

SILVIA MACCARI PETRICOSKI

**BRIQUETES PRODUZIDOS COM MISTURA DE PODAS URBANAS,
GLICERINA E RESÍDUOS DE PROCESSAMENTO DE MANDIOCA.**

CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2017

SILVIA MACCARI PETRICOSKI

**BRIQUETES PRODUZIDOS COM MISTURA DE PODAS URBANAS,
GLICERINA E RESÍDUOS DE PROCESSAMENTO DE MANDIOCA.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia de Energia na Agricultura da Universidade Estadual do Oeste do Paraná para obtenção do Título de Mestra em Engenharia de Energia na Agricultura.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Armin Feiden
COORIENTADORA: Prof. Dra. Adriana Ferla de Oliveira

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

P588b

Petricoski, Sílvia Maccari

Briquetes produzidos com mistura de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca. / Sílvia Maccari Petricoski. Cascavel, 2017.

83 f.

Orientador: Prof. Dr. Armin Feiden

Coordenadora: Profª. Drª. Adriana Ferla de Oliveira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2017

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura

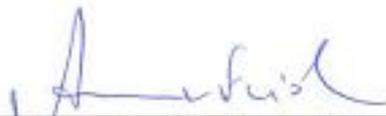
1. Energia da biomassa. I. Feiden, Armin II. Oliveira, Adriana Ferla de. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

CDD 20.ed. 662.88
CIP-NBR 12899

SILVIA MACCARI PETRICOSKI

Briquetes produzidos com mistura de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biocombustíveis, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Armin Feiden

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



Luciene Kazue Tokura

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



Arlindo Fabricio Corrêa

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)



Adriana Ferla de Oliveira

Universidade Federal do Paraná - Campus de Palotina (UFPR)

Cascavel, 9 de março de 2017

Dedico a presente dissertação a meus pais, irmãos, amigos, colegas, esposo e em especial aos professores pelo empenho e dedicação para com seus alunos, fornecendo-nos o conhecimento necessário para nossa formação.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus que todos os dias de minha vida, me deu forças nos momentos mais difíceis para nunca desistir.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, em especial aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura pela oportunidade e pelo conhecimento transmitido, essencial para minha formação.

Em especial aos professores Dr. Armin Feiden e Dra. Adriana Ferla de Oliveira, pela orientação durante a realização deste trabalho e especial atenção nas revisões e sugestões fundamentais para a conclusão desta dissertação, por seu apoio e amizade, além de sua dedicação e competência.

Aos meus familiares, esposo e amigos que sempre me incentivaram e apoiaram nesta jornada.

A Senhora Guiomar Maria de Santana Neves produtora rural e presidente da Cooperativa de Plantas Medicinais – GRAN LAGO; ao Senhor Luis Carlos Vieira, diretor presidente da LENECO – Lenhas Ecológicas; a Unidade de Fecularia da Cooperativa Agroindustrial Lar e a Prefeitura Municipal de Vera Cruz do Oeste - PR pela confiança.

Enfim a todos aqueles que de alguma forma me apoiaram a continuar nessa caminhada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Secador via aquecimento solar.....	30
Figura 2: Resíduos de podas urbanas. A - Material triturado. B – Acondicionamento no secador.....	31
Figura 3: Bagaço de mandioca. A – Material antes da secagem. B – Centrifugação. C – Peneiramento. D – Material seco.....	32
Figura 4: Determinações das massas.....	33
Figura 5: Briquetadeira mecânica de pistão.....	35
Figura 6: Produção de briquetes.....	36
Figura 7: Briquetes produzidos a partir dos tratamentos T1 a T5.....	36
Figura 8: Equipamentos empregados nos ensaios de teor de umidade. A – Amostra antes da secagem. B – Balança digital. C – Estufa. D – Dessecador.....	38
Figura 9: Equipamentos empregados na análise do poder calorífico superior. A – Amostra sendo ralada e peneirada. B e C – Bomba calorimétrica.....	41
Figura 10: Equipamentos empregados na análise de resistência mecânica. A – Moldes para regularizar a superfície dos briquetes. B – Briquetes com a superfície de enxofre. C – Prensa hidráulica. D – Momento de ruptura do briquete.....	42
Figura 11: Equipamentos empregados na análise de densidade aparente. A e B – Determinação do diâmetro e do comprimento do briquete respectivamente. C – Determinação da massa do briquete.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens do processo de compactação de resíduos de biomassa. Oxford, 2004.....	14
Tabela 2: Plano de ensaios de briquetes em função da massa e da composição percentual de resíduos. Vera Cruz do Oeste, 2016.....	34
Tabela 3: Valores médios do teor de umidade antes da briquetagem, dos briquetes e desvio padrão. Cascavel, 2016.....	45
Tabela 4: Valores médios da análise imediata. Cascavel, 2016.....	47
Tabela 5: Valores médios da análise elementar. Cascavel, 2016.....	50
Tabela 6: Valores médios do poder calorífico superior e desvio padrão. Cascavel, 2016.....	52
Tabela 7: Valores médios do poder calorífico inferior e útil. Cascavel, 2016.....	53
Tabela 8: Valores do poder calorífico superior e inferior de diversos produtos. Brasília, 2015.....	56
Tabela 9: Valores médios de densidade aparente, energética e desvio padrão. Cascavel, 2016.....	57
Tabela 10: Valores médios de resistência mecânica e desvio padrão.	59

PETRICOSKI, Silvia Maccari. Ma. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, março, 2017. **Briquetes produzidos com mistura de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca.** Professor. Orientador Dr. Armin Feiden. Professora Coorientadora Dra. Adriana Ferla de Oliveira.

RESUMO

Ao longo da história, diversas foram as fontes e as formas de energia utilizadas para a produção de bens e de serviços, em especial a energia gerada a partir de combustíveis fósseis, como o petróleo. Em função dos limites de suas reservas mundiais; as emissões de CO₂, e os desastres ecológicos a partir da perfuração de poços de petróleo, é fundamental pensar em fontes de energia renováveis e sustentáveis: aquelas que se reconstituem naturalmente, num curto período de tempo. Uma das alternativas para a solução deste problema é a energia proveniente das biomassas, seja de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia. O briquete é considerado um biocombustível sólido, feito a partir da compactação de resíduos lignocelulósicos muito utilizado para a geração de energia. Neste trabalho objetivou-se estudar a produção de briquetes a partir de misturas de Resíduos de Podas Urbanas - RPU, glicerina e bagaço de mandioca (*Manihot esculenta*). Para a redução da umidade das amostras de RPU e de mandioca, foi utilizado um secador via aquecimento solar. Posteriormente, as amostras dos RPU, do bagaço de mandioca e a glicerina foram misturadas gerando os tratamentos, T1 (100% RPU), T2 (92% RPU e 8% Bagaço de mandioca), T3 (97% RPU e 3% Glicerina), T4 (89% RPU, 8% Bagaço de mandioca e 3% Glicerina) e T5 (94,5% RPU, 4% Bagaço de mandioca e 1,5% Glicerina). Em seguida, foram realizadas as análises de parâmetros físicos, químicos e energéticos dos briquetes. O teor de umidade dos briquetes foi menor no tratamento T1 (7,935%). O tratamento T2 teve menor valor de carbono fixo (16,858%) e teor de voláteis (66,520%) e maior teor de cinzas (16,621%). As porcentagens de C, H e N não diferiram estatisticamente entre os tratamentos. Os valores do poder calorífico superior, inferior e útil foram maiores no tratamento T3 (18,973 MJ kg⁻¹); (17,480 MJ kg⁻¹) e (15,980 MJ kg⁻¹) respectivamente. A densidade aparente foi maior no tratamento T1 (1.183 kg m⁻³) bem como a densidade energética (20.778,76 MJ m⁻³). O tratamento T2 teve a maior resistência mecânica (1,281 kgf cm⁻²). Os resultados, portanto, demonstraram que os tratamentos T1, T2 e T3 foram mais eficientes, produzindo briquetes com propriedades que atendam as especificações do mercado, além de apresentarem grande potencial energético, sendo bons substitutos à lenha. Com base nas informações coletadas no Município de Vera Cruz do Oeste - PR no ano de 2015, poderiam ser produzidos aproximadamente 76,92 t ano⁻¹ de briquetes oriundos de resíduos de podas urbanas, contribuindo desta forma para a geração de receita no valor de R\$ 23.614,44.

PALAVRAS-CHAVE: biocombustível sólido, biomassa, bioenergia.

PETRICOSKI, Silvia Maccari. Ma. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, março, 2017. **Briquettes produced with mixed urban pruning, glycerin and cassava processing residues.** Professor Orientador Dr. Armin Feiden. Professora Coorientadora Dra. Adriana Ferla de Oliveira.

ABSTRACT

Throughout history, several sources and forms of energy have been used for production of goods and services. especially energy generated from fossil fuels such as oil. Due to the limits of their world reserves; CO₂ emissions and ecological disasters from oil well drilling, it is crucial to think in renewable and sustainable sources of energy: those that naturally reconstitute themselves in a short period of time. One the alternatives for solving this problem is the energy coming from biomasses, whether animal or vegetable origin, it can be used to production of energy. The briquette is considered a solid biofuel, made from compaction of lignocellulosic residues much used to energy generation. This paper aimed to study production of briquettes from mixtures of urban pruning waste - RPU, from glycerine and cassava bagasse (*Manihot esculenta*). A prototype drier was used through solar heating to reduce humidity of RPU and cassava samples. Afterwards, samples of RPU, cassava bagasse and glycerin were mixed, yielding the treatments T1 (100% RPU), T2 (92% RPU and 8% Cassava bagasse), T3 (97% RPU and 3% Glycerin), T4 (89% RPU, 8% Cassava bagasse and 3% Glycerin) and T5 (94.5% RPU, 4% Cassava bagasse and 1,5% Glycerin). Then the analyzes of physical, chemical and energetic parameters the briquettes were carried out. The moisture content of the briquettes was lower in T1 treatment (7.935%). T2 treatment had lower fixed carbon value (16.858%) volatile content (66.520%) and higher ash content (16.621%). The percentages of C, H and N did not differ statistically between the treatments. The values of the upper, lower and useful calorific value were higher on T3 (18.973 MJ kg⁻¹); (17,480 MJ kg⁻¹) and (15,980 MJ kg⁻¹) respectively. The apparent density was higher in T1 (1183 kg m⁻³) as well as energy density (20778.76 MJ m⁻³). Treatment T2 had the highest mechanical strength (1,281 kgf cm⁻²). The results, therefore, showed that treatments T1, T2 and T3 were more efficient, producing briquettes with properties that meet specifications of the market, besides presenting great energetic potential, being good substitutes for firewood. Based on information collected in Vera Cruz do Oeste - PR in 2015, approximately 76.92 t ano⁻¹ of briquettes from urban pruning residues could be produced, thus contributing to generation of revenue in the value of R\$ 23,614.44.

KEYWORDS: Solid biofuel, biomass, bioenergy

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Resíduos de Podas Urbanas.....	4
2.2. Resíduos de Processamento de Mandioca.....	6
2.3. Glicerina – Subproduto da Fabricação do Biodiesel.....	8
2.4. Matéria-prima Utilizada na Produção de Briquete.....	10
2.4.1. Fatores que influenciam na produção e qualidade de briquetes.....	14
2.4.1.1. Teor de umidade.....	15
2.4.1.2. Tamanho das partículas.....	16
2.4.1.3. Aglutinante.....	17
2.4.1.4. Temperatura.....	18
2.4.1.5. Pressão.....	18
2.4.2. Caracterização física, química e energética dos briquetes.....	19
2.4.2.1. Teor de umidade.....	19
2.4.2.2. Teor de voláteis e cinzas.....	20
2.4.2.3. Poder calorífico.....	22
2.4.2.4. Resistência mecânica.....	25
2.4.2.5. Densidade aparente e energética.....	26
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1. Coleta e Seleção dos Materiais.....	29
3.2. Secagem e Acondicionamento dos Materiais.....	29
3.3. Produção dos Briquetes.....	34
3.4. Análise dos Parâmetros Físicos, Químicos e Energéticos.....	37
3.4.1. Teor de umidade.....	37
3.4.2. Análise imediata.....	38
3.4.2.1. Teor de voláteis.....	39
3.4.2.2. Teor de cinzas.....	39

3.4.2.3. Teor de carbono fixo.....	40
3.4.3. Análise elementar	40
3.4.4. Determinação do poder calorífico.....	40
3.4.5. Resistência mecânica.....	41
3.4.6. Densidade aparente e energética.....	42
3.4.7. Análise estatística.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1. Caracterização Física, Química e Energética.....	45
4.2. Análise Econômica.....	60
5. CONCLUSÃO.....	63
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
Apêndice A.....	76
Apêndice B.....	77

1. INTRODUÇÃO

O aumento na produção de resíduos provoca impactos ambientais, uma vez que sua taxa de geração é muito maior que a sua taxa de degradação. Dessa maneira, torna-se imprescindível reduzir e reaproveitar os resíduos gerados pelo homem, recuperando-se assim, matéria e energia, preservando recursos naturais e minimizando as agressões ao meio ambiente (GALVÃO; OETTTERER, 2014).

Desde o início da civilização têm-se utilizado o ar, a água e o solo como forma natural para o descarte dos rejeitos humanos, não se admitindo mais considerar a natureza como simples sítio para o descarte de resíduos. Sendo muitos os tipos de resíduos e suas características mais variadas, o seu caráter poluente se dá, não somente, pela carga poluidora, mas também pela sua quantidade e produção localizada (MAGALHÃES, 2002).

Um desses materiais atualmente descartados inadequadamente é o resultante da poda e remoção das árvores localizadas nas ruas, avenidas, canteiros centrais e praças. Por necessidade de adequação aos equipamentos urbanos, que, devido à falta de locais apropriados para a sua disposição e o custo elevado das técnicas para seu tratamento, constituem-se em um dos maiores e principais desafios enfrentados atualmente pelas prefeituras e concessionárias de energia elétrica nos diversos municípios brasileiros (BARATTA JÚNIOR; MAGALHÃES, 2010).

Quando dispostos em aterros, os resíduos de poda produzem grande quantidade de metano e gás carbônico que sendo lançado na atmosfera constitui de forma ampla a quantidade de gases de efeito estufa - GEE. O metano particularmente tem potencial de aquecimento muito mais elevado que o gás carbônico para a atmosfera. Nos aterros também ocorre à contaminação da água por chorume de decomposição da matéria orgânica (COSTA, 2012).

Outro resíduo comumente descartado é o da mandioca (*Manihot esculenta*). A quantidade de mandioca produzida no estado do Paraná o destaca como 2º lugar no ranking nacional. Esta produção em 2014 correspondeu a 4 milhões de toneladas, ou seja, 17,5% da produção brasileira (SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ, 2015).

A cultura da mandioca é matéria-prima para muitos produtos de uso geral, como alimentos diversos, produtos de higiene, tintas e colas, entre outros. Porém, como em qualquer atividade produtiva, também gera resíduos culturais e subprodutos derivados de processos industriais, como os resíduos sólidos que são constituídos basicamente de cascas, fibras e bagaço e o resíduo líquido chamado de manipueira ou água de extração de fécula (DEL BIANCHI, 1998).

O farelo ou bagaço de mandioca é um resíduo agroindustrial sólido resultante do processamento da raiz para extração do amido (PANDEY, 2000).

Apesar de parte da produção nacional de mandioca ser consumida *in natura*, uma parcela significativa é utilizada para o processamento, principalmente para a fabricação de farinha e fécula de mandioca. O processamento da mandioca, no entanto é gerador de resíduos poluentes, principalmente quando não tratados de forma adequada, causando sérios impactos ambientais (MARTINEZ, 2016).

A cadeia produtiva do biodiesel também gera alguns subprodutos como: glicerina, lecitina, farelo e a torta oleaginosa. A glicerina bruta (glicerol, sabões, água, álcool, ácidos graxos e sais), gerada na obtenção do biodiesel se constitui em 10% da produção e destes, 80% aproximadamente é glicerol (MATURANA, 2011).

O glicerol é um composto químico de base obtida principalmente como um co-produto na indústria oleoquímicos, enquanto que a glicerina é o nome dado a misturas comerciais ricas em glicerol. A glicerina é uma substância versátil e, devido a sua combinação única de propriedades físicas e químicas, teve mais de 1.500 utilizações finais. É usado como um ingrediente ou meio de transformação em produtos cosméticos, produtos de higiene e cuidados pessoais, medicamentos e alimentos (OLIVEIRA et al., 2013).

Com a demanda crescente por fontes energéticas renováveis e a instituição do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel – PNPB em 2004 pelo Governo Federal, a produção de biodiesel e, conseqüentemente, de glicerina tem aumentado intensamente no país, surgindo um excesso de oferta frente à baixa demanda deste produto. O PNPB prevê que este biocombustível seja adicionado ao diesel fóssil comercializado em todo território nacional (CLAUDIO; SILVA; GONÇALVES, 2009).

Em 2008, o diesel passou a conter, obrigatoriamente, 3% de biodiesel (B3) o que acarretou numa produção de cerca de 100 mil toneladas de glicerina. Com o

aumento da mistura do biodiesel ao diesel para 5% (B5) a partir de 2010 foi gerado um excedente de 250 mil t ano⁻¹ de glicerina. Estes valores são muito superiores ao consumo e produção nacional atuais, estimados em cerca de 30 mil toneladas anuais (SANT'ANNA et al., 2012).

Neste contexto, torna-se necessário novas formas de utilização da glicerina com o objetivo de superar a oferta da mesma.

Este excedente causa preocupação, já que esta glicerina fabricada via processo de biodiesel é altamente poluidora. Este coproduto, por ser insolúvel, em contato com rios e lagos se precipita na água e dificulta a oxigenação dos organismos aquáticos. Por outro lado, se for simplesmente queimada, pode resultar em emissão de acroleína, um composto químico bastante tóxico e cancerígeno (MARÇON, 2010).

Portanto, com o intuito de utilizar estes resíduos disponíveis para fins energéticos, o presente trabalho teve por objetivo a produção de briquetes a partir de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca, como alternativa para a geração de energia renovável, contribuindo para a redução dos impactos ambientais.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar os parâmetros físicos, químicos e energéticos dos briquetes (Teor de umidade, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e cinzas, poder calorífico superior, inferior e útil, resistência mecânica, densidade aparente e energética).
- Analisar os componentes das cinzas.
- Determinar o(s) melhor (es) tratamento (s) para produção dos briquetes com os resíduos propostos.
- Verificar a possibilidade de aproveitamento do potencial energético dos briquetes produzidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Resíduos de Podas Urbanas

As árvores fornecem múltiplos benefícios em cidades, incluindo a redução das temperaturas urbanas, sequestro de carbono, a melhoria da qualidade do ar, mitigação de tempestade, escoamento de água e fornecimento de habitat para os animais (OLDFIELD et al., 2014).

A maioria dos resíduos provenientes das podas urbanas são descartados em locais impróprios como lixões e aterros sanitários. Nestes locais misturam-se com os outros resíduos sólidos, que podem conter substâncias perigosas e materiais biológicos biodegradáveis, que interagem química e biologicamente, causando impactos sobre a qualidade do ar, do solo e da água. Assim, esses resíduos quando acumulados, de maneira inadequada, além de causar tais problemas de poluição, caracterizam também um desperdício de matéria orgânica que poderia ser reutilizada (BARATTA JÚNIOR; MAGALHÃES, 2010).

Na maioria das vezes este problema se agrava pelo fato de que a arborização e as implantações dos sistemas elétricos de distribuição são planejados e realizados de forma independente e isso acaba resultando em uma disputa entre as árvores e as redes de distribuição pelo mesmo espaço físico. Diante disto, surge então a necessidade de poda dessas árvores, para que seja permitida a coexistência da vegetação, sem causar prejuízos à distribuição de energia elétrica, quer seja no meio rural ou urbano (VELASCO, 2003).

De acordo com Baratta Júnior e Magalhães (2010), estes resíduos geram um volume considerável que pode ser aproveitado das mais diversas formas: lenha, carvão, madeira para fabricação de móveis rústicos, artesanato, brinquedos, etc., porém, parte deste material, ou seja, os galhos mais finos inservíveis para lenha, carvão ou finalidade mais nobre, que corresponde a cerca de 60% do volume total, poderá ser utilizado para produção de briquetes. A poda urbana apresenta várias formas de aproveitamento como a reintegração destes resíduos aos respectivos ciclos biogeoquímicos (pela obtenção de composto orgânico por processo de compostagem), sua reutilização (artesanato ou obras de arte, bancos de jardins,

etc.) ou seu aproveitamento energético, quer como lenha, carvão vegetal *in natura* como combustível de usina termoelétrica e estudos para a geração de energia elétrica.

Conforme Vieira (2012), a biomassa é considerada uma fonte alternativa de energia, pois consiste em um material orgânico de origem vegetal ou animal.

Historicamente a biomassa sempre esteve presente como fonte energética, sendo na forma de lenha ou de carvão, porém outras formas de utilização da biomassa para gerar energia ganharam ênfase na segunda metade do século XX. O interesse por novas fontes de biomassa ganhou espaço devido a esta fonte energética ser considerada limpa e renovável (PRETO; MORTOZA, 2010).

A energia disponível na biomassa vegetal deriva da reação entre gás carbônico (CO₂ no ar), água e luz solar, ou seja, pelo processo de fotossíntese, o qual armazena fração de energia solar nas ligações químicas de seus componentes (SOUZA; SORDI; OLIVA, 2002).

Segundo Açma (2003), a energia presente na biomassa pode ser transformada (através de processos de conversão físicos, químicos e biológicos) em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos. O objetivo desta conversão é transformar um material carbonáceo de baixa eficiência energética para uma eficiência economicamente viável.

De acordo com Quirino (1991a), no Brasil, existe grande volume de resíduos agroindustriais de natureza lignocelulósicos, mas ainda com baixo índice de aproveitamento. Esses resíduos estão concentrados nas regiões mais populosas do país, as quais também apresentam a maior demanda de energia. Apesar de o Brasil ser um grande produtor de biomassa, a sua distribuição no território nacional é irregular.

Canto et al. (2011) afirmam que a geração de energia por biomassa florestal apresenta vantagens ambientais, pela substituição de combustíveis fósseis e redução da emissão de gases de efeito-estufa; e vantagens sociais, pela geração de empregos locais.

A biomassa pode fornecer energia através da combustão direta, gaseificação, pirólise, hidrólise, digestão anaeróbica, hidrogenação ou fermentação (CHEN; XING; HAN, 2009). Porém, a tecnologia para a produção de energia na forma de

briquetagem para combustível sólido, continua sendo a mais aplicável à nível doméstico (OLADEJI, 2010; SOTANDE; OLUYEGE; ABAH, 2010).

O Brasil é eminentemente um país agrícola. Cada ano cerca de 330 milhões de toneladas de resíduos de biomassa são gerados no país. Estes resíduos frequentemente não são utilizados como fonte de energia, por terem características energéticas pobres (baixa densidade, baixo poder calorífico e alto teor de umidade), causando altos custos durante o transporte, manuseio e armazenamento. Alguns destes inconvenientes podem ser superados se os resíduos de biomassa forem densificados em briquetes, a fim de fornecer mais energia por unidade de volume, e melhorar o transporte e o armazenamento (FELFLI et al., 2011).

Segundo Yank, Ngadi e Kok (2016) em todo o mundo, aproximadamente três bilhões de pessoas utilizam a lenha diariamente para cozinhar. A biomassa representa 80% da oferta de energia nos países em desenvolvimento. Há uma necessidade crescente de fontes de combustíveis alternativos, de modo a reduzir o desmatamento, ou seja, de árvores que estão sendo cortadas para a produção de lenha.

A conversão deste resíduo em briquetes poderia fornecer um novo mercado para as fábricas. Com o crescimento deste setor industrial o briquete de biomassa vegetal pode substituir o carvão vegetal de madeira em alguns processos industriais para produzir energia e diminuir o desmatamento (TEIXEIRA; PENA; MIGUEL, 2010).

Portanto, a biomassa é uma das principais fontes de energia renovável. E por ser um dos maiores países produtores agrícolas e florestais, apresenta um grande potencial que pode ser aproveitado na fabricação de briquetes.

2.2. Resíduos de Processamento de Mandioca

O setor de produção de mandioca no Brasil ocupa espaço de destaque mundial e segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2011), a área plantada foi de 1,798 milhões de hectares, com produção aproximada de 26,5 milhões de toneladas, com rendimento médio de 14 t ha^{-1} , colocando o país entre os principais produtores mundiais desta raiz tuberosa.

A raiz da planta, conhecida popularmente como mandioca, serve como matéria prima utilizada em empresas de pequeno porte conhecidas como casas de farinha ou farinheiras. Ainda, sua raiz serve como alimento para milhões de pessoas, sendo que nas casas de farinha, é processada para a fabricação de farinhas de mesa, tais como: farinha fina, torrada, farofa pronta e biju. As empresas que extraem o amido são conhecidas como fecularias. Considerada a substância nobre da mandioca, a fabricação de fécula ou amido é mais sofisticada, exigindo uma tecnologia especial de extração (FERREIRA, 2013).

Os subprodutos da industrialização da mandioca são partes constituintes da própria planta, gerados em função dos processos tecnológicos adequados. Por este conceito, seriam considerados subprodutos, inclusive, os restos de cultura. A qualidade e a quantidade dos subprodutos variam bastante e dependem de vários fatores como cultivar, idade da planta, tempo após colheita, tipo e regulagem do equipamento industrial, entre outros (CEREDA, 2001).

Nos processos de industrialização da mandioca, para fins de obtenção de farinha ou fécula, são gerados resíduos sólidos de descarte, obtidos durante as etapas de pré-limpeza e descascamento da raiz, como partes lenhosas e deterioradas das raízes, crueira, porções fibrosas retidas em peneiras, bagaços e resíduos líquidos da água de lavagem das raízes e manipueira. Esses resíduos muitas vezes se acumulam nas pequenas farinheiras ou são utilizados no trato de animais ruminantes (FERNANDES JÚNIOR; CEREDA, 1996).

Também há estudos do subaproveitamento destes resíduos no solo como fertilizante e para a alimentação de animais, pois, segundo Abrahão et al. (2005), a casca de mandioca é um resíduo com baixa quantidade de proteína e grande quantidade de fibra e energia.

De acordo com Ferreira (2013), em fábricas maiores, os resíduos são os mesmos, obtendo-se um acúmulo destes devido ao maior volume de mandioca processada. Outro resíduo resultante da etapa da prensagem da massa de mandioca é a manipueira, sendo líquido de coloração amarela-escuro, malcheiroso e de elevado potencial poluente (SAGRILLO et al., 2003).

Além do aspecto da agressão ao meio ambiente, deve ser também considerado que o despejo indevido dos subprodutos de mandioca constitui em

desperdício de rendimentos para o produtor, quando se avaliam as quantidades geradas e a composição dos subprodutos (CEREDA, 2001).

Uma das maneiras de solucionar tais problemas e ainda obter uma nova fonte de renda é o aproveitamento destes subprodutos. A utilização na agricultura e na alimentação animal, bem como a produção de energia a partir destes resíduos são algumas das alternativas.

Para fortalecer os briquetes, um material de ligação (aglutinante) pode ser utilizado. Em geral, o amido de milho é utilizado para produzir o material ligante, contudo, em trabalhos produzidos pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação – FAO (1987); Smith (2004) e Teixeira; Pena; Miguel (2010) a fécula de mandioca foi utilizada porque é amplamente produzida no Brasil.

2.3. Glicerina – Subproduto da Fabricação do Biodiesel

A produção do biodiesel no Brasil é bastante favorecida pela localização geográfica do mesmo (BRAGA; BRAGA, 2012). Como este é um país tropical, possui amplos recursos hídricos e temperaturas médias anuais sem variações muito bruscas, na maior parte de suas regiões, ele é propício à plantação de diversas espécies vegetais que podem ser utilizadas para a produção do biodiesel (ABDALLA, 2008).

O biodiesel é obtido principalmente a partir de óleos e gorduras de origem vegetal (mamona, dendê, canola, girassol, amendoim, soja e algodão) e de origem animal (sebo bovino, gordura suína) e de óleos e gorduras residuais - OGR (OSAKI; BATALHA, 2011), e assume cada vez maior importância quando utilizado puro 100% (B100) ou misturado ao diesel de petróleo, na geração de energia elétrica ou no transporte veicular (GOES; ARAÚJO; MARRA, 2009).

A transesterificação é um dos processos para a produção do biodiesel, que é baseado em uma reação química que, sinteticamente, é a reação de um óleo vegetal com um álcool simples, em geral, metanol ou etanol. A reação é catalisada por um ácido ou uma base, podendo ser utilizado o hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio (NaOH ou KOH). Nessa reação, as moléculas principais dos óleos e gorduras, os chamados triacilgliceróis, são separados em ácidos graxos e glicerina por decantação ou centrifugação (LARSEN, 2009).

A fase mais densa é a glicerina bruta, contendo geralmente 50% de glicerol e várias impurezas, e a menos densa é o biodiesel, igualmente impregnado de impurezas. A glicerina representa cerca de 10% do subproduto formado na reação de transesterificação desse biocombustível, ou seja, para cada tonelada de biodiesel, são produzidos aproximadamente 100 kg de glicerina bruta (MENDES; SERRA, 2012).

Conforme Gutiérrez Oppe (2008) a glicerina é um líquido incolor e inodoro, viscoso, higroscópico, de sabor doce, não tóxico, biocompatível, sintetizado por plantas e animais, geralmente metabolizado a piruvato. Sua fórmula química é: $\text{CH}_2\text{OH-CHOH-CH}_2\text{OH}$ (KNOTHE et al., 2006).

A glicerina foi descoberta em 1779, por um químico sueco, chamado Karl Wilhelm Scheele, cujo nome vem da adaptação da palavra grega “GLUKÚS” que significa doce. O termo “glicerol” aplica-se somente ao composto químico puro 1,2,3 propanotriol. O termo “glicerina” aplica-se aos produtos comerciais purificados normalmente contendo >95% de glicerol, cujo máximo grau de pureza 99,5% é chamado de glicerina P.A (GUTIÉRREZ OPPE, 2008).

Comercialmente podem ser encontrados três tipos principais de glicerina baseados na sua pureza: glicerina bruta, glicerina de qualidade técnica e glicerina refinada.

A glicerina bruta contém uma grande quantidade de metanol, água, sabões e sais. Normalmente tem um teor de glicerol de 40% a 88% em peso. A glicerina bruta é o coproduto natural obtido durante a produção de biodiesel. A glicerina de qualidade técnica é um produto de alta pureza com a maioria de seus poluentes removidos possui metanol livre, sabonetes, sais e outros componentes estrangeiros. Já a glicerina refinada é um produto de grau farmacêutico adequado para utilizar na alimentação, higiene pessoal, cosméticos, produtos farmacêuticos e outras aplicações especiais (DUQUE; ALZATE, 2010).

Diversas aplicações industriais estão disponíveis para o uso e comércio da glicerina, quando em concentrações adequadas. Apesar dessas inúmeras aplicações industriais, outra possibilidade viável e que deve ser considerada é a utilização da glicerina como uma alternativa para o óleo combustível. A queima em caldeiras, visando o aproveitamento do seu poder calorífico, é uma das finalidades mais empregadas ultimamente, porém, a liberação de compostos tóxicos, como a

acroleína, durante a queima da glicerina, é um problema ambiental que pode inviabilizar esse processo (DE BONI, 2008).

O glicerol, é altamente energético, está presente em alimentos e no metabolismo animal e tem potencial de uso como substituto parcial dos grãos de cereais ou outros ingredientes ricos em amido na alimentação animal (DEFRAIN et al., 2004; LAMMERS et al., 2008). Em 2010, embora sem publicação oficial, a glicerina oriunda do processamento do biodiesel foi autorizada na alimentação animal pelo Ministério da Agricultura e Produção Animal, desde que contenha uma concentração abaixo de 80% e no máximo 13% de umidade (OLIVEIRA, et al., 2013).

A glicerina bruta, objeto deste estudo, tem um valor muito baixo de mercado por causa de suas impurezas e contaminações decorrentes das condições e do processo de produção de biodiesel cru, como restos de catalisadores de sódio e potássio, ou cadeias de ésteres ou ácidos graxos que não sofreram transesterificação, ou seja, não formaram biodiesel e são separados com a glicerina (SANT'ANNA et al., 2012).

Em função do aumento na demanda desse biocombustível, surge a necessidade de estudos para novas aplicações desse subproduto, o qual, se descartado ao meio ambiente, pode ter alto impacto ambiental (ANTUNES et al., 2011).

2.4. Matéria-prima Utilizada na Produção de Briquete

O Brasil do ponto de vista da oferta de energia renovável possui uma matriz energética particularmente, limpa, sendo que a oferta interna de energia renovável, do país, é de 44,1% (BRASIL, 2012), o setor industrial ainda possui muitas das suas atividades dependentes de combustíveis fósseis. Como consequência, esse setor acaba agredindo o meio ambiente por emitir altíssimas concentrações de gases do efeito estufa, aumentando o aquecimento global, além de contribuir para a extensa extração de combustíveis na forma de petróleo e carvão (LAHIJANI; ZAINAL, 2011).

Porém, nos últimos anos, a biomassa passou a ser considerada uma alternativa para a diversificação da matriz energética mundial e consequente

redução da dependência de combustíveis fósseis (GONÇALVES; SARTORI; LEÃO, 2009).

Como o Brasil é um dos maiores produtores agrícolas e florestais do mundo, a quantidade de biomassa residual representa um depósito de energia que pode ser melhor aproveitada, especialmente na forma de briquetes e peletes. Os briquetes e peletes resultam da compactação de resíduos lignocelulósicos, e são utilizados na geração de energia na forma de calor ou eletricidade. Os peletes, normalmente, têm diâmetro entre 6 e 16 mm e comprimento de 25 a 30 mm, enquanto os briquetes têm diâmetro entre 50 e 100 mm e comprimento entre 250 a 400 mm. Porém esses valores podem variar, de acordo com a demanda do cliente, ou mesmo para atender especificações internacionais (DIAS et al., 2012).

Segundo Bhattacharya (2002), os briquetes e peletes são substitutos diretos da lenha em muitas aplicações, incluindo o uso residencial, em indústrias e estabelecimentos comerciais como olarias, cerâmicas, padarias, pizzarias, laticínios, fábricas de alimentos, indústrias químicas, têxteis e de cimento dentre outros.

Para Felfli et al. (2011), o processo de briquetagem de biomassa consiste na compactação dos resíduos em condições de altas temperatura e pressão até a formação de aglomerados homogêneos de biomassa que podem ser usados para a queima doméstica ou industrial com expressiva concentração da energia disponível. Densidade, resistência à compressão e poder calorífico são características importantes para a qualificação dos briquetes e são influenciadas por variáveis relacionadas ao processo de produção.

Conforme Nyakuma et al. (2014), a briquetagem é uma técnica de aglomeração de partículas finas que são compactadas mecanicamente por meio de pressão, podendo ser ou não utilizados aglomerantes, obtendo um produto compacto e com forma definida, permitindo a densificação energética da biomassa em pequenas unidades de volume chamados de briquetes. Estes briquetes possuem baixa umidade, aumento da resistência e de energia em comparação com as matérias-primas utilizadas na sua fabricação. Estas propriedades melhoram as características de combustão tais como temperatura de ignição, o valor calorífico, de massa e de calor transferido, bem como o transporte e armazenamento dos materiais com economia.

Em diferentes partes do mundo os briquetes são produzidos e utilizados a partir de resíduos agrícolas (KIBWAGE et al., 2006; FARIA; BRITO, 1981; FAO, 1987; SMITH, 2004; ERIKSSON; PRIOR, 1990).

No Brasil são produzidos cerca de 1,2 milhão de toneladas de briquetes por ano. Destes, 930 mil toneladas são de madeira e 272 mil toneladas de resíduos agrícolas como bagaço de cana, palha e casca de arroz, resíduos de caroço de algodão entre outros (BRAZILIAN ASSOCIATION INDUSTRY BIOMASS AND RENEWABLE ENERGY, 2012). A taxa de crescimento da demanda de briquete é de 4,4% ao ano, o que demonstra a importância potencial no mercado de energia renovável (SILBERSTEIN, 2011).

Um dos materiais mais utilizados para a produção de briquetes no país são os finos de carvão vegetal, principalmente nos estados de Minas Gerais e São Paulo, obtidos na produção, transporte e manuseio. Por ser um material muito friável gera aproximadamente 25% de finos em pó. Outras matérias-primas usadas são os resíduos do beneficiamento agroindustrial de produtos agrícolas, como mandioca, café, algodão, arroz, bagaço de cana-de-açúcar, etc. A disponibilidade de resíduos agrícolas no país alcança quantidades expressivas (GONÇALVES, 2010).

Praticamente todos estes resíduos podem ser usados para a briquetagem, porque eles são homogêneos, possuem fluidez e contêm menos de 15% de umidade (FELFLI et al., 2011).

Na Europa e nos Estados Unidos, os briquetes possuem elevada produção, consumo e qualidade sofrendo constante evolução tecnológica. Na fabricação de briquete, as matérias-primas utilizadas podem ser oriundas de resíduos agroindustriais como: serragem, maravalha, casca de arroz, palha de milho, sabugo, bagaço de cana-de-açúcar, casca de algodão, casca de café, casca de soja, feno de braquiária entre outros, que são gerados durante o processamento das culturas ou como subproduto dos processos industriais (GONÇALVES, 2010).

Brito (1997) afirma que o carvão vegetal é o principal combustível de madeira utilizado nas siderúrgicas do país. As famílias ocupam o segundo lugar em termos de consumo de combustível de madeira para uso doméstico. Portanto, briquetes produzidos com materiais alternativos, podem reduzir o consumo de carvão feito a partir de florestas existentes.

Desta maneira, seria possível a substituição da lenha pelo briquete, como produto equivalente ou até mesmo, com qualidade superior a qualquer lenha. Além disso, a busca por alternativas energéticas como o uso da biomassa é compensatória em função de minimizar os efeitos poluidores das atividades antrópicas além de diminuir os custos com aterros sanitários (GONÇALVES, 2010).

Quanto ao cenário de peletes de madeira, a demanda mundial está aumentando rapidamente, devido à conveniência e facilidade de manuseio e transporte. Em 2010, o comércio mundial de combustíveis sólidos a partir da biomassa (excluindo carvão) ascendeu a 18 milhões de toneladas. Mais de 90% desse total foi de peletes (40%) resíduos de madeira (25%) e lenha (25%). A Europa utiliza aproximadamente 85% do total produzido no mundo, ressaltando-se que somente a Suécia responde por 20% desse consumo (SAWIN et al., 2012).

A briquetagem ou a peletização de resíduos agrícolas e agroindustriais é uma forma bastante eficiente para concentrar a energia disponível na biomassa desses resíduos, de modo a obter produtos com maior densidade (em kg m^{-3}) e densidade energética (em MJ m^{-3}) superiores às dos resíduos originais. Em $1,00 \text{ m}^3$ de briquetes contém pelo menos 5 vezes mais energia que $1,00 \text{ m}^3$ de resíduos. Isso, levando-se em consideração a densidade a granel e o poder calorífico médio desses materiais. Devido à dimensão a às grandes distâncias internas do país, o aspecto concentração energética assume também grande importância (QUIRINO, 1991a).

Portanto, a briquetagem é uma alternativa potencial para utilização dos resíduos das atividades agrícola, florestal e agroindustrial, em substituição a lenha, pois este processo aumenta a densidade dos materiais concentrando a energia e diminuindo significativamente o volume dos resíduos, facilitando o manuseio, o transporte e o armazenamento, melhorando a combustão e diminuindo a emissão de partículas (TUMULURU et al., 2011; KALIYAN; VANCE MOREY, 2009).

As vantagens e desvantagens do processo de compactação de resíduos de biomassa segundo Bhattacharya (2004) encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens do processo de compactação de resíduos de biomassa. Oxford, 2004

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Aumento do conteúdo calorífico do material por unidade de volume; - Maior facilidade dos processos de transporte e estocagem; - O combustível produz uma queima uniforme e de qualidade; - O processo ajuda a resolver o problema da disponibilidade dos resíduos; - Elimina a possibilidade da combustão espontânea na estocagem; - Reduz a biodegradação dos resíduos; - Devido à baixa umidade, atinge rapidamente temperaturas altas, produzindo menos fumaça, cinzas e fuligem, se comparado com a lenha; - O material resultante da compactação atinge uma maior temperatura de chama e tem uma maior regularidade térmica mantendo o calor homogêneo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Altos investimentos em equipamentos e gastos de energia no processo; - Tendência dos briquetes em se desmancharem quando expostos a água ou submetidos a alta umidade; - Alta carga tributária incidente na venda do produto e nos equipamentos utilizados.

Fonte: Bhattacharya (2004). Adaptado pelo autor

2.4.1. Fatores que influenciam na produção e qualidade de briquetes

Kaliyan e Vance Morey (2009) discutiram como o final do produto é afetado pelos pré-tratamentos e as características iniciais da biomassa, ou seja, a umidade, o tamanho de partícula, o teor de ligante, a temperatura e a pressão de compactação.

Para Temmerman et al. (2006), uma série de fatores impactam significativamente a resistência e a durabilidade de briquetes e peletes. Os principais parâmetros considerados relacionados à matéria-prima e processo são:

- Matéria-prima: teor de umidade, tamanho de partícula, pré-condicionamento, composição química, adição ou presença de agentes ligantes.
- Processo: dimensões da matriz e a distância entre a prensa e a matriz, temperatura, pressão entre outras.

2.4.1.1. Teor de umidade

Gonçalves, Sartori e Leão (2009) destacam que o teor de umidade deve estar compreendido entre 15-20% para que ocorra a queima, visto que os valores superiores reduzem o valor do calor de combustão, a temperatura da câmara de queima e a temperatura dos gases de escape. Valores de umidade acima de 15% podem levar à quebra do briquete ou à degradação biológica durante o transporte e armazenamento. Por outro lado, baixo teor de água (<5%) pode resultar em perda de material, bem como a sua quebra, geração de finos durante o transporte e armazenamento.

De acordo com Bhattacharya, Sett e Shrestha (1989), o 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.

A secagem também é necessária para evitar a degradação por ação de microrganismos ou condições climáticas, levando à alteração das características químicas e físicas do material (DIAS et al., 2012).

Quanto menor o teor de umidade dos resíduos madeireiros, maior será a produção de calor por unidade de massa. Farinhaque (1981) indica que para a queima, a madeira não pode ter teor de umidade superior a 20%, pois os valores superiores reduzem o valor do calor de combustão, a temperatura da câmara de queima e a temperatura dos gases de escape. A presença de água representa poder calorífico negativo, pois parte da energia liberada é gasta na vaporização da água e se o teor de umidade for muito variável, pode dificultar o processo de combustão, havendo necessidade de constantes ajustes no sistema (BRITO, 1986).

Se, por um lado, a água facilita a gelatinização do amido, fragmentação de proteína, solubilização de fibras durante a densificação, o excesso da mesma pode levar à compactação e entupimento na alimentação do maquinário. (DIAS et al., 2012). Estudos mostram que o teor de água ideal, para a maioria das biomassas, está entre 5-10%, pois resulta em um produto mais denso, estável e durável do que briquetes compactados com teores de água acima dos 15%. No entanto, outros estudos sugerem teores de umidade entre 15 e 23% para produtos como serragem e palha de trigo (DEMIRBAS; SAHIN-DEMIKIBAS; DEMIRBAS, 2004).

2.4.1.2. Tamanho das partículas

Dias et al. (2012) relatam que o tamanho das partículas é muito importante para determinar a qualidade e durabilidade de um pelete ou briquete. Quanto menor for o tamanho de partícula, menor será a porosidade do produto final e, portanto, maior será a sua densidade. A baixa porosidade do pelete ou briquete pode, entretanto dificultar a queima devido ao menor número de espaços livres para difusão de calor. Sendo assim, a taxa de combustão dos produtos muito densos será menor e maior o período de combustão. Estudos mostram que a condição ideal é a presença de partículas de diferentes tamanhos, pois isso possibilita a melhora no empacotamento das partículas e contribui para a alta resistência dos briquetes e peletes.

A matéria-prima ideal deverá ser composta por uma mistura de partículas de vários tamanhos, sendo que a medida máxima depende do tipo de material e do diâmetro da matriz. Geralmente é aceitável uma granulometria entre 5 e 10 mm, enquanto que grandes prensas com matrizes de 125 mm de diâmetro aceitam partículas de até 15 mm. Segundo Eriksson e Prior (1990) uma matéria prima de baixa granulometria resulta em briquetes muito densos, mas requer pressões e temperaturas muito elevadas para aglomerar as partículas sem adição de aglutinantes.

A redução no tamanho das partículas é geralmente recomendado, a fim de reduzir os espaços interpartículas e criar laços mais fortes durante a compressão. Estudos mostram que a condição ideal é a presença de partículas de diferentes tamanhos, pois isso possibilita a melhora no empacotamento das partículas e contribui para a alta resistência dos briquetes e peletes. Uma distribuição ampla de tamanho de partículas promove a incorporação das partículas pequenas pelas partículas de maior dimensão. Entretanto, partículas muito finas, com tamanho inferior a 1 mm, não são adequadas, porque são menos densas, mais coesas e pouco fluídas (MISSAGIA et al., 2011; BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989; FAVORODE; O'CALLAGHAN, 1987).

Exceto materiais que possuem pequeno tamanho de partícula, como serragem e casca de arroz, todos os outros materiais devem ser reduzidos a 6-8 mm

de tamanho com cerca de 10-20% de finos para se obter bons resultados de briquetagem (DIAS et al., 2012).

2.4.1.3. Aglutinante

A lignina, as proteínas, amido, gorduras e carboidratos solúveis são adesivos naturais da biomassa. A presença desses compostos justifica não utilizar aglomerantes artificiais para a briquetagem ou a peletização. Entretanto, caso a matéria-prima tenha deficiência desses compostos, há a necessidade da adição do ligante. Mais de 50 ligantes orgânicos e inorgânicos têm sido empregados na densificação, sendo os mais comuns no Brasil: amido de milho, fécula de mandioca, resinas sintéticas, alcatrão vegetal e melaço de cana-de-açúcar (DIAS et al., 2012).

As principais características dos aglutinantes são: alta taxa de aglomeração; inexistência de material inerte em sua composição; disponibilidade; alta resistência mecânica; resistência à umidade e boas condições de operacionalidade. Em alguns aglutinantes podem ocorrer reações químicas com o material compactado que conferem boas características ao briquete, como é o caso da cal e do melaço que reagem com o carvão formando uma camada de proteção à água. Outros aglutinantes podem ter propriedades lubrificantes e reduzem a fricção entre partículas, aumentando a compactação, servindo também como um agente intermediário entre o briquete e as ferramentas. Alguns exemplos são: óleos, amido seco, talco, ceras e grafite (SALAME, 1992).

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. A necessidade da resistência à água depende principalmente do giro de estoque, do tipo de embalagem, do local e do tempo de armazenagem. A maioria dos fabricantes de briquetes para churrasqueira vende seus produtos em embalagens fechadas para diminuir ou eliminar o contato com a umidade. No entanto, fabricantes de briquetes para uso industrial têm que tornar seus produtos resistentes à umidade para suportar transporte em carrocerias descobertas ou parcialmente cobertas. Nesses casos,

sugere-se que se utilizem ligantes à prova de água, como resinas, de modo a reduzir o dano causado pela umidade (RICHARDS, 1990).

Para Dias et al., (2012), quando a resistência e a durabilidade dos briquetes ou peletes não estão de acordo com os padrões de qualidade ou com os requisitos de mercado, os ligantes são adicionados à mistura de alimentação na faixa de 0,5-5% (em peso) para aumentar a resistência mecânica ou para minimizar as variações de qualidade do compactado.

2.4.1.4. Temperatura

A temperatura de compactação 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).

Para Gonçalves (2010) a compactação em condições acima de 100°C permite a fluidificação da lignina contida nas células da biomassa, a qual age como um aglutinante entre as partículas, dispensando, assim, o uso de ligantes adicionais na biomassa. Além disso, temperaturas elevadas evaporam parte da umidade da biomassa, melhorando o poder calorífico do produto compactado.

2.4.1.5. Pressão

A aplicação de pressão pelos equipamentos de compactação nas partículas da biomassa favorece diferentes mecanismos de ligação. Em altas pressões, os ligantes naturais, tais como amido, proteína, lignina e pectina da biomassa são extraídos das células vegetais, contribuindo assim para a interligação e coesão das partículas. Normalmente, o efeito da pressão é estudado em laboratório, utilizando um conjunto de molde e de êmbolo, onde a pressão é aplicada à biomassa por uma máquina de ensaio universal ou prensa hidráulica. Por meio desses experimentos,

verificou-se o efeito dos ligantes naturais existentes na matéria-prima (DIAS et al., 2012).

Bhattacharya, Sett e Shrestha (1989) classificaram os processos de compactação de biomassa em duas categorias principais: compactação quente em alta pressão e compactação fria em baixa pressão. O primeiro tipo é o mais importante em relação à variedade de matérias que pode processar e às características dos produtos obtidos, tanto que se tornou o mais comum e o termo compactação usualmente se refere implicitamente a este tipo de técnica.

A conveniência de praticar a compactação em condições de elevada pressão consiste na obtenção de um produto com maior densidade e maior durabilidade, especialmente em relação ao manuseio e transporte (GONÇALVES, 2010).

2.4.2. Caracterização física, química e energética dos briquetes

Os biocombustíveis sólidos possuem características combustíveis muito variáveis e que dependem da matéria-prima primordial, bem como do pré-tratamento e condições a que é sujeito previamente à sua utilização (SALGUEIRO, 2014).

De acordo com Fernandes (2015) a caracterização das propriedades físicas e químicas dos combustíveis sólidos pode determinar seu valor econômico, desde a produção até sua utilização industrial, além de auxiliar no controle das emissões atmosféricas, bem como a disposição adequada dos rejeitos sólidos, minimizando os efeitos indesejáveis ao meio ambiente. As análises de combustíveis sólidos obtidos a partir da biomassa consistem principalmente das análises imediata (determinação da umidade, cinza, matéria volátil e carbono fixo), elementar (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cloro) e térmica (poder calorífico).

No Brasil não existem normas específicas para análise dos parâmetros de qualidade de biocombustíveis sólidos. Por isso, utilizam-se as mesmas normas aplicadas a carvão vegetal e mineral para a produção de briquetes e peletes.

2.4.2.1. Teor de umidade

O teor de umidade corresponde à quantidade de água presente num determinado produto, podendo ser muito elevado em biomassas frescas, expostas

ao ar e mais baixo em biomassas processadas como peletes e briquetes. A utilização de biomassa como biocombustível sólido exige assim o conhecimento dos níveis de umidade, sendo fundamental reduzi-la mediante secagem para uma utilização segura e eficiente (FERNANDES, 2015).

Altos teores de umidade afetam o processo de combustão exigindo tempos de residência mais longos para que ocorra a secagem antes do processo de desvolatilização, pois se o teor de umidade da biomassa for superior a 60%, muito dificilmente ocorre combustão (LOO; KOPPEJAN, 2008).

Dado que a umidade afeta o conteúdo calorífico dos combustíveis, para altos teores de umidade torna-se necessário utilizar maiores quantidades de combustível para atingir uma determinada potência da instalação, o que leva à produção de maiores quantidades de gases de combustão, implicando a necessidade de utilização de equipamentos com maiores dimensões (KHAN et al., 2009). Outro fator relacionado a existência de valores elevados de umidade, é a ocorrência do crescimento de fungos e degradação da biomassa no armazenamento além da baixa estabilidade durante o transporte (MENDES, 2011; QUAACK; KNOEF; STASSEN, 1999).

Conforme Vassilev et al. (2010), o teor de umidade da biomassa pode variar numa ampla gama de 3-63%. Este parâmetro é muito importante, uma vez que pode variar substancialmente dependendo do tipo de biomassa e o nível de secagem. Por exemplo, os resíduos de cereais podem possuir baixos teores de umidade, enquanto que nos resíduos florestais os teores de umidade podem ascender a 70% (MENDES, 2011; QUAACK; KNOEF; STASSEN, 1999).

2.4.2.2. Teor de voláteis e cinzas

O teor de voláteis - TV e o teor de cinzas – TCZ (ou inertes) fornecem informações aproximadas da combustibilidade dos resíduos. O teor de cinzas é a percentagem em massa de cinzas após a queima completa do briquete ou pelete. A maioria dos resíduos de biomassa tem baixo teor de cinzas, exceto a casca de arroz que pode conter até cerca de 25% de cinzas, devido ao alto conteúdo de sílica da matéria prima (DIAS et al., 2012).

Os elementos que dão origem às cinzas podem ser inerentes à biomassa, ligados às estruturas contendo carbono, ou podem ser introduzidos no combustível como fragmentos minerais do ambiente externo, durante a colheita com recurso ao uso de maquinarias (LOO; KOPPEJAN, 2008).

O teor de cinzas pode variar entre 0,1% e 46,3%. Sendo assim um parâmetro importante nas análises de biomassa porque dá indicação sobre o conteúdo de matéria inorgânica que dará origem à formação de cinzas nos sistemas de combustão e fornece também indicação sobre a possível existência de contaminação da biomassa (VASSILEV et al., 2010).

De acordo com Salgueiro (2014) a sua importância é grande na medida em que é necessário acautelar ciclos de limpeza e manutenção, bem como a existência de mecanismos de despoejamento e redução de emissão de partículas nos sistemas de combustão.

Os principais elementos inerentes à biomassa que formam a matriz das cinzas são o Ca, Si, Mg, K, Na, Al, Fe e P. No processo de combustão, o combustível é oxidado formando-se óxidos destes elementos CaO, SiO₂, MgO, K₂O, Na₂O, Al₂O₃, Fe₂O₃ e P₂O₅. Alguns destes óxidos podem combinar-se formando compostos mais complexos que podem causar problemas em alguns equipamentos de combustão de biomassa (PALAZON, 2013).

Altos teores de cinzas podem levar à corrosão do queimador e a desgastes de todos os equipamentos por abrasão, o que se torna mais crítico quando o teor de cinzas for superior a 4% (MANDE, 2009).

O teor de voláteis refere-se à fração de biomassa que, por via de decomposição térmica até aos 900 °C, passa para a fase gasosa sob a forma de variados gases voláteis combustíveis. O aquecimento da biomassa leva à libertação de compostos gasosos contendo vapor de água, hidrocarbonetos leves, CO, CO₂ e H₂. (KHAN et al., 2009). A biomassa apresenta uma fração de matéria volátil relativamente elevada a rondar 64% contra 31% no carvão (VASSILEV et al., 2010).

O teor de matéria volátil da biomassa contribui tipicamente com cerca de 70% de calor para o processo de combustão (WILLIAMS et al., 2012) e afeta, em particular, a estabilidade da chama, a formação de poluentes e a eficiência global da combustão. Como resultado da elevada quantidade de matéria volátil, a biomassa apresenta uma elevada reatividade que influencia o processo de combustão, na

medida em que uma parte do combustível de biomassa é vaporizado antes de ocorrerem às reações de combustão em fase gasosa (FERNANDES, 2015).

Neste sentido, tem de se garantir as condições de operação adequadas, nomeadamente de temperatura e fornecimento de O_2 , bem como um *design* adequado do equipamento a fim de se conseguir a combustão completa com alta eficiência e baixas emissões de poluentes (KHAN et al., 2009).

As cinzas são substâncias compostas de material inorgânico e tem relação inversa com o poder calorífico. Os materiais voláteis durante a queima da biomassa volatilizam rapidamente diminuindo o tempo de residência do combustível dentro do aparelho de combustão, podendo contribuir para uma baixa eficiência energética. O carbono fixo, por sua vez, tem relação direta com o poder calorífico. Um maior teor de carbono fixo implica em um maior tempo de residência dentro do aparelho de queima (CHAVES et al., 2013)

Conforme Vale, Brasil e Leão (2002) o teor de carbono fixo depende principalmente do teor de material volátil, já que os teores de cinzas para madeira são baixos. Desta forma, madeira com maiores teores de material volátil tem menores teores de carbono fixo.

2.4.2.3. Poder calorífico

Segundo Salgueiro (2014), o poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de energia térmica liberada durante a queima completa de uma unidade de massa ou de volume de combustível, expressa em $J\ kg^{-1}$; $J\ m^{-3}$; $kcal\ kg^{-1}$ ou $kcal\ m^{-3}$. O poder calorífico superior - PCS corresponde ao conteúdo total de energia libertada quando o combustível é queimado na presença de ar, contando com o calor latente necessário para evaporar a água proveniente do combustível e formada na combustão. Essa queima é feita em uma câmara adiabática, na qual a amostra é depositada com 0% de umidade e incinerada, com medições contínuas da temperatura através de uma bomba calorimétrica.

Atualmente as bombas calorimétricas expressam o PCS dos combustíveis nas unidades padrão. No entanto, Dias et al. (2012) propõem que o valor do poder calorífico da madeira, em $MJ\ kg^{-1}$, e da maior parte dos resíduos agroflorestais pode ser calculado usando a seguinte Equação 1:

$$PCS = 20,0 \times (1 - TCZ - TU) \quad (\text{Equação 1})$$

em que:

PCS = Poder calorífico superior (kcal kg^{-1});

TCZ = teor de cinzas (%);

TU = teor de umidade do combustível (%).

Porém, mesmo com teor de umidade da massa de 0%, a reação química provocada pela combustão faz com que as moléculas de hidrogênio constituintes do material se unam às de oxigênio formando água, exigindo um gasto de energia para a sua evaporação. Para se ter um valor mais preciso da quantidade de energia efetivamente disponível no combustível é calculado o Poder Calorífico Inferior - PCI, que só é igual ao PCS no caso de o material analisado não conter hidrogênio em sua composição. Caso contrário, é excluída a interferência desse vapor d'água produzido durante a combustão no processo de medição do PCS. Uma forma de obtenção do PCI, segundo Brito (1986), é através da Equação 2:

$$PCI = PCS - 600 (9H \div 100) \quad (\text{Equação 2})$$

em que:

PCI = poder calorífico inferior (kcal kg^{-1});

PCS = poder calorífico superior (kcal kg^{-1});

H = teor de hidrogênio (%);

600 = calor de condensação da água a 0 °C (zero graus Celsius), constante;

9 = representa a quantidade de água (em quilogramas) que se formam ao oxidar um quilo de hidrogênio.

De acordo com a composição química elementar média da madeira pode-se assumir o teor de hidrogênio como 6% (SILVA, 2001).

A fórmula exclui a interferência do vapor de água produzido na combustão do hidrogênio (H) presente no material em combinação com o oxigênio. A maioria dos sistemas de utilização da biomassa para a produção de energia não seca o material abaixo de 10% de umidade, portanto, o poder calorífico que melhor se aproxima da realidade é o Poder Calorífico Útil - PCU, que é derivado do PCI, levando-se em

consideração um dado teor de umidade (TU), e segundo Vale et al. (2007) e Gentil (2008), é calculado através da Equação 3:

$$PCU = [(PCS - K) \times (1 - TU) - (600 \times TU)] \div 238,89 \quad (\text{Equação 3})$$

em que:

PCU = poder calorífico útil (kcal kg^{-1});

PCS = poder calorífico superior (kcal kg^{-1});

K = constante de calor de vaporização da água no calorímetro, no valor de 324 kcal kg^{-1} ;

600 = calor de condensação da água a 0°C (zero graus Celsius), constante;

238,89 = transformação de kcal kg^{-1} em MJ kg^{-1} ou GJ t^{-1} ;

TU = teor de umidade.

O poder calorífico inferior ou líquido (PCI) leva em conta a energia não recuperada a partir do vapor de água residual, a partir da oxidação do conteúdo de hidrogênio. É muitas vezes utilizado para fins de referência, especialmente em aplicações industriais. Na madeira e na maioria dos resíduos agroindustriais, o teor de hidrogênio é cerca de 6% por peso em base seca e sem cinzas, o que significa que a equação acima poderia ser alterada como se apresenta na Equação 4:

$$PCI = 18,7 \times (1 - TCZ) - 21,2 \times TU \quad (\text{em MJ kg}^{-1}) \quad (\text{Equação 4})$$

O poder calorífico, considerando a base seca, varia com o teor de cinzas da amostra, sendo que quanto maior for a percentagem de cinzas do combustível, menor será o poder calorífico (MENDES, 2011).

A biomassa apresenta menores valores de poder calorífico que o carvão, devido, sobretudo ao mais baixo teor de carbono e mais elevado teor de oxigênio. Fernandes (2015) afirma que o conteúdo de C e H contribui para o aumento do PCS e o conteúdo de O contribui para a sua diminuição, e o elemento H influencia o PCI, devido à formação de água. Para uma biomassa que contenha cerca de 87% de umidade o PCI será zero. Na prática, para se conseguir queimar um combustível e extrair a energia, o teor máximo admissível de umidade deve ser inferior a 55% (QUAAK; KNOEF; STASSEN, 1999).

2.4.2.4. Resistência mecânica

A resistência dos briquetes à compressão é determinada para se prever o seu comportamento mecânico submetido a uma determinada carga ou esforço, considerando a sua posição de armazenamento. No ensaio, o briquete é submetido à pressão contínua e progressiva até que o mesmo fracture. A resistência à compressão é um parâmetro significativo na avaliação do briquete ao manuseio e condições de trabalho (MELO, 2000).

Para Quirino (1991a), além do tamanho da partícula na composição do briquete, a umidade da matéria prima também pode influenciar diretamente na qualidade do briquete produzido, no que diz respeito à sua resistência mecânica. Assim, para os materiais lignocelulósicos com teores de umidade em base seca muito acima de 15% ou muito secos (menor que 9%), podem se observar estouros ou trincas e rachaduras no briquete recém formado, conseqüentemente causando a sua desintegração durante o transporte e manipulação ou inviabilizando tecnicamente a briquetagem.

Sotande, Oluyeye e Abah (2010) recomendam a determinação da Carga Máxima de Ruptura - CMR nos sentidos longitudinal e diametral para a determinação da resistência mecânica dos briquetes, pois em condições de transporte e manuseio, os briquetes estariam submetidos a ambos os esforços.

Por outro lado, vários são os estudos da resistência mecânica dos briquetes que indicam que estes materiais compactados devem apresentar maior resistência no sentido diametral, pois são observados valores de carga máxima de ruptura extremamente inferiores nesta posição, indicando uma possível quebra do briquete também para esta posição no caso de manuseio, quedas e durante o transporte (FURTADO et al., 2010; FERRAGUTTI et al., 2011; LEITE et al., 2011; RAMOS e PAULA et al., 2011).

Conforme descrito por Dias et al. (2012), peletes têm menor tendência de sofrer quebras devido a quedas, se comparados aos briquetes. Entretanto, devem ser feitos estudos contemplando a capacidade máxima de empilhamento para ambos, considerando constituintes do compactado (biomassa, adesivo), condições de operação (temperatura, pressão) e a embalagem, para determinar a altura máxima de empilhamento.

A resistência do briquete à ruptura pela compressão possui boas correlações lineares com o teor de carbono fixo e com o teor de cinzas, sugerindo-se que deve haver aumento de resistência do briquete com redução do teor de cinzas e, conseqüentemente, aumento do teor de carbono fixo (QUIRINO, 1991a).

Diante disso, a avaliação mecânica dos briquetes pode ser usada como ferramenta para direcionar seus usos, quer sejam domésticos ou até mesmo aplicações em altos fornos industriais (SOUZA, 2014).

2.4.2.5. Densidade aparente e energética

Besley (1966), destaca que o conceito físico de densidade é a quantidade de massa contida na unidade de volume. Ela pode ser determinada utilizando-se a seguinte Equação 5:

$$D = \frac{m}{v} \quad (\text{Equação 5})$$

sendo:

D = densidade

m = massa

v = volume

Várias normas internacionais descrevem a densificação das partículas sólidas como um indicador de qualidade de briquetes e peletes. A densidade é uma ferramenta utilizada também como parâmetro para análise da qualidade para a elaboração das determinações técnicas (RABIER et al., 2006).

A densificação da matéria prima resulta em briquetes com alta densidade, baixa umidade e forma adequada. Para a determinação da densidade há vários métodos dentre eles o método do deslocamento dos líquidos que é baseado no principio de Arquimedes no qual o volume do briquete é estimado pelo volume de água deslocado no momento em que a amostra é submergida em líquido, entretanto este método não é conveniente uma vez que os briquetes são materiais higroscópicos e o líquido no qual foi submergido pode ser absorvido. Além disso, bolhas de ar podem acumular na superfície da amostra enquanto submersos devido à tensão superficial. O método estereométrico é baseado na medição das

dimensões (diâmetro e altura) de um briquete de forma regular, com o auxílio de um paquímetro digital. Deste modo, o volume da amostra é determinado pelo cálculo do volume de um cilindro (VENDRASCO et al., 2010).

Para tanto, 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 briquete ou pelete único e a densidade de um aglomerado de briquetes ou peletes, 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 peletes (DIAS et al., 2012).

A densidade dos compactados depende da densidade do resíduo lignocelulósico de origem, da pressão de briquetagem ou de peletização e, em certo grau, do tempo e temperatura de processamento (DERMIBAS; SAHIN-DERMIBAS; DERMIBAS, 2004). Geralmente os materiais com maior umidade e tamanhos de partículas maiores tendem a reduzir a densidade do produto final, enquanto que as temperaturas e pressões de processo mais elevadas aumentam a densidade dos produtos.

Por sua vez, a densidade a granel depende da forma de embalagem, acondicionamento e empilhamento. Densidade a granel baixa tem efeito negativo sobre a densidade energética da pilha ou aglomerado e, por conseguinte, também sobre os custos de transporte e da capacidade de armazenamento, tanto para o produtor do briquete ou do pelete como para o consumidor final (BORGHI, 2012).

Visando à utilização energética dos combustíveis de biomassa, é desejável alta densidade energética, ou seja, maior quantidade de energia por unidade de volume. Neste sentido, a briquetagem é um processo bastante eficiente para aumentar a densidade energética da biomassa (PROTÁSIO et al., 2011).

Em geral, a densidade aparente dos briquetes varia entre 500 e 1200 kg m⁻³, enquanto a dos peletes vai de 500 a 750 kg m⁻³. A densidade a granel dos briquetes dificilmente excede 500 kg m⁻³, mas ainda é significativamente maior que a densidade a granel da biomassa bruta não adensada. Observações qualitativas também têm demonstrado que à medida que a densidade e a umidade dos briquetes

aumentam, a ignitabilidade diminui, o que pode dificultar o processo de combustão (DERMIBAS; SAHIN-DERMIBAS, 2009).

A densidade da madeira corresponde a uma maior ou menor resistência mecânica e valor energético. Quanto maior a densidade da madeira, maior será a resistência mecânica e maior será o valor energético, pois a densidade está intimamente relacionada com a quantidade de celulose que a constitui. Para o uso energético, quanto mais alta a densidade da madeira, maior será o rendimento energético, devido ao maior teor de celulose e lignina (GOULART et al., 2012).

Geralmente a biomassa de alimentação é muito leve, com densidades variando de 50 a 180 kg m⁻³ e, devido à natureza volumosa, é normalmente armazenada em campo aberto para garantir a aeração natural. Em se tratando de regiões ou períodos do ano em que há chuva constante, a biomassa deve ser armazenada em silos ou coberta por plásticos ou lonas impermeáveis sob um galpão ou cobertura, de modo que os efeitos de ventos sejam minimizados (MENDES, 2011).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Coleta e Seleção dos Materiais

Foi coletada uma amostra de 600 kg de Resíduos de Podas Urbanas – RPU no Município de Vera Cruz do Oeste, localizado na região oeste do Estado do Paraná, com Latitude de 25° 03' 28" S e Longitude de 53° 52' 37" W e Altitude de 560 m.

Também foram coletados 700 kg de resíduo de processamento de mandioca (bagaço) proveniente da Unidade de Fecularia da Cooperativa Agroindustrial Lar instalada no Município de Missal – PR com Latitude de 25° 05' 31 "S e Longitude de 54° 14' 51" W e Altitude de 328 m.

A amostra de 8 kg de glicerina residual resultante da produção de biodiesel por rota metálica com catálise básica foi coletada na Universidade Federal do Paraná - UFPR, localizada no Município de Palotina – PR com Latitude de 24° 17' 02" S e Longitude de 53° 50' 24" W e Altitude de 333 m.

As amostras de RPU foram moídas num triturador de galhos, marca Ecológica, modelo PGM-400 com acionamento por motor a diesel estacionário de 54 a 67 cv. O equipamento possui rotor picador de 600 mm de diâmetro com oito facas, sistema de alimentação por quatro rolos, apoiados em rolamentos, sendo dois rolos inferiores lisos e dois rolos superiores dentados com cabeçote oscilante o que promoveu a obtenção de uma granulometria compreendida entre 5 a 10 mm.

3.2. Secagem e Acondicionamento dos Materiais

Para a secagem das amostras de RPU e do bagaço de mandioca, foi utilizado um secador do tipo container, com circulação forçada de ar aquecido via energia solar (Figura 1), localizado na propriedade rural da Sra. Guiomar Maria de Santana Neves no Município de Vera Cruz do Oeste - PR. O sistema de circulação do ar é parcialmente fechado, havendo a entrada de ar ambiente quando necessário. Possui quatro carrinhos de dimensões 2,43 X 1,6 X 1 m, dispostos dois na frente e dois atrás, cada um contendo 20 bandejas, totalizando 80. As bandejas possuem as

dimensões de 0,06 X 1,6 X 1 m com orifícios na base para circulação de ar por entre o material. As bandejas estão espaçadas em 0,4 m entre si.



Figura 1: Secador via aquecimento solar

A amostra de RPU foi submetida à desidratação, no secador anteriormente descrito com temperatura variando de 20 a 30°C conforme pode-se observar na Figura 2.



Figura 2. Resíduos de podas urbanas. A - Material triturado. B – Acondicionamento no secador

O bagaço de mandioca, por possuir uma umidade muito elevada, (em torno de 85%) conforme Laudo Técnico apresentado pela Fecularia da Cooperativa Agroindustrial Lar (Apêndice A), passou por um processo de centrifugação (Figura 3). O bagaço foi colocado em sacos de pano e centrifugado em centrífuga de uso doméstico para a retirada do excesso de água (Figura 3).

Em seguida, o material foi peneirado e seco em secador anteriormente descrito com temperatura variando de 20 a 30 °C (Figura 3).

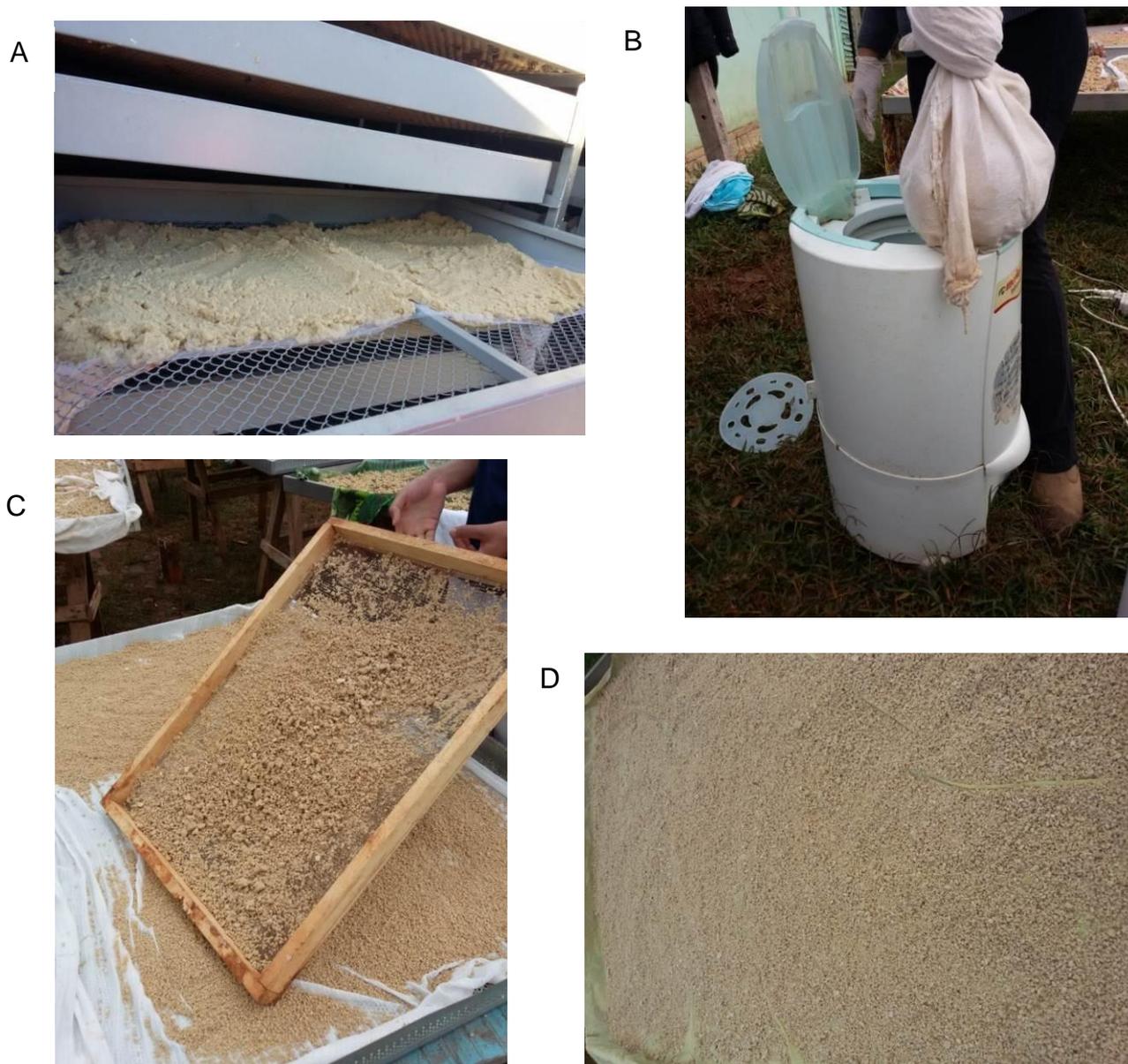


Figura 3: Bagaço de mandioca. A – Material antes da secagem. B – Centrifugação. C – Peneiramento. D – Material seco

As determinações das massas das amostras de RPU e de bagaço de mandioca foram realizadas com o auxílio de uma balança de plataforma, marca Toledo, modelo 2124/3, máx. 250 kg e mín. 1 kg com variação de 0,05 kg (Figura 4).

As amostras de RPU e do bagaço de mandioca foram mantidas por 30 dias no secador, até atingirem o teor de umidade desejado 15 a 20% (GONÇALVES; SARTORI; LEÃO, 2009). Para verificação da umidade foram aferidas as massas em balança tipo plataforma, o material de duas bandejas. Repetindo-se o mesmo procedimento até massa constante dos materiais.

O teor de umidade das amostras de RPU e do bagaço de mandioca foi realizado no Laboratório de Física do Solo - LAFIS da UNIOESTE *campus* de Cascavel de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - NBR 8293/83.

É importante destacar que o índice pluviométrico no período de 01 a 31 de maio de 2016 foi de 202,60 mm (SECRETARIA MUNICIPAL DE AGRICULTURA, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, 2016) o que dificultou o processo de secagem dos materiais, uma vez que o secador trabalha com o ar aquecido pela radiação solar.



Figura 4: Determinações das massas

A análise do teor de umidade da glicerina foi realizada no Laboratório de Produção de Biocombustíveis – LPB, da UFPR - setor Palotina de acordo com a norma técnica ABNT - NBR 8293/83.

De acordo com a análise de umidade, foi verificado que a glicerina encontrava-se com teor de 4%, não havendo, portanto, a necessidade de secagem.

Para análise do hidróxido contido na glicerina foi utilizado o método de calcinação seguido por titulação (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008). A análise foi realizada no Laboratório de Química Analítica da UNIOESTE *campus* de Toledo.

De acordo com a análise, a quantidade de hidróxido presente na glicerina foi de $7,08 \cdot 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$.

Após a secagem dos materiais (RPU e bagaço de mandioca), os mesmos foram acondicionados em sacos plásticos revestidos de papelão a fim de serem transportados até a empresa LENECO – Lenha Ecológica, localizada na BR Rodovia de Acesso à PRC 163, km 1, Zona Rural no Município de Capitão Leônidas Marques – PR, para serem submetidos ao processo de briquetagem.

3.3. Produção dos Briquetes

Para a produção dos briquetes foram utilizadas as amostras dos RPU, de bagaço de mandioca e a glicerina nas proporções propostas para a briquetagem sendo realizado o planejamento experimental completo apresentado na Tabela 2,

Tabela 2: Plano de ensaios de briquetes em função da massa e da composição percentual de resíduos. Vera Cruz do Oeste, 2016

Ensaio	Resíduo de Podas Urbanas (%)	Resíduo de Podas Urbanas (kg)	Bagaço de Mandioca (%)	Bagaço de Mandioca (kg)	Glicerina (%)	Glicerina (kg)
T1	100,0	50,00	-	-	-	-
T2	92,0	46,00	8	4	-	-
T3	97,0	48,50	-	-	3,0	1,50
T4	89,0	44,50	8	4	3,0	1,50
T5 (Ponto Central)	94,5	47,25	4	2	1,5	0,75

As amostras foram misturadas manualmente e submetidas a uma briquetadeira mecânica de pistão para biomassa, marca LIPPEL, modelo BL 95/210, potência 55 kW, ano 2010, com capacidade de produção de 1.200 a 1.800 kg h⁻¹, dependendo do tipo de biomassa utilizada como matéria-prima, conforme mostrado na Figura 5.



Figura 5: Briquetadeira mecânica de pistão

O processo ocorreu da seguinte forma: os tratamentos T1 a T5 foram inseridos um de cada vez, de forma manual na parte superior da briquetadeira. A biomassa foi compactada a uma pressão de $48,94 \text{ kgf cm}^{-2}$, atingindo temperatura interna de $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$. O processo de produção dos briquetes pode ser observado na Figura 6.

Para verificar o intervalo entre um tratamento e outro foi adicionado farinha de trigo na parte superior da briquetadeira ao final de cada tratamento.



Figura 6: Produção de briquetes

Os briquetes produzidos conforme Figura 7, foram encaminhados para realização das análises físicas, químicas e energéticas.



Figura 7: Briquetes produzidos a partir dos tratamentos T1 a T5

3.4. Análise dos Parâmetros Físicos, Químicos e Energéticos

3.4.1. Teor de umidade

O teor de umidade da biomassa antes da briquetagem e dos briquetes foi determinado de acordo com a norma técnica ABNT - NBR 8293/83, em triplicata no Laboratório de Física do Solo - LAFIS da UNIOESTE, *campus* de Cascavel. Obteve-se a massa úmida de cada amostra através da balança digital marca Marte, modelo AY220, máx. 220g e mín. 0,01g, em seguida as mesmas foram introduzidas em estufa a 105 °C marca Nova Ética até que a massa ficasse constante, posteriormente foram colocadas no dessecador, pesadas para obter a massa seca (Figura 8). O teor de umidade foi adquirido pela diferença entre as massas da amostra, antes e logo após ser submetida à secagem, através da Equação 6.

$$TU = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

onde:

TU = teor de umidade da biomassa, em porcentagem (%);

m_1 = massa inicial da biomassa, em gramas (g);

m_2 = massa final da biomassa (massa seca), em g.



Figura 8: Equipamentos empregados nos ensaios de teor de umidade. A – Amostra antes da secagem. B – Balança digital. C – Estufa. D – Dessecador

3.4.2. Análise imediata

Para a realização da análise imediata dos briquetes com a quantificação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo foi seguida as adaptações realizadas por Sánches (2010) das normas ASTM (D-3172 até D-3175). As análises foram realizadas em triplicata no Laboratório de Química Orgânica da UFPR - setor Palotina.

3.4.2.1. Teor de voláteis

As amostras foram acondicionadas em cadinhos de porcelana com tampa e ambos foram secos em estufa, modelo SL-102, marca Solar a 110°C por uma hora. Após esfriar em dessecador por 30 minutos, as amostras foram colocadas em Forno Mufla, marca Zezimaq, aquecido até 950°C por seis minutos. Após este procedimento, as amostras foram colocadas em um dessecador para resfriamento e pesagem. Após a extração dos voláteis, ficou como resíduo o carbono fixo e as cinzas. O teor de voláteis foi determinado pela Equação 7.

$$TV = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100 \quad (\text{Equação 7})$$

onde:

TV = teor de voláteis (%);

m_2 = massa seca (g);

m_3 = massa final proveniente da mufla, após 6 (seis) minutos a 950 °C, (g).

3.4.2.2. Teor de cinzas

O material proveniente da etapa anterior, já sem umidade e voláteis foi colocado no Forno Mufla, marca Zezimaq a uma temperatura de 750 °C, por um período de duas horas. Ao final, dentro do cadinho restaram somente as cinzas resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos. O teor de cinzas foi calculado pela Equação 8.

$$TCZ = \frac{m_2 - m_4}{m_2} \times 100 \quad (\text{Equação 8})$$

onde:

TCZ = teor de cinzas (%);

m_2 = massa seca (g);

m_4 = massa da amostra após 2 (duas) horas a 750 °C, (g).

3.4.2.3. Teor de carbono fixo

Após a determinação dos teores de umidade, de matéria volátil e de cinzas das amostras, o teor de carbono fixo - TCF foi determinado indiretamente pela diferença entre os valores do teor de voláteis e teor de cinzas, através da Equação 9.

$$TCF = 100 - (TV + TCZ) \quad (\text{Equação 9})$$

onde:

TCF = teor de carbono fixo (%);

TV = teor de voláteis (%);

TCZ = teor de cinzas (%).

3.4.3. Análise elementar

Para a realização da análise elementar (determinação das porcentagens de carbono, hidrogênio e nitrogênio) as amostras de cada tratamento foram encaminhadas para a Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de São Paulo – USP onde foram sujeitas à combustão em uma atmosfera de oxigênio puro, e os gases resultantes dessa combustão foram quantificados em um detector TCD (detector de condutividade térmica) através do método de Pregl-Dumas em aparelho analisador elementar - Perkin Elmer 2400 series ii.

3.4.4. Determinação do poder calorífico

Os briquetes formados pelos tratamentos T1 a T5 foram submetidos à determinação dos respectivos valores de poder calorífico superior, baseando-se na norma técnica ABNT - NBR 8633/84.

Para tanto, houve a necessidade de ralar e peneirar os briquetes a fim de que os mesmos ficassem com a granulometria reduzida para submeter à análise.

As amostras previamente secas foram pesadas em balança digital marca Marte, modelo AY220, máx. 220g e mín. 0,01g. Em seguida, foram colocadas em uma bomba calorimétrica da marca DDS, modelo E2K para a determinação do poder

calorífico superior (Figura 9). As análises de determinação do PCS foram realizadas em triplicata no Laboratório de Física do Solo - LAFIS da UNIOESTE, *campus* de Cascavel.

Para a transformação dos valores do PCS para PCI foram realizadas utilizando-se a Equação 2 já mencionada, tendo o percentual de hidrogênio presente em cada tratamento.

A Equação 3 foi utilizada para a determinação do PCU.

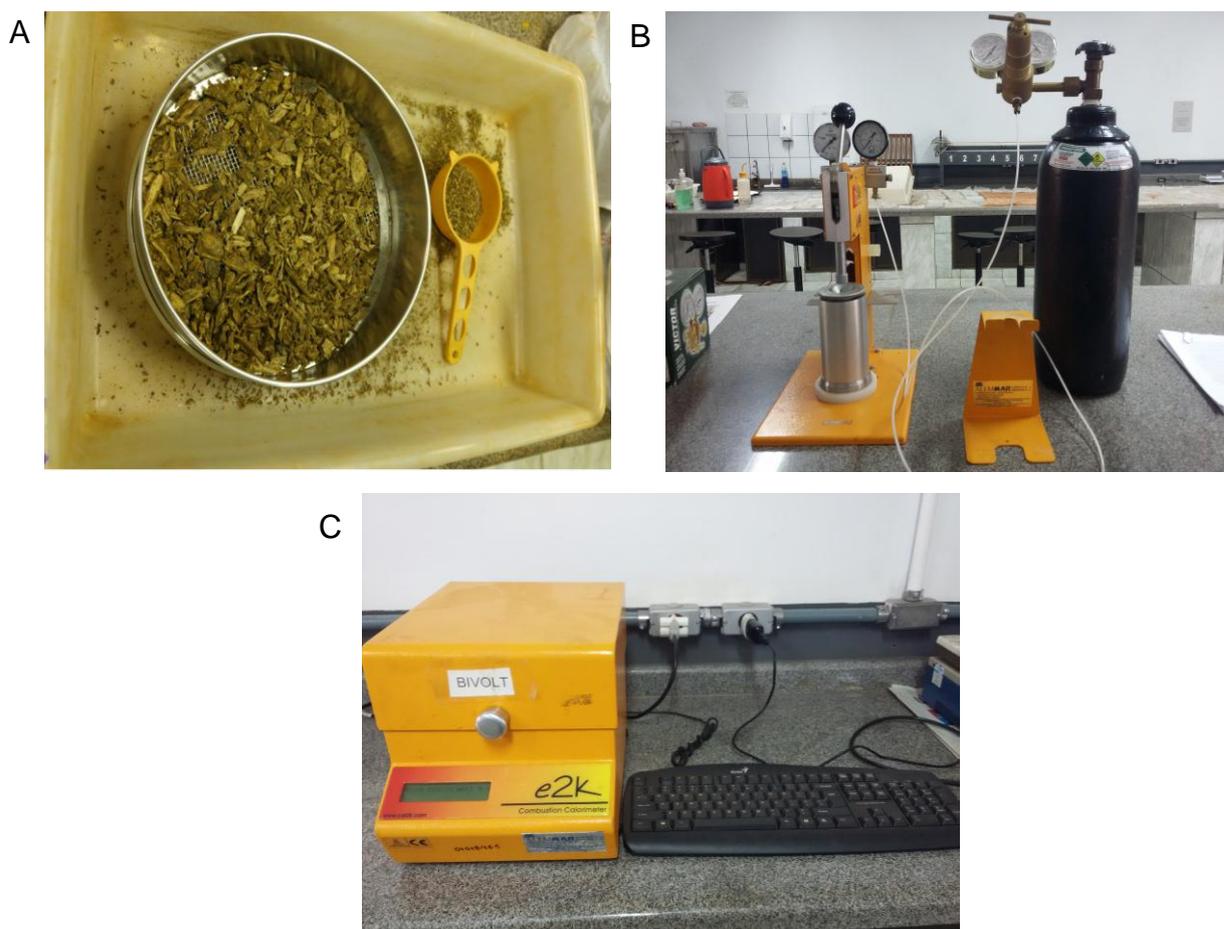


Figura 9: Equipamentos empregados na análise do poder calorífico superior. A – Amostra sendo ralada e peneirada. B e C – Bomba calorimétrica

3.4.5. Resistência mecânica

O teste para avaliar a Carga Máxima de Ruptura (CMR, kgf) dos briquetes foi baseado na ABNT - NBR 5739/07 sendo realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais da Engenharia - LEME da UNIOESTE, *campus* de Cascavel. Para garantir uma maior uniformidade da superfície dos briquetes, os mesmos foram colocados

em moldes e preenchidos com enxofre derretido antes de serem submetidos à análise (Figura 10).

O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC100 com capacidade para 100 toneladas (Figura 10). A máquina foi programada para trabalhar com a unidade em (kgf). As análises foram realizadas em triplicata.



Figura 10: Equipamentos empregados na análise de resistência mecânica. A – Moldes para regularizar a superfície dos briquetes. B – Briquetes com a superfície de enxofre. C – Prensa hidráulica. D – Momento de ruptura do briquete

3.4.6. Densidade aparente e energética

A densidade aparente (kg m^{-3}) dos briquetes foi determinada segundo Protásio et al. (2011) pelo método estereométrico. O volume foi calculado considerando-se a forma cilíndrica dos briquetes. Utilizando um paquímetro digital

(marca King Tools, modelo Caliper, 0-150 mm) foi determinado o comprimento e o diâmetro, enquanto a massa foi obtida em uma balança digital Marca Shimadzu, modelo BL 3200H, máx. 3200g e mín. 0,5g (Figura 11).

O diâmetro dos briquetes foi determinado considerando-se três partes distintas, ou seja, a parte superior, a inferior e o centro. Como a superfície dos briquetes era irregular, houve a necessidade de realizar cortes com o auxílio de uma faca a fim de tornar a superfície mais uniforme para a análise.

Para os cálculos de volume tomou-se como base o diâmetro médio dos briquetes e utilizou-se a Equação 5.

A densidade energética dos briquetes foi calculada multiplicando-se o poder calorífico superior pelos seus valores de densidade aparente (PROTÁSIO et al., 2011).

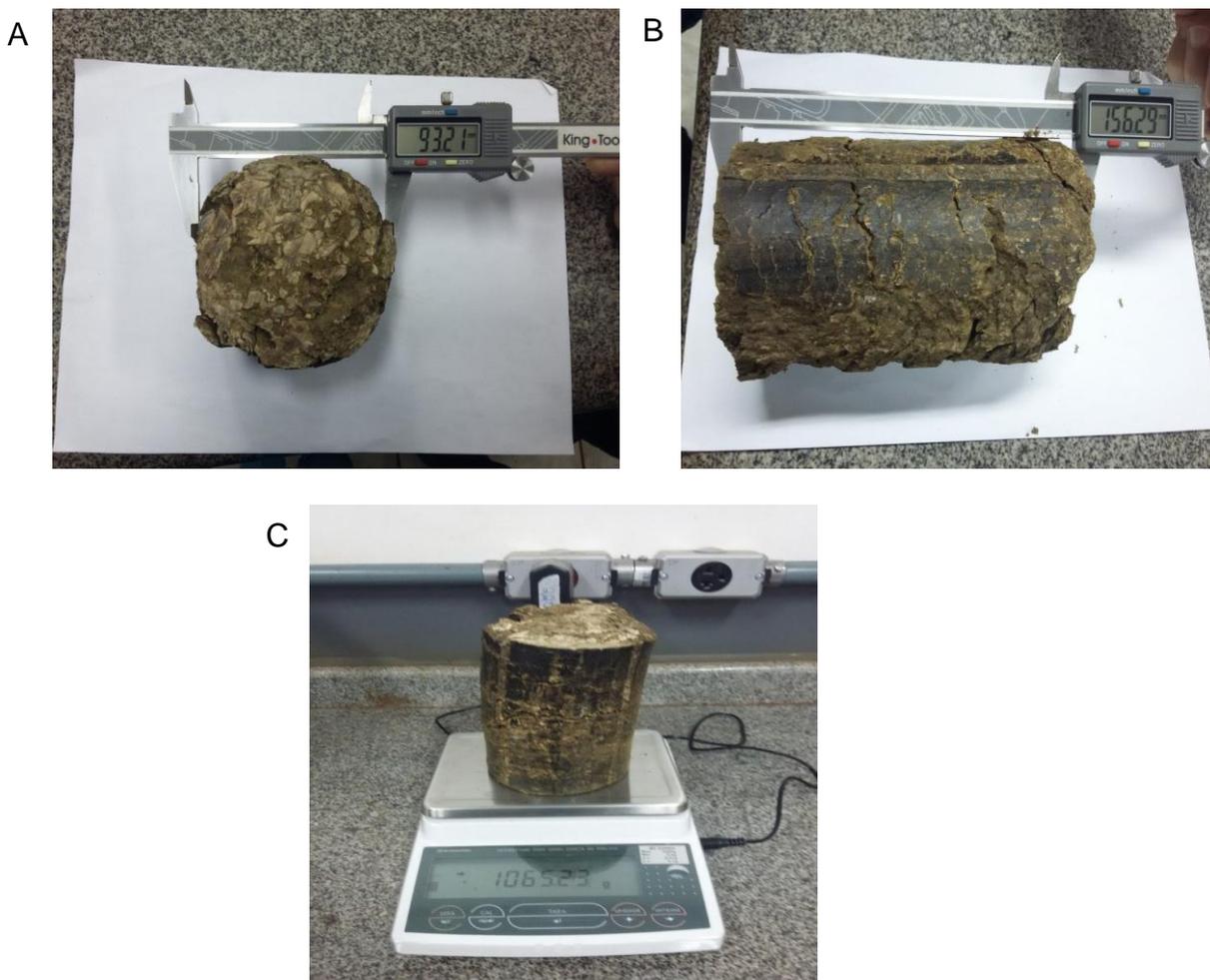


Figura 11: Equipamentos empregados na análise de densidade aparente. A e B – Determinação do diâmetro e do comprimento do briquete respectivamente. C – Determinação da massa do briquete

3.4.7. Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado simples envolvendo o planejamento fatorial completo obtendo também o ponto central. Com isto totalizou-se 5 tratamentos, definidos com base na variação da quantidade de resíduos de poda de árvores, bagaço de mandioca e glicerina influenciando na composição dos briquetes.

As análises foram realizadas com 5 tratamentos em três repetições, sendo avaliados: teor de umidade, análise imediata (teor de voláteis, cinzas e carbono fixo), análise elementar (determinação de C, H e N), poder calorífico, densidade aparente e energética e resistência mecânica dos briquetes.

Os resultados das análises foram calculados por estatística não paramétrica e comparação de médias por meio do teste de Kruskal-Wallis ao nível de 5% de probabilidade de erro, utilizando a linguagem R (R CORE TEAM, 2017) e complemento adicional *agricolae* (MENDIBURU, 2016), apresentando-se, dessa maneira, as médias com o devido ranqueamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização Física, Química e Energética

Após a realização das misturas e antes da briquetagem, uma amostra de cada tratamento foi retirada e encaminhada ao Laboratório LAFIS da UNIOESTE, *campus* de Cascavel para determinação do teor de umidade. Os valores médios e o desvio padrão da umidade para cada tratamento podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores médios do teor de umidade antes da briquetagem, dos briquetes e desvio padrão. Cascavel, 2016

Tratamento	Teor de umidade antes da briquetagem (%)	Teor de umidade dos briquetes (%)	Desvio padrão dos briquetes
T1	8,632 (a)	7,935 (a)	0,168
T2	8,771 (a)	8,308 (b)	0,048
T3	9,134 (a)	8,252 (b)	0,107
T4	9,119 (a)	8,775 (d)	0,054
T5	9,269 (a)	8,667 (c)	0,045

Letras iguais indicam valores significativamente iguais no teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro

Resíduos muito secos ou acima da umidade recomendada pela literatura prejudicam o processo de compactação do material, além de reduzir a sua estabilidade, desfazendo-se quando estocados ou transportados (MENEZES, 2013).

Dias et al. (2012) recomendam que o valor de umidade dos materiais a serem compactados esteja compreendida entre 10 a 15%.

Aplicando-se o teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro (Apêndice B) pode-se concluir que os valores médios do teor de umidade antes da briquetagem não diferiram estatisticamente entre si como pode ser observado na Tabela 3.

Existe uma tendência de que a quantidade de glicerina utilizada aumente o teor de umidade, isso porque a glicerina possui propriedade higroscópica, ou seja, absorve água, o que pode ter influenciado no aumento desta porcentagem de umidade.

Já os valores médios do teor de umidade após a briquetagem (Apêndice B) diferiram estatisticamente entre si. O teor de umidade foi menor no briquete do tratamento T1 (7,935%) e maior no briquete do tratamento T4 (8,775%).

De acordo com Gonçalves, Sartori e Leão (2009), o poder calorífico pode ser reduzido no briquete se a umidade estiver acima de 15%, além disso, o briquete pode se tornar quebradiço durante o transporte e armazenamento se por outro lado, o teor de umidade estiver abaixo de 5% o que não ocorreu com os tratamentos testados.

Em estudo realizado por Moraes (2007) com resíduos lignocelulósicos utilizados na fabricação de briquetes para a queima de blocos cerâmicos, o teor de umidade antes da briquetagem foi de 49,34% para resíduos de semente de algodão; 28,63% para resíduos de serragem de madeira produzida na indústria de briquetes; 19,74% para resíduos de serragem gerada nas serrarias e indústrias de móveis e 51,31% nos resíduos de serragem de *Pinus*.

Segundo Yank, Ngadi e Kok (2016) ao produzirem briquetes de casca e farelo de arroz, os autores tiveram o teor de umidade variando entre 4,64 e 7,42% para os briquetes.

Soares et al. (2015) determinaram o teor de umidade para briquetes produzidos com 40% de serragem de madeira e 60% de borra de café sendo o teor de umidade de 8,99%. Na proporção de 50% pó de borra de café e 50% serragem de madeira o teor de umidade foi de 9,05%.

Pimenta et al. (2015) ao produzirem briquetes a partir de carvão de cascas de coco obtiveram o teor de umidade de 4,6%.

Protásio et al. (2012) realizaram estudo com briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café submetidos aos processos de carbonização e torrefação. Os briquetes torrificados apresentaram, em média, 3% de umidade em base seca e os briquetes *in natura* e carbonizados 7 e 8%, respectivamente, o material torrado apresenta menor umidade, pois durante o processo a hemicelulose é decomposta tornando o material menos higroscópico.

Os briquetes também foram submetidos à análise imediata (determinação do teor de voláteis, carbono fixo e teor de cinzas). Os resultados podem ser verificados na Tabela 4.

Tabela 4: Valores médios da análise imediata. Cascavel, 2016

Tratamento	Teor de voláteis (%)	Teor de carbono fixo (%)	Teor de cinzas (%)
T1	70,959 (c)	20,231 (a)	8,808 (d)
T2	66,520 (d)	16,858 (c)	16,621 (e)
T3	72,483 (b)	19,263 (b)	8,253 (c)
T4	72,962 (b)	19,206 (b)	7,831 (b)
T5	73,857 (a)	20,110 (a)	6,032 (a)

Letras iguais indicam valores significativamente iguais no teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro

A biomassa com alto teor de voláteis apresenta maior facilidade de incendiar e queimar, porém o processo de combustão em geral pode ser afetado, já que existe dificuldade de controle do mesmo (VIEIRA, 2012).

O teor de voláteis é um índice importante para a briquetagem, pois indica a porcentagem de materiais com potencial de geração de calor e o teor de cinzas corresponde à porcentagem de material inerte, que não produz calor. Portanto, o teor de voláteis e o teor de cinzas (ou inertes) fornecem informações aproximadas da combustibilidade dos resíduos (GONÇALVES; SARTORI; LEÃO, 2009).

Aplicando-se o teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro (Apêndice B) pode-se concluir que o tratamento T2 possuiu menor valor de voláteis (66,520%) bem como o menor valor de carbono fixo (16,858%), em contrapartida, possui o maior valor de teor de cinzas (16,621%) diferindo-se estatisticamente dos demais tratamentos (Tabela 4). Estes valores demonstram que o bagaço de mandioca contribui com o aumento de material inorgânico no briquete diminuindo o poder calorífico. Esses valores também podem estar associados a grande quantidade de impurezas aderidas ao bagaço de mandioca, tais como terra e outros materiais inertes.

Pode-se observar na Tabela 4 que o tratamento T5 apresentou maiores teores de materiais voláteis (73,857%), em contrapartida, os valores de teores de cinzas foram menores (6,032%). Isso porque a glicerina facilita a combustão do material e eleva a temperatura num curto espaço de tempo. O mesmo foi constatado através dos elevados valores de PCS.

A porcentagem de matérias voláteis está compreendida no intervalo de 76 a 86% (base seca) estabelecido para biomassa vegetal (MORAES, 2007).

Gentil (2008) afirmou que os briquetes no Brasil possuem teores de voláteis em torno de 81%, carbono fixo 18,8% e cinzas 1,2%.

Em estudo realizado por Moraes (2007) com resíduos lignocelulósicos utilizados na fabricação de briquetes para a queima de blocos cerâmicos, o teor de voláteis foi de 78,98% para casca de semente de algodão e 89,02% para serragem de madeira. Em relação ao teor de carbono fixo o autor obteve 12,58% para a casca de semente de algodão e 8,88% para a serragem de madeira. O teor de cinzas foi de 8,44% para casca de semente de algodão e 2,10% para serragem de madeira.

Pimenta et al. (2015) ao produzirem briquetes a partir de carvão de cascas de coco obtiveram valores para os tratamentos 12/12 e 12/15 de proporção de amido e argila usado como aglutinante em relação ao peso seco total dos briquetes respectivamente de: 28,81% e 27,43% de matérias voláteis; 34,26% e 39,93% de carbono fixo e 36,93% e 32,65% de cinzas.

Protásio et al. (2012) ao estudarem briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café submetidos aos processos de carbonização e torrefação, obtiveram valores de 22%, 69% e 8% de teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e teor de cinzas respectivamente para briquetes carbonizados. Para briquetes torreficados os valores foram de 54%, 41% e 5% de teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e teor de cinzas respectivamente. Para os briquetes *in natura* os valores foram de 72%, 24% e 4% de teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e teor de cinzas respectivamente.

Soares et al. (2015) determinaram o teor de voláteis e de cinzas para briquetes produzidos com 40% de serragem de madeira e 60% de borra de café sendo o teor de voláteis de 85,84% e de cinzas de 5,17%. Na proporção de 50% pó de borra de café e 50% serragem de madeira o teor de voláteis foi de 85,57% e de cinzas 5,38%.

Combustíveis com altos teores de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis tendem a se queimar mais lentamente, ou seja, eles poderão requerer longo tempo de residência na fornalha para a queima total, quando comparados com combustíveis que possuam baixo índice de carbono fixo (BRAND, 2010).

De acordo com Gabardo et al. (2011), estes resíduos podem ser uma alternativa na produção de briquetes, já que para ser considerado um carvão de qualidade, o carbono fixo deve apresentar valores maiores que 75%. Segundo o

autor, quanto maior a concentração de carbono no resíduo, maior o poder calorífico dos materiais. A quantidade de calor gerado pelo resíduo é estabelecida pelo percentual de carbono fixo, sendo que quanto maior este valor, mais lentamente o combustível irá queimar.

É o principal contribuinte para produzir energia durante a combustão. Esta propriedade determina a sua eficiência na combustão.

O teor de cinzas representa a fração inerte da amostra, a qual é incombustível. Quando este apresenta valores elevados, reduz-se o PCS, que possui relação direta com a composição química da matéria-prima queimada (FURTADO et al., 2010).

Gentil (2008) em seu estudo sobre tecnologia e economia do briquete de madeira, obteve 1,99% de teor de cinzas para briquete de madeira com teor de umidade a 12,9% de base úmida e 1,53% de teor de cinza para serragem de *Pinus sp* com teor de umidade de 11,1% de base úmida.

Felfli et al. (2011) encontraram valores de 3,7% de teor de cinzas para resíduos de cascas de grãos de café e 17% de teor de cinzas para cascas de arroz.

Altos teores de cinzas diminuem a eficiência do reator, já que necessita de um maior consumo de oxigênio, além da cinza residual nas fornalhas das indústrias ser indesejável, portanto quanto menor o teor, melhor é a qualidade do combustível (HOFFMANN, 2010). Segundo o autor, da mesma maneira que a umidade, o teor de cinzas interfere no poder calorífico e causa perda de energia, pois as cinzas são substâncias inorgânicas que não se queimam, sendo assim, não produzem calor, o que confirma a tendência da redução do poder calorífico conforme haja aumento desta substância no combustível.

Sendo assim, havendo aumento do teor de cinzas, haverá diminuição da quantidade de materiais combustíveis, conseqüentemente, diminuição do poder calorífico, visto que os materiais minerais não participam do processo de combustão (BRAND, 2010).

A lenha é o combustível mais utilizado em caldeiras e tem um teor de cinzas em torno de 1%, o que é um bom índice por não prejudicar caldeiras e fornalhas (VALE et al., 2007). Segundo os mesmos autores, a quantidade de cinzas está diretamente relacionada com a quantidade e qualidade de minerais presentes na

biomassa, como cálcio, potássio, fósforo, magnésio, ferro e sódio, que provocam redução nos teores de carbono fixado no carvão vegetal.

A maioria das cinzas vem de minerais singenéticos (minerais dentro do tecido vegetal da planta antes da queima) refletindo, portanto, a composição mineralógica do solo em que o material de planta cresceu. Estas composições químicas das cinzas mantêm-se inalteradas pelo processo de combustão, sendo que a maior fase é de sílica cristalina (TEIXEIRA; PENA; MIGUEL, 2010).

Na sequência os briquetes foram submetidos à análise elementar (determinação das porcentagens de C, H e N). Os resultados podem ser verificados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores médios da análise elementar. Cascavel, 2016

Tratamento	C (%)	H (%)	N (%)
T1	45,01	6,12	1,53
T2	45,33	6,30	1,77
T3	46,48	6,61	1,57
T4	46,00	6,27	1,22
T5	46,93	6,83	1,44

Baixos valores de hidrogênio na composição da madeira resultam em uma alta relação C/H, fato este indesejável quando se visa à produção de energia, pois pequenos acréscimos no teor de hidrogênio promovem elevado ganho no valor calórico dos combustíveis de biomassa. Estes autores encontraram por meio da análise de regressão linear simples que a cada 1% de acréscimo no teor de hidrogênio ocorre um aumento de aproximadamente $2.152,70 \text{ kJ kg}^{-1}$ no poder calorífico superior da biomassa vegetal. Ainda observaram que a cada 1% de acréscimo no teor de carbono ocorre um aumento de apenas $268,10 \text{ kJ kg}^{-1}$ no valor calórico da biomassa (PROTÁSIO et al., 2011).

Assim, compostos orgânicos que contenham maiores teores de carbono e hidrogênio produzem maior quantidade de energia quando queimados.

Maior teor de carbono leva, obviamente, à maior relação C/H. Parte do teor de carbono encontrado nos briquetes é atribuída aos materiais voláteis, que também possuem carbono em sua composição. Assim, o incremento no teor de carbono fixo com o aumento no teor de carbono elementar sugere quantidade maior de carbono elementar dificilmente pirolisável. Entre os tipos de estruturas carbônicas dificilmente

pirolisadas presentes na madeira, encontram-se as cadeias aromáticas. Portanto, aumento de compostos aromáticos, ou seja, que possuem maior relação C/H, eleva o teor de carbono fixo do briquete (SOARES et al., 2014).

Com relação à correlação positiva entre o PCS e a relação C/H, pode-se inferir que o aumento da relação C/H está diretamente ligado à maior aromaticidade do material e, portanto, à maior quantidade de ligações C=C. A energia de ligação entre dois carbonos é da ordem de 348 kJ mol^{-1} para ligações C-C e 518 kJ mol^{-1} para ligações C=C, em compostos aromáticos (ATKINS; JONES, 2006). As ligações químicas que possuem maior energia de ligação, quando rompidas, liberam mais energia e, conseqüentemente, caracterizam um material com maior poder calorífico.

Felfli et al. (2005) afirmaram que as relações H/C e O/C diminuem com o processo de torrefação, este fato está relacionado à degradação térmica das hemiceluloses, resultando na liberação da maioria dos componentes oxigenados e aromatizados. Altas relações C/N implicam em uma quantidade menor de nitrogênio a ser liberada para o ambiente após a combustão da biomassa. Quanto menor for a relação C/N, mais rápida será a liberação de CO_2 para a atmosfera durante a combustão, fato este indesejável, pois este gás é um dos responsáveis pelo efeito estufa.

Independente da espécie, a composição química elementar da madeira do gênero *Eucalyptus*, em base seca, é de aproximadamente 48% de carbono, 6% de hidrogênio, 45% de oxigênio, 0,15% de nitrogênio e 0,01% de enxofre (PROTÁSIO et al., 2011).

Portanto, como pode ser observado na Tabela 5, as porcentagens de C, H e N dos tratamentos não diferiram significativamente entre si. A quantidade de glicerina utilizada neste trabalho nos tratamentos T3, T4 e T5 não alterou a relação C/H.

Chen et al. (2011) encontraram, para a madeira torrificada na temperatura de $250 \text{ }^\circ\text{C}$ e tempo total de 2 h, os valores de 66,73%, 5,84%, 27,30% e 0,14% para os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, respectivamente.

Já Felfli et al. (2005) determinaram, para o briquete torrificado de madeira na temperatura de $250 \text{ }^\circ\text{C}$ e tempo de 1,5 h, valores de 57,63%, 6% e 28,47% para os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio, respectivamente, resultados que demonstram a influência da composição química da biomassa, da taxa de

aquecimento e do tempo total na composição química elementar do combustível submetido ao processo térmico de torrefação.

Em estudo realizado por Protásio et al. (2012) com briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café submetidos aos processos de carbonização e torrefação, obtiveram valores de 70,42%, 3,48% e 2,15% de carbono, hidrogênio e nitrogênio respectivamente para briquetes carbonizados; 55,86% 5,08% e 2,40% de carbono, hidrogênio e nitrogênio respectivamente para briquetes torrificados a taxa de 1,5 °C min⁻¹ e valores de 45,09%, 5,42% e 2,12% de carbono, hidrogênio e nitrogênio respectivamente para briquetes *in natura*.

Santos et al. (2013), ao analisar o efeito energético da madeira de espécies no estado do Rio Grande do Norte, obtiveram os maiores valores de C para as madeiras de Mororó (*Bauhinia cheilantha*) com 47,23% e Pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*) com 47,24%, as quais não diferem entre si a 5% de significância, e os menores teores foram observados para Imburana (*Commiphora leptophloeos*) com 43,85%, sendo esse significativamente diferente. Para o teor de nitrogênio (N), os maiores valores foram observados para Pereiro (1,32%), os quais diferem dos obtidos nas madeiras de Jurema Branca (*Piptadenia stipulacea*) com 0,84% e Mororó (0,86%), não observando efeito da espécie para as variáveis teor de hidrogênio (H) e relação carbono/hidrogênio (C/H).

Os briquetes também foram submetidos à análise de poder calorífico superior através da bomba calorimétrica. Os resultados podem ser verificados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores médios do poder calorífico superior e desvio padrão. Cascavel, 2016

Tratamento	Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹)	Desvio padrão
T1	17,549 (c)	0,499
T2	16,229 (d)	0,163
T3	18,973 (a)	0,467
T4	17,528 (c)	0,178
T5	18,437 (b)	0,106

Letras iguais indicam valores significativamente iguais no teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro

O PCS indica a quantidade de energia liberada durante a transferência de calor, relacionada à eficiência do processo, ou seja, quanto maior for o PCS, mais eficiente (VIEIRA, 2012).

O teor de umidade é um fator importante a ser observado, pois quanto menor for este valor, menor será a quantidade de energia gasta no processo de carbonização da madeira e maior o poder calorífico do material (DIAS et al., 2012).

Aplicando-se o teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro (Apêndice B) pode-se concluir que os valores médios do poder calorífico superior foram estatisticamente diferentes para os tratamentos.

O tratamento T3 (18,973 MJ kg⁻¹) apresentou o maior valor de poder calorífico. Isso pode ser justificado pela adição da glicerina, a qual possui poder calorífico elevado em torno de 25,52 MJ kg⁻¹ (MATURANA, 2011).

O tratamento T2 (16,229 MJ kg⁻¹) apresentou o menor valor de poder calorífico diferindo estatisticamente dos outros tratamentos. Essa tendência pode ser justificada pela adição do bagaço de mandioca que possui um poder calorífico baixo em torno de 15,75 MJ kg⁻¹ (ALVES, 2014).

De posse dos valores do teor de H que foi determinado pela análise elementar e o teor de umidade dos briquetes, aplicando-se as equações 2 e 3 é possível obter o valor do poder calorífico inferior e útil (Tabela 7).

Tabela 7: Valores médios do poder calorífico inferior e útil. Cascavel, 2016

Tratamento	Poder calorífico inferior (MJ kg⁻¹)	Poder calorífico útil (MJ kg⁻¹)
T1	16,165 (c)	14,731 (c)
T2	14,806 (d)	13,449 (d)
T3	17,480 (a)	15,980 (a)
T4	16,110 (c)	14,555 (c)
T5	16,893 (b)	15,406 (b)

Letras iguais indicam valores significativamente iguais no teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro

Um dos mais importantes fatores que influenciam o poder calorífico é o teor de umidade. Uma das vantagens dos combustíveis densificados, quando comparados com a lenha são: menor volume, teor de umidade mais constante e alto poder calorífico. O seu poder calorífico e o baixo teor de umidade (10 a 12%) o farão sempre superar à lenha (25 a 35% de teor de umidade). Tanto pela maior densidade como pelo maior poder calorífico ter-se-á na estocagem sempre mais energia por unidade de volume, reduzindo-se pátios de estocagem a dimensão de equipamentos de queima (MORAES, 2007).

O Poder Calorífico Superior do briquete varia conforme o tipo de matéria-prima ou outros materiais usados na briquetagem. De acordo com Quirino et al. (2004) as serragens e maravalhas mais usadas no Estado de Goiás são de coníferas como *Pinus* sp com PCS na faixa de 21,756 MJ kg⁻¹ e as madeiras folhosas como Maçaranduba (*Manilkara* sp), na faixa de 19,246 MJ kg⁻¹ de PCS. Considera-se uma média do PCS das madeiras de 19,706 MJ kg⁻¹.

Yank, Ngadi e Kok (2016) ao produzirem briquetes de casca e farelo de arroz, os mesmos tiveram o poder calorífico superior variando entre 16,01 e 16,45 MJ kg⁻¹.

Segundo Alves (2014) em seu estudo sobre o potencial energético de resíduos de produção agrícola, após briquetagem obteve poder calorífico superior de 16,73 MJ kg⁻¹ para o bagaço de mandioca, 18,89 MJ kg⁻¹ para maniva de mandioca, 18,92 MJ kg⁻¹ para sabugo de milho e 18,44 MJ kg⁻¹ para palha de milho.

Teixeira, Pena e Miguel (2010) obtiveram uma média de 25,551 MJ kg⁻¹ para o poder calorífico superior nos briquetes de carvão vegetal a partir de cinzas de bagaço de cana.

Em estudo realizado por Moraes (2007) com resíduos lignocelulósicos utilizados na fabricação de briquetes para a queima de blocos cerâmicos, o poder calorífico superior foi de 18,683 MJ kg⁻¹ para resíduos de semente de algodão e 18,965 MJ kg⁻¹ para resíduos de serragem de madeira.

Segundo Gonçalves, Sartori e Leão (2009) em estudo realizado com a produção de briquetes com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis* observou-se que o poder calorífico superior médio dos briquetes com 25% de RRSU e 75% de madeira de eucalipto, foi de 21,239 MJ kg⁻¹. Considerando-se a energia utilizável, o briquete com 25% de RRSU é o que apresentou maior poder calorífico útil na ordem de 17,175 MJ kg⁻¹.

Gentil (2008) afirma que embora variáveis, os briquetes produzidos no Brasil possuem um Poder Calorífico Superior de 17,991 a 20,083 MJ kg⁻¹. Em seu estudo sobre tecnologia e economia do briquete de madeira, ao analisar o briquete de madeira com teor de umidade a 12,9% de base úmida obteve PCS de 18,363 MJ kg⁻¹; PCI de 17,008 MJ kg⁻¹ e PCU de 14,489 MJ kg⁻¹. Já para a serragem de *Pinus* sp com teor de umidade de 11,1% de base úmida obteve PCS de 18,066 MJ kg⁻¹; PCI 20,894 MJ kg⁻¹ e PCU 14,577 MJ kg⁻¹.

Felfli et al. (2011) determinaram potenciais caloríficos de alguns resíduos como, por exemplo, casca de arroz com $14,0 \text{ MJ kg}^{-1}$ e casca de café com $18,4 \text{ MJ kg}^{-1}$. No trabalho de Sakkampang e Wongwuttanasatian (2014) foram encontrados valores de $16,78$ a $18,96 \text{ MJ kg}^{-1}$ para briquetes contendo serragem, e $15,77$ a $18,19 \text{ MJ kg}^{-1}$ para briquetes contendo bagaço de cana e glicerina.

Gonçalves (2010) reporta o valor de PCS de $19,312 \text{ MJ kg}^{-1}$ para briquete contendo 100% de celulose proveniente de papéis diversos (papel ofício, revista, jornal entre outros).

Furtado et al. (2010) ao analisarem briquetes produzidos com uma mistura de diferentes materiais – MIX obteve qualidade satisfatória no MIX com PCS de $19,970 \text{ MJ kg}^{-1}$.

Pimenta et al. (2015) ao produzir briquetes a partir de carvão de cascas de coco alcançou valores de PCS de $15,443 \text{ MJ kg}^{-1}$ e $15,133 \text{ MJ kg}^{-1}$ para os tratamentos 12/12 e 12/15 de proporção de amido e argila usado como aglutinante em relação ao peso seco total dos briquetes respectivamente.

O poder calorífico inferior médio do carvão vegetal é de $30,8 \text{ MJ kg}^{-1}$. O teor de material volátil varia de 20 a 35%, o carbono fixo de 65 a 80% e as cinzas (material inorgânico) de 1 a 3% (JOAQUIM, 2009).

Observa-se tendência de maiores valores de poder calorífico superior estarem associados aos maiores valores de carbono fixo, observando-se o contrário para o teor de materiais voláteis. Logo, um acréscimo do teor de carbono fixo e um decréscimo no teor de materiais voláteis proporcionam aumento no poder calorífico superior (PROTÁSIO et al., 2012) haja vista que, associada ao carbono, é a entalpia que determina o valor calórico dos combustíveis submetidos ao tratamento térmico.

Portanto, os valores de PCS obtidos neste trabalho (Tabela 6) estão de acordo com a literatura, e apresentam bons resultados relacionados ao poder calorífico. Assim, os resultados de PCS são favoráveis ao reaproveitamento dos resíduos de podas urbanas, glicerina e resíduos do processamento de mandioca, devido ao potencial energético dos briquetes.

Comparando os valores obtidos pelo poder calorífico dos briquetes, pode-se constatar que estes são muito superiores aos demonstrados na Tabela 8 do Balanço Energético Nacional – BEN (BRASIL, 2015).

Tabela 8: Valores do poder calorífico superior e inferior de diversos produtos.
Brasília, 2015

	Densidade <i>Specific mass</i> kg m ⁻³	Poder Calorífico Superior <i>Higher Heating Value</i> kcal kg ⁻¹	Poder Calorífico Inferior <i>Net Heating Value</i> kcal kg ⁻¹	
Alcatrão	1.000	9.000	8.550	<i>Tar</i>
Álcool Etílico Anidro	791	7.090	6.750	<i>Anhydrous Alcohol</i>
Álcool Etílico Hidratado	809	6.650	6.300	<i>Hydrated Alcohol</i>
Asfaltos	1.025	10.500	9.790	<i>Asphalt</i>
Bagaço de Cana	130	2.257	2.130	<i>Sugar-cane Bagasse</i>
Biodiesel (B100)	880	9.345	9.000	<i>Biodiesel (B100)</i>
Caldo de Cana	-	623	620	<i>Sugar-cane Juice</i>
Carvão Metalúrgico Importado	-	7.700	7.400	<i>Imported Metallurgical Coal</i>
Carvão Metalúrgico Nacional	-	6.800	6.420	<i>National Metallurgical Coal</i>
Carvão Vapor 3100 kcal kg ⁻¹	-	3.100	2.950	<i>Stream coal 3100 kcal kg⁻¹</i>
Carvão Vapor 3300 kcal kg ⁻¹	-	3.300	3.100	<i>Stream coal 3300 kcal kg⁻¹</i>
Carvão Vapor 3700 kcal kg ⁻¹	-	3.700	3.500	<i>Stream coal 3700 kcal kg⁻¹</i>
Carvão Vapor 4200 kcal kg ⁻¹	-	4.200	4.000	<i>Stream coal 4200 kcal kg⁻¹</i>
Carvão Vapor 4500 kcal kg ⁻¹	-	4.500	4.250	<i>Stream coal 4500 kcal kg⁻¹</i>
Carvão Vapor 4700 kcal kg ⁻¹	-	4.700	4.450	<i>Stream coal 4700 kcal kg⁻¹</i>
Carvão Vapor 5200 kcal kg ⁻¹	-	5.200	4.900	<i>Stream coal 5200 kcal kg⁻¹</i>
Carvão Vapor 5900 kcal kg ⁻¹	-	5.900	5.600	<i>Stream coal 5900 kcal kg⁻¹</i>
Carvão Vapor 6000 kcal kg ⁻¹	-	6.000	5.700	<i>Stream coal 6000 kcal kg⁻¹</i>
Carvão Vapor sem Especificação	-	3.000	2.850	<i>Non-specified Steam Coal</i>
Carvão Vegetal	250	6.800	6.460	<i>Charcoal</i>
Coque de Carvão Mineral	600	7.300	6.900	<i>Coal Coke</i>
Coque de Petróleo	1.040	8.500	8.390	<i>Petroleum Coke</i>
Eletricidade	-	860	860	<i>Electricity</i>
Energia Hidráulica	1.000	860	860	<i>Hydraulic Energy</i>
Gás Canalizado Rio de Janeiro	-	3.900	3.800	<i>Gasworks Gas-Rio de Janeiro</i>
Gás Canalizado São Paulo	-	4.700	4.500	<i>Gasworks Gas-São Paulo</i>
Gás de Coqueira	-	4.500	4.300	<i>Coke Oven Gas</i>
Gás de Refinaria	0,780	8.800	8.400	<i>Refinery Gas</i>
Gás Liquefeito de Petróleo	552	11.750	11.100	<i>LGP</i>
Gás Natural Seco	0,740	9.256	8.800	<i>Dry Natural gas</i>
Gás Natural Úmido	0,740	10.454	9.930	<i>Humid Natural Gas</i>
Gasolina Automotiva	742	11.220	10.400	<i>Motor Gasoline</i>
Gasolina de Aviação	726	11.290	10.600	<i>Aviation Gasoline</i>
Lenha Catada	300	3.300	3.100	<i>"Picked" Firewood</i>
Lenha Comercial	390	3.300	3.100	<i>Commercial Firewood</i>
Lixívia	1.090	3.030	2.860	<i>Black Liquor</i>
Lubrificantes	875	10.770	10.120	<i>Lubrificants</i>
Melaço	1.420	1.930	1.850	<i>Molasses</i>
Nafta	702	11.320	10.630	<i>Naphtha</i>
Óleo Combustível	1.000	10.085	9.590	<i>Fuel Oil</i>
Óleo Diesel	840	10.750	10.100	<i>Diesel Oil</i>
Outros Energéticos de Petróleo	864	10.800	10.200	<i>Other Energy Oil Products</i>
Outros Não-energéticos de Petróleo	864	10.800	10.200	<i>Other Non-Energy products</i>
Petróleo	884	10.800	10.800	<i>Petroleum</i>
Querosene de Aviação	799	11.090	10.400	<i>Jet Fuel</i>
Querosene Iluminante	799	11.090	10.400	<i>Lighting Kerosene</i>
Solventes	741	11.240	10.550	<i>Solvents</i>

Fonte: BRASIL (2015). Adaptado pelo autor

Os briquetes também foram submetidos à análise de densidade aparente através do método estereométrico. A densidade energética dos briquetes foi calculada multiplicando-se o poder calorífico superior pelos seus valores de densidade aparente. Os resultados podem ser verificados na Tabela 9.

Tabela 9: Valores médios de densidade aparente, energética e desvio padrão. Cascavel, 2016

Tratamento	Densidade aparente (kg m ⁻³)	Densidade energética (MJ m ⁻³)	Desvio padrão para densidade energética
T1	1.183,00 (a)	20.778,76 (a)	1.254,31
T2	1.116,00 (a)	18.122,70 (b)	1.165,89
T3	925,00 (b)	17.472,43 (b)	249,27
T4	Não mensurado	Não mensurado	Não mensurado
T5	Não mensurado	Não mensurado	Não mensurado

Letras iguais indicam valores significativamente iguais no teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro

Os briquetes dos Tratamentos 4 e 5 não suportaram as movimentações ocasionadas pelo transporte desde sua produção até o Laboratório de Física do Solo - LAFIS da UNIOESTE *campus* de Cascavel, não podendo ser avaliados.

Aplicando-se o teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro (Apêndice B) pode-se concluir que os valores médios de densidade aparente dos tratamentos T1 e T2 não diferiram estatisticamente entre si. Pode-se observar ainda na Tabela 9 que o tratamento T3 (925 kg m⁻³) obteve o menor valor de densidade energética.

Gentil (2008) afirma que a densidade aparente dos briquetes no Brasil varia de 1.000 kg m⁻³ a 1.400 kg m⁻³.

Furtado et al. (2010) ao analisarem briquetes produzidos com uma mistura de diferentes materiais – MIX obteve densidade aparente de 1.220 kg m⁻³.

Pimenta et al. (2015) ao produzirem briquetes a partir de carvão de cascas de coco alcançaram valores de densidade aparente de 660 kg m⁻³ e 710 kg m⁻³ para os tratamentos 12/12 e 12/15 de proporção de amido e argila usado como aglutinante em relação ao peso seco total dos briquetes respectivamente.

Visando à utilização energética dos combustíveis de biomassa, é desejável alta densidade energética, ou seja, maior quantidade de energia por unidade de volume. Produtos de alta densidade são vantajosos do ponto de vista de transporte,

armazenamento e manuseio devido à otimização e à logística do processo (PROTÁSIO et al., 2012).

Conforme o teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro (Apêndice B) pode-se concluir que os valores médios da densidade energética foram estatisticamente iguais para os Tratamentos T2 (18.122,70 MJ m⁻³) e T3 (17.472,43 MJ m⁻³) e estes foram diferentes do Tratamento T1 (20.778,76 MJ m⁻³) como pode ser observado na Tabela 9.

Observa-se para o Tratamento T1 o maior valor médio para densidade energética (20.778,76 MJ m⁻³), em virtude da alta densidade aparente dos briquetes, quando comparado com os tratamentos T2 (18.122,70 MJ m⁻³) e T3 (17.472,43 MJ m⁻³), o que ocasiona alta densidade energética, mesmo o combustível não apresentando o maior valor calórico.

Dias et al. (2012) afirmam que o tamanho das partículas é muito importante para determinar a qualidade e durabilidade de um pelete ou briquete. Quanto menor for o tamanho de partícula, menor será a porosidade do produto final e, portanto, maior será a sua densidade. As partículas estiveram compreendidas entre 5 a 10 mm o que pode ter influenciado nos valores de densidade aparente e energética dos briquetes.

Os valores médios para densidade aparente e energética dos briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café submetidos aos processos de carbonização; torrefação a taxa de 1,5 °C min⁻¹ e a 3,0 °C min⁻¹ e *in natura* foram de 793 kg m⁻³ e 22.800 MJ m⁻³ para o processo de carbonização; 866 kg m⁻³ e 20.600 MJ m⁻³ para a torrefação a taxa de 1,5 °C min⁻¹; 855 kg m⁻³ e 20.100 MJ m⁻³ para a torrefação a taxa de 3,0 °C min⁻¹ e 1.292 kg m⁻³ e 23.500 MJ m⁻³ para o briquete *in natura*, respectivamente (PROTÁSIO et al., 2012).

Na sequência, os briquetes foram submetidos à análise da resistência mecânica através da carga máxima de ruptura. Os resultados podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10: Valores médios de resistência mecânica e desvio padrão. Cascavel, 2016

Tratamento	Resistência mecânica (kgf cm ⁻²)	Desvio padrão
T1	1,111 (ab)	0,239
T2	1,281 (a)	0,097
T3	0,869 (b)	0,058
T4	Não mensurado	Não mensurado
T5	Não mensurado	Não mensurado

Letras iguais indicam valores significativamente iguais no teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro

A resistência mecânica ou a força de compressão é a carga máxima aplicada para um briquete até seu rompimento. Esse valor estima a quantidade de peso que um briquete pode suportar durante o armazenamento, além de simular as reais condições de resistência ao carregamento, descarregamento e transporte nos caminhões de entrega a que os briquetes estão sujeitos (GENTIL, 2008).

Aplicando-se o teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro (Apêndice B) pode-se concluir que os valores médios de resistência mecânica foram estatisticamente diferentes para os Tratamentos T2 (1,281 kgf cm⁻²) e T3 (0,869 kgf cm⁻²) como pode ser observado na Tabela 10.

O tratamento T2 (1,281 kgf cm⁻²) foi o que obteve maior valor de resistência mecânica, isso pode ser justificado pela adição de 8% do bagaço de mandioca que serve como um aglutinante de partículas, devido ao amido, o que confere maior resistência mecânica aos briquetes.

É recomendado que o tamanho das partículas esteja compreendido entre 6-8 mm, pois reduz-se os espaços interpartículas e cria-se laços mais fortes durante a compressão o que contribui para a resistência mecânica dos briquetes (DIAS et al., 2012). As partículas estiveram compreendidas entre 5 a 10 mm o que não influenciou nos valores de resistência mecânica.

Soares et al. (2015) determinaram a carga máxima de ruptura de briquetes produzidos com 40% de serragem de madeira e 60% de borra de café sendo o valor de resistência mecânica de 2,54 kgf cm⁻².

Furtado et al. (2010) ao analisarem briquetes produzidos com uma mistura de diferentes materiais – MIX, obtiveram uma resistência à compressão utilizando-se uma máquina de testes universal, aplicando-se força perpendicular à lateral do briquete com velocidade de ensaio de 2,0 mm min⁻¹ de 1,67 kgf cm⁻².

A resistência à compressão encontrada no trabalho realizado por Pimenta et al. (2015), utilizando-se uma máquina de testes universal, aplicando-se força perpendicular à lateral do briquete com velocidade de ensaio de $6,0 \text{ mm min}^{-1}$ ao produzirem briquetes a partir de carvão de cascas de coco foi de $1,16 \text{ kgf cm}^{-2}$ para os melhores tratamentos (12/12 e 12/15 de proporção de amido e argila usado como aglutinante em relação ao peso seco total dos briquetes).

A resistência mecânica dos briquetes é um indicativo importante de sua durabilidade e aplicabilidade em sistemas de geração de energia, indicando desvantagem do processo de carbonização. Protásio et al. (2012) obtiveram valores de resistência mecânica à tração por compressão diametral dos briquetes produzidos na ordem de $12,03 \text{ kgf cm}^{-2}$ para briquetes *in natura*; $10,30 \text{ kgf cm}^{-2}$ para briquetes torreficados a taxa de $3,0 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$; $9,79 \text{ kgf cm}^{-2}$ para briquetes torreficados a taxa de $1,5 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ e $3,97 \text{ kgf cm}^{-2}$ para briquetes carbonizados no estudo de processamento dos grãos de café.

Considerando a distância de entrega do briquete ao cliente final, assim como a forma em que os briquetes são arrumados nas embalagens, é de se supor que os de menor diâmetro suportariam maiores distâncias ao esfarelamento, quebra e porcentagem de inteiros ao chegar ao destino. Isto seria uma vantagem comercial, pois poderiam ser entregues em maior distância (GENTIL, 2008).

4.2. Análise Econômica

Em relação à análise econômica, de acordo com os relatórios e requerimentos da Secretaria Municipal de Agricultura, Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Município de Vera Cruz do Oeste – PR, no ano de 2015 foram produzidos aproximadamente 500 m^3 de resíduo de podas urbanas e foram comercializados 462 m^3 de lenha oriundos do corte e poda de árvores nas vias públicas do município.

O metro cúbico da lenha foi comercializado a R\$ 30,54 totalizando uma receita de R\$ 14.109,48 no município.

O resíduo de poda urbana por sua vez, foi utilizado para fins de compostagem e produção de mudas nativas e ornamentais no Viveiro Municipal e também foi

doado para os agricultores e escolas interessadas para ser utilizado como cobertura de solo em pomares e hortas.

De acordo com a empresa LENECO, 6,5 m³ de resíduo de poda urbana equivale a produção de 1 tonelada de briquetes. Seguindo este raciocínio lógico, o Município de Vera Cruz do Oeste, deixou de produzir 76,92 toneladas de briquetes.

No estudo realizado por Dias et al. (2012) em relação a produção de briquetes e peletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais, os preços médios de comercialização de briquetes com frete num raio de 50 km variam de acordo com a composição dos briquetes. Os briquetes produzidos com serragem de madeira são comercializados a 250,00-350,00 R\$ t⁻¹; outros resíduos florestais 270,00-320,00 R\$ t⁻¹; casca de arroz 300,00 R\$ t⁻¹; finos de carvão 1.000,00-1.600,00 R\$ t⁻¹.

A empresa LENECO comercializa os briquetes produzidos com resíduo da indústria moveleira (serragem de *Pinus* e *Eucalipto*) a 307,00 R\$ t⁻¹. Sendo assim, os resíduos de poda urbana no Município de Vera Cruz do Oeste poderiam gerar uma receita anual de aproximadamente R\$ 23.614,44.

Segundo Quirino (1991b) é difícil fazer um cálculo preciso do custo do briquete. No entanto pode-se utilizar o princípio da equivalência energética do óleo combustível ou da lenha, que são substituídos geralmente pelo briquete de resíduo.

Basta considerar o poder calorífico inferior do briquete e sua eficiência de queima em caldeiras e relacionar estes valores ao óleo combustível. Tomando-se como exemplo: o óleo combustível e um briquete produzido, tem-se:

$$\text{PCI óleo comb.} = 9.800 \text{ kcal kg}^{-1} \text{ ou } 41,03 \text{ MJ kg}^{-1}$$

$$\text{PCI briquete} = 3.800 \text{ kcal kg}^{-1} \text{ ou } 15,90 \text{ MJ kg}^{-1}$$

Considerando a eficiência em caldeiras (n):

$$n_{\text{óleo comb.}} = 92\%$$

$$n_{\text{briquete}} = 80\%$$

Em consequência, ter-se-ia uma equivalência energética (I_{eq}) ao óleo combustível igual a 0,337. Portanto, tem-se:

$$I_{eq} = 0,337 \text{ (índice de equivalência ao óleo)}$$

Calculando-se o custo do transporte (CT) por:

$$CT = CTt \times D$$

onde: CTt = custo de transporte por tonelada por km; e D = distância em km.

Assim, tem-se o preço máximo que o briquete pode atingir, considerando a substituição do óleo combustível por ele (C_b): $C_b = C_{oc} \times 0,337 - CT$

onde C_{oc} = custo do óleo combustível. Caso se tenha mais algum custo, como o transporte do resíduo ou de sua coleta, basta abater como feito com CT .

5. CONCLUSÃO

Os teores de umidade dos tratamentos antes da briquetagem não apresentaram diferenças significativas e estiveram próximos aos recomendados pela literatura. Em relação ao teor de umidade dos briquetes após a briquetagem o Tratamento que apresentou melhor resultado foi o T1 (7,935%) com menor valor.

Na análise imediata o Tratamento T2 obteve menor valor de carbono fixo (16,858%) e teor de voláteis (66,520%), em contrapartida obteve maior teor de cinzas (16,621%).

Na análise elementar, as porcentagens de C, H e N não diferiram estatisticamente entre os tratamentos.

Os resultados do poder calorífico superior, inferior e útil foram maiores no tratamento T3 (18,973 MJ kg⁻¹); (17,480 MJ kg⁻¹) e (15,980 MJ kg⁻¹) respectivamente.

A densidade aparente foi maior no Tratamento T1 (1.183 kg m⁻³) que não diferiu estatisticamente do Tratamento T2 (1.116 kg m⁻³). A densidade energética foi maior no Tratamento T1 (20.778,76 MJ m⁻³).

Em relação à resistência mecânica, o tratamento T2 apresentou o maior valor (1,281 kgf cm⁻²).

Os resultados, portanto, demonstraram que os tratamentos T1, T2 e T3 foram mais eficientes, produzindo briquetes com propriedades que atendam as especificações do mercado, além de apresentarem grande potencial energético, sendo bons substitutos à lenha.

Com base nas informações coletadas no Município de Vera Cruz do Oeste - PR no ano de 2015 poderiam ser produzidos aproximadamente 76,92 t ano⁻¹ de briquetes oriundos de resíduos de podas urbanas, contribuindo desta forma para a geração de receita no valor de R\$ 23.614,44.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, A.L. Utilização de subprodutos da indústria de biodiesel na alimentação de ruminantes. **Zootecnia**, Viçosa, v.37, p.260-258, 2008.

ABRAHÃO, J.J.S. et al. Características de carcaças e da carne de tourinhos submetidos a dietas com diferentes níveis de substituição do milho por resíduo úmido da extração da fécula de mandioca. **Zootecnia**, Viçosa, v.34, n.5, p.1640–1650, 2005.

AÇMA, H.H. Combustion characteristics of different biomass materials. **Energy Conversion and Management**, Istambul, v.44, p.155-162, 2003.

ALVES, D.A.H. **Avaliação do potencial energético de resíduos de produção agrícola provenientes do beneficiamento da mandioca e do milho**. 2014. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

ANTUNES, F.A.F. et al. Condições de pré-tratamento do glicerol proveniente da produção de biodiesel utilizando planejamento experimental plackett burman. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA - INIC, 15, 2011, Lorena. **Anais...** Lorena, SP: Universidade do Vale do Paraíba, 2011. Disponível em: <http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2011/anais/arquivos/0236_0543_01.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2016.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. Porto Alegre: Bookman, 2006. 968p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8293**: Carvão mineral - Determinação de umidade. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal – determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

BARATTA JÚNIOR, A.P; MAGALHÃES, L.M.S. Aproveitamento de resíduos da poda de árvores da cidade do Rio de Janeiro para compostagem. **Ciências Agroambientais**, Rio De Janeiro, v.8, n.1, p.113-125, dez. 2010.

BESLEY, L. **Importance, variation and measurement of wood density and moisture**. Canada: Pulp and Paper Research Institute of Canada, 1966.

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.

- BHATTACHARYA, S.C. Biomass energy and densification: a global review with emphasis on developing countries. In: WORLD CONFERENCE ON PELLETS, 2002, Stockholm, Sweden. **Anais...**Stockholm: Swedish Bioenergy Association, 2002. p.1-17.
- BHATTACHARYA, S.C. Fuel for thought, renewable energy word. **Renewable Energy World**, Oxford, v.7, n.6, p.122-130, 2004.
- BORGHI, M.M. **Efeito da Granulometria na Avaliação dos Briquetes**. 2012. 47p. Monografia (Engenharia Industrial Madeireira), Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.
- BRAGA, C.F.G.V.; BRAGA, L.V. Desafios da energia no Brasil: panorama regulatório da produção e comercialização do biodiesel. **Cadernos EBAPE. BR**, v.10, n.3, p.751-762, 2012.
- BRAND, M.A. **Energia de biomassa florestal**. 1.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia - MME. **Balanço Energético Nacional (BEN) 2015 - Ano Base 2014**. Brasília. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2016.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia - MME. **Balanço Energético Nacional (BEN) 2012 - Ano Base 2011**. Brasília. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html>. Acesso em: 19 nov. 2012.
- BRAZILIAN ASSOCIATION INDUSTRY BIOMASS AND RENEWABLE ENERGY. **Brazil Status Report 2012: bioenergy – biomass – renewable energy**. Disponível em:<<http://abibbrasil.wix.com/brazilianassociationbiomass>>. Acesso em: 23 mai. 2016.
- BRITO, J.O. Madeira para a floresta: a verdadeira realidade do uso de recursos florestais. **Silvicultura**, Piracicaba, v.11, n.41, p.188-193, 1986.
- BRITO, J.O. Fuelwood utilization in Brazil. **Biomass and Bioenergy**. v.12, n.1, p.69–74, 1997.
- CANTO, J.L. et al. Avaliação de um sistema de cavaqueamento de ponteiros de eucalipto para aproveitamento energético. **Árvore**, Viçosa, v.35, n.6, p.1327-1334, 2011.
- CEREDA, M.P. Caracterização dos subprodutos da industrialização da mandioca. In: CEREDA, M.P. **Manejo, uso e tratamento de subprodutos da industrialização da mandioca**. São Paulo: Fundação Cargill, v.4, 2001. Cap.1, p.31-35.
- CHAVES A.M.B. et al. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia Bioesfera**. Goiânia, v.9, n.17, p.533-542, 2013.

CHEN, L.; XING, L.; HAN, L. Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, n.9, p.2689-2695, 2009.

CHEN, W.H. et al. Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. **Energy**, v.36, n.5, p.3012-3021, 2011.

CLAUDIO, J.A.M.; SILVA, C.X.; GONÇALVES, V.C. Gliceroquímica: novos produtos e processos a partir da Glicerina de produção de biodiesel. **Química Nova**, v.32, p.639-648, 2009.

COSTA, L.F.B. **O gás metano do aterro sanitário de Manaus e as possibilidades de uso social**. 2012. 51p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012.

DE BONI, L.A.B. **Tratamento da glicerina bruta e subprodutos obtidos da reação de transesterificação de sebo bovino utilizada para a produção de biodiesel**. 2008. 115p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2008.

DEFRAIN, J.M. et al. Feeding glycerol to transition dairy cows: effects on blood metabolites and lactation performance. **Journal of Dairy Science**, v.87, n.12, p.4195-4206, 2004. Disponível em: <[http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(04\)73564-X/fulltext](http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(04)73564-X/fulltext)>. Acesso em: 13 out. 2011.

DEL BIANCHI, V.L. **Balço de massa e de energia do processamento de farinha de mandioca em uma empresa de médio porte do Estado de São Paulo**. 1998. 118p. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1998.

DEMIRBAS, A.; SAHIN-DELMIBAS, A.; DELMIBAS, A.H. Briquetting properties of biomass waste materials. **Energy Sources**, Philadelphia, v.26, n.1, p.83-91, 2004.

DELMIBAS, K.; SAHIN-DELMIBAS, A. Compacting biomass for energy densification. **Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects**, Philadelphia, v.31, p.1063-1068, 2009.

DIAS, J.M.C.S. et al. **Produção de briquetes e peletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012. 130p.

DUQUE, J.A.P.; ALZATE, C.A.C. Análisis de la refinación de glicerina obtenida como coproducto en la producción de biodiesel. **Ingeniería y Universidad**, Bogotá, v.14 n.1, p.9-27, enero-junio. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.org.co/pdf/inun/v14n1/v14n1a01.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

ERIKSSON, S., PRIOR, M. The briquetting of agricultural wastes for fuel. **Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)**, Rome, 1990. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/T0275E/T0275E00.htm>>. Acesso em: 29 abr.2016.

FABORODE, M.O.; O'CALLAGHAN, J.R. Optimizing the compression/briquetting of fibrous agricultural materials. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v.38, n.4, p.245-262, 1987.

FARIA, L.M., BRITO, J.O. **Carvão vegetal pulverizado como opção energética**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 1981. (Circular Técnica, 138). Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr138.pdf>>. Acesso em: 29 abr. 2016.

FARINHAQUE, R. **Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (*Mimosa scrabella*, Benth) e aspectos gerais de combustão**. Curitiba: FUPEF, 1981. 14p.

FELFLI, F.F. et al. Wood briquette torrefaction. **Energy for Sustainable Development**, v.9, n.3, p.19-22, 2005.

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

FERNANDES JÚNIOR, A.; CEREDA, M.P. Influência do tempo de retenção hidráulica (TRH) sobre a fase acidogênica da digestão anaeróbia de manipueira. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v.11, n.3, p.1-7, 1996.

FERNANDES, P.I.C. **Estudo da Biomassa Florestal Residual Consumida em Centrais Termoelétricas**. 2015. 76p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente), Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

FERRAGUTTI, A.C. et al. Determinação da resistência dos briquetes formados a partir de blendas de Pinus sp e pó de lixa. In: 6° Congresso Internacional de Bioenergia, 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Centro de Eventos da FIEP, 2011.

FERREIRA, M.S. Avaliação bromatológica dos resíduos da industrialização da mandioca e seu aproveitamento em ração para animais ruminantes. **Agropecuária Sustentável**, Viçosa, v.3, n.1, p.105-109, jul. 2013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Forestry Paper 41: Simple Technologies for Charcoal Making**. Rome, 1987. Cap.11. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/X5328E/x5328e0c.htm>>. Acesso em: 25 mar. 2016.

FURTADO, T.S. et al. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.30, n.62, p.101-106, mai/jul. 2010.

GABARDO, R.P. et al. Aproveitamento de resíduos de origem florestal para a produção de carvão. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Londrina – PR, 2011.

GALVÃO, J.A.; OETTERER, M. **Qualidade e Processamento de Pescado**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 256p.

- GENTIL, L.V.B. **Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira**. 2008. 195p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- GOES, T.; ARAÚJO, M.; MARRA, R. **Biodiesel e sua Sustentabilidade**. S.l.: EMBRAPA, 2009. 19p.
- GONÇALVES, J.E.; SARTORI, M.M.P.; LEÃO, A.L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Energia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.5, p.657-661, 2009.
- GONÇALVES, J.E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. 2010. 104p. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.
- GOULART, S.L. et al. Análises químicas e densidade básica da madeira de raiz, fuste e galho de Barbatimão (*stryphnodendron adstringens Conville*) de bioma cerrado. **Cerne**, Lavras, v.18, n.1, p.59-66, jan. 2012.
- GUTIÉRREZ OPPE, E.E. **Desidratação por destilação azeotrópica da glicerina obtida como subproduto da produção do biodiesel**. 2008. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- HOFFMAN, B. S. **O ciclo Combinado com Gaseificação Integrada e a Captura de CO₂: Uma Solução para mitigar as emissões de CO₂ em Termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo**. 2010. 128p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola 2011**. Brasília, 2011. Disponível em:<<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 11 mai. 2011.
- JOAQUIM, M.S. Carvão Vegetal: **Uma Alternativa Para os Produtores Rurais do Sudoeste Goiano**. 2009. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- KALIYAN, N.; VANCE MOREY, R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products, **Biomass and Bioenergy**. v.33, n.3, p.337-359, 2009.
- KHAN, A. et al. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. **Fuel Processing Technology**, v.90, n.1, p.21-50, 2009.
- KIBWAGE, J.K. et al. Organic Resource Management in Kenya: Perspectives and guidelines. In: **Recycling Waste into Fuel Briquettes**. Nairobi, 2006. Cap.15.

Disponível em: <<http://www.formatkenya.org/orrbook/Chapters/chapter15.htm>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

KNOTHE, G. et al. **Manual de biodiesel**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. 339p.

LAHIJANI, P; ZAINAL, Z.A. Gasification of palm empty fruit bunch in a bubbling fluidized bed: a performance and agglomeration study. **Bioresource Technology**, v.102, n.2, p.2068-2076, jan. 2011.

LAMMERS, P.J. et al. Digestible and metabolizable energy of crude glycerol for growing pigs. **Journal of Animal Science**, v.86, n.3, p.602-608, 2008. Disponível em: <<http://jas.fass.org/content/86/3/602.full?>>. Acesso em: 28 set. 2011.

LARSEN, A.C. **Co-digestão anaeróbia de glicerina bruta e efluente de fecularia**. 2009. 55p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2009. Disponível em: <<http://www.dominipublico.gov.br/download/texto/cp114920.pdf>>. Acesso em: 29 mai. 2016.

LEITE, E.R.S. et al. 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, 2011.

LOO, S., KOPPEJAN, J. **The handbook of biomass combustion and co-firing**. London: Earthscan, 2008. 442p.

MANDE, S.P. Thermo chemical conversion of biomass. In: KISHORE, V.V.N. **Renewable energy engineering and technology**. New Delhi: The Energy and Resources Institute, 2009. p.705-728.

MARÇON, R.O. **Pré-tratamento da glicerina bruta gerada na produção de biodiesel por transesterificação de óleos vegetais e gordura animal**. 2010. 122p. Dissertação (Mestrado em Agroenergia). Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2010. Disponível em: <<http://www.dominipublico.gov.br/download/texto/cp153130.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2013.

MAGALHÃES, L.M. **Lixo e desperdício, perspectiva numa sociedade de consumo**. 2002. 47p. Monografia (Pós-graduação em Marketing Globalizado). Universidade Cândido Mendes, Rio de Janeiro, 2002.

MARTINEZ, D.G. **Produção de etanol a partir de resíduos do processamento da mandioca**. 2016. 45p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2016.

MATURANA, C.A.Y. **Estudo da combustão direta da glicerina bruta e loira como alternativa de aproveitamento energético sustentável**. 2011. 275p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MELO, S.V.P. **Produção de briquetes de carvão vegetal com alcatrão de madeira**. 2000. 96p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

MENDES, C. Biocombustíveis Sólidos – Produção, Qualidade e Utilização no Mercado de Calor. In: WORKSHOP DO LABORATÓRIO ESPECIALIZADO EM BIOCMBUSTÍVEIS SÓLIDOS, 2011, Coimbra. **Anais...**Coimbra, Portugal: Centro da Biomassa para a energia, 2011. Disponível em: <<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ojxXizwMFrUJ:www.eubio.net.net/GetItem.asp%3Fitem%3Ddigistorefile%3B287264%3B1540%26params%3Dopen%3Bgallery+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br&client=firefox-b>>. Acesso em: 12 jun. 2016.

MENDES D.B.; SERRA, J.C.V. Glicerina: uma abordagem sobre a produção e o tratamento. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v.13, n.20, p.01-09, jul./dez. 2012.

MENDIBURU F. **Agricolae**: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.2-4. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>>. 2016.

MENEZES, M.J.S. **Poder Calorífico e Análise Imediata da Maravalha de Pinus (*Pinus sp*) e araucária (*Araucaria angustifolia*) de reflorestamento como Resíduos de Madeira**. 2013. 65p. Dissertação (Mestrado de Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do paraná, Cascavel, 2013.

MISSAGIA, B. et al. Physicomechanical properties of rice husk pellets for energy generation. **Energy & Fuels**, Washington, v.25, n.12, p.5786-5790, 2011.

MORAES, D.M. **Briquetes de Resíduos Ligno-celulósicos como Potencial Energético para a Queima de Blocos Cerâmicos: Aplicação em uma Indústria que Abastece o Distrito Federal**. 2007. 230p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil), Universidade de Brasília, Brasília. 2007.

NYAKUMA, B.B. et al. Comparative analysis of the calorific fuel properties of Empty Fruit Bunch Fiber and Briquette. **Energy Procedia**, v.52, p.466-473, 2014.

OLADEJI, J.T. Fuel characterization of briquettes produced from corncob and rice husk residues, **The Pacific Journal of Science and Technology**, Nigeria, v.11, n.1, p.101, 2010.

OLDFIELD, E.E. et al. Positive effects of afforestation efforts on the health of urban soils. **Forest Ecology and Management**, Washington, v.313, p.266-273, fev. 2014.

OLIVEIRA J.S. et al. Composição química da glicerina produzida por usinas de biodiesel no Brasil e potencial de uso na alimentação animal. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.43, n.3, p.509-512, mar. 2013.

OSAKI, M.; BATALHA, M.O. Biodiesel and vegetable oil production in Brazil: reality and challenge. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, Lavras, v.13, n.2, p.227-242, 2011.

PALAZON R.P. **Forest biomass of the Mediterranean – quality and end users** European Union: PROFORBIOMED - Promotion of residual forestry biomass in the Mediterranean basin, 2013. Disponível em: <http://proforbiomed.eu/sites/default/files/Forest_biomass_end_users.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2016.

PANDEY, A.C.R. et al. Biotechnological potential of agro- -industrial residues: II Cassava bagasse. **Bioresource Technology**, v.74, p.81–87, 2000.

PIMENTA, A.S. et al. Utilização de resíduos de coco (*Cocos nucifera*) carbonizado para a produção de briquetes. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n.1, p.137-144, jan/mar. 2015.

PRETO, E.V.; MORTOZA, G.L. **Geração de Energia Elétrica Utilizando Biomassa**. 2010. 92p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

PROTÁSIO, T.P. et al. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.31, p.273-283, 2011.

PROTÁSIO, T.P. et al. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11, p. 1252–1258, 2012.

QUAAK, P.; KNOEF, H.; STASSEN, H. Energy from Biomass: a review of combustion and gasification technologies. **World Bank Technical Papers**, Washington, n.422, 1999.

QUIRINO, W.F. **Características de briquetes de carvão vegetal a seu comportamento na combustão**. 1991. 80p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991a.

QUIRINO, W.F. **Briquetagem de resíduos lignocelulósicos**. Brasília: LPF/IBAMA, 1991b. 8p. (Circular Técnica, 2).

QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de descartes lignocelulósicos. **Biomassa e Energia**, v.1, n. 2, p. 173-182, 2004.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. 2017.

RABIER, F. et al. Participle density determination of pellets and briquettes. **Biomass and Bioenergy**, v.30, p.954-963, 2006.

RAMOS E PAULA, L.E. et al. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.31, n.66, p.103-112, 2011.

RICHARDS, S.R. Physical testing of fuel briquettes. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v.25, n.2, p.89-100, 1990.

SAGRILO, E. et al. Effect of harvest period on the quality of storage roots and protein content of the leaves in five cassava cultivars (*Manihot esculenta*, Crantz). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v.46, n.2, March, p.295–305, 2003.

SAKKAMPANG, C.; WONGWUTTANASATIAN, T. Study of ration of energy consumption and gained energy during briquetting process for glycerin-biomass briquette fuel. **Fuel**, v.115, p.186-189, 2014.

SALAME, J.E.F. **Estudo básico para briquetagem de carvão vegetal**. Ouro Preto: Escola de Minas e Metalurgia, 1992. 19 p.

SALGUEIRO, T.G.O. **Estudo de Biocombustíveis Sólidos: Importância das Cinzas para Processos de Combustão**. 2014. 154p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente), Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.

SÁNCHEZ, C.G. **Tecnologia da Gaseificação de biomassa**. Campinas: Átomo, 2010. 432p.

SANT'ANNA, M.C.S et al. Viabilidade de usina de brique de casca de coco e glicerina em Sergipe. **Scientia Plena**, v.8, n.5, p.059905-1, 2012.

SANTOS, R.C. et al. Potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no Estado do Rio Grande do Norte. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.23, n. 2, p. 491-502, 2013.

SAWIN, J.L. et al. **Renewables 2012 Global Status Report**. Paris: REN21, 2012. Disponível em: <http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/GSR2012_low%20res_FINAL.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2012.

SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ. **Análise da Conjuntura Agropecuária – Mandioca Safra 2014/2015**. Curitiba: DERAL, 2015. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/mandioca_2014_15.pdf>. Acesso em: 10 set. 2015.

SECRETARIA MUNICIPAL DE AGRICULTURA, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Relatórios e Requerimentos de Poda e Corte de Árvores nas Vias Públicas**. Vera Cruz do Oeste, 2015.

SECRETARIA MUNICIPAL DE AGRICULTURA, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Índice Pluviométrico**. Vera Cruz do Oeste, 2016

SILBERSTEIN, E. **UnB mapeia matérias primas para a fabricação de briquetes**. Brasília: UnB Ciência, 2011. Disponível em: <http://www.unbciencia.unb.br/index.php?option=com_content&view=article&id=366>:

unb-mapeia-materias-primas-paraa-fabricacao-de-briquetes&catid=41:florestal>. Acesso em: 20 mai. 2015.

SILVA, D. **Avaliação da eficiência energética em uma indústria de painéis compensados**. 2001. 182p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2001.

SMITH, A. **Fuel from the fields: a guide to converting agricultural waste into charcoal briquettes**. Massachusetts: Institute of Technology (MIT), 2004.

SOARES, V.C. et al. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.38, n.3, p-543-549, 2014.

SOARES, L.S. et al. Utilização de resíduos de borra de café e serragem na moldagem de briquetes e avaliação de propriedades. **Revista Matéria**, v.20, n.2, p. 550 – 560, 2015.

SOTANNDE, O.A.; OLUYEGE, A.O.; ABAH, G.B. Physical and combustion properties of briquettes from sawdust of azadirachta indica. **Journal of Forest Research**, v.21, n.1, p.63-67, 2010.

SOUZA, S.N.M., SORDI, A.; OLIVA, C.A. Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, 4, 2002, Campinas. **Anais...** Campinas: AGRENER, 2002.

SOUZA, F. **Avaliação da qualidade de briquetes produzidos com seis biomassas agroflorestais por métodos não destrutivos**. 2014, 142p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

TEIXEIRA, S.R.; PENA, A.F.V.; MIGUEL, A.G. Briquetting of charcoal from sugar-cane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel. **Waste Management**, v.30, n.5, p.804–807, may. 2010.

TEMMERMAN, M. et al. Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.30, n.11, p.964-972, 2006.

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

VALE, A.T; BRASIL, M.A.M; LEÃO, A.L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do Cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.12, n.1, p. 71-80, 2002.

VALE, A.T. et al. Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arabica*, L) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*). **Cerne**, Lavras, v.13, n.4, p. 416-420, out./dez. 2007.

VASSILEV, S.V. et al. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v.89, n.5, p.913-933, may, 2010.

VELASCO, G.D.N **Arborização viária x sistemas de distribuição de energia elétrica: avaliação dos custos, estudo das podas e levantamento de problemas fitotécnicos**. 2003. 94p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

VENDRASCO, L. et al. Determinação da densidade de briquetes pelo método estereométrico. In: 5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 2010, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010.

VIEIRA, A.C.M. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia**. 2012. 56p. Dissertação (Mestrado de Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

WILLIAMS, A. et al. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.38, n.2, p.113-137, april. 2012.

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

APÊNDICE

Apêndice A

R E S U L T A D O S D E A N A L I S E

CLIENTE: COTREFAL/MISSAL
 AMOSTRA: MASSA DE MANDIOCA
 FORNECEDOR: FECULARIA 2
 DATA COLETA: 31/05/94 DATA RECEBIMENTO: 01/06/94 AMOSTRADOR:

NR. LABORATORIO: 937
 NR. AMOSTRA: 11

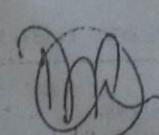
ANALISES QUIMICAS	REFERENCIA	RESULTADO
MATERIA SECA		15.36 %
PROTEINA BRUTA		2.82 %
EXTRATO ETereo		0.08 %
FIBRA BRUTA		19.06 %
- Umidade:		85.0%

ANALISES FISICAS		GRANULOMETRIA		RESULTADOS	MICROSCOPIA
FENEIRAS		MIN.	MAX.		
Retido em	mm			%	Odor:
Retido em	mm			%	Cor:
Retido em	mm			%	Impurezas:
Fundo				%	

ORIENTARIOS:
 AMOSTRA DENTRO DOS PADROES.

A PRESENTE ANALISE TEM SEU VALOR RESTRITO SOMENTE A AMOSTRA.

TOLEDO(PR), 07 / 06 / 1.994

Responsavel Tecnico: 

120229498
28731921

Apêndice B

Carregar pacotes adicionais:

```
library("agricolae", lib.loc=~ /R/x86_64-redhat-linux-gnu-library/3.3")
library("markdown", lib.loc=~ /R/x86_64-redhat-linux-gnu-library/3.3")
library("rmarkdown", lib.loc=~ /R/x86_64-redhat-linux-gnu-library/3.3")
library("readr")
```

Análise de Kruskal-Wallis para dados COMPLETOS por meio do pacote "agricolae"

```
##Umidade (antes)
ua1<-with(silvia1,kruskal(umidade_antes,trat,group=TRUE,main="silvia1"))
ua1

## $statistics
##      Chisq  p.chisq      LSD
##  4.766667 0.3120874 7.817914
##
## $parameters
##   Df ntr t.value alpha      test name.t
##    4   5 2.228139  0.05 Kruskal-Wallis  trat
##
## $means
##      rank umidade_antes      std r   Min   Max
## T1  3.666667      8.632567 0.16193741 3 8.4501 8.7592
## T2  7.333333      8.771367 0.93128621 3 7.7381 9.5460
## T3  9.000000      9.134867 0.41796512 3 8.6812 9.5043
## T4  8.666667      9.119000 0.09900096 3 9.0527 9.2328
## T5 11.333333      9.269200 0.15527959 3 9.0902 9.3677
##
## $comparison
## NULL
##
## $groups
##   trt      means M
## 1  T5 11.333333 a
## 2  T3  9.000000 a
## 3  T4  8.666667 a
## 4  T2  7.333333 a
## 5  T1  3.666667 a

##Umidade (depois)
ud1<-with(silvia1,kruskal(umidade_depois,trat,group=TRUE,main="silvia1"))
ud1

## $statistics
##      Chisq  p.chisq      LSD
## 12.833333 0.01211953 2.778977
##
## $parameters
##   Df ntr t.value alpha      test name.t
```

```

##      4      5 2.228139  0.05 Kruskal-Wallis  trat
##
## $means
##      rank umidade_depois      std r      Min      Max
## T1  2.000000      7.935700 0.16821935 3 7.7427 8.0512
## T2  6.666667      8.308233 0.04868083 3 8.2782 8.3644
## T3  6.333333      8.252967 0.10779361 3 8.1332 8.3422
## T4 14.000000      8.775167 0.05488209 3 8.7214 8.8311
## T5 11.000000      8.667633 0.04517182 3 8.6389 8.7197
##
## $comparison
## NULL
##
## $groups
##   trt      means M
## 1  T4 14.000000 a
## 2  T5 11.000000 b
## 3  T2  6.666667 c
## 4  T3  6.333333 c
## 5  T1  2.000000 d

## Poder Calorífico Superior
pcs1<-
with(silvia1,kruskal(poder_calorifico_superior,trat,group=TRUE,main="silvia1"))
pcs1

## $statistics
##   Chisq   p.chisq   LSD
##   12.9 0.01177489 2.69841
##
## $parameters
##   Df ntr  t.value alpha      test name.t
##   4   5 2.228139  0.05 Kruskal-Wallis  trat
##
## $means
##      rank poder_calorifico_superior      std r      Min      Max
## T1     6      17.54933 0.4994330 3 17.256 18.126
## T2     2      16.22933 0.1631727 3 16.062 16.388
## T3    14      18.97333 0.4670806 3 18.581 19.490
## T4     7      17.52833 0.1785534 3 17.387 17.729
## T5    11      18.43667 0.1065473 3 18.332 18.545
##
## $comparison
## NULL
##
## $groups
##   trt means M
## 1  T3     14 a
## 2  T5     11 b
## 3  T4     7  c
## 4  T1     6  c
## 5  T2     2  d

```

```
## Poder Calorífico Inferior
```

```
pci1<-with(silvia1,kruskal(poder_calorifico_inferior,trat,group=TRUE,main="silvia1"))
pci1
```

```
## $statistics
```

```
##   Chisq   p.chisq   LSD
##   12.9 0.01177489 2.69841
```

```
##
```

```
## $parameters
```

```
##   Df ntr t.value alpha      test name.t
##   4   5 2.228139  0.05 Kruskal-Wallis  trat
```

```
##
```

```
## $means
```

```
##   rank poder_calorifico_inferior      std r   Min   Max
## T1    6                        16.16533 0.4994330 3 15.872 16.742
## T2    2                        14.80633 0.1631727 3 14.639 14.965
## T3   14                        17.48033 0.4670806 3 17.088 17.997
## T4    7                        16.11033 0.1785534 3 15.969 16.311
## T5   11                        16.89367 0.1065473 3 16.789 17.002
```

```
##
```

```
## $comparison
```

```
## NULL
```

```
##
```

```
## $groups
```

```
##   trt means M
## 1  T3    14 a
## 2  T5    11 b
## 3  T4     7 c
## 4  T1     6 c
## 5  T2     2 d
```

```
## Poder Calorífico Útil
```

```
pcu1<-with(silvia1,kruskal(poder_calorifico_util,trat,group=TRUE,main="silvia1"))
pcu1
```

```
## $statistics
```

```
##   Chisq   p.chisq   LSD
##   12.9 0.01177489 2.69841
```

```
##
```

```
## $parameters
```

```
##   Df ntr t.value alpha      test name.t
##   4   5 2.228139  0.05 Kruskal-Wallis  trat
```

```
##
```

```
## $means
```

```
##   rank poder_calorifico_util      std r   Min   Max
## T1    7                        14.73133 0.44186008 3 14.456 15.241
## T2    2                        13.45000 0.15690443 3 13.287 13.600
## T3   14                        15.98067 0.41876286 3 15.614 16.437
## T4    6                        14.55533 0.16141974 3 14.436 14.739
## T5   11                        15.40633 0.09002962 3 15.315 15.495
```

```
##
```

```
## $comparison
```

```
## NULL
```

```

##
## $groups
##   trt means M
## 1  T3     14 a
## 2  T5     11 b
## 3  T1      7 c
## 4  T4      6 c
## 5  T2      2 d

## Teor Combustível
tc1<-with(silvia1,kruskal(teor_combustivel,trat,group=TRUE,main="silvia1"))
tc1

## $statistics
##      Chisq    p.chisq      LSD
## 13.03333 0.01111406 2.529589
##
## $parameters
##   Df ntr  t.value alpha      test name.t
##   4   5 2.228139  0.05 Kruskal-Wallis  trat
##
## $means
##      rank teor_combustivel      std r      Min      Max
## T1  5.000000      70.95963 0.2167061 3 70.8104 71.2082
## T2  2.000000      66.52027 0.5920612 3 66.1235 67.2008
## T3  8.666667      72.48333 0.4687262 3 72.1243 73.0136
## T4 10.333333      72.96217 0.1074151 3 72.8392 73.0377
## T5 14.000000      73.85763 0.1437916 3 73.7630 74.0231
##
## $comparison
## NULL
##
## $groups
##   trt      means M
## 1  T5 14.000000 a
## 2  T4 10.333333 b
## 3  T3  8.666667 b
## 4  T1  5.000000 c
## 5  T2  2.000000 d

## Teor de Cinzas
tc2<-with(silvia1,kruskal(teor_cinzas,trat,group=TRUE,main="silvia1"))
tc2

## $statistics
##      Chisq    p.chisq      LSD
## 13.5 0.009074317 1.819268
##
## $parameters
##   Df ntr  t.value alpha      test name.t
##   4   5 2.228139  0.05 Kruskal-Wallis  trat
##
## $means
##      rank teor_cinzas      std r      Min      Max

```

```

## T1  11    8.808867 0.1417320 3  8.6700  8.9533
## T2  14   16.621333 0.5216919 3 16.0442 17.0594
## T3   8    8.253333 0.1828500 3  8.1227  8.4623
## T4   5    7.831367 0.1117385 3  7.7095  7.9290
## T5   2    6.032300 0.4139694 3  5.6484  6.4709
##
## $comparison
## NULL
##
## $groups
##   trt means M
## 1  T2   14 a
## 2  T1   11 b
## 3  T3    8 c
## 4  T4    5 d
## 5  T5    2 e

##Carbono Fixo
cf1<-with(silvia1,kruskal(carbono_fixo,trat,group=TRUE,main="silvia1"))
cf1

## $statistics
##      Chisq    p.chisq    LSD
##  12.23333 0.01569792 3.419707
##
## $parameters
##   Df ntr  t.value alpha      test name.t
##    4  5 2.228139  0.05 Kruskal-Wallis  trat
##
## $means
##      rank carbono_fixo      std r      Min      Max
## T1 13.000000      20.23150 0.1378970 3 20.1218 20.3863
## T2  2.000000      16.85843 0.2245982 3 16.7041 17.1161
## T3  6.666667      19.26333 0.3496501 3 18.8637 19.5129
## T4  6.333333      19.20643 0.2179647 3 19.0333 19.4512
## T5 12.000000      20.11007 0.4107096 3 19.7661 20.5648
##
## $comparison
## NULL
##
## $groups
##   trt      means M
## 1  T1 13.000000 a
## 2  T5 12.000000 a
## 3  T3  6.666667 b
## 4  T4  6.333333 b
## 5  T2  2.000000 c

```

Análise de Kruskal-Wallis para dados PARCIAIS por meio do pacote "agricolae"

```

##Resistência Mecânica
rm1<-with(silvia2,kruskal(resist_mecanica,Tratamento,group=TRUE,main="silvia2"))
rm1

```

```

## $statistics
##      Chisq    p.chisq    LSD
##  5.066667 0.07939393 3.825678
##
## $parameters
##   Df ntr  t.value alpha      test   name.t
##    2   3 2.446912  0.05 Kruskal-Wallis Tratamento
##
## $means
##      rank resist_mecanica      std r      Min      Max
## T1 5.333333      1.1106374 0.23963422 3 0.8484044 1.3182387
## T2 7.333333      1.2813061 0.09713522 3 1.1977458 1.3878821
## T3 2.333333      0.8687784 0.05827672 3 0.8269844 0.9353495
##
## $comparison
## NULL
##
## $groups
##   trt   means M
## 1  T2 7.333333 a
## 2  T1 5.333333 ab
## 3  T3 2.333333 b

##Densidade Aparente
da1<-
with(silvia2,kruskal(densidade_aparente,Tratamento,group=TRUE,main="silvia2"))
da1

## $statistics
##      Chisq    p.chisq    LSD
##  5.955556 0.05090583 3.193856
##
## $parameters
##   Df ntr  t.value alpha      test   name.t
##    2   3 2.446912  0.05 Kruskal-Wallis Tratamento
##
## $means
##      rank densidade_aparente      std r      Min      Max
## T1 7.333333      1.1833333 0.03818813 3 1.150 1.225
## T2 5.666667      1.1163333 0.06230837 3 1.075 1.188
## T3 2.000000      0.9213333 0.02968726 3 0.896 0.954
##
## $comparison
## NULL
##
## $groups
##   trt   means M
## 1  T1 7.333333 a
## 2  T2 5.666667 a
## 3  T3 2.000000 b

##Densidade Energética
de1<-

```

```
with(silvia2,kruskal(densidade_energetica,Tratamento,group=TRUE,main="silvia2"))
de1
```

```
## $statistics
##      Chisq    p.chisq      LSD
##  5.422222 0.06646292 3.586332
##
## $parameters
##   Df ntr  t.value alpha      test   name.t
##    2   3 2.446912  0.05 Kruskal-Wallis Tratamento
##
## $means
##      rank densidade_energetica      std r      Min      Max
## T1 8.000000                20778.77 1254.3171 3 19844.40 22204.35
## T2 3.666667                18122.71 1165.8908 3 17443.33 19468.94
## T3 3.333333                17472.43  249.2768 3 17227.99 17726.27
##
## $comparison
## NULL
##
## $groups
##   trt      means M
## 1  T1 8.000000 a
## 2  T2 3.666667 b
## 3  T3 3.333333 b
```