, P. V. R., KANDPAL, T. C. A techno-economice valuation of biomass briquetting in India. **Biomass and Bioenergy**, v.14, n.5/6, p.479-488. Great Britain. 1998.

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

USDA Foreign Agriculture Service. **Global Agricultural Information Network** – EU Biofuels Annual 2017. Gain Report, 2017. 44p.

VALE, A.T.; GENTIL, L.V.; GONÇALEZ, J.C.; COSTA, A.F da. Caracterização energética de resíduos de grão de café (*Coffea arábica*, L) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*), DUKE. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 416-420, 2007.

VALE, A.T.; GENTIL, L.V. Produção e uso energéticos de biomassa e resíduos agroflorestais. *In*: Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III. Rio Branco: Suprema, p. 195-241, 2008.

VAN WYLEN. G. J. , SONNTAG. R. E., BORGNAKKE. C. **Fundamentos da termodinâmica**. 5a edição. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, p.385-400, 1998. 538p.

VIAK, A. **Wood pellets in Europe** – State of the art, technologies, activities, markets. AEBIOM, Editor UMBERA. Part of theThermie B project, Oslo, 2000.88p.

VIDAL, A.C.F.; HORA, A.B. **Papel e Celulose**. *In*: Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. BNDES Setorial, v.33, p.261-314. 2010.

VIEIRA, A.C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Pós-Graduação Stricto Sensu em Energia na Agricultura, Cascavel, 2012. 56p.

VIEIRA, R. C., ANTUNES, D. P. C., SILVA, M. C. S., ALMEIDA, R. M. R. G. **Estudo do processo de hidrólise de resíduos lignocelulósicos do milho para a produção de bioetanol**. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis, SC, 2014.

VINTERBÄCK, J. Pellets 2002: The first world conference on pellets. **Biomass and Bioenergy**, v.27, n 6, p. 513-520, 2002.

YANG, H., YAN, R., CHEN, H., HO LEE, D., ZHENG, C., Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86. p1781-1788, 2007.

WAQUIL, P. D.; GAZOLLA, M.; NIEDERLE, P.; BLUME, R., BASTIAN, L.; SANTOS, F. D.; CONCHA, M. **O perfil da agroindústria rural no Brasil: uma análise com base nos dados do Censo Agropecuário 2006**. Relatório de Pesquisa. Brasília: IPEA, 2013. 89p.

WANDER, P.R. **Utilização de resíduos de madeira e lenha como alternativas de energias renováveis para o desenvolvimento sustentável da região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. 2001. Dissertação (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. 105f.

WANG, C.; YAN, J. Feasibility Analysis of Wood Pellets Production and Utilization in China as a Substitute for Coal. **International Journal of Green Energy**, Vol. 2, No. 1, pp. 91-107, 2005.

WANG, S.H.; NASCIMENTO, T.P do.; BATISTA, G da. S.; MENESES, S.P de.; ASCHERI, J.L.R. Pellets de trigo e soja produzidos por extrusão. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v.28, n.3 , 2008

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E.U.; OGADA, T.,; SIAGI, Z. Combustion of Agricultural Residues. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.26, p.1-27, 2000.

ZAMORANO, M.; POPOV, V.; RODRÍGUEZ, M. L.; GARCÍA-MARAVÉ A. A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues. **Renewable Energy**, v.36, p.3133-3140, 2011.

ZHANG, X.; NGUYEN, D.; PAICE, M. G.; TSANG, A.; RENAUD, S. Degradation of wood extractives in thermo-mechanical pulp by soybean lipoxygenase. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 40, n. 4, p. 866- 873, 2007.