

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
FRANCIELE GESLEINE CAPOTE

**CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CO-PRODUTOS COMPACTADOS
DA BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS**

CURITIBA
2012

FRANCIELE GESLEINE CAPOTE

**CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CO-PRODUTOS COMPACTADOS
DA BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação Interinstitucional em Bioenergia com sede na Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Bioenergia.

Orientadora:
Dra. Graciela Inês Bolzon de Muniz

Co-orientadores:
Dr. Luciano Farinha Watzlawick
Dra. Martha Andreia Brand
Dr. Waldir Ferreira Quirino

CURITIBA
2012

TERMO DE APROVAÇÃO

FRANCIELE GESLEINE CAPOTE

CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CO-PRODUTOS COMPACTADOS DA BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de mestre no programa de Pós-Graduação Interinstitucional em Bioenergia, com sede na Universidade Federal do Paraná, cuja banca examinadora é composta pelos seguintes examinadores:

Prof.(a) Dr.(a) Graciela Ines Bolzon de Muniz
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Waldir Ferreira Quirino
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, ____ de _____ de 2012.

Dedico este trabalho a minha família por todo o apoio durante esta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelas bênçãos derramadas, durante a conclusão de mestrado e em todas as fases de minha vida.

À minha família, à minha mãe Varcília ao meu pai Emílio e meus irmãos Luiz Fernando e Andrielle, pelo incentivo financeiro, pelo apoio, pelo carinho e pela compreensão durante o estudo e execução do trabalho.

De modo especial, ao meu esposo, Denis Vinicius Bonato, que com amor, com respeito, com encorajamento e com paciência, me incentivou ao longo desse processo.

À minha orientadora, Profa. Dra. Graciela Ines Bolzon de Muniz, pelo acompanhamento e pela amizade.

Aos co-orientadores Profa. Dra. Martha Andreia Brand, Prof. Dr. Luciano Farinha Watzlawick e ao Prof. Dr. Waldir Ferreira Quirino, pela paciência, dedicação neste trabalho.

À Profa. Dra. Carmen Guedes pelo incentivo e pela dedicação ao mestrado acadêmico interinstitucional em Bioenergia.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo para o desenvolvimento deste projeto.

À Universidade Federal do Paraná e à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa pela estrutura cedida para realização da pesquisa e também às empresas que forneceram material para estudo.

Enfim, gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram para o desenrolar desta pesquisa de mestrado e aos leitores que acompanharão este trabalho.

“Minha energia é o desafio, minha motivação é o impossível, e é por isso que eu preciso ser, à força e a esmo, inabalável”.

Augusto Branco

CAPOTE, F. G. **Caracterização e classificação de co-produtos compactados da biomassa para fins energéticos**. 2012. p.73. Dissertação (Mestrado Interinstitucional em Bioenergia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

RESUMO

A demanda energética mundial tem possibilitado o estudo de inovações tecnológicas ambientalmente viáveis, principalmente relacionadas à utilização de recursos renováveis. Tudo isso, em busca da minimização dos prejuízos causados pelo uso indiscriminado dos combustíveis fósseis. A finalidade dos estudos acerca de energia limpa é diminuir a quantidade e a disposição inadequada de resíduos, recuperando-os para a produção de energia renovável, diminuindo assim perdas econômicas e propiciando melhoria da qualidade ambiental. Assim sendo, o presente trabalho aborda um levantamento bibliográfico, além de uma pesquisa experimental com a análise química imediata, bem como a determinação da massa específica aparente e do poder calorífico em briquetes e peletes de diferentes materiais tais como, resíduos da madeira, bagaço de cana e cereais. Do total das amostras coletadas, 60% são oriundas de resíduos de madeira, 30% de bagaço de cana e apenas 10% de resíduos de cereais, como arroz e aveia. As análises imediatas realizadas permitiram comparar as amostras de diferentes biomassas mediante padrões estabelecidos por normas europeias. Verificou-se que os materiais analisados mantêm-se dentro das normas de qualidade. Através da análise das propriedades físico-químicas foi possível determinar classes para a correta utilização dos compactados energéticos, de forma que foram originadas 6 classes para briquetes e 2 classes para peletes, conforme o uso. Os resultados evidenciam que 60% das amostras apresentaram características que possibilitariam a utilização tanto doméstica quanto industrial, enquanto 40% restantes são destinadas apenas ao uso industrial devido ao potencial de toxicidade. Tais análises fornecerão dados quantitativos que poderão subsidiar pesquisas posteriores com relação à construção de uma normatização nacional de produtos compactados de biomassa, classificando-os e adequando-os para utilização conforme as características de cada produto. De forma a permitir o melhor aproveitamento do poder energético e reduzir os impactos ambientais ocasionados pela disposição inadequada de resíduos da biomassa.

Palavras-chave: Resíduos. Peletes. Briquetes.

CAPOTE, F. G. **Caracterização e classificação de co-produtos compactados da biomassa para fins energéticos**. 2012. p.73. Dissertação (Mestrado Interinstitucional em Bioenergia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

ABSTRACT

The global energy demand has enabled the study of technological innovations environmentally viable, mainly related to the use of renewable resources. All this in pursuit of minimizing the damage caused by the indiscriminate use of fossil fuels. The purpose of the studies on clean energy is decreasing the amount and improper disposal of waste, reclaiming them for the production of renewable energy, reducing economic losses and providing enhanced environmental quality. Therefore, this paper discusses a literature, besides the experimental research with the chemical analysis and the determination of the bulk density and calorific into briquettes and pellets of different materials such as wood residues, bagasse sugarcane and cereals. Of the total samples collected, 60% are from wood waste, 30% sugarcane bagasse and only 10% of waste grains like rice and oats. The analyzes performed allow immediate compare samples from different biomasses by standards set by European standards. It was found that materials considered remain within the norms of quality. Through the analysis of physicochemical properties were determined classes for the correct use of compressed energy, so that they originated 6 classes for briquettes and pellets for 2 classes, based on usage. The results show that 60% of the samples had characteristics that make it possible to both domestic and industrial use, while the remaining 40% are meant only for industrial use due to potential toxicity. Such analyzes provide quantitative data that can support further research regarding the construction of a national standardization of compressed biomass products, sorting them and adapting them for use according to the characteristics of each product. In order to allow better use of power energy and reduce the environmental impacts caused by improper disposal of waste biomass.

Keywords: Waste. Pellets. Briquettes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figura 1 – | Evolução do consumo da madeira e derivados em relação aos demais combustíveis no Paraná..... | 16 |
| Figura 2 - | Produção de briquetes em prensa extrusora por pistão mecânico | 30 |
| Figura 3 - | Prensa de extrusão por rosca sem fim..... | 31 |
| Figura 4 – | Prensa hidráulica | 32 |
| Figura 5 – | Número de amostras por classe | 62 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------------|---|----|
| Tabela 1 | – Principais categorias de resíduos agrícolas no Brasil | 18 |
| Tabela 2 | – Principais culturas agrícolas e seus respectivos resíduos no Brasil ... | 18 |
| Tabela 3 | – Composição química elementar de diferentes tipos de biomassa em base seca | 22 |
| Tabela 4 | – Poder calorífico líquido de biomassa florestal e agrícola em diferentes teores de umidade | 23 |
| Tabela 5 | – Propriedades energéticas de diferentes tipos da biomassa | 24 |
| Tabela 6 | – Composição (%) e poder calorífico superior da palha e bagaço de cana-de-açúcar | 25 |
| Tabela 7 | – Características de resíduos antes e após a compactação (briquetagem) | 27 |
| Tabela 8 | – Propriedades de briquetes de diferentes tipos de resíduos da biomassa | 28 |
| Tabela 9 | – Comparação das propriedades de diferentes tipos de briquetadeiras | 32 |
| Tabela 10 | – Normas europeias sobre especificações de peletes de madeira | 39 |
| Tabela 11 | – Norma sueca SS 18 71 21 para especificação de briquete de madeira | 39 |
| Tabela 12 | – Caracterização de amostras de produtos compactados | 42 |
| Tabela 13 | – Classificação dos produtos compactados conforme as características físico-químicas | 46 |
| Tabela 14 | – Classificação das amostras de produtos compactados conforme composição | 48 |
| Tabela 15 | – Análise imediata relacionando as médias estatísticas do teor de umidade | 49 |
| Tabela 16 | – Teor de cinzas médio dos briquetes e peletes analisados | 51 |
| Tabela 17 | – Massa específica aparente média dos briquetes e peletes analisados | 52 |
| Tabela 18 | – Poder calorífico médio entre as amostras de briquetes e peletes analisados | 54 |
| Tabela 19 | – Características relacionadas ao PCS, PCI e PCL dos briquetes analisados | 55 |
| Tabela 20 | – Análise imediata de briquetes e peletes de diferentes tipos de resíduos da biomassa | 56 |
| Tabela 21 | – Classificação para a utilização do compactado de acordo com a biomassa | 60 |
| Tabela 22 | – Classificação por amostra de produtos compactados para a geração de energia | 61 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

C – Carbono

H – Hidrogênio

O – Oxigênio

N – Nitrogênio

S – Enxofre

A – Cinzas

V – Voláteis

F – Carbono Fixo

kJ – Quilojoule

kg – Quilograma

Ms – matéria seca

Mu – matéria úmida

PCS – Poder Calorífico Superior

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCL – Poder Calorífico Líquido

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 | OBJETIVO GERAL | 14 |
| 2.1 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 14 |
| 3 | REVISÃO DA LITERATURA | 15 |
| 3.1 | Energia | 15 |
| 3.2 | Disponibilidade de biomassa para a geração de produtos compactados..... | 16 |
| 3.3 | Propriedades da biomassa para a produção energética | 22 |
| 3.4 | Processos de conversão dos resíduos da biomassa em produtos energéticos | 27 |
| 3.5 | Características do processo de combustão da biomassa..... | 33 |
| 3.6 | Pirólise da biomassa | 34 |
| 3.7 | Produtos dos processos de combustão e pirólise | 34 |
| 3.7.1 | Produtos gasosos | 35 |
| 3.7.1.1 | <i>Dióxido de carbono</i> | 35 |
| 3.7.1.2 | <i>Dióxido de enxofre</i> | 35 |
| 3.7.1.3 | <i>Monóxido de carbono</i> | 35 |
| 3.7.1.4 | <i>Gás metano</i> | 36 |
| 3.7.2 | Produtos líquidos | 36 |
| 3.7.2.1 | <i>Alcatrão</i> | 36 |
| 3.7.2.2 | <i>Ácido Pirolenhoso</i> | 36 |
| 3.7.2.3 | <i>Bioóleo</i> | 37 |
| 3.7.3 | Produtos sólidos | 37 |
| 3.7.3.1 | <i>Fuligem</i> | 37 |
| 3.7.3.2 | <i>Cinzas</i> | 38 |
| 3.8 | Normalização para produtos compactados da biomassa | 38 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 41 |
| 4.1 | Local de realização da pesquisa | 41 |
| 4.2 | Local de coleta dos dados e análise das amostras | 41 |
| 4.3 | Análises técnicas e tecnológicas dos produtos compactados | 43 |
| 4.4 | Classificação de produtos compactados para fins energéticos | 45 |
| 4.5 | Delineamento estatístico | 47 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 48 |
| 5.1 | Matéria-prima dos briquetes | 48 |
| 5.2 | Caracterização de amostras de briquetes e peletes..... | 49 |
| 5.3 | Propriedades dos produtos compactados conforme o tipo de biomassa. | 56 |
| 5.4 | Classificação de briquetes e peletes | 59 |
| 6 | CONCLUSÃO | 63 |
| | REFERÊNCIAS | 64 |

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a substituição das fontes energéticas fósseis pela energia renovável foi um grande avanço ambiental. No entanto, tal tecnologia ainda precisa ser aprimorada para sua melhor utilização, tendo como intuito a diminuição de possíveis prejuízos causados pelo gerenciamento errôneo dos produtos energéticos.

O mundo moderno tem uma exorbitante demanda energética, provocando grandes desastres ambientais, tornando-se uma preocupação mundial. Estes desastres se dão pelo uso de combustíveis fósseis os quais são uma das formas mais primitivas de obtenção de energia.

A emissão de resíduos em grande escala, dispostos inadequadamente, fator que acarreta inúmeros prejuízos ao meio ambiente. Para que este fato seja minimizado, surgem as alternativas tecnológicas com o objetivo de conceder um destino adequado aos resíduos.

As novas alternativas tecnológicas para a redução e substituição do uso de combustíveis fósseis aparecem na forma de energias renováveis, tais como: a energia eólica, a solar, as das marés, a hidrelétrica e dentre todas, destaca-se a energia da biomassa.

Os estudos sobre as energias renováveis da biomassa ainda são escassos, principalmente quanto a um padrão de utilização de biocombustíveis sólidos, ponto vital para conservação da natureza e da saúde humana.

A energia da biomassa é uma das formas mais antigas para obtenção de energia. O termo biomassa refere-se à utilização de um biocombustível para geração de energia limpa, ou seja, o uso de um combustível renovável oriundo de material orgânico. A biomassa normalmente é proveniente de organismos vegetais ou seus derivados, que através de processos como pirólise, gaseificação, combustão e co-combustão transformam-se em energia renovável (PEREIRA, 2009).

No cenário energético mundial há diversos conflitos gerados pelo uso dos combustíveis fósseis, como o petróleo pelo seu valor econômico e pelos seus riscos para o meio ambiente. O desenvolvimento de processos tendo como foco as energias renováveis estão aos poucos sendo implantados em diversos países (TOLMASQUIM, 2005).

O Brasil, por sua vez, possui inúmeros recursos energéticos diversificados, o que o coloca em vantagem aos demais países quando se trata principalmente de energias alternativas (TOLMASQUIM, 2011).

De acordo com Tolmasquim (2011) a biomassa é amplamente utilizada como fonte de energia, devido as excelentes propriedades inflamáveis deste material. Além disso, os recentes estudos a respeito de energias renováveis facilitaram a utilização não apenas parcial, mas, praticamente total da biomassa.

O avanço em pesquisas a respeito de biocombustíveis tem proporcionado a diminuição de descartes através do uso de resíduos como matéria prima para a geração de produtos energéticos, conhecidos como co-produtos. Os resíduos da biomassa podem ser considerados excelentes co-produtos para a geração de energia seja na forma de biogás, bioóleo, biodiesel ou na co-geração de produtos compactados, briquetes ou pellets (TOLMASQUIM, 2011).

A compactação envolve a compressão de resíduos da biomassa, sob elevada temperatura e pressão, formando um sólido de alta densidade. Dessa forma, os resíduos são aproveitados, fornecendo energia térmica renovável.

Apesar das excelentes expectativas, a utilização dos produtos compactados gera dúvidas quanto aos impactos na saúde humana, uma vez que os produtos energéticos comercializados possuem diversas origens. Esses produtos podem ser usados em residências, estabelecimentos comerciais, indústrias sem qualquer distinção entre as propriedades físico-químicas dos materiais compactados da biomassa.

A caracterização de briquetes com fins energéticos torna-se importante pelo fato, de não existir uma normatização nacional, o que a torna necessária, baseada em dados técnicos quantitativos do material a ser normatizado.

O desenvolvimento de uma normatização nacional para os produtos compactados, apesar de recente no Brasil, vem ganhando cada vez mais estima. Assim, pesquisas a respeito da caracterização de briquetes e peletes são essenciais para fornecer subsídios para a classificação adequada e o desenvolvimento de normalização padrão.

Por tudo isso, a correta classificação de produtos compactados da biomassa, conforme determinação e especificação das características individuais podem favorecer uma melhor aplicação para seu uso doméstico ou industrial.

2 . OBJETIVO GERAL

Caracterizar briquetes e demais compactados de biomassa produzidos em algumas regiões do estado do Paraná, tais como: Guarapuava, Cascavel e União da Vitória, além de São Paulo/SP e Erechim/RS, Brasil.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1)** Determinar as propriedades físicas e químicas de produtos compactados de biomassa.
- 2)** Classificar os produtos compactados segundo classes de qualidade, baseando-se em uma proposta de normatização nacional para produtos compactados.
- 3)** Gerar dados para embasamento de uma normatização nacional de compactados de biomassa, permitindo melhor aproveitamento do poder energético e reduzindo os impactos ambientais ocasionados por resíduos da biomassa.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Energia

A forma de energia mais utilizada nas sociedades primitivas era a energia térmica obtida pela combustão da lenha oriunda das florestas e usadas para preparar os alimentos, além do aquecimento doméstico. Aos poucos, já na Idade Média, foram sendo incluídas, tais como a energia dos ventos e da água. Somente após a Revolução industrial, foi introduzido o uso do petróleo, do gás natural e do carvão em grande escala (GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (2011), a produção de petróleo foi 5,4% maior em 2010. Este dado pode ser explicado pelo aumento do número de unidades de produção de petróleo, além do aumento da produção das unidades existentes.

Sendo assim, nota-se que o modelo energético atual, baseia-se na utilização de combustíveis fósseis para obtenção de energia. A problemática desta situação é a emissão de gases do efeito estufa (SLONGO; KUPERSTEIN e NETTO, 2008).

Caso o produto compactado com finalidade energética contenha algum agente contaminante, as cinzas produzidas através do processo de combustão podem liberar metais pesados no ambiente, como o cádmio e o chumbo, além de outras substâncias tóxicas como as dioxinas. Ecologicamente, esse processo torna o produto inviável, caso não haja a correta especificação de utilização no rótulo ou em norma própria (PEREIRA, 2009).

Torna-se necessário, portanto, uma caracterização adequada dos diferentes tipos de biocombustíveis, principalmente os sólidos, como os briquetes e peletes, para que, dessa forma, também sejam utilizados adequadamente, proporcionando maior e melhor rendimento evitando a emissão de poluentes.

A determinação das propriedades de cada briquete ou pelete pode proporcionar a correta utilização do produto, sem que haja risco de contaminação. Tendo vista que o alto teor de cinzas em briquetes, por exemplo, pode fundir em caldeiras formando incrustações, corrosão e, conseqüentemente, podendo diminuir a potencialidade da produção energética e emitir poluentes.

3.2. Disponibilidade de biomassa para a geração de produtos compactados

Normalmente as matérias-primas mais utilizadas para a produção de biocombustíveis da biomassa e, conseqüentemente, para a geração de energia térmica, são provenientes de atividades agrícolas e madeireiras (FAPESP, 2010).

Conforme estudos da FAPESP (2010), no Brasil, os tipos de biomassas mais utilizadas para a geração de energia térmica são: a lenha e seus resíduos e o bagaço de cana. O consumo da lenha e seus derivados, com finalidade energética renovável, têm aumentado nos últimos anos, que pode ser observado na Figura 1.

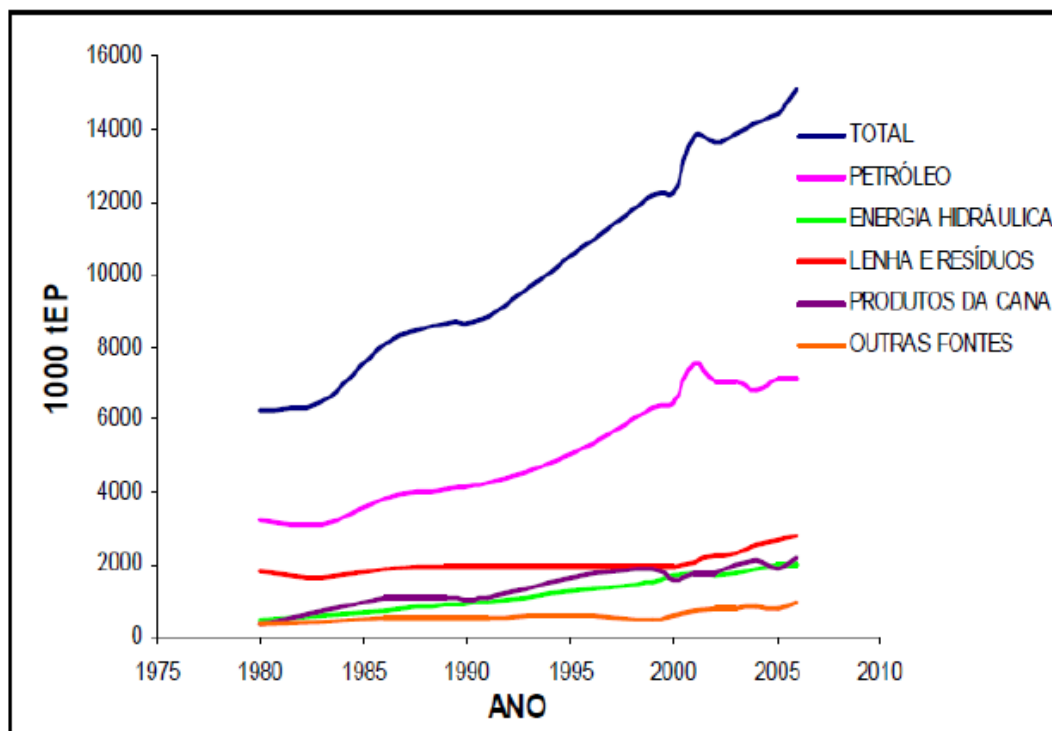


Figura 1. Evolução do consumo da madeira e de derivados em relação aos demais combustíveis no Paraná

Fonte: COPEL(2006)

De acordo com estudos de Ferreira-Leitão et al. (2010), o Brasil gera um grande montante de resíduos com potencial energético, a maior parte originada pela ampla produção agrícola no país.

Alguns resíduos agrícolas em potencial para a produção de energia renovável como os resíduos do milho, soja e palha da cana de açúcar não são utilizados para esta finalidade devido à competição com o mercado mundial de alimentos, não sendo economicamente viável.

O Brasil é, atualmente, considerado o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, destinando-se grande parte dessa produção à indústria açucareira e as usinas de álcool. Por outro lado, a cana-de-açúcar, é, entre as principais monoculturas, a que gera maior número de resíduos. É permitido afirmar que os resíduos da produção agrícola no Brasil são exorbitantes e mal utilizados (BRASIL, 2012b).

Tendo em vista o montante de resíduos gerados em atividades agrícolas e de beneficiamento, pode-se verificar a vasta disponibilidade de recursos que pode ser utilizada na produção de energia renovável da biomassa (FERREIRA-LEITÃO et al., 2010).

Porém, percebe-se que são necessárias tecnologias adequadas, com o objetivo de ampliar o montante de biomassa disponível e otimizar o processo de produção energética, sem que haja necessidade de maior área de plantio (CORTEZ, BAJAY e BRAUNBECK, 2002).

Conforme Couto et al. (2004b), a disponibilidade de resíduos agrícolas é exorbitante, porém há necessidade de otimização no processo de produção energética, para que os resíduos sejam devidamente aproveitados para esta fins energéticos.

Segundo o Balanço Energético Brasileiro, de 2011, a produção de cana-de-açúcar em 2010 aumentou cerca de 0,8% com relação ao mesmo período do ano anterior (EPE, 2011).

Conforme Gauthier (1996) citado por Couto *et al.* (2004b) o montante de resíduos da cana-de-açúcar pode variar de 50 a 80% provenientes das atividades sucroalcooleiras.

Ainda segundo Cortez, Bajay e Braunbeck (2002) a produção de cana pode chegar a 300 milhões de toneladas por ano para posterior beneficiamento em álcool e açúcar. Conseqüentemente, a quantidade de resíduos resultantes desse processo aproxima-se a 100 milhões de toneladas por ano. Porém observou-se no decorrente estudo que apenas 20% das amostras eram compostas por bagaço de cana. Apesar da grande quantidade desse tipo de resíduo, boa parte é utilizada na própria indústria sucroalcooleira para queima em caldeiras e geração da energia térmica.

A Tabela 1 evidencia os principais resíduos agrícolas produzidos no Brasil, o percentual de detritos e a comparação com relação ao poder calorífico dos mesmos.

Tabela 1. Principais categorias de resíduos da produção agrícola no Brasil

| Matéria-prima da produção agrícola | Percentual da produção de resíduos(%) | Poder calorífico líquido |
|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| | | (Kcal kg) ⁽¹⁾ |
| Algodão | 50 | 3.800 |
| Arroz | 20 a 25 | 3.300 |
| Coco | 50 | 4.200 |
| Café | 20 | 4.300 |
| Cana-de-açúcar | 80 | 3.600 |
| Girassol | 10 a 15 | 3.200 |
| Milho | 25 a 30 | 4.000 |

(1) – Teor de umidade de 10%

Fonte: GAUTHIER¹ (1986) citado por COUTO et al. (2004b).

Do processo de beneficiamento de produtos agrícolas podem ser gerados até 80% de resíduos com alto potencial de queima. Mas, grande parte destes resíduos não são utilizados para produção energética devido a concorrência com a indústria de alimentos (COUTO et al, 2004b).

A Tabela 2 faz uma comparação entre as principais culturas agrícolas no Brasil e a quantidade de resíduos resultantes da produção.

Tabela 2. Principais culturas agrícolas e seus respectivos resíduos no Brasil

| Cultura | Produção Anual | Tipo de Resíduo | Quantidade Total de Resíduos (milhões t/ano) |
|----------------|---------------------------|-----------------|--|
| Cana-de-Açúcar | 270-300 milhões t | Bagaço | 90-100 |
| | | Palha | 90-100 |
| Eucalipto | 90 milhões m ³ | Casca | 6,8 |
| Pinus | 41 milhões m ³ | Casca | 2,2 |
| Arroz | 9 milhões t | Casca | 1,8 |

Fonte: Adaptado pela autora de CORTEZ, BAJAY e BRAUNBECK (2002)

A quantidade de resíduos proveniente do beneficiamento da cana-de-açúcar é realmente muito grande. No entanto, grande parte desses resíduos é utilizada na própria indústria, *in natura*, para a queima em caldeiras e manutenção de energia térmica no processo produtivo (SOUZA, SORALI e OLIVA, 2002).

A produção de arroz no Brasil chega a 9 milhões de toneladas ao ano. Segundo Cortez, Bajay e Braunbeck (2002), uma grande produção tem consequentemente

¹ GAUTHIER, T. G. *Revista O Papel*, n°9, p. 62-64, 1986.

uma vasta geração de resíduos, que compreendem 1,8 milhão de toneladas ao ano. No material em estudo, as amostras compostas por resíduos de cereais compreenderam 7 % do total.

De acordo com estudos de Abbas e Ansumali (2010) a produção estimada de arroz no Brasil corresponde a 1,9 % por ano do total produzido no mundo. Cerca de 50% dos resíduos da produção de arroz, como a casca de arroz, é utilizado para gerar energia na forma de vapor para o funcionamento de máquinas de moagem mecânicas no próprio processo produtivo.

Os estudos de Quirino (2000) apontam que o potencial energético dos resíduos de arroz, principalmente da casca, aproxima-se de 3730 kcal/kg, torna-o viável energeticamente. Sendo assim, atualmente, a produção de cereais no Brasil tem tido acréscimo significativo e a produção agrícola tem investido cada vez mais em otimização durante processo produtivo desses produtos.

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2012), afirma que com relação a matriz energética nacional o uso da energia limpa proveniente da biomassa corresponde, atualmente acerca de 3,5% do consumo de energia nacional. Os resíduos comumente mais aplicados para produção de biocombustíveis sólidos são detritos do arroz e da aveia.

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2012), a potência gerada por usinas movidas a biomassa no país aproxima-se de 5700 MW. Deste total: 944 MW correspondem à usinas abastecidas por licor negro; 232 MW à usinas abastecidas por resíduos de madeira; 45MW às de biogás; 21 MW à casca de arroz; e 4000 MW às usinas abastecidas por bagaço de cana. Entre os diferentes tipos de biomassa, o bagaço de cana tem o maior número de usinas e, conseqüentemente, a maior porcentagem em relação à geração de energia limpa no Brasil, seguido pela madeira e seus derivados.

As cascas de arroz correspondem a uma pequena porcentagem, devido ao número reduzido de usinas que aproveitam estes resíduos para produção energética e, também, pela falta de tecnologias apropriadas para este co-produto (ABBAS e ANSUMALI, 2010).

Os resíduos da produção de arroz, tendo em vista os estudos realizados por Foletto et al. (2005), para os quais se enquadram as cascas, correspondem a 1.162.000 toneladas, chegando a 20% do volume total produzido no estado do Rio Grande do Sul.

De acordo com Brito (2007), a madeira em suas diferentes formas, lenha e derivados, compoem a matriz energética mundial, principalmente dos países em desenvolvimento, onde há constante aumento no uso das energias renováveis. Sendo que no Brasil a biomassa florestal constitui cerca de 10 a 25% na matriz energética nacional.

Sob a perspectiva de Feitosa (2008), a maior porcentagem de resíduos provenientes de atividades madeireiras é a lenha, considerando também casca e aparas. Esses resíduos representam aproximadamente 71% de todos os descartes da indústria madeireira.

Cerca de 22% de resíduos de madeira correspondem à serragem e 7% aos cepilhos e maravalhas. O setor moveleiro é responsável por grande parte da geração de resíduos, resultantes dos processos de beneficiamento da madeira. No Brasil, os resíduos da indústria madeireira e moveleira são utilizados principalmente para a geração de energia térmica (FEITOSA, 2008).

O Brasil tem potencial para gerar energia através da madeira e seus derivados produzidos a partir de florestas energéticas. A implantação de florestas energéticas no Brasil é capaz de gerar benefícios econômicos, ambientais e sociais (SILVA, 2009).

O Brasil argumenta Silva (2009), tem a capacidade de produzir até 300.000 quilocalorias de energia potencial por hectare/dia em cultura de florestas energéticas, se houver possibilidades tecnológicas e cuidados na escolha para a produção.

Em virtude de fatores como a uniformidade no crescimento, a boa adaptação em diferentes ambientes, a alta produtividade e ao curto tempo de crescimento, as espécies vegetais mais utilizadas para a geração de energia são as coníferas e uma folhosa, o eucalipto (PEREIRA et al., 2010; NOGUEIRA e LORA, 2003).

Espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* produzem as maiores quantidades de resíduos da produção industrial que, conseqüentemente, são utilizados na produção de energia. Devido as características morfológicas, os gêneros arbóreos são usados em plantações de florestas energéticas (PEREIRA et al., 2010; NOGUEIRA e LORA, 2003).

Verifica-se nos estudos de Cortez, Bajay e Braunbeck (2002), que a produção de *Pinus* sp. atinge aproximadamente de 41 milhões de toneladas por ano, enquanto de *Eucalyptus* sp. aproxima-se de 90 milhões de toneladas por ano.

Consequentemente, o número de resíduos gerados por ano para *Pinus* fica em torno de 2,2 milhões de toneladas e eucalipto 6,8 milhões de toneladas ao ano. Novamente enfatizando-se a grande porcentagem de amostras de compactados provenientes de resíduos da madeira.

Com base nos estudos de Tetto et al. (2009), a produção da madeira com finalidade energética, teve aumento de aproximadamente 10,6% entre os anos de 1997 a 2007, no estado do Paraná. A lenha é o principal produto para a geração de energia, seguido pelo carvão vegetal, este com maior produção na região centro-sul do estado, porém com tendência ao crescimento na região noroeste.

De todo o montante de madeira produzidos na década de realização do estudo de Tetto et al. (2009), verificou-se que a disponibilidade de madeira para fins energéticos chega a 31,2% da produção total do estado do Paraná.

O setor siderúrgico normalmente utiliza o carvão vegetal para a geração de energia, porém tem-se buscado tecnologias de produção ecologicamente e ambientalmente mais viáveis (FAPESP, 2010).

3.3 Propriedades e fatores que influenciam as variáveis da biomassa para a produção energética

Quando se trata de produção energética, as análises em torno da composição química da biomassa vegetal são essenciais, pois os resultados poderão qualificar a biomassa com relação ao potencial de energia disponível (BRAND, 2010).

Dentre os processos de análise química, encontra-se a análise imediata que, por sua vez, está relacionada à avaliação da porcentagem de carbono fixo (F), de materiais voláteis (V), de cinzas (A) e de umidade (W) todos contidos na biomassa energética (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Para o processo de compactação com fins energéticos a melhor matéria-prima é aquela que consiste de lignocelulósicos, pois a lignina faz a ligação entre as partículas da biomassa, favorecendo também os processos de combustão, devido à presença de carbono e hidrogênio em sua constituição, já que, como se sabe estes dois elementos são caracterizados por produzir calor (RAVEN, 2001).

O teor de umidade, o teor de cinzas, a densidade e o poder calorífico são aspectos considerados essenciais para potencializar a produção de compactados da biomassa com finalidade energética (BRAND, 2010).

A composição química elementar, verificada por Brand (2010) serve de base para os cálculos de combustão, a partir da porcentagem de cada um dos seus elementos presentes nas mais diversas biomassas. A Tabela 3 mostra os valores relativos à composição química de diferentes tipos de biomassa em base seca.

Tabela 3. Composição química elementar de diferentes tipos de biomassa em base seca

| Tipo de biomassa | Composição elementar média (%) | | | | | | Composição imediata média (%) | | | PCS |
|------------------|--------------------------------|-------------|---------------|-------------|------|-------|-------------------------------|-------|-------|---------|
| | C | H | O | N | S | A | V | A | F | Kcal/kg |
| Coníferas | 49,29 | 5,99 | 44,36 | 0,06 | 0,03 | 0,30 | 82,54 | 0,29 | 17,70 | 4700 |
| Folhosas | 49,00 | 5,87 | 43,97 | 0,30 | 0,01 | 0,72 | 81,42 | 0,79 | 17,82 | 4600 |
| Casca de arroz | 40,96 | 4,30 | 35,86 | 0,40 | 0,02 | 18,34 | 65,47 | 17,89 | 16,67 | 3850 |
| Bagaço de cana | 44,80 47 | 5,35 6,5 | 39,55 35,8 | 0,38 4,1 | 0,01 | 9,79 | 73,78 | 11,27 | 14,95 | 4100 |
| Casca de coco | 48,23 | 5,23 | 33,19 | 2,98 | 0,12 | 10,25 | 67,95 | 8,25 | 23,80 | 4500 |
| Sabugos de milho | 46,58 | 5,87 | 45,46 | 0,47 | 0,01 | 1,40 | 80,10 | 1,36 | 18,54 | 4500 |
| Ramas de algodão | 47,05 | 5,35 | 40,97 | 0,65 | 0,21 | 5,89 | 73,29 | 5,51 | 21,20 | 4370 |
| Cama de aviário | 37,49 | 5,12 | 31,82 | 3,70 | 0,45 | 21,62 | 62,73 | 23,40 | 13,87 | 3550 |
| Capim elefante | 41,16 | 5,55 | 45,91 | 1,78 | - | 5,60 | 76,69 | 5,6 | 17,70 | 3600 |
| Etanol | 50,05 | 13,05 | 36,9 | | | | | | | |

Fonte: Adaptado de JENKINS (1990), citado por NOGUEIRA e LORA (2003); TEIXEIRA e LORA (2004); VLASSOV (2001); TOLMASQUIM (2005) e BRAND (2010).

Na Tabela 3, verificar-se que quanto à composição imediata, a biomassa, que apresentou alta porcentagem de voláteis e baixa porcentagem de cinzas, demonstrou elevado poder calorífico. Desta forma, é possível perceber a relação entre os diferentes fatores da composição química.

Tomando como base as pesquisas de Nogueira e Lora (2003), a umidade pode ser mensurada através da quantidade de água disponível na biomassa. O cálculo se faz pela diferença entre os pesos da amostra antes e após o processo de secagem, o que possibilita a determinação da umidade em base seca ou úmida.

A quantidade de água presente na biomassa é, de acordo com Brand (2010), essencial para a produção energética, pois se houver grande quantidade de água no produto, mais tempo e energia serão necessárias para que ocorra a completa combustão.

Assim, o poder calorífico é inversamente proporcional à umidade do produto energético, pois quanto maior o poder calorífico menor o teor de umidade. A porcentagem de água presente no produto compactado interfere no ciclo energético, pois parte da energia que seria utilizada na etapa de combustão é usada para a secagem do produto (NETO et al., 2010).

A Tabela 4 relaciona a porcentagem de teor de umidade ao poder calorífico, em Kcal/kg, dos principais tipos de biomassa utilizados na produção de energia.

Tabela 4. Poder calorífico líquido de biomassa florestal e agrícola em diferentes teores de umidade

| Biomassa | Teor de umidade – Base úmida (%) | Poder calorífico líquido Kcal/kg |
|------------------------------|---|---|
| Carvão vegetal | 5 | 7300 |
| Carvão de resíduos agrícolas | 5 | 6140 |
| Esterco | 13 | 3250 |
| Bagaço de cana | 50 | 2000 |
| Casca de coco | 8 | 4000 |
| Casca de café | 23 | 3200 |
| Casca e palha de palma | 35 | 1900 |
| Palha e casca de arroz | 13 | 3200 |

Fonte: Adaptado de NOGUEIRA e LORA (2003), citado por BRAND, 2010,.

A Tabela 4, demonstra que o poder calorífico líquido depende de diversos fatores. O tipo de biomassa utilizada e principalmente a umidade, podem ser destacadas. Quanto maior o teor de umidade presente na biomassa, menor o poder de queima do combustível.

De acordo com Couto et al. (2004b), um exemplo da relação entre o poder calorífico e a umidade é a madeira, na qual o poder calorífico pode duplicar se o teor de umidade reduzir, por exemplo de 50% para 20%.

Além disso, a combustão direta de resíduos florestais torna-se inviável, uma vez que o elevado teor de umidade presente, cerca de 50%, reduz significativamente o poder calorífico, de forma que se torna necessária a secagem correta do material (NETO et al., 2010).

Em estudos realizados por Sturion e Tomaselli (1990) sobre a influência do tempo de secagem da bracinga para a produção energética, verifica-se que a diminuição do teor de umidade durante o processo de secagem era proporcional ao aumento do poder calorífico, ou seja, quanto mais seca a biomassa maior a capacidade energética.

A quantidade de partículas poluentes liberadas durante o processo de queima da biomassa com elevado índice de umidade é também significativamente maior do que aquela resultante da combustão de material seco (BRAND, 2010).

Para Brand (2010), outro fator importante quando se trata da análise imediata é o teor de cinzas. As cinzas correspondem à porcentagem de material que resta do processo de combustão; desta forma, as cinzas residuais devem ser retiradas para evitar danos causados pela corrosão de material abrasivo resultante das cinzas.

As cinzas resultantes do processo de combustão direta da biomassa tornam-se um agente poluidor em potencial, por possuir em sua composição uma grande quantidade de carbono residual (FOLETTTO et al., 2005).

Conforme Brand (2010), a espécie vegetal, o tipo de biomassa, a idade e o local do crescimento do vegetal são fatores que interferem diretamente na quantidade de cinzas do biocombustível. A Tabela 5 relaciona os diferentes tipos de biomassa ao poder de queima e ao teor de cinzas em porcentagem.

Tabela 5. Propriedades energéticas de diferentes tipos de biomassa

| Biomassa | PCS (kcal/kg) | TC (%) |
|--|---|---------------|
| Pinus com casca ⁽¹⁾ | 4800 | 0,4 |
| Eucalipto com casca ⁽¹⁾ | 4600 | 0,85 |
| Bagaço de cana-de-açúcar | 3700 ⁽²⁾ a 4139 ⁽³⁾ | 9,79 |
| Casca de arroz | 3730 ⁽²⁾ a 3855 ⁽³⁾ | 18,34 |
| Capim elefante | 3600 a 4300 | 2,6 a 11 |
| Palha de milho | 3570 ⁽²⁾ | - |
| Casca de coco | 4548 ⁽³⁾ | 10,25 |
| Sabugo de milho | 4483 ⁽³⁾ | 1,40 |
| Ramas de algodão | 4361 ⁽³⁾ | 5,89 |
| Esterco seco de animais para queima direta | 3487 ⁽⁴⁾ | - |

Fonte: Adaptado de BRAND (2007)¹; QUIRINO (2000)²; UFPR³; Nogueira e Lora (2003)⁴, citado por BRAND (2010)

A porcentagem de cinzas encontrada para cada biomassa e destacada na Tabela 5, refere-se ao contido no próprio material, sem que haja contaminação, esta afinal acrescentaria significativamente o teor de cinzas.

O poder calorífico é definido como a dose de calor liberado durante o processo de combustão completa da biomassa energética. Isto normalmente é quantificado quando uma amostra de produto energético é colocada em uma bomba calorimétrica, em atmosfera de oxigênio, permitindo mensurar a energia liberada, normalmente em Kcal/kg (ANON et al., 1995).

O processo de determinação de poder calorífico em bomba calorimétrica segue algumas etapas até o resultado final. Quando a amostra de biocombustível é colocada em uma bomba calorimétrica, esta deve estar livre de umidade, pois o cadinho com a amostra é fechado dentro do calorímetro, recebe então oxigênio e em seguida sofre uma descarga elétrica, iniciando o processo de combustão (BRAND, 2010).

Existem dois tipos de poder calorífico, o superior e o inferior. O poder calorífico superior (PCS) é determinado em laboratório e pode ser compreendido como a mensuração de um nível mais elevado de calor quando comparado ao poder calorífico inferior (PCI). O poder calorífico superior também pode ser determinado quando ocorre a combustão e o volume permanece constante. Nesta etapa a água formada se condensa de forma que não ocorra perda de calor latente do vapor d'água (PROTÁSIO et al., 2011; REGUEIRA et al., 2002).

Para avaliar o poder calorífico inferior, o calor liberado durante a condensação da umidade presente na amostra é desconsiderado, sendo considerado apenas o calor do combustível realmente utilizado (NOGUEIRA e LORA, 2003).

O poder calorífico superior e o poder calorífico inferior são calculados sem umidade, pois a água presente nos biocombustíveis evapora, em um processo que consome parte do calor gerado, produzindo o poder calorífico inferior na base úmida ou poder calorífico líquido (BRAND, 2010).

Considerando ainda a citação de Brand (2010), o teor de umidade, o teor de cinzas, dentre outros fatores relacionados principalmente a composição química da biomassa são fatores que podem influenciar no valor do poder calorífico.

A Tabela 6 compara duas biomassas diferentes, a palha de cana e o bagaço de cana, bem como a relação existente entre a composição química e o poder calorífico.

Tabela 6. Composição (%) e poder calorífico superior da palha e bagaço de cana-de-açúcar

| Amostra | Umidade | Voláteis | Carbono fixo | Cinzas | C | H | PCS (kcal/kg) |
|----------------|----------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|----------|----------------------|
| Palha de cana | 10,5 | 74,7 | 15,0 | 10,3 | 43,2 | 5,6 | 3631 |
| Bagaço de cana | 9,9 | 75,4 | 13,7 | 10,8 | 43,6 | 6,2 | 4270 |

Fonte: ROSILLO-CALLE et al. (2005).

Existe uma relação entre o teor de umidade, cinzas e poder calorífico, pois quanto maior o teor de umidade e menor o teor de cinzas, maior o poder de queima do biocombustível. Nota-se que a palha de cana tem poder calorífico maior que o bagaço de cana, devido à composição química diferenciada entre as duas biomassas.

Uma propriedade extremamente importante, que deve ser levada em consideração na produção energética a partir de produtos compactados da biomassa, é a densidade (QUIRINO, 2000).

A densidade é definida por Quirino (2000) como a quantidade de energia por volume de um combustível. Quando comparam-se às propriedades da lenha com o briquete, por exemplo, é possível perceber que a densidade energética do briquete é três vezes superior à da lenha, ou seja, o briquete possui um potencial energético muito maior do que a lenha.

Um dos parâmetros que influencia mais profundamente a densidade energética ou a massa específica aparente é a densidade a granel das amostras (PINHEIRO, RENDEIRO e PINHO, 2012).

A Tabela 7 compara e relaciona as características dos resíduos *in natura* com os resíduos depois da compactação, briquetagem, para fins energéticos.

Tabela 7. Características de resíduos antes e após a compactação (briquetagem)

| Tipo de resíduo | Umidade (%) | Densidade natural (kg/m ³) | Densidade triturada (kg/m ³) | Densidade do briquete (kg/m ³) | Densidade a granel (kg/m ³) | Poder calorífico (kcal/kg) |
|--|---------------------------|--|--|--|---|---|
| Palha de milho ¹ | 9,8 | 33 | | 910 | | 3570 (PCS) |
| Pó de serra ¹ | 11,5 | 274 | | 1220 | 570 | 4880(PCS) |
| Fábrica de compensado ¹ | 13,5 | 132 | | 830 | | 4424(PCS) |
| Casca de arroz ¹ | 11,6 11 ⁽²⁾ | 150 | | 1280 1100 ⁽²⁾ | 610 650-700 ⁽²⁾ | 3730 (PCS) 3500 (PCL) 3800 (PCS) ⁽²⁾ |
| Bagaço (LPF) CEARG Copersucar ¹ | 12,7 50,0 | 46 180 | 197 | 1100 | | 3700 (PCS) 1700(PCL) 4764 (PCS) |
| Cepilho ¹ | 9,0 | 112 | | 1160 | 589 | |
| Resíduo de algodão ² | 12 | | | 1100 | 650-700 | 4300 (PCS) |
| Resíduo de <i>Pinus</i> ² | 9,0 | | | 1170 | 700-750 | 4680 |
| Resíduo de madeira de lei ² | 11 | | | 1200 | 750-800 | 4900 |
| Resíduo de eucalipto ² | 11 | | | 1180 | 720-780 | 4800 |
| Lenha comercial ² | 25-30 | | | 600 | 350-400 | 2200-2500 |

Fonte: QUIRINO (2000)¹; DE PAULA (2006)².

É importante ressaltar que nos valores relativos ao poder calorífico líquido foram descontados a porcentagem de energia consumida para a evaporação do teor de umidade da biomassa.

Verifica-se que a massa específica do briquete é superior ao do resíduo *in natura*, fator que influencia diretamente no aumento dos valores correspondentes ao poder calorífico.

3.4 Processos de conversão dos resíduos da biomassa em produtos energéticos

Os produtos compactados da biomassa consistem em resíduos sólidos que, sob altas temperaturas e pressão, sofrem compactação, briquetagem, podendo ou não ter a presença de aglutinantes dependendo da matéria-prima utilizada. São

normalmente denominados briquetes ou peletes, dependendo do maquinário utilizado em sua produção. Os briquetes são utilizados em estufas, fogões, lareiras, churrasqueiras e como outras demais fontes de energia térmica (SCHUTZ; ANAMI e TRAVESSINI, 2010).

Conforme Paula et al. (2011), a utilização de briquetes está intimamente relacionada à preservação ambiental, uma vez que recupera resíduos e substitui a lenha e o carvão vegetal.

A utilização adequada dos briquetes produzidos pelo aproveitamento de resíduos de biomassa pode reduzir significativamente a poluição ambiental, colaborando com o uso sustentável da energia. Assim essas alternativas ecológicas, buscam reduzir os impactos ambientais e abater a crise energética mundial (DIBLASI FILHO, 2007).

Os resíduos coletados são moídos para que adquiram a granulometria adequada cerca de 5 a 10 mm, depois deverão secar para que o teor de umidade fique em torno de 8 a 15% (FILIPPETTO, 2008).

Para Gentil (2008), a massa específica de briquetes encontra-se entre 1,0 t/m³ a 1,5 t/m³, tendo normalmente formato cilíndrico ou hexagonal de aproximadamente 70 mm a 100 mm de diâmetro e comprimento de 10 cm a 40 cm.

A Tabela 8 apresenta uma comparação entre as principais características de briquetes oriundos de diferentes biomassas relacionadas à lenha, as propriedades consideradas são: poder calorífico, teor de umidade e densidade.

Tabela 8. Propriedades de briquetes de diferentes tipos de resíduos da biomassa

| Briquetes | P.C.S. Kcal/kg | Massa Específica Aparente g/cm³ | Umidade |
|----------------------------|---------------------------|---|----------------|
| Casca de arroz | 3.800 | 1,10 | 12% |
| Resíduos de algodão | 4.300 | 1,10 | 12% |
| Resíduos de Pinus | 4.600 | 1,17 | 12% |
| Bagaço de cana | 4.700 | 1,10 | 14% |
| Resíduos de madeira de lei | 4.900 | 1,20 | 12% |
| Resíduos de Eucalipto | 4.800 | 1,18 | 12% |
| Lenha comercial | 2.500 | 0,60 | 30% |

Fonte: Adaptado pela autora de Biomaxind (2012)

Diante da Tabela 8, verifica-se que o poder calorífico superior (P.C.S.) é visivelmente maior nos briquetes quando comparados à lenha comercial. Os valores para a massa específica e a granel são muito abaixo dos valores encontrados nos briquetes. O único fator elevado com relação à lenha é a umidade a que implica na

diminuição do poder calorífico desse material, pois quanto maior o teor de umidade, menor o poder calorífico.

De acordo com Quirino e Brito (1991), o processo de briquetagem serve para concentrar a capacidade energética. Quando se compara o poder calorífico, tem-se que 1m^3 de briquete é cinco vezes mais energético que 1m^3 de lenha.

O material, tendo a umidade e a granulometria adequadas, alimenta a briquetadeira que a compactando-a em uma matriz, por meio de um pistão ou parafuso, dependendo da máquina utilizada. Durante a compactação o produto pode sofrer também o aquecimento da superfície externa o que permite maior resistência (FILIPPETTO, 2008).

Com relação aos processos de compactação, existem vários tipos de prensas ou briquetadeiras: briquetadeira extrusora por pistão mecânico, briquetadeira de extrusão por rosca sem fim e briquetadeira hidráulica.

A prensa extrusora por pistão mecânico (Figura 2) a densificação ocorre através de golpes de um pistão, regulada por dois volantes. A partir do silo de armazenagem, os resíduos são transferidos para um dosador, seguidos pela briquetagem que resulta em peças cilíndricas compactadas (QUIRINO, 2011).



Figura 2. Processo de produção por prensa extrusora por pistão mecânico
Fonte: AUTORA (2012)

Enquanto na prensa de extrusão por rosca sem fim (Figura 3) os resíduos são compactados continuamente, produzindo um briquete com um furo central, poucos exemplares produzidos no Brasil (QUIRINO, 2011).



Figura 3. Prensa de extrusão por rosca sem fim
Fonte: LIPPEL (2012)

Por fim, o resultado da prensa de extrusão por rosca sem fim é muito mais vantajoso que nos demais tipos de prensa, pois o briquete (Figura 3) torna-se um produto com elevada densidade, altamente resistente, homogêneo e com um orifício central (QUIRINO, 2011).

A prensa hidráulica (Figura 4) é utilizada para pequenas quantidades de resíduos. O nome da prensa vem do uso de um pistão regulado hidraulicamente. O equipamento é alimentado lateralmente por resíduo a ser compactado através de uma rosca sem fim. Após a compactação, o briquete é expelido para fora da prensa por uma peça localizada na parte frontal do embolo do equipamento (QUIRINO, 2011).



Figura 4. Prensa hidráulica
Fonte: LIPPEL (2012).

Existe pouca diferença entre as propriedades da briquetadeira por pistão mecânico e a prensa por extrusão do tipo rosca sem fim, enquanto a prensa extrusora produz maior densidade no produto final, a prensa do tipo pistão consome menos energia. Mesmo assim, com essa diferença, a produção de ambas é praticamente equivalente (MATUS e KRIZAN, 2010).

Existem também as peletizadoras compostas por um rolo e uma matriz. A matéria-prima é compactada pela pressão e pelo calor exercido entre os a fricção dos componentes do equipamento e os resíduos. Por fim, os peletes são extruídos através da matriz (COUTO et. al., 2004a)

Conforme Couto et al. (2004a), são conhecidos dois principais tipos de peletizadoras que diferem entre si pela matriz: uma peletizadora com matriz de disco e uma com matriz de anel.

O produto final do processo de peletização é o pelete, material cilíndrico com diâmetro entre 6 a 8 mm, comprimento em torno de 10 a 40 mm, porcentagem de cinzas entre 0,4 a 1,5% e umidade aproximando-se de 10% (SILVA et al., 2012)

3.5 Características do processo de combustão da biomassa

A combustão da biomassa ocorre através de um processo termoquímico. O objetivo desse processo é o inverso ao da fotossíntese, pois lança no ar dióxido de carbono, enquanto obtém a energia solar armazenada pelo vegetal (NOGUEIRA e LORA, 2003).

De acordo com Nogueira e Lora (2003), o procedimento de queima segue uma sequência bem definida que se inicia pela secagem, seguida pela emissão dos voláteis, ignição dos voláteis, combustão dos voláteis, extinção da chama dos voláteis e, por fim, a combustão de resíduo de carbono.

Sabe-se que a quantidade de voláteis da biomassa é muito grande, assim o processo de combustão divide-se em duas etapas: a homogênea, em que há queima dos voláteis e a etapa heterogênea, na qual ocorre a combustão do resíduo de carbono.

A reação de combustão consiste na presença de biomassa e ar, resultando em dióxido de carbono, uma pequena quantidade de dióxido de enxofre e água (resultante do processo de secagem). Estes são produtos da oxidação completa. Porém, também, são liberados os gases nitrogênio, hidrogênio e oxigênio, monóxido de carbono e metano. Quanto aos sólidos eliminados, encontram-se a fuligem e as cinzas, uma fração mineral não combustível da biomassa (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Outro processo de transformação da biomassa, segundo Nogueira e Lora (2003), é a pirólise que se diferencia da combustão por propiciar a degradação térmica da biomassa na ausência parcial ou total de oxigênio, dando origem a outros combustíveis.

A carbonização, por exemplo, que é uma forma lenta da pirólise, converte materiais lignocelulósicos em combustíveis sólidos mais densos e com maior poder energético (NOGUEIRA e LORA, 2003).

3.6 Pirólise da biomassa

Os autores Nogueira e Lora (2003) esclarecem ainda que a pirólise diferencia-se da combustão por propiciar a degradação térmica da biomassa na ausência parcial ou total de oxigênio, dando origem a outros combustíveis.

Do processo de pirólise, resultam substâncias sólidas como o carvão vegetal, líquidas como os óleos vegetais e gasosas como o monóxido de carbono, metano e dióxido de carbono (PEREIRA, 2009).

Dessa forma, a pirólise transforma também o combustível sólido em combustíveis líquidos como o bioóleo, o bioetanol, o alcatrão e outros. Sendo possível também ser um método de conversão de sólido para combustíveis gasosos, como o metano ou biogás (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Outro processo interessante de transformação da biomassa é a gaseificação. Nesse processo, a meta é a produção de um gás intermediário que posteriormente poderá ser utilizado na obtenção de energia (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Conforme Pereira (2009), a partir do processo de gaseificação gera-se um gás inflamável, que através da filtração e remoção de componentes químicos torna-se menos tóxico.

3.7 Produtos dos processos de combustão e pirólise

Os processos de transformação da biomassa em produtos energéticos, também geram produtos sólidos, líquidos ou gasosos. Acoplado à matéria-prima usada, uma parte considerável destes resíduos pode trazer prejuízos ao meio ambiente, inclusive à saúde humana.

Dentre os produtos gasosos mais conhecidos estão: CO_2 , SO_2 , CO e o CH_4 . Os produtos líquidos, geralmente liberados, são o alcatrão, o ácido pirolenhoso e os bioóleos. Já os resíduos sólidos são: a fuligem e as cinzas (NOGUEIRA e LORA, 2003).

3.7.1 Produtos gasosos

3.7.1.1. *Dióxido de carbono*

O dióxido de carbono é derivado da reação do ácido carbônico e água. Encontrado na forma gasosa, possui a estrutura química linear, é incolor e inodoro. Do ponto de vista biológico, o dióxido de carbono é importante para que ocorra a fotossíntese nos vegetais. É também um agente oxidante, resultante da decomposição térmica da reação de combustão de compostos orgânicos. Contudo, o excesso de CO₂ no ar pode indicar poluição atmosférica e trazer danos ao meio ambiente (LEE, 1996).

3.7.1.2 *Dióxido de enxofre*

Conforme Lee (1996), o dióxido de enxofre é obtido através da combustão do carvão mineral. A formação de SO₂ prejudica o meio ambiente, pois trata-se de um gás incolor com um cheiro asfíxiante que com níveis superiores a 5 ppm torna-se tóxico ao homem, enquanto que as plantas sofrem danos com teores ainda menores.

3.7.1.3. *Monóxido de carbono*

Com base em Lee (1996), o monóxido de carbono é oriundo do processo de combustão, da reação entre o carbono e o oxigênio. Trata-se de um gás incolor, inodoro extremamente tóxico. Sua toxicidade provém do fato de se ligar a hemoglobina do sangue, formando um complexo mais estável que a oxihemoglobina, impedindo, dessa forma, que a hemoglobina transporte o oxigênio até as células. Essa toxicidade leva à inconsciência, seguida de morte do indivíduo.

3.7.1.4 Gás metano

É um hidrocarboneto simples, formado por um átomo de carbono e quatro átomos de hidrogênio. É um gás incolor e pouco solúvel em água. Uma das formas de obtenção desse gás ocorre através da decomposição térmica de compostos orgânicos (NOLLER, 1968).

Conforme Noller (1968), o gás metano pode ser usado no fornecimento de energia. Um processo que ocorre com a utilização de biodigestores para a produção de biogás, obtido por fermentação realizada por microorganismos presentes em matéria orgânica em decomposição.

3.7.2 Produtos líquidos

3.7.2.1 Alcatrão

De acordo com Nogueira e Lora (2003), composto por hidrocarbonetos, o alcatrão é um líquido viscoso e de coloração escura mais próxima ao marrom, com aroma característico, semelhante à amônia. O alcatrão tem diversas finalidades pode ser utilizado para pavimentação, como fonte de energia, além de outras utilizações.

O alcatrão é um resíduo líquido resultante do processo de pirólise, durante um rápido processo em que a temperatura e a granulometria da biomassa é menor que em outros procedimentos de pirólise (NOGUEIRA e LORA, 2003).

3.7.2.2 Ácido Pirolenhoso

O ácido pirolenhoso é uma solução aquosa composta por ácido acético, metanol, acetona, uma quantidade reduzida de acetato de metila, álcool amílico e aminas.

Muito usado na agricultura, é conhecido também, por vinagre de madeira (NOLLER, 1968).

Segundo Nogueira e Lora (2003), o ácido pirolenhoso constitui-se na fração líquida da destilação seca da madeira ou o processo de pirólise.

3.7.2.3 Bioóleo

Conforme Nogueira e Lora (2003), o bioóleo é obtido através do processo de pirólise da biomassa. Normalmente, as plantas oleaginosas são usadas no procedimento, devido ao seu alto teor de óleo.

O bioóleo é constituído por hidrocarbonetos e é um líquido pouco menos viscoso que o alcatrão e com coloração escura, aproximando-se aos tons negros. Possui grande relevância para a produção de biocombustíveis líquidos, como o biodiesel, fornecendo energia renovável para a utilização em automóveis (NOGUEIRA e LORA, 2003).

3.7.3 Produtos sólidos

3.7.3.1 Fuligem

A fuligem é um resíduo sólido resultante do processo de combustão incompleta da biomassa. É uma variedade do carvão apresenta-se na forma amorfa, constituindo uma dispersão de partículas muito finas. Quanto à aplicabilidade, pode-se citar o uso como tintas, propiciando a coloração preta (NOGUEIRA e LORA, 2003).

3.7.3.2 Cinzas

As cinzas são decorrentes do processo de combustão da biomassa, parte produzida nesse processo é leve o suficiente para ser arrastada juntamente com os gases de combustão e recebem denominação de cinza leve ou volante (VASCONCELLOS et al., 2004).

Conforme Vasconcellos et al. (2004), as cinzas mais densas tornam-se mais problemáticas para o meio ambiente. Por este motivo, as cinzas não são lançadas para a atmosfera, pois precipitam no fundo da caldeira ou onde forem queimadas, unindo-se formando aglomerados denominados cinza pesada ou residual.

A composição química da cinza é basicamente de sais minerais. A quantidade de cada componente tóxico encontrado nestas, depende da matéria-prima utilizada, das formas de combustão e da deposição das cinzas residuais. As cinzas, geralmente, são ricas em potássio, o que pode se tornar um grande problema devido à lixiviação pelas chuvas. Outros tipos de cinzas são ricas em cálcio e pobres em potássio, como por exemplo, as oriundas da lenha (VASCONCELLOS et al., 2004).

A combustão da biomassa gera uma quantidade relativamente baixa de cinzas, quando comparada à combustão do carvão mineral, por exemplo. As cinzas resultantes do processo deste processo, normalmente, são emitidas e depositadas de forma inadequada, causando desequilíbrio ambiental. Devido a estes transtornos, muitos estudos têm surgido com o objetivo de dar uma aplicação ambientalmente correta a esse grande volume de resíduos produzidos.

De acordo com Raj (1991), as cinzas isentas de metais pesados podem ser utilizadas como fertilizantes, uma vez que estas correspondem à fração mineral do processo de combustão podendo atuar, de acordo com sua composição química, como adubo em solos pobres em nutrientes.

3.8 Normalização para produtos compactados da biomassa

A produção de compactados da biomassa para geração de energia necessita de normas que incentivem e busquem a organização do mercado de briquetes e

peletes. Na maioria dos países da Europa já existem normas específicas para briquetes e peletes. Na Áustria, Suécia e Alemanha, existem especificações oficiais para biocombustíveis compactados da biomassa, enquanto outros países aguardam uma norma europeia comum para briquetes e peletes (BRCKI e JANIC, 2009).

Dentre as normas sobre briquetes e peletes, as principais são encontradas na Europa, DIN 51731, ensaio de combustíveis sólidos, norma sobre briquetes de madeira não tratada. Na Áustria, a norma ÖNorm M 7135, inclui outros critérios no teste de qualidade de peletes, tais como a abrasão. Enquanto as demais normas, como por exemplo, a ÖNorm 7136, consideram as características dos peletes durante e após o transporte. Na Suécia, as normas consideradas são SS 187120, para peletes e SS 18 71 21 para briquetes (VENDRASCO e YAMAJI, 2012).

A Tabela 10 relaciona e compara algumas propriedades dos peletes sob o ponto de vista de diferentes normas europeias.

Tabela 10. Normas europeias sobre especificações de peletes de madeira

| Propriedade | Unidade | Valor máximo |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| Diâmetro | Mm | 4 a 10 ¹ |
| Comprimento | Mm | <5xD ^{1 4} |
| Densidade aparente | kg/dm ³ | >600 ³ |
| Densidade da partícula | kg/dm ³ | >1,12 ¹ |
| Teor de Umidade | % | <10 ^{1 3 4} |
| Teor de Cinzas | % | <0,5 ^{1 4} |
| Poder Calorífico Líquido | MJ/kg | >18,0 ^{1 4} |

Fonte: Adaptado pela autora de OBERNBERGER e THEK (2002)

Legenda: ¹de acordo com a norma ÖNorm M 7135; ³de acordo com a norma SS 18 71 20; ⁴de acordo com as normas Austrian Pellets Association.

A Tabela 11 demonstra as especificações para briquetes de madeira conforme a norma Sueca SS 18 71 21, com relação às principais propriedades dos compactados da biomassa energética.

Tabela 11. Norma sueca SS 18 71 21 para especificação de briquete de madeira

| Propriedade | Unidade | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 |
|-------------------------|-------------------|---------|---------|---------|
| Dimensões ø | Mm | Min 25 | Min 25 | Min 25 |
| Dimensões – comprimento | Mm | Máx 300 | Máx 100 | - |
| Densidade a granel | kg/m ³ | >550 | >450 | >450 |
| Teor de Umidade | % bu | ≤12 | ≤12 | ≤15 |
| Teor de Cinzas | % MS | ≤15 | ≤15 | - |
| Poder Calorífico Útil | Kcal/kg | ≥3869 | ≥3869 | - |

Fonte: Adaptado pela autora de HIRSMARK (2002), citado por GENTIL (2008)

Conforme as Tabelas 10 e 11, pode-se notar que as normas regulamentadoras dos compactados energéticos da biomassa estabelecem valores padrões com relação às propriedades dos mesmos, tais como densidade, cinzas, umidade, poder

calorífico e porcentagem de substâncias componentes, para produção e comercialização.

No Brasil, existem leis relacionadas às atividades de geração, importação e exportação de resíduos sólidos, como a Lei Estadual 12493, de 22 de Janeiro de 1999, artigo 3º (BRASIL, 1999), na qual fica estabelecido que a geração de resíduos deve ser minimizada através de tecnologias de reutilização e reciclagem.

As normalizações sobre compactados da biomassa com fins energéticos no Brasil ainda não estão definidas, o que se tem, até o presente momento, são legislações referentes à exportação de briquetes, como no artigo 8º da Instrução Normativa nº 77 de 07 de dezembro de 2005 (BRASIL, 2005a).

A exportação de lenha somente é permitida quando proveniente de plantios florestais ou quando se trata de resíduos do processamento industrial da madeira na forma de briquetes ou peletes, artigo 8º da Instrução Normativa nº 77 de 07 de dezembro de 2005 (BRASIL, 2005a).

De acordo com Vendrasco e Yamaji (2012), normalizações sobre produtos compactados podem motivar o crescimento do mercado brasileiro de briquetes e peletes, por isso a necessidade de estudos a respeito do tema.

4. Materiais e Métodos

O estudo envolveu a coleta de dados, com ênfase no estado do Paraná, de onde se obteve maior número de amostras de produtos compactados coletados e analisados. Obteve-se também uma amostra da região sudeste do país, mais precisamente do estado de São Paulo, uma amostra do estado de Santa Catarina e uma do estado do Rio Grande do Sul. Os estados São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul, conforme estudos de Gentil (2008) se destacam como as unidades da federação mais importantes com relação à indústrias de briquetagem.

4.1 Local de Realização da Pesquisa

Após a coleta de amostras de briquetes e peletes, as análises das amostras foram realizadas no laboratório de tecnologia da madeira, da EMBRAPA-Florestas, localizado em Colombo-PR. Algumas análises foram realizadas também no laboratório de anatomia e qualidade da madeira do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, da Universidade Federal do Paraná-UFPR, campus Jardim Botânico, localizado em Curitiba-PR.

4.2 Local de coleta dos dados e análise das amostras

A primeira etapa do projeto envolveu a coleta de diferentes amostras oriundas de regiões distintas do Sul do Brasil. Durante a coleta, foram anotadas as especificações, características físico-químicas do produto fornecidas por cada uma das empresas.

O processo de coleta das 10 amostras nas empresas foi aleatoriamente nas 9 empresas produtoras de compactados disponíveis (Janeiro de 2010 à Outubro de 2011). As amostras de briquetes e peletes consistiam da mistura de diferentes resíduos vegetais.

A Tabela 12 demonstra as especificações de cada um dos produtos compactados, de acordo com cada empresa fornecedora. Os dados coletados relativos às características físico-químicas foram colocados em uma tabela comparativa.

Tabela 12. Caracterização de amostras de produtos compactados

| Data de coleta | Origem | Produto | Especificações do Produto conforme empresa fornecedora |
|---------------------------|---------------------|--|---|
| 10/01/2010 | União da Vitória/Pr | Briquetes de carvão vegetal | Carvão vegetal compactado com aglutinantes naturais |
| 19/03/2010; 27/09/2010 | Guarapuava/Pr | Briquete de finos de carvão e amido; Briquete de bagaço de cana; Briquete de resíduos de cereais | Compactados por prensa extrusora do tipo parafuso ou rosca sem fim; com aglutinantes naturais |
| 10/08/2010 | Rio Grande do Sul | Pelete | Atóxico, baixa formação de cinzas, sem cheiro e pouca fumaça, alta combustão e grande poder calorífico. |
| 25/11/2010 | Guarapuava/PR | Briquetes de serragem | Compactados por prensa extrusora de pistão mecânico; calor concentrado, combustão sem aditivos químicos, calor constante sem picos de temperatura. |
| 23/02/2011 | Guarapuava/PR | Briquete de serragem e aglutinantes | Compactados por prensa extrusora do tipo parafuso ou rosca sem fim; finos de carvão vegetal resultantes de processos de pirólise; compactados com alguns aglutinantes naturais |
| 30/03/2011 06/07/2011 | Cascavel/PR | Carvão vegetal compactado; Briquete de serragem e casca de grãos | Compactados por prensa extrusora de pistão mecânico; briquete de serragem e casca de grãos prensados sem produtos químicos para queima de alto poder calorífico em fornos, lareiras e churrasqueiras. |
| 18/08/2011 | Curitiba/PR | Briquete de serragem | Compactados por prensa extrusora de pistão mecânico; sem maiores especificações |
| 18/08/2011 | Curitiba/PR | Briquete de resíduos de madeira | Compactados por prensa extrusora de pistão mecânico; sem maiores especificações |
| 20/08/2011 | São Paulo/SP | Peletes de resíduos de bagaço de cana | Compactados com aglutinantes naturais |
| 06/10/2011 | General Carneiro/PR | Briquetes de finos de carvão vegetal | Compactados por prensa extrusora de pistão mecânico; carvão vegetal compactado com aglutinantes naturais |
| 10/10/2011 | Guarapuava/PR | Briquete de madeira | Compactados por prensa extrusora de pistão mecânico; sem maiores especificações |
| 15/10/2011 | Guarapuava/PR | Briquete de serragem e aglutinantes naturais | Compactados por prensa extrusora do tipo parafuso ou rosca sem fim; sem maiores especificações |

A Tabela 12 indica o tipo de produto compactado com finalidade energética, bem como a data, origem e especificações do material, segundo a empresa fabricante. A importância da organização destes dados em tabela fez-se necessária para

comparação posterior com os dados das análises laboratoriais de caracterização dos produtos compactados.

Cada amostra coletada foi mantida em sacos plásticos numerados, datados e classificados conforme especificações do produto informadas pela empresa. As embalagens plásticas com as amostras foram numeradas de acordo com a ordem de coleta, de forma a facilitar o manuseio e as posteriores análises laboratoriais.

Na maior parte das amostras, as especificações do rótulo do produto, demonstram que são produtos compactados com aglutinantes naturais e com alto poder calorífico. A matéria-prima das amostras coletadas entre briquetes e peletes é constituída basicamente de resíduos madeireiros, bagaço de cana, cereais e finos de carvão.

Para a execução do trabalho, foram selecionadas as amostras compostas por resíduos de madeira, bagaço de cana e de cereais, devido ao teor de cinzas desses produtos ser relativamente menor quando comparado aos compactados com finos de carvão vegetal (BRAND, 2010).

Algumas empresas produtoras de briquetes e peletes continham pouca ou nenhuma informação técnica sobre o produto que fabrica (Tabela 12). Certamente, as análises poderão auxiliá-las, fornecendo subsídios significantes para melhorar a produção do compactado da biomassa.

4.3 Análises técnicas e tecnológicas dos produtos compactados

Após a coleta, foram realizadas análises químicas imediatas para determinar o teor de cinzas, o teor de umidade e o poder calorífico. As normas utilizadas para a realização dos ensaios foram:

- NBR 8112 – Carvão vegetal – Análise imediata para comparação de resultados obtidos;
- NBR 13999 – Madeira – Determinação do resíduo (cinzas) após a incineração a 525°C;

Para a determinação das cinzas foi utilizada a Equação 1:

$$TC (\%) = \frac{P_{cinzas}}{P_{AS \text{ da amostra inicial}}} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

TC(%) = Teor de cinzas

P_{cinzas} = Peso das cinzas, em gramas, após incineração da amostra à 525°C.

$P_{AS \text{ da amostra inicial}}$ = Peso da amostra, em gramas, antes da incineração à 0% de umidade.

- NBR 14929 – Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos- Método por secagem em estufa;

Para as análises laboratoriais, as amostras foram pesadas em balança de precisão, submetidas à estufa, em temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até peso constante, utilizando a Equação 2 para a determinação do teor de umidade:

$$TU (\%) = \frac{P_u - P_s}{P_u} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

TU (%) = teor de umidade

P_u = peso inicial da mostra, em gramas

P_s = peso final da amostra, em gramas, após secagem em estufa.

- DIN 51900- Determinação do poder calorífico de combustíveis sólidos e líquidos utilizando a bomba calorimétrica e calculando o poder calorífico líquido.

Para a determinação da densidade aparente ou massa específica, inicialmente foram determinados valores para massa e volume para cada amostra. Em seguida, utilizou-se a Equação 3:

$$D = \frac{M_u}{V_u} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

D = Densidade aparente ou massa específica aparente, em kg/m^3

M_u = Massa úmida, em kg

Vu = Volume úmido, em m³

Os resultados foram avaliados, quantificados e classificados. Foi realizado também um levantamento bibliográfico a respeito do tema de estudo, visando o levantamento de elementos relevantes para a concretização da pesquisa.

4.4 Classificação de produtos compactados para fins energéticos

Segundo o projeto Florestas Energéticas-Embrapa (2010), os produtos compactados podem ser classificados conforme constituição química, densidade e porcentagem de cinzas para o uso doméstico ou industrial.

Para este estudo foram formadas 8 classes distintas, com o objetivo de enquadramento dentro da classificação criada pelo projeto Florestas Energéticas-Embrapa (2010), para utilização de produtos compactados, dispostas na Tabela 13.

Tabela 13. Classificação dos produtos compactados conforme as características físico-químicas

| Classe | Característica do produto compactado |
|---------------|---|
| 1 | Briquete de resíduo de madeira ou agrícola, com menos de 5% de cinzas, com aglutinantes naturais e densidade normal; briquetes destinados ao uso doméstico e industrial |
| 2 | Briquete de resíduo de madeira ou agrícola, com menos de 5% de cinzas, sem especificações quanto à presença de agentes contaminantes e densidade normal; briquete destinado ao uso industrial |
| 3 | Briquete de resíduo de madeira ou agrícola, com menos de 5% de cinzas, com aglutinantes naturais e alta densidade; briquetes destinados ao uso doméstico e industrial |
| 4 | Briquete de resíduo de madeira ou agrícola, com menos de 5% de cinzas, sem especificações quanto à presença de agentes contaminantes e alta densidade; briquete destinado ao uso industrial |
| 5 | Briquete de bagaço de cana, com mais de 5% de cinzas, sem especificações quanto a presença de agentes contaminantes e densidade normal; briquete destinado ao uso industrial |
| 6 | Briquete de bagaço de cana, com menos de 5% de cinzas, com aglutinantes naturais e alta densidade; briquete destinado ao uso doméstico ou industrial. |
| 7 | Pelete de resíduo de madeira ou agrícola, com menos de 5% de cinzas, sem especificações quanto à presença de agentes contaminantes e alta densidade; pelete destinado ao uso doméstico e industrial |
| 8 | Pelete de resíduo de bagaço de cana, com mais de 3% de cinzas, sem especificações quanto à presença de agentes contaminantes; pelete destinado ao uso industrial |

De acordo com o projeto Florestas Energéticas-Embrapa (2010), a presença de cinzas torna-se importante para esta classificação, pois um alto teor de cinzas pode fundir-se em caldeira tornando extremamente tóxico. Considera-se com densidade normal, os briquetes provenientes de prensa extrusora de pistão mecânico ou hidráulico. Conseqüentemente, os produtos com alta densidade são produzidos por prensa de extrusão do tipo rosca sem fim ou parafuso, devido ao fato de propiciarem o aquecimento externo do briquete.

4.5 Delineamento estatístico

Os ensaios relacionados à análise estatística envolvem a determinação de resíduos (cinzas), determinação do teor de umidade, da densidade e do poder calorífico. Cada amostra consistiu em um tratamento, portanto foram realizados dez tratamentos; para cada tratamento foram realizadas três repetições, com exceção do ensaio relacionado à densidade e ao poder calorífico para os quais foram realizadas duas repetições para cada uma das amostras.

Para análise estatística dos dados, foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC). Utilizou-se também o teste de Bartletty, que possibilitou verificar a homogeneidade entre as amostras. Sendo homogêneas, as amostras foram testadas utilizando-se a ANOVA, aumentando o nível de confiança dos resultados possibilitando chegar a 99% de segurança.

Em seguida, foi utilizado o teste de Tukey para comparação entre as médias de cada um dos tratamentos, por ser o teste mais usado em análises como esta. A simbologia das letras a, b, c, d, e, f, g, h e i indicam diferenças quando letras desiguais aparecem em distintas amostras, caso os símbolos sejam iguais não se percebe diferença significativa entre as amostras. Foi realizada a estatística descritiva para verificação de amplitude e desvio padrão dos dados coletados (GONÇALVES, 2006; MATOS, 2007).

5. Resultados e Discussão

5.1 Matéria-prima dos briquetes

As amostras de produtos compactados da biomassa com finalidade energética foram coletadas aleatoriamente. O número de empresas que forneceram amostras de briquetes e peletes para o presente estudo corresponde a 15% do total de usinas em funcionamento no Brasil, com base em estimativas de Gentil (2008).

Após a coleta, o material obtido foi separado em produtos compactados oriundos de resíduos madeireiros, resíduos de bagaço de cana, resíduos de cereais e derivados do carvão vegetal, porém estas últimas não foram utilizadas para as análises, como se pode verificar na Tabela 14.

Tabela 14. Classificação das amostras de produtos compactados conforme composição

| Amostra | Composição |
|----------------|----------------------------------|
| 1 | Madeira |
| 2 | Madeira |
| 3 | Madeira |
| 4 | Madeira |
| 5 | Bagaço de cana |
| 6 | Bagaço de cana |
| 7 | Madeira |
| 8 | Madeira |
| 9 | Bagaço de cana |
| 10 | Cereais (casca de arroz e aveia) |

Observa-se que a maior porcentagem de amostras do estudo é oriunda de resíduos de madeira, fato que pode ser explicado, com base em estimativas realizadas por Gentil (2008) das matérias-primas mais usadas para a briquetagem 70% correspondem à madeira e apenas 30% à algodão, café, palha de arroz, pó-de-fumo e bagaço de cana-de-açúcar. Os estudos de Tetto et al. (2009) sobre a disponibilidade de madeira, reforçam ainda que a utilização de madeira para fins energéticos corresponde aproximadamente 31,2% do total de madeira produzida no estado do Paraná.

O número intermediário de amostras resultantes da compactação de resíduos da cana de açúcar pode ser explicado através de pesquisas de Rípoli, Molina Junior e Rípoli (2000), em que os resíduos da produção de açúcar e álcool, tais como,

bagaço e palha, correspondem a 80% durante o processo produtivo, porém 50% dos resíduos gerados são utilizados na própria indústria.

O baixo número de amostras de cereais se deve ao fato de que poucas empresas utilizam estes resíduos para produção energética, mesmo que o Paraná seja considerado o décimo segundo maior produtor nacional de arroz com casca e na segundo maior produtor de aveia branca com casca, segundo levantamentos realizados por Brasil (2012a). Pesquisas de Foletto et al. (2005) demonstram que os resíduos de cereais como casca de arroz e aveia possuem muitas outras finalidades, além da produção energética.

5.2 Caracterização de amostras de briquetes e peletes

As médias estatísticas sobre o teor de umidade foram comparadas entre os diferentes tipos de biomassa, de forma que os dados obtidos estão dispostos na Tabela 15.

Tabela 15. Análise imediata relacionada à comparação de médias estatísticas do teor de umidade

| Amostra | Produto | Tipo de biomassa | Umidade (%) |
|----------------|----------------|-------------------------|--------------------|
| 8 | Briquete | Madeira | 4 i |
| 9 | Briquete | Bagaço de cana | 6 g |
| 10 | Briquete | Cereais | 6 h |
| 5 | Briquete | Bagaço de cana | 7 f |
| 6 | Pelete | Bagaço de cana | 8 e |
| 2 | Briquete | Madeira | 10 d |
| 3 | Pelete | Madeira | 10 d |
| 7 | Briquete | Madeira | 11 c |
| 1 | Briquete | Madeira | 12 b |
| 4 | Briquete | Madeira | 13 a |

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey $P > 0,05$).

Verificou-se que a amplitude das amostras ficou em torno de 9 % com desvio padrão de 2,9%. Assim sendo, pode-se perceber que não houve diferença significativa entre as amostras 2 e 3, com relação à umidade, isto pode ser explicado devido a constituição do briquete ser a mesma, madeira. Enquanto as demais amostras apresentaram significativa variação com relação à umidade.

Com a análise estatística, foi possível notar que as maiores médias com relação ao teor de umidade foram encontradas nas amostras 1, 4 e 7, todas provenientes de resíduos madeireiros. Isto se dá pelo tipo de madeira utilizada para a produção do briquete, pelos diferentes fabricantes do produto o que implica a variação de equipamentos utilizados no processo de briquetagem, além da variação no processo produtivo, como a secagem do material e método de produção (BRAND, 2010).

A umidade média entre briquetes e peletes, em estudo, foi de aproximadamente 9%, mostrando-se mais vantajoso que a biomassa antes da compactação. Os estudos de Quirino (2000) e De Paula (2006) apresentou cerca de 18% de umidade.

Enquanto estudos de Quirino (2011) tanto em briquetadeiras de extrusão por pistão mecânico quanto em prensas extrusoras por rosca sem fim, a umidade inicial de resíduos deve ficar em torno de 10 à 12%, pois o teor de umidade do briquete poderá diminuir o poder calorífico.

Segundo Gentil (2008), a norma sueca SS 18 71 21 para briquetes relata que o teor de umidade deve ficar entre 12% (classe 1 e 2) e 15%(classe 2), dependendo da classe em que o briquete se enquadra. No caso dos briquetes deste estudo a maioria das amostras pertencem as classes 2, uma amostra pertence a classe 1 e uma a classe 3. Porém, todos os briquetes verificados no estudo estão dentro das normas europeias padrão com relação à umidade para briquetes.

As normas SS 18 71 20, ÖNorm M 7135 e Austrian Pellets Association para peletes discorrem que a umidade deve ser menor que 10%, nos peletes em estudos a umidade fica dentro dos padrões da norma referida, pois estão em torno de 9-10% de umidade.

Com relação à porcentagem de cinzas, percebe-se que não há variação significativa entre as amostras 1 e 3 provenientes de resíduos da madeira. Também não houve significativa variação entre as amostras 5 e 6, ambas oriundas de bagaço de cana, as demais amostras diferem pouco entre si (Tabela 16).

Tabela 16. Teor de cinzas médio dos briquetes e peletes analisados

| Amostra | Produto | Tipo de biomassa | Cinzas (%) |
|---------|----------|------------------|------------|
| 6 | Pelete | Bagaço de cana | 7,84 a |
| 5 | Briquete | Bagaço de cana | 7,81 a |
| 9 | Briquete | Bagaço de cana | 4,06 b |
| 10 | Briquete | Cereais | 1,67 c |
| 4 | Briquete | Madeira | 1,28 cd |
| 8 | Briquete | Madeira | 1,25 cd |
| 2 | Briquete | Madeira | 0,79 d |
| 1 | Briquete | Madeira | 0,28 e |
| 3 | Pelete | Madeira | 0,27 e |
| 7 | Briquete | Madeira | 0,22 e |

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey $P > 0,05$).

O teste de Bartlett não verificou homogeneidade entre as amostras, assim sendo, as médias foram transformadas através da raiz quadrada, para permitir a homogeneidade. A análise descritiva permitiu verificar que a amplitude entre as diferentes amostras chegou a 7,6 %, enquanto o desvio padrão relacionado ao teor de cinzas, entre as amostras analisadas, atingiu aproximadamente 3%.

Verifica-se que a porcentagem de cinzas encontrada é muito inferior às de algumas biomassas analisadas, como no estudo das propriedades energéticas de bagaço de cana-de-açúcar e casca de arroz realizada por Quirino (2000) que chegam a 9,79 e 18,34%, respectivamente.

De acordo com a norma sueca SS 18 71 21, o teor máximo de cinzas é de 1,5%. Sendo assim, somente os briquetes de madeira estão dentro dos padrões, com relação a cinzas, apresentando amostras com no máximo 1,28% de cinzas (GENTIL, 2008).

As normas europeias para peletes relatam que o teor de cinzas deve ser menor que 0,5%. Nos peletes em estudos, a umidade fica dentro dos padrões da norma referida para as amostras de madeira, enquanto para as amostras de bagaço de cana o teor de cinzas chega a 7,84% devido à composição da biomassa .

De uma forma geral, conforme Nogueira e Lora (2003), verifica-se o baixo teor de cinzas presentes na composição química dos diferentes tipos de biomassa. Esse fator pode ser observado na Tabela 17, com exceção das amostras compostas por

bagaço de cana, que apresentam valores relativamente altos, devido principalmente a morfologia do vegetal.

Tabela 17. Massa específica aparente média dos briquetes e peletes analisados

| Amostra | Produto | Tipo de biomassa | Massa específica aparente (kg/m ³) |
|---------|----------|------------------|--|
| 9 | Briquete | Bagaço de cana | 1105 a |
| 10 | Briquete | Cereais | 1109 a |
| 8 | Briquete | Madeira | 1156 a |
| 2 | Briquete | Madeira | 1182 a |
| 7 | Briquete | Madeira | 867 b |
| 1 | Briquete | Madeira | 750 bc |
| 4 | Briquete | Madeira | 710 bc |
| 5 | Briquete | Bagaço de cana | 636 c |
| 3 | Pelete | Madeira | - |
| 6 | Pelete | Bagaço de cana | - |

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey P > 0,05).

Análises estatísticas constataram que a amplitude entre as diferentes amostras chegou a 546 kg/m³, enquanto o desvio padrão aproximou-se de 223 kg/m³. O valor médio para a massa específica aparente das amostras de estudo ficou em torno de 938 kg/m³, valor superior ao encontrado em alguns tipos de biomassa de espécies florestais tais como: cavacos de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. com ou sem casca, cedro, dentre outras espécies (BRAND, 2010).

Nos estudos de Brand (2007) sobre a densidade, verifica-se que em cavacos de *Pinus taeda* sem casca e na serragem de *Pinus taeda*, por exemplo, a densidade básica chega a 320 e 323 kg/m³, respectivamente, bem abaixo da densidade média encontrada para as diferentes amostras de briquetes.

Normalmente a densidade está relacionada ao equipamento de briquetagem utilizado para a compactação. Sendo assim, verifica-se que as amostras 1, 4 e 5 apresentaram baixos valores com relação à densidade, situação que pode ser explicada devido ao processo de briquetagem a que essas amostras foram acondicionadas, pois foi utilizado o equipamento do tipo pistão mecânico para a produção das amostras mencionadas.

As amostras 2 e 10 apresentaram os valores mais elevados diferindo significativamente da amostra 4 que mostrou menor valor encontrado para a densidade. As demais amostras não apresentaram diferenças significativas.

A massa específica aparente normalmente tem relação direta com o teor de umidade, pois quanto maior a umidade maior o peso e, conseqüentemente, maior a densidade aparente (BRAND, 2010).

Os equipamentos de briquetagem também interferem na qualidade final do produto compactado, tanto para a uniformidade da queima quanto para a resistência ao transporte. Em estudos de Svenningson (1987), os equipamentos de extrusão por pistão mecânico demonstravam melhores resultados com relação a qualidade energética do que as briquetadoras por pistão do tipo rosca sem fim.

Entretanto estudos de Quirino (2011), possibilitaram verificar que em equipamentos estrangeiros de compactação por extrusão através de pistão mecânico, a densidade do briquete varia de 920 à 1200 kg/m³, conforme o fabricante. Porém as amostras em estudo apresentaram densidade média abaixo deste padrão em torno de 829 kg/m³.

Ainda conforme estudos de Quirino (2011) nas briquetadeiras de rosca sem fim, estrangeiras, a densidade de briquetes fica entre 1070 à 1220 kg/m³, enquanto as amostras analisadas a densidade média chegou a 1123 kg/m³, estando dentro do padrão e demonstrando que a maior densificação ocorre em prensas do tipo rosca sem fim.

Os dados obtidos estão de acordo com estudos de Matus e Krizan (2010) que evidenciaram que alguns equipamentos do tipo prensa extrusora de pistão mecânico, produzem briquetes com rupturas devido a forma de compactação, por folhas sobrepostas em cada curso do pistão, este fato diminui a qualidade do produto final que pode fragmentar com facilidade. Este mesmo estudo comprovou que os briquetes produzidos por prensa extrusora do tipo parafuso ou rosca sem fim são de melhor qualidade devido a compressão contínua que possibilita melhor densificação.

Ainda conforme estudos de Matus e Krizan (2010) é importante enfatizar que outros fatores como tipo da biomassa, teor de umidade e processo produtivo são essenciais, além da compactação e influenciam diretamente na qualidade energética final do briquete.

Nota-se na Tabela 18, que o poder calorífico médio das amostras de diferentes origens e biomassa, chega a aproximadamente 4382 kcal/kg, sendo superior a determinados tipos de biomassa.

Tabela 18. Poder calorífico médio entre as amostras de briquetes e peletes analisados

| Amostra | Produto | Tipo de biomassa | PCS (kcal/kg) |
|----------------|----------------|-------------------------|----------------------|
| 7 | Briquete | Madeira | 4632 a |
| 4 | Briquete | Madeira | 4571 ab |
| 1 | Briquete | Madeira | 4563 ab |
| 2 | Briquete | Madeira | 4554 ab |
| 5 | Briquete | Bagaço de cana | 4336 ab |
| 10 | Briquete | Cereais | 4293 ab |
| 8 | Briquete | Madeira | 4281 ab |
| 3 | Pelete | Madeira | 4274 ab |
| 9 | Briquete | Bagaço de cana | 4234 ab |
| 6 | Pelete | Bagaço de cana | 4170 b |

Nota: Médias seguidas da mesma letra na COLUNA não diferem significativamente entre si (Tukey P > 0,05).

Com base na Tabela 18, é possível verificar que 80% das amostras não apresentam variação significativa quanto ao poder calorífico. Apenas as amostras 6 e 7 apresentam pequena variação, sendo a amostra 6 proveniente de bagaço de cana enquanto a 7 é de origem de resíduos de madeira. Conforme estudos de Brand (2010), as diferenças relacionadas ao poder calorífico somente são consideradas significativas quando superiores a 300 kcal/kg.

A amplitude das amostras ficou em torno de 462 kcal/kg, averiguada por meio da análise estatística descritiva, através da qual foi possível verificar também que o desvio padrão aproximou-se de 169 kcal/kg.

A Tabela 19 mostra a relação entre o poder calorífico superior, o poder calorífico inferior e o poder calorífico líquido. O poder calorífico é utilizado quando o combustível possui umidade livre, além da água presente na sua constituição química (BRAND, 2010).

Tabela 19. Características relacionadas ao poder calorífico superior, poder calorífico inferior e poder calorífico líquido dos briquetes e peletes analisados

| Amostra | Produto | Tipo de biomassa | PCS ¹ (kcal/kg) | Umidade (%) | PCI ² (kcal/kg) | PCL ³ (kcal/kg) |
|---------|----------|------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | Briquete | Madeira | 4563 | 12 | 4239 | 3658 |
| 2 | Briquete | Madeira | 4554 | 10 | 4230 | 3747 |
| 3 | Pellet | Madeira | 4274 | 10 | 3950 | 3495 |
| 4 | Briquete | Madeira | 4571 | 13 | 4247 | 3617 |
| 5 | Briquete | Bagaço de cana | 4336 | 7 | 4012 | 3689 |
| 6 | Pellet | Bagaço de cana | 4170 | 8 | 3846 | 3490 |
| 7 | Briquete | Madeira | 4632 | 11 | 4308 | 3768 |
| 8 | Briquete | Madeira | 4281 | 4 | 3957 | 3775 |
| 9 | Briquete | Bagaço de cana | 4234 | 6 | 3910 | 3639 |
| 10 | Briquete | Cereais | 4293 | 6 | 3969 | 3695 |

Legenda: ¹PCS: Poder Calorífico Superior; ²PCI: Poder Calorífico Inferior; ³PCL: Poder Calorífico Líquido.

O poder calorífico inferior com umidade ou poder calorífico líquido, refere-se a energia perdida para a liberação do hidrogênio. Tendo em vista que toda biomassa é composta por este elemento, desconta-se também a energia utilizada para evaporar a água livre presente no combustível sólido.

As amostras de resíduos de madeira apresentaram os maiores valores em relação as demais amostras, como na amostra 8 que ofereceu aproximadamente 3775 kcal/kg.

Em estudos de Nogueira e Lora (2003), citados por Brand (2010), o poder calorífico líquido para materiais originários de resíduos da cana, chegou a 2000 kcal/kg. Enquanto as três amostras do presente estudo, compostas de bagaço de cana, apresentaram respectivamente os seguintes valores: 3689 kcal/kg, 3490 kcal/kg e 3639 kcal/kg, resultados mais vantajosos para a geração de energia quando compactados.

As amostras oriundas da compactação de cereais apresentaram cerca de 3695 kcal/kg quanto ao poder calorífico líquido. Quando comparado a outros trabalhos como o de Nogueira e Lora (2003) citado por Brand (2010), o poder calorífico líquido encontrado para resíduos de palha e casca de arroz a 13% de umidade foi de 3200 Kcal/kg.

5.3. Propriedades dos produtos compactados conforme o tipo de biomassa

As médias entre os resultados obtidos com relação ao teor de umidade, ao teor de cinzas, ao poder calorífico e a densidade encontram-se na Tabela 20, a qual relaciona cada propriedade ao tipo de biomassa que compõe cada um dos compactados.

Tabela 20. Análise imediata de briquetes e pellets de diferentes tipos de resíduos da biomassa

| Biomassa | Média do teor de umidade (%) | Média do teor de cinzas (%) | Massa específica aparente (kcal/m³) | Média do Poder Calorífico Superior (kcal/kg) |
|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---|---|
| Briquetes e pellets de madeira | 10 | 0,68 | 940 | 4479 |
| Briquetes e pellets de bagaço de cana | 7 | 6,57 | 871 | 4247 |
| Briquete de cereais (arroz e aveia) | 6 | 1,67 | 1109 | 4293 |

A análise de umidade possibilitou determinar a quantidade de água encontrada no briquete ou pelete que interfere diretamente no poder de queima de forma a diminuir o potencial energético do produto final (QUIRINO et al., 2005).

A amostra 2, resultante da compactação de resíduos de madeira e de casca de cereais, foi incluída nas amostras de resíduos de madeira devido à quantidade de serragem ser superior a de cereais.

Na Tabela 20, podem ser consideradas de melhor qualidade as amostras de produtos compactados resultantes da briquetagem de resíduos de cereais, devido ao teor de umidade encontrado ser menor do que as dos demais, ficando em torno de 6% de umidade.

Os compactados de resíduos de cereais como casca de arroz e aveia alcançaram uma média de 6 % de umidade entre as amostras. Já nas análises de Nogueira e Lora (2003), os resíduos de arroz, tais como casca e palha podem atingir 13% de umidade. Já estudos sobre a umidade de resíduos de aveia, são escassos.

Os valores mais elevados com relação à umidade podem ser provenientes do tipo da biomassa utilizada no processo de compactação, pois a água absorvida liga-se

eletronicamente na estrutura da madeira. Este fato favorece o armazenamento de água, aumentando a umidade e evidenciando que quanto maior a umidade presente no biocombustível menor o poder de queima (BRAND et al., 2004).

Segundo De Paula (2006), o teor de umidade de resíduos de madeira e de lenha comercial, antes do processo de compactação, encontra-se entre 9 a 30% de umidade. Enquanto nas amostras de produtos compactados, oriundos de resíduos da madeira, a umidade foi de 4 a 13%, com média de 10% de umidade nas amostras.

Estudos de Rosillo-Calle et al. (2005) a respeito da composição química entre bagaço e palha de cana, demonstraram que o bagaço de cana não compactado possui cerca de 10% de umidade, podendo chegar a 50% de umidade, de acordo com as pesquisas de Nogueira e Lora (2003). Em contrapartida, as amostras de briquetes e peletes provenientes de bagaço de cana em estudo obtiveram de 6 a 7% de umidade com média de 7% entre as amostras.

Deve-se levar em consideração que a umidade é um fator que pode ser influenciada por diversos fatores como, por exemplo, a parte do vegetal utilizada, a estação do ano, o local de coleta, dentre outros fatores (BRAND, 2010).

Os dados relativos ao teor de cinzas variam conforme a composição da biomassa, o que pode ser observado na tabela 23. Nos briquetes e peletes de resíduos de madeira, a média ficou entre 0,68% de cinzas, para as amostras oriundas de resíduos de bagaço de cana a média chegou a 6,57% e para as amostras de cereais atingiu 1,67% de cinzas.

De acordo com o estudo feito por Brand (2010), a biomassa de bagaço de cana apresenta, normalmente, as maiores porcentagens de cinzas. Porém, o teor de cinzas dos compactados varia segundo a biomassa utilizada na pesquisa, além de poder variar na mesma espécie com relação a parte da planta usada.

Estudos demonstram que as espécies vegetais *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. são as mais utilizadas para produção de biocombustível e geração de energia renovável. No presente estudo, os compactados da biomassa de vegetais de grande porte como das espécies citadas apresentaram porcentagens muito baixas de cinzas (BRAND, 2010).

As amostras de produtos compactados de resíduos de madeira, deste estudo, apresentaram em media 0,68% de cinzas em sua composição para os diferentes espécimes vegetais. O teor de cinzas em algumas amostras de resíduos de madeira,

foi superior a média das amostras, fato esse que tende a diminuir o poder de queima dos compactados. Normalmente, o teor de cinzas encontrado em diferentes biomassas é relativamente baixo, com exceção da casca de arroz e bagaço (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Os altos teores de cinzas encontrados em algumas amostras devem-se ao fato da composição ser basicamente a mesma, bagaço de cana. Isto pode ser explicado pela realização da fotossíntese ao longo do corpo deste vegetal e ao maior contato com materiais inorgânicos (BRAND, 2010).

A densidade aparente também conhecida como massa específica aparente, refere-se à quantidade de massa contida em determinado volume de um combustível sólido, levando em consideração o teor de umidade do material (BRAND, 2010).

As massas específicas aparente das amostras de briquetes de madeira apresentaram em média 940 kg/m^3 (Tabela 17), apresentando valor mais baixo que os encontrados em pesquisas de De Paula (2006), que comparou a densidade de briquetes de diferentes resíduos da biomassa obtendo média de densidade de 1037 kg/m^3 entre as diferentes amostras.

Ainda em estudos de De Paula (2006) uma das amostras de briquete, proveniente da compactação de lenha comercial, alcançou média de densidade mais baixa que a das amostras analisadas, cerca de 600 kg/m^3 . Esta situação pode ser explicada por ser o processo de briquetagem influenciado principalmente pelo tipo de biomassa utilizada ou tipo de equipamento utilizado no processo de briquetagem.

A vantagem da densificação pode ser observada em estudos de Quirino (2000), o qual afirma que a densidade *in natura* do bagaço de cana varia de 46 a 180 kg/m^3 , e a densidade após a compactação é de cerca de 1100 kg/m^3 .

As amostras de briquetes de bagaço de cana do estudo apresentaram também valores maiores que os dos resíduos antes da compactação, atingindo em média 871 kg/m^3 , porém algumas amostras chegaram a 1115 kg/m^3 , mostrando o benefício da compactação energética.

A análise de briquetes de cereais, de casca de arroz e de aveia, demonstrou os maiores valores para a densidade, 1109 kg/m^3 . É significativo notar que a matéria-prima considerada apresenta baixa densidade quando *in natura*. E conseqüentemente gera briquetes com maior densidade quando submetida a uma

maior taxa de compressão da biomassa, durante o processo de briquetagem (BRAND, 2010).

Os estudos de Quirino (2000), apontam que outro material que apresentou vantagem quanto à compactação foi o resíduo de arroz, sendo que a densidade natural é de 150 kg/m^3 e após a compactação pode atingir 1280 kg/m^3 .

Os valores relacionados ao poder calorífico superior encontrado nas diferentes amostras de produtos compactados com finalidade energética apresentaram poucas diferenças.

Conforme Brand (2010), em termos práticos, as diferenças estatísticas relacionadas ao poder calorífico entre as amostras, quando menores que 300 kcal/kg tornam-se insignificantes. Sendo assim, as amostras compostas por madeira apresentaram poder calorífico um pouco mais elevado que as demais, porém a diferença torna-se irrisórias.

Nas pesquisas de Brand (2007), as biomassas de pinus e de eucalipto apresentaram 4800 e 4600 kcal/kg , respectivamente. Já nos estudos de De Paula (2006), o poder calorífico dos resíduos de madeira atingiram 4900 kcal/kg . Isto se deu pelo fato da biomassa em análise, pois enquanto o primeiro estudo utilizou partes das espécies com casca, o segundo trabalhou com os resíduos da madeira.

As amostras de bagaço de cana apresentaram os menores valores para a queima, o que também pode ser verificado em análises de Rosillo-Calle (2005), em que o poder calorífico da biomassa do bagaço de cana chega a 3631 kcal/kg .

Quanto aos briquetes de cereais (casca de arroz e de aveia) estão dentro do padrão para este tipo de biomassa. Estudos de Quirino (2000) demonstram que biomassas de casca de arroz de 3730 kcal/kg até 4764 kcal/kg , números encontrados também nos trabalhos de De Paula (2006).

5.4 Classificação de briquetes e peletes

A classificação verificada na Tabela 21 segue o padrão de classificação determinado pelo projeto Florestas Energéticas-Embrapa (2010), para produtos compactados com finalidade energética.

Tabela 21. Classificação para a utilização do compactado de acordo com o tipo de biomassa

| CLASSIFICAÇÃO | TIPO DE COMPACTADO DA BIOMASSA | AMOSTRAS |
|----------------------|--|-----------------|
| Classe 1 | Briquetes de madeira para uso doméstico (densidade normal) | 1, 2 e 4 |
| Classe 2 | Briquetes de madeira para o uso industrial (densidade normal) | 7 |
| Classe 3 | Briquete de bagaço de cana e Briquete de cereais para o uso doméstico (alta densidade) | 9 e 10 |
| Classe 4 | Briquete de madeira para o uso industrial (alta densidade) | 8 |
| Classe 5 | Briquete de bagaço de cana para o uso industrial | 5 |
| Classe 6 | Briquete de bagaço de cana para o uso industrial | 9 |
| Classe 7 | Pelete de madeira para o uso doméstico | 3 |
| Classe 8 | Pelete de bagaço de cana para o uso industrial | 6 |

Na classe 1, foram verificadas duas amostras provenientes de resíduos de atividades madeireiras, sendo as mais recomendadas para o uso doméstico, devido ao baixo teor de cinzas e contaminantes.

Enquanto na classe 2, foram identificadas duas amostras também de resíduos de madeira, que não são recomendadas para o uso doméstico, devido a falta de informações com relação a possíveis agentes contaminantes.

Na classe 3, enquadram-se os briquetes destinados ao uso doméstico ou industrial, com características semelhantes aos dos briquetes da classe 1. Entretanto, nesta classe é comum a alta densidade das amostras observadas. Caracterizam-se pertencentes à classe 3, briquetes provenientes de bagaço de cana e de resíduos de cereais.

A classe 4 é caracterizada por briquetes oriundos de resíduos da madeira, de alta densidade e sem especificações quanto à contaminação. Por isso, são relacionados apenas ao uso industrial e não residencial.

Na classe 5, estão presentes briquetes apenas de bagaço de cana, com grande quantidade de cinzas e sem especificações, sendo então, classificados para o uso industrial. A classe 6 é característica para briquetes de bagaço de cana destinado ao

uso doméstico ou industrial, com a quantidade de cinzas é inferior a 5%, além de caracterizarem-se pela alta densidade e aglutinantes naturais.

As classes 7 e 8 são compostas por peletes. Destas a classe 7 é dedicada ao uso doméstico e industrial, enquanto a classe 8 é reservada ao uso industrial apenas, devido aos altos teores de cinzas e a possível presença de contaminantes.

Com base nos dados obtidos, as amostras podem ser especificadas e classificadas em função do teor de cinzas, densidade e especificações do produto, a Tabela 22, demonstra as particularidades de cada amostra em suas respectivas classes.

Tabela 22. Classificação por amostra de produtos compactados para a geração de energia

| Amostra | Especificação |
|----------------|---|
| 1 | Briquete de resíduo de madeira, com menos de 5% de cinzas, densidade normal e sem produtos contaminantes. |
| 2 | Briquete de resíduo de madeira e cereais, com menos de 5% de cinzas, densidade normal e sem contaminantes. |
| 3 | Pelete de resíduo de madeira, com menos de 3% de cinzas e sem contaminantes |
| 4 | Briquete de resíduo de madeira, com menos de 5% de cinzas, densidade normal e sem contaminantes |
| 5 | Briquete de bagaço de cana, com mais de 5% de cinzas, densidade normal e sem especificações quanto a presença de contaminantes |
| 6 | Pelete de bagaço de cana, com mais de 3% de cinzas sem especificações quanto a presença de contaminantes |
| 7 | Briquete de resíduo de madeira, com menos de 5% de cinzas, densidade normal e sem especificações quanto a presença de contaminantes |
| 8 | Briquete de resíduo de madeira, com menos de 5% de cinzas, alta densidade e sem especificações quanto a presença de contaminantes |
| 9 | Briquete de bagaço de cana, com menos de 5% de cinzas, alta densidade e sem contaminantes |
| 10 | Briquete de resíduos de cereais, com menos de 5% de cinzas, alta densidade e sem contaminantes |

Verifica-se na TABELA 25 que os compactados das amostras 1, 2, 3, 4, 9 e 10 são destinados ao uso doméstico ou industrial. Já as amostras 5, 6, 7 e 8 estão relacionadas apenas ao uso industrial devido à elevada quantidade de cinzas ou à falta de informações com relação presença de agentes contaminantes. A Figura 5 mostra a relação entre a porcentagem de amostras coletadas e a classificação baseada na proposta do projeto de Florestas Energéticas-Embrapa (2010).

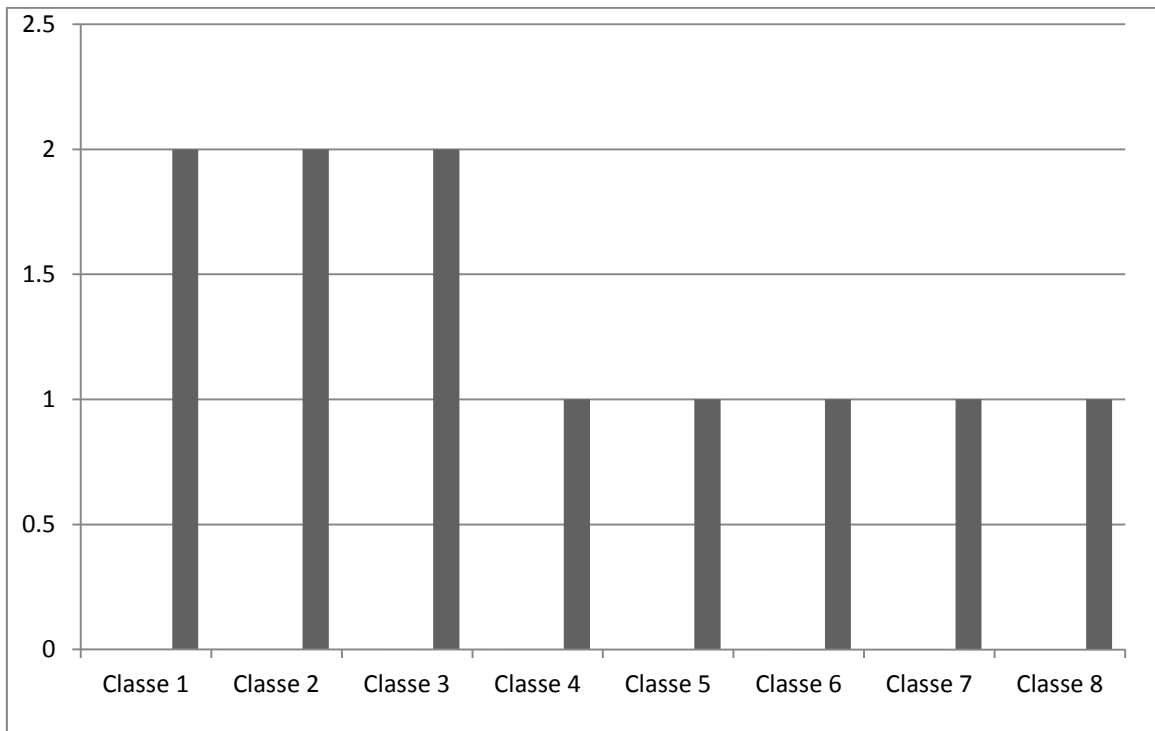


Figura 5. Número de amostras por classe.

Através da figura 5, verifica-se homogeneidade entre a divisão e classificação das amostras. As maiores porcentagens das amostras coletadas se enquadram nas classes 1, 2 e 3 cada uma com duas amostras representantes. Seguidas pelas classes 4, 5, 6, 7 e 8 cada uma com uma amostra correspondente.

A correta classificação faz necessária, principalmente, para evitar a contaminação por metais pesados resultantes das cinzas residuais do processo de combustão da biomassa.

6. CONCLUSÃO

A execução desta pesquisa possibilitou determinar as propriedades físicas e químicas de diferentes produtos compactados de biomassa vegetal, oriundos principalmente do estado do Paraná e de localidades da região Sul do Brasil.

Os briquetes em análise mostraram valores menores para a umidade e para as cinzas do que a norma sueca regulamenta para a qualidade de biocombustíveis sólidos. O poder calorífico, parâmetro relacionado à qualidade energética aproximou-se de 3869 kcal/kg padrão da norma sueca.

Os briquetes em estudos apresentaram melhores resultados com relação à produção energética do que os considerados pela norma sueca. Enquanto os peletes de madeira considerados na pesquisa apresentaram-se de qualidade energética pouco abaixo dos peletes considerados pelas normas europeias. Já com relação ao teor de cinzas e teor de umidade, os peletes em estudos apresentaram menores valores.

Os produtos compactados foram classificados segundo classes de qualidade em cinco classes distintas, conforme o nível de cinzas, de densidade e de presença de agentes tóxicos nas amostras.

Dentre as amostras analisadas, 60% são destinadas ao uso doméstico ou industrial, por conter baixo teor de cinzas e aglutinantes naturais. Enquanto 40% das amostras estão designadas apenas ao uso industrial, devido à elevada quantidade de cinzas nas amostras ou a falta de informações com relação à presença de agentes contaminantes, podendo acarretar problemas para a saúde humana.

Existem poucos trabalhos a respeito da composição química de briquetes ou peletes, sendo necessárias mais pesquisas relacionadas à composição química de cada amostra para determinação de possíveis produtos tóxicos resultantes da combustão de produtos compactados da biomassa.

O presente trabalho contribuiu através de elementos técnicos quantitativos e qualitativos para a concretização de normatização nacional de produtos compactados da biomassa para a geração de energia. De forma a possibilitar o melhor aproveitamento do poder energético da biomassa residual e diminuir os impactos ambientais ocasionados pela disposição inadequada de resíduos da biomassa.

REFERÊNCIAS

ABBAS, A.; ANSUMALI, S. **Global Potential of Rice Husk as a Renewable Feedstock for Ethanol Biofuel Production**. Bioenergy Research, Sydney, v. 3, n. 4, p.328-334, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL (Brasil). **Biomassa**. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 12 jan. 2012.

ANON, J., A., R.; LOPEZ, F. F.; CASTIFIERAS, J. P.; LEDO, J. P.; REGUEIRA, L. N. **Calorific values and flammability for forest wastes during the seasons of the year**. Bioresource Technology, Santiago de Compostela, v.52, p. 269-274, 1995.

Biomaxind. **O briquete – Alternativa Energética**. Disponível em: <<http://www.biomaxind.com.br>>. Acesso em: 10 jan. 2012.

BRAND, M. A.; MUNIZ, G. I. B.; COSTA, V. J.; AMORIN, M.; BITTENCOURT, E. **Influência do tempo de armazenamento sobre a perda da umidade de resíduos madeiráveis**. In: III Encontro de Ciência e Tecnologia, 2004, Lages. Anais do III ECTec-Encontro de Ciência e Tecnologia. Lages: Universidade do Planalto Catarinense, 2004. p. 1-10.

BRAND, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. 2007. 131f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRASIL. **Instrução normativa IBAMA nº 77 de 07 de Dezembro de 2005a**. Disponível em:<<http://www.ibama.gov.br>>. Acesso em 5 de janeiro de 2012.

BRASIL. **Lei Estadual nº 12.493 de 22 de Janeiro de 1999**. Disponível em:<<http://www.legislação.pr.gov.br>>. Acesso em 16 de janeiro de 2012.

BRASIL. **Lei nº 11.097 de 13 de Janeiro de 2005b**. Disponível em:<<http://legislação.planalto.gov.br>>. Acesso em 10 de dezembro de 2011.

BRASIL. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. SEAB. **Estimativas de safra**. Disponível em: <www.agricultura.pr.gov.br>. Acesso em: 16 fev. 2012a.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Estatísticas da produção agrícola**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em 13 de Abril de 2012b.

BRITO, J. O. **O uso energético da madeira**. Estudos Avançados, Piracicaba, v. 21, n. 59, p.185-186, 2007.

BRCKI, M.; JANIC, T. **Standards for pelleted and briquetted biofuels**. Savremena poljoprivredna tehnika, Republica da Servia, v. 35, n. 4, p. 260-267, 2009.

COPEL. **Companhia Paranaense de Energia**. Disponível em:<<http://www.copel.com>>. Acesso em 20 de fevereiro de 2012.

CORTEZ, L. A. B.; BAJAY, S. W.; BRAUNBECK, O. **Uso de resíduos agrícolas para fins energéticos: o caso da palha de cana-de-açúcar**. In: CENBIO, 2002, São Paulo. Artigos Técnicos. São Paulo: Unicamp, 2002. p. 1-30.

COUTO, L.; MULLER, M., D.; DA SILVA JÚNIOR, A. G.; CONDE, L., J., N. **Produção de pellets de madeira – O caso da Bio-Energy no Espírito Santo**. Biomassa & Energia, Viçosa, v. 1, n. 1, p.45-52, 2004a.

COUTO, L. C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L. F.; CAMARA, D. **Vias de valorização energética da biomassa**. Biomassa & Energia, v. 1, n. 1, p.71-92, 2004b.

DE PAULA, J. C. M. Monografia: **Aproveitamento de resíduos de madeira para confecção de briquetes**. 2006. 30 f. Monografia - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

DIBLASI FILHO, I. **Ecologia Geral**. 1º ed. São Paulo: Ciência Moderna, 2007. 52 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Projeto Florestas Energéticas**. 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Balanco Energético Nacional 2010: Ano Base 2009**. Rio de Janeiro: EPE, 2010. 32 p. Disponível em: <<http://epe.gov.br>>. Acesso em: 12 nov. 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Balço Energético Nacional 2011: Ano Base 2010**. Rio de Janeiro: EPE, 2011. 66 p. Disponível em: <<http://epe.gov.br>>. Acesso em: 12 out. 2011.

FEITOSA, B. C. **Aproveitamento dos resíduos de madeira no Pará**. Revista da Madeira. Edição especial: Bioenergia. v.114. 2008. Disponível em: <<http://www.remade.com.br>>. Acesso em 15 de fevereiro de 2012.

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

FERREIRA, C. S. **Desenvolvimento do processo de obtenção de filme polimérico a partir da casca de arroz**. 2005. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Estadual de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

FERREIRA-LEITÃO, V.; GOTTSCHALK, L. M. F.; FERRARA, M. A.; NEPOMUCENO, A. L.; MOLINARI, H. B. C.; BOM, E. P. S. **Biomass Residues in Brazil: Availability and Potential Uses**. Waste And Biomass Valorization, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p.65-76, 2010.

FILIPPETTO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. 2008. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2008.

FOLETTTO, E., L.; HOLFMANN, R.; HOLFMANN, R., S.; PORTUGAL JUNIOR, U., L.; JOHN, S., L. **Aplicabilidade das Cinzas da Casca de Arroz**. Química Nova, v. 28, n. 6, p.1055-1060, 2005.

FUNDAÇÃO DE APOIO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO - FAPESP (São Paulo). **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**. São Paulo: Fapesp, 2010. 208 p.

FUNGARO, D. A.; BRUNO, M. **Utilização de zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão para remoção de azul de metileno em água**. Orbital, v. 1, p.7-20, 2009.

FUNGARO, D. A.; BRUNO, M. **Utilização de zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão para remoção de azul de metileno em água**. Orbital - The

Electronic Journal Of Chemistry, São Paulo, p. 49-63. 2009. Disponível em: <<http://www.ipen.br>>. Acesso em: 08 nov. 2010.

GENTIL, L.V.B. Tese de Doutorado: **Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira**. 2008. 175 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e o meio ambiente no Brasil**. Estudos Avançados, v. 21, p.7-20, 2007.

GONÇALVES, J. E. **Caracterização química e energética de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. 2006. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2006.

HIRSMARK, J. **Densified Biomass Fuels in Sweden**. 2002. Dissertação (Mestrado)-Swedish University of Agricultural Sciences, n. 38, Uppsala, 2002.

LEE, J.D. **Química inorgânica não tão concisa**. 4º ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1996. 183 p.

LIPPEL. **Briquetadeiras**. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br>>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2012.

MATOS, CARLOS A. S. **Valorização Energética Sustentável de Biomassa dos resíduos Florestais da Mata Atlântica (Brasil)**. 2007. 125f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nova Lisboa - Faculdade de Ciência e Tecnologia, Lisboa, 2007.

MATUS, M.; KRIZAN, P. **Influence of Structural Parameters in Compacting Process on Quality of Biomass Pressings**. Aplimat – Journal Of Applied Mathematics, Bratislava, 2010. p. 87-96. Disponível em: <<http://www.journal.aplimat.com>>. Acesso em: 16 out. 2012.

NETO, J. M.; BALBINOT, R.; MIRANDA, G. M.; SCHIRMER, W. N. **Estudo da viabilidade de implantação de uma usina de briquetagem no município de Palmas, Paraná**. Revista da Madeira, v. 20, n 122, p 64-72, 2010.

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

NOLLER, C.R. **Química Orgânica**. 3º ed. México:Interamericana, 1968. 158 p.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. **Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their composition behavior.** Biomass & Bioenergy, v. 27, n.6, p.653-669, 2004.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; REZENDE, R. N.; ASSIS, C. O.; BALIZA, A. E. R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos.** Pesquisa Florestal Brasileira, Minas Gerais, p. 103-112. 01 jun. 2011. Disponível em: <www.cnpf.embrapa.br>. Acesso em: 10 fev. 2012.

PEREIRA, M.J. **Energia: Eficiência e Alternativas.** Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009. 126 p.

PEREIRA, J. C. D.; HIGA, A. R.; SHIMIZU, J. Y.; HIGA, R. C. V. **Comparação da qualidade da madeira de eucalipto para fins energéticos.** Revista da madeira, v. 20, n. 122, p.80-82, 2010.

PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T. **Densidade energética de resíduos vegetais.** Biomassa & Energia, Viçosa, v. 2, n. 2, p.113-123, 2005. Disponível em: <<http://www.ufpa.br>>. Acesso em 5 de março de 2012.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P.F.; JUNIOR, GUIMARAES, M. **Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal.** Pesquisa florestal brasileira, v.31, n. 66. p.113-122, 2011.

PUPPIM DE OLIVEIRA, J., A. **The policymaking process for creating competitive assets for the use of biomass energy: the Brazilian alcohol programme.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.6, n.1 e 2, p.129-140, 2002.

QUIRINO, W. F. **Briquetagem de resíduos lignocelulósicos.** Brasília: IBAMA – Circular Técnica do LPF, v. 1, n. 2, 1991. Disponível em: <http://www.funtecg.org.br>>. Acesso em 13 de novembro de 2011.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais.** Laboratório de produtos florestais LPF/IBAMA. Módulo do curso “Capacitação de agentes multiplicadores em valorização da madeira e dos resíduos vegetais”, p.4-32, 2000.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal.** Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos

Recursos Naturais Renováveis – IBAMA – Laboratório de Produtos Florestais FLP, p.16, 1991.

QUIRINO, W., F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A., P., A.; ABREU, V., L., S.; AZEVEDO, A., C., S. **Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos**. Biomassa & Energia, Brasília, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

QUIRINO, W., F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A., P., A.; ABREU, V., L., S.; AZEVEDO, A., C., S. **Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos**. Revista da madeira, Brasília, n. 89, p. 100-106, 2005.

RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres- Potafos, 1991. 343p.

RAVEN, P. H., EVERT, R. F., EICHHORN, S. E. **Biologia vegetal**. 6.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2001. 906 p.

REGUEIRA, L. N.; ANON, J. R.; PROUPIN, J.; DIZ, A. V. **Calorimetry as a tool to design campaigns to prevent and fight forest fires originating from shrub species**. Thermochemica Acta, n.394, p. 279–289, 2002.

RÍPOLI, T. C. C.; MOLINA JUNIOR, W. F.; RÍPOLI, M. L. C. **Energy Potencial of Sugar Cane Biomass in Brazil**. Scientia Agricola, Piracicaba, v. 57, n. 4, p.677-681, 2000.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S.V.; ROTHMAN, H. ; ROCHA, J.D.; ROCHA, M.P.G.D. **Uso da Biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas, SP: UNICAMP, 2005. 447p.

SCHUTZ, F. C. de A.; ANAMI, M. H.; TRAVESSINI, R. **Desenvolvimento e ensaio de briquetes fabricados a partir de resíduos ligno-celulósicos da agroindústria**. Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia, Medianeira, v. 1, n. 1, p.1-8, 2010.

SHRIVER, D.F.; ATKINS, P.W. **Química Inorgânica**. 3°ed. Porto Alegre: Bookman, 2003, 620 p.

SILVA, D. A. **As florestas energéticas**. Revista da madeira, v. 20, n. 121, p.25-27, 2009.

SILVA, D. A.; RIBEIRO, R. M.; SIMETTI, R.; SFEIR, T. A. **A indústria de pellet e perspectivas de mercado.** In: CONGRESSO FLORESTAL PARANAENSE, 4., 2012, Curitiba. Anais do 4º Congresso Florestal Paranaense. Curitiba: UFPR, 2012. p. 1 - 8. Disponível em: <<http://www.congressoflorestalpr.com.br/>>. Acesso em: 20 set. 2012.

SLONGO, D., R.; KUPERSTEIN, R., P.; NETTO, R., B. **Plantações energéticas de bambu.** Revista da Madeira, v. 20, n. 121, p. 40-41, 2008.

SOUZA, S. N. M.; SORALI, A.; OLIVA, C. A. **Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná.** 4º Encontro de Energia no Meio Rural. 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.org>>. Acesso em 20 de janeiro de 2012.

STURION, J. A., TOMASELLI, I. **Influência do tempo de estocagem de lenha de Bracatinga na produção de energia.** Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n. 21, p. 37-47, 1990.

SVENNINGSON, P. **Biomass briquettes in the dominican republic. Part II: technical analysis.** Biomass, v 13, n 4. 1987.

TEIXEIRA, F. N.; LORA, E. E. S. Capítulo 2 - **Suprimento energético para termelétricas.** In: LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração termelétrica. Planejamento, projeto e operação.** Rio de Janeiro: Interciência, v.1, p. 31–86, 2004.

TETTO, A. F.; FIALHO, J. T.; GONÇALVES, K. A.; GONÇALVES, R. V. **Disponibilidade de madeira para fins energéticos no estado do Paraná, no período de 1997 a 2007.** 4º Congresso internacional de Bioenergia, Curitiba, 2009.

TOLMASQUIM, M. T. **Geração de energia elétrica no Brasil.** Rio de Janeiro: Interciência, 2005. 79 p.

TOLMASQUIM, M. T. **Novo modelo do setor elétrico brasileiro.** Rio de Janeiro: Synergia, 2011. 238 p.

VASCONCELLOS, C. B.; LEAL, C., L., D.; FRANÇA, M., P.; CASTRO, P., F. **Aproveitamento de cinzas de caldeira na construção civil.** Revista Vértices, v. 6, n.1, p. 131-148, 2004.

VENDRASCO, L.; YAMAJI, F. M. **Normas técnicas nas indústrias brasileiras de briquetes**. Disponível em: <<http://sistemas.usp.br>>. Acesso em 16 de fevereiro de 2012.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: UFPR, 2001.