

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS LONDRINA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**LÍLIAN RODRIGUES DE LIMA COSTA**

**CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DE RESÍDUOS  
LIGNOCELULÓSICOS VISANDO À PRODUÇÃO DE  
BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA  
2016**

**LÍLIAN RODRIGUES DE LIMA COSTA**

**CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DE RESÍDUOS  
LIGNOCELULÓSICOS VISANDO À PRODUÇÃO DE  
BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi

Co-orientador: Prof. Dr. Alexei Lorenzetti Novaes Pinheiro

**LONDRINA  
2016**



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Londrina  
Coordenação de Engenharia Ambiental



## TERMO DE APROVAÇÃO

### Título da Monografia

Caracterização e compactação de resíduos lignocelulósicos visando à produção de biocombustíveis sólidos

por

Lílian Rodrigues de Lima Costa

Monografia apresentada no dia 01 de dezembro de 2016 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Aulus Roberto Romão Bineli  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Alexei Lorenzetti Novaes Pinheiro  
(UTFPR)

---

Profa. Dra. Ricardo Nagamine Costanzi  
(UTFPR)  
Orientador

---

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

*O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.*

*Dedico este trabalho a minha  
querida avó Rosa Batista  
(in memoriam)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por todas as bênçãos que derrama sobre minha vida, por me dar forças nos momentos mais difíceis e por nunca se esquecer de mim.

Aos meus pais, Genacil e Valdete, por sempre acreditarem em mim, pela educação, amor e orações à Deus para que este sempre me guiasse pelo caminho do bem, enfim, por estarem comigo em todas as etapas da minha vida, me apoiando e aconselhando. Amo muito vocês!

A Loriane e Leonardo, meus queridos irmãos, por todo companheirismo, amizade, paciência e por estarem comigo nos momentos em que mais precisei de vocês. Contem sempre comigo! Também agradeço ao meu cunhado Leandro, minhas sobrinhas Isabela e Mariana, bem como toda minha família (avós, tios, primos) que sempre oraram e torceram pelo meu futuro.

Ao meu orientador, Ricardo Costanzi, por toda confiança depositada em mim, pelo apoio e paciência, por sempre me aconselhar e acalmar nos momentos críticos do trabalho, enfim, obrigada por tudo! Nunca esquecerei o quanto ajudou na minha formação profissional/pessoal. Que Deus te abençoe muito!

Ao meu co-orientador, Alexei Lorenzetti, pelo companheirismo na montagem do calorímetro, por toda ajuda e conhecimento técnico que me passou ao longo do trabalho e durante os anos da faculdade.

Ao professor, Janksyn Bertozzi, por toda ajuda ao longo do trabalho, pela parceria, amizade e paciência, enfim, por todo suporte que me forneceu. Meu muito obrigada!

Ao professor, Aulus Binelli, por todo apoio e sugestão ao longo do trabalho. Pela ajuda de Filippe Bernardino e Felipe Lopes nos ensaios de compactação. Agradeço também as meninas do mestrado, Ana Cosso e Aline, pela ajuda nas análises e no delineamento estatístico, respectivamente.

Agradecimento especial ao meu supervisor de estágio, Bruno Misael Vedovatte, por todo apoio, confiança e ensinamento ao longo dos últimos meses.

Aos professores, Maurício Santos, Marcelo Anami, Joseane Theodoro, Tatiane Dal Bosco, Ajadir Fazolo, Orlando De Carvalho Jr, seja na liberação de laboratórios, equipamentos e até mesmo aconselhamentos. Aos técnicos do laboratório de Química da UTFPR, pelo fornecimento dos laboratórios, vidrarias e soluções.

Aos colegas de curso, trabalho e do Rotaract: Andressa Duarte, Bruna Sacramento, Caroline Wikuats, Fernanda Nonaka, Igor Shiraishi, Denise Araújo, Ana Flávia Moreira, Thaís Kurashima, Cinthya Queiroz, Laís Paleari e Paulina Bonfim, pelo convívio, amizade e apoio. Agradeço também Manuela Daher por toda ajuda e sugestão.

Enfim, a todos aqueles que me ajudaram de alguma forma ou contribuíram direta ou indiretamente na execução deste trabalho, e que por alguma distração não foram citados, obrigada de todo o coração!

## RESUMO

COSTA, Lílian Rodrigues de Lima. **Caracterização e compactação de resíduos lignocelulósicos visando à produção de biocombustíveis sólidos**. 2016. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Coordenação de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2016.

O uso de combustíveis fósseis ainda é grande no cenário global, no entanto, mediante os problemas ambientais que ocasionam, aliados com aumento de seus preços e esgotamento de suas reservas, o interesse pela utilização de fontes de energia renováveis aumenta. Os resíduos lignocelulósicos são classificados como materiais orgânicos, e estes, são a principal fonte de geração de energia a partir da biomassa. Uma técnica viável para o reaproveitamento energético destes materiais é a briquetagem. Esta consiste na compactação dos resíduos sob condições adequadas de umidade, pressão e temperatura, transformando a biomassa em aglomerados sólidos denominados briquetes, que podem substituir o uso da lenha em diversas atividades. Mediante isso, esta pesquisa buscou caracterizar resíduos do processamento da madeira e agrícolas, provenientes de cultivos de milho, soja e trigo, bem como propor a fabricação de briquetes que minimizem os impactos sobre o Meio Ambiente. Para tanto, os resíduos foram caracterizados de acordo com as variáveis umidade, teor de cinzas, carbono volátil e fixo, granulometria e densidade a granel. Realizou-se também a adaptação de um calorímetro Precyzja KL-5 com o intuito de realizar ensaios futuros de poder calorífico de amostras. Os briquetes foram produzidos em prensa hidráulica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por meio de planejamento estatístico em Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), variando a pressão do processo de 2 a 5 bar e temperatura de 150 a 250°C. Observou-se neste ensaio que a variável compressão possuiu maior significância que a variável de temperatura. Com o presente trabalho pode-se concluir que dos resíduos analisados o proveniente do cultivo de trigo e a maravalha (ambos novos) apresentaram melhores resultados que os demais. Dentro das premissas avaliadas, observou-se que os resíduos podem ser utilizados na produção de briquetes desde que haja uma melhoria nas condições de armazenamento e coleta destes, a fim de impactar positivamente seu teor de umidade e cinzas, em especial.

**Palavras-chave:** Biocombustíveis sólidos. Compactação. Biomassa vegetal. Energia.

## ABSTRACT

COSTA, Lílian Rodrigues de Lima. **Characterization and compaction of lignocellulosic residues for solid biofuels production** 2016. 93 f. Conclusion of Course Work (Bachelor of Environmental Engineering) – Department of Environmental Engineering, Federal Technological University of Paraná. Londrina, 2016.

The use of fossil fuels is still big worldwide, however, due to the environmental problems they cause, coupled with a rise in their prices and depletion of their reserves, interest in the use of renewable energy sources has increased. The lignocellulosic residues are classified as organic materials, and these are the main energy source from biomass. A viable technique for energy reuse of these materials is briquetting. This technique consists in waste compaction under appropriate conditions of moisture, temperature and pressure, transforming biomass into solid agglomerates called briquettes, which can replace the use of wood in several activities. Therefore, the objectives of this study were to characterize waste from agriculture and wood processing, as well as propose the manufacture of briquettes that minimize impacts on the environment. The residues were characterized according to the variables moisture, ash content, volatile and fixed carbon, grain size and bulk density. In addition, a PRECYZJA KL-5 calorimeter was adapted in order to carry out further tests of calorific value of samples. The briquettes were produced in hydraulic press at the Federal Technological University of Paraná, through statistical planning on Central Composite Rotational Outlining (CCRO), varying the pressure of the process from 2 to 5 bar and temperature from 150 to 250°C. This test shows that the variable compression has greater significance compared to temperature. Conclusion based on the study include that the analyzed waste from the cultivation of wheat and wood shavings (both new) showed better results than the others. Within the premises evaluated, it was observed that the waste can be used in the production of briquettes as long as there is an improvement in their storage and collection conditions, in order to positively impact their moisture and ash content, in particular.

**Key- words:** Solid biofuels. Compaction. Vegetable biomass. Energy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1- Oferta interna de energia renovável no Brasil em 2014.....   | 15 |
| Figura 2- Fontes de Biomassa .....   | 16 |
| Figura 3- Produção do cultivo de soja entre os anos 2006-2015 .....  | 21 |
| Figura 4- Resíduos gerados no processamento da Soja no ano de 2009.....  | 22 |
| Figura 5- Produção do cultivo do milho entre os anos 2006-2015 .....   | 23 |
| Figura 6- Resíduos gerados no processamento do milho no ano de 2009 .....  | 24 |
| Figura 7- Produção do cultivo do trigo entre os anos 2006-2015.....  | 25 |
| Figura 8- Resíduos gerados no processamento do trigo no ano de 2009.....   | 26 |
| Figura 9- Processo de fabricação de briquetes .....  | 28 |
| Figura 10 - Curva de temperatura X tempo.....  | 33 |
| Figura 11- Peneiras utilizadas no ensaio granulométrico.....   | 40 |
| Figura 12- Calorímetro Precyzja tipo KL-5 antes das modificações, à esquerda (a); mesa de controle à direita (b) ..... | 44 |
| Figura 13- Calorímetro depois das modificações .....   | 45 |
| Figura 14- Controlador do calorímetro montado.....   | 45 |
| Figura 15- Diagrama esquemático das conexões dos sensores de temperatura.....  | 46 |
| Figura 16- Diagrama esquemático do circuito de ignição do filamento .....  | 47 |
| Figura 17- Procedimento para quantificação de ácidos formados.....   | 49 |
| Figura 18- Molde utilizado no ensaio de compactação .....  | 52 |
| Figura 19 - Montagem do sistema de compactação.....  | 53 |
| Figura 20- Distribuição granulométrica dos resíduos decompostos .....  | 57 |
| Figura 21- Distribuição granulométrica dos resíduos NV .....   | 58 |
| Figura 22- Cinzas provenientes dos resíduos .....  | 61 |
| Figura 23- Gráfico de temperatura x tempo (ácido benzoico) .....   | 64 |
| Figura 24 - Gráfico de temperatura x tempo (Trigo NV) .....  | 65 |
| Figura 25- Gráfico de temperatura x tempo .....  | 65 |
| Figura 26 - Gráficos de superfície em 2 dimensões (a) e em 3 dimensões (b) .....                                       | 68 |
| Figura 27- Gráfico de Pareto com efeitos das variáveis sobre o sistema e sua significância .....                       | 69 |
| Figura 28 - Briquetes produzidos .....   | 71 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1- Participação na produção brasileira de diversas culturas, nos primeiros meses de 2016 .....           | 19 |
| Tabela 2- Produção de resíduos das principais culturas brasileiras em 2010, com exceção da cana-de-açúcar ..... | 20 |
| Tabela 3 - Teores de umidade obtidos .....  | 54 |
| Tabela 4 - Teores de umidade encontrados na literatura .....  | 55 |
| Tabela 5- Resultados do ensaio granulométrico .....   | 56 |
| Tabela 6- Resultados obtidos para os teores de carbono volátil, fixo e cinzas .....                             | 59 |
| Tabela 7- Valores de referência para materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo ..                       | 60 |
| Tabela 8- Valores obtidos para a densidade a granel dos resíduos.....   | 62 |
| Tabela 9 - Densidade dos resíduos segundo a literatura .....  | 63 |
| Tabela 10 - Resultados obtidos no ensaio de Poder calorífico superior (PCS) .....                               | 65 |
| Tabela 11- Valores de referência para PCS.....  | 66 |
| Tabela 12 - Porcentagem de enxofre de acordo com a literatura.....  | 67 |
| Tabela 13-Valores e resultados do DCCR com variáveis temperatura e compressão ...                               | 67 |
| Tabela 14 - Valores de densidade aparente obtidos .....   | 70 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 - Classificação dos combustíveis provenientes da biomassa.....   | 17 |
| Quadro 2- Vantagens do briquete sobre a lenha.....                        | 36 |
| Quadro 3- Abertura das peneiras utilizadas no ensaio granulométrico ..... | 39 |
| Quadro 4- Modelo do DCCR .....  | 51 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>2 OBJETIVOS</b> .....  | <b>14</b> |
| 2.1 OBJETIVO GERAL .....  | 14        |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 14        |
| <b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....  | <b>15</b> |
| 3.1 BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA .....                                    | 15        |
| 3.2 RESÍDUOS AGRÍCOLAS.....   | 18        |
| 3.2.1 Soja .....  | 20        |
| 3.2.2 Milho.....  | 22        |
| 3.2.3 Trigo .....   | 24        |
| 3.3 RESÍDUOS DA MADEIRA .....   | 26        |
| 3.4 BRIQUETAGEM.....  | 27        |
| 3.4.1 Definição e processo .....  | 27        |
| 3.4.2 Características da matéria-prima, briquete e processo produtivo ..... | 29        |
| 3.4.2.1 Dimensão .....  | 29        |
| 3.4.2.2 Granulometria.....  | 30        |
| 3.4.2.3 Densidade .....   | 30        |
| 3.4.2.4 Teor de umidade .....   | 30        |
| 3.4.2.5 Teor de material volátil .....                                      | 31        |
| 3.4.2.6 Teor de cinzas .....  | 31        |
| 3.4.2.7 Teor de carbono fixo.....   | 32        |
| 3.4.2.8 Poder calorífico .....  | 32        |
| 3.4.2.9 Aglutinantes.....   | 33        |
| 3.4.2.10 Pressão de compactação .....                                       | 34        |
| 3.4.2.11 Temperatura.....   | 34        |
| 3.5 VANTAGENS E UTILIZAÇÃO DO BIOCOMBUSTÍVEL.....                           | 35        |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | <b>38</b> |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS.....  | 38        |
| 4.1.1 Teor de Umidade.....  | 38        |
| 4.1.2 Granulometria.....  | 39        |
| 4.1.3 Teor de materiais voláteis .....                                      | 41        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.1.4 Teor de cinzas.....   | 42        |
| 4.1.5 Teor de Carbono fixo.....   | 42        |
| 4.1.6 Densidade a granel .....  | 43        |
| 4.2 ADAPTAÇÃO DE BOMBA CALORIMÉTRICA PRECYZJA TIPO KL-5.....              | 43        |
| 4.3 PRODUÇÃO DOS BRIQUETES .....  | 50        |
| 4.3.1 Escolha e preparação das amostras .....                             | 50        |
| 4.3.2 Proporção dos resíduos .....  | 50        |
| 4.3.3 Compactação das amostras.....                                       | 51        |
| 4.4 DENSIDADE APARENTE DOS BRIQUETES.....                                 | 53        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                     | <b>54</b> |
| 5.1 TEOR DE UMIDADE .....   | 54        |
| 5.2 GRANULOMETRIA .....   | 56        |
| 5.3 TEOR DE VOLÁTEIS, CINZAS E CARBONO FIXO .....                         | 59        |
| 5.4 DENSIDADE A GRANEL .....  | 62        |
| 5.5 ANÁLISE DO CALORÍMETRO E PODER CALORÍFICO SUPERIOR DAS AMOSTRAS ..... | 64        |
| 5.4 AVALIAÇÃO DOS BRIQUETES PRODUZIDOS.....                               | 67        |
| 5.4.1 Ensaio de compactação .....   | 67        |
| 5.4.2 Densidade Aparente.....   | 70        |
| <b>6. CONCLUSÃO .....</b>   | <b>72</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>73</b> |
| ANEXO A – Manual e especificações do calorímetro Precyzja tipo KL-5 ..... | 82        |
| ANEXO B – Linhas de comando do arduino .....                              | 90        |

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de combustíveis fósseis nos processos de produção industriais e de consumo ainda é predominante no cenário global. No entanto, as questões ambientais relacionadas ao seu uso, como as mudanças climáticas e os níveis de poluição, em conjunção com os preços crescentes e esgotamento de suas reservas, incorrem no aumento do interesse pela utilização de fontes de energia renováveis (DIAS et. al, 2012).

Neste contexto, o Brasil apresenta vantagem por estar entre os países que possuem as maiores participações de fontes renováveis de energia na matriz energética, com cerca de 39,4 % no ano de 2014 (BRASIL, 2015). Vale ressaltar que este fato é de suma importância para o país, visto que auxilia na obtenção de um padrão energético sustentável associado ao potencial de desenvolvimento do país.

Dentre as fontes renováveis de energia, a biomassa é uma das mais importantes e disponíveis no território brasileiro. Ela é caracterizada como uma forma indireta da energia solar, visto que as plantas ao realizarem o processo de fotossíntese absorvem essa energia, transformando-a em energia química, que pode então ser convertida nos mais diferentes resultantes energéticos (ANEEL, 2005; REIS, FADIGAS E CARVALHO, 2005).

Os resíduos orgânicos podem ser considerados como forma processual principal para geração de energia a partir da biomassa (CORTEZ, LORA E AYARZA, 2008), podendo ser de origem animal, vegetal, industrial e florestal.

Resíduos lignocelulósicos, tais como agrícolas e provenientes do beneficiamento da madeira, se enquadram nesta classificação e, quando reaproveitados para a geração de energia, impedem o assoreamento de mananciais, diminuem a poluição do ar associada a queima inadequada e geração de gases estufa, bem como reduzem extensos espaços industriais ocupados (PROTASIO et. al, 2011).

A briquetagem é uma técnica que reaproveita os resíduos agrícolas de forma a compacta-los em determinadas pressões, transformando-os em aglomerados sólidos

denominados briquetes, que possuem potencial energético maior que a biomassa in natura (ALVES JUNIOR, 2003), em decorrência do aumento da densidade.

Estes biocombustíveis por apresentarem um ótimo poder calorífico e umidade controlada, podem substituir o uso da lenha em processos de queima para geração de calor e energia, minimizando assim, a degradação de florestas.

Neste sentido, esta pesquisa buscou caracterizar resíduos agrícolas e do processamento da madeira, bem como propor a fabricação de briquetes que reduzam impactos sobre o meio ambiente a fim produzir energia renovável descentralizada e propor soluções energéticas locais.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo geral a avaliação dos potenciais para produção de energia a partir do uso de resíduos agrícolas em conjunção com resíduo madeireiro na forma de briquetes.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

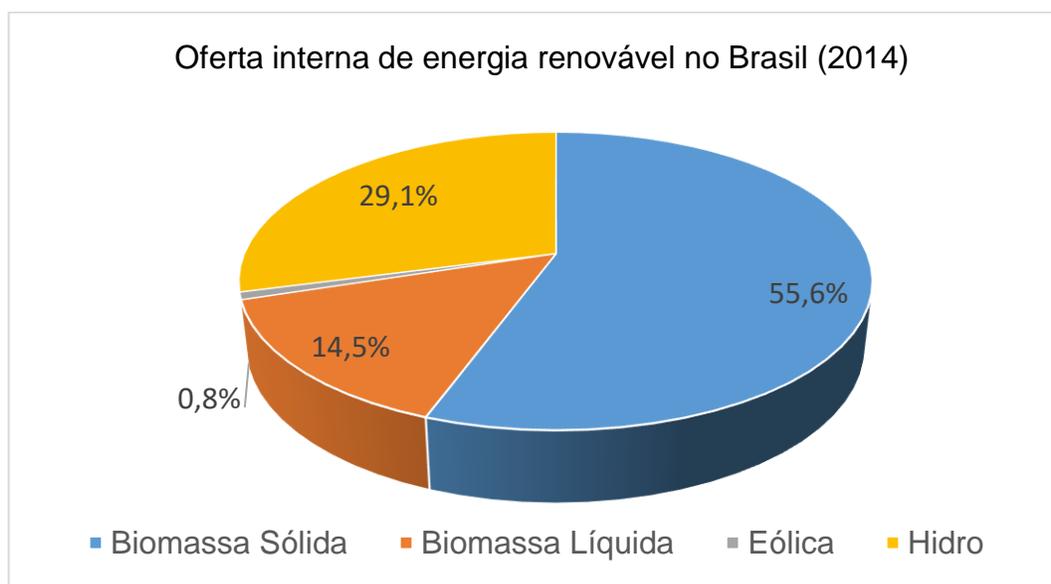
Este trabalho teve como objetivos específicos:

- Caracterizar os resíduos agrícolas e madeireiros;
- Adaptar bomba calorimétrica para a determinação do poder calorífico em estudos posteriores;
- Avaliar as variáveis de pressão e temperatura para compactação de resíduos agrícolas na produção do briquete;
- Avaliar a qualidade dos briquetes produzidos por meio da densidade aparente.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA

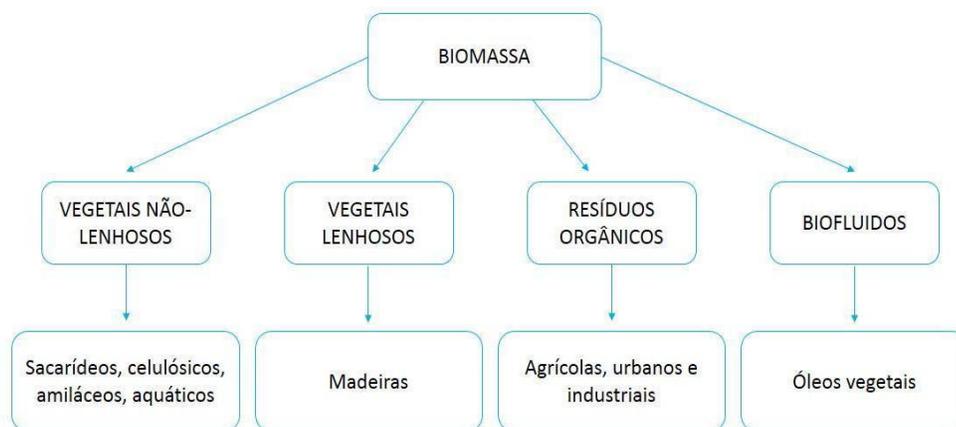
Dentro do cenário nacional, a biomassa constitui-se como uma fonte de energia renovável muito importante para a matriz energética, visto que a biomassa sólida representava 55,6% da oferta interna de energia renovável no Brasil e a líquida 14,5% no ano de 2014 (vide Figura 1). Estes valores correspondem respectivamente a 21,9% e 5,7% dentre todas as fontes utilizadas (BRASIL, 2015).



**Figura 1- Oferta interna de energia renovável no Brasil em 2014**  
Fonte: Brasil (2015)  
Elaboração própria

O termo biomassa pode ser definido como todo o tipo de matéria orgânica que pode ser transformada em energia elétrica, mecânica ou térmica (ANEEL, 2008). O

Ministério de Minas e Energia (1982 apud CORTEZ, LORA E AYARZA, 2008), classificou-a conforme a Figura 2. Em síntese ela é dividida em vegetais não-lenhosos e lenhosos, resíduos orgânicos e os biofluidos.



**Figura 2- Fontes de Biomassa**

**Fonte: Adaptado de Ministério de Minas e Energia (1982 apud CORTEZ, LORA E AYARZA, 2008)  
Elaboração Própria**

A biomassa é responsável por gerar os biocombustíveis que, segundo sua forma, podem ser encontrados como sólidos, líquidos ou gases (REIS, FADIGAS E CARVALHO, 2005). Oliveira (2003) enfatiza que essa característica confere ampla flexibilidade desta fonte em relação as demais fontes renováveis, visto que pode-se escolher o formato físico (forma de estado) do combustível que se deseja obter.

No Quadro 1 verificam-se os tipos de biocombustíveis, que em síntese são classificados em: provenientes da biomassa oriunda das florestas nativas e plantadas; de resíduos sólidos e os biocombustíveis não-florestais provenientes da agroindústria (REIS, FADIGAS E CARVALHO, 2005).

**Quadro 1 - Classificação dos combustíveis provenientes da biomassa**

|   |   |
|---|---|
| <b>Biomassa oriunda das florestas nativas e plantadas</b> | Lenha, carvão vegetal, briquetes, cavacos e resíduos sólidos oriundos do aproveitamento não energético da madeira             |
|   | Biocombustíveis líquidos e gasosos, subprodutos dos processos de conversão da madeira. Exemplos: metanol, gás de gaseificação |
| <b>Biocombustíveis não-florestais (Agroindústria)</b>     | Combustíveis sólidos e líquidos produzidos a partir de plantações energéticas. Exemplos: álcool da cana-de-açúcar             |
|   | Resíduos de plantações energéticas. Exemplos: palhas, folhas e pontas da plantação de cana-de-açúcar                          |
|   | Resíduos da agroindústria. Exemplos: casca de arroz, palha de milho, etc.   |
|   | Subprodutos animais. Exemplos: esterco de aves, bovinos, suínos, caprinos que são transformados em biogás                     |
|   | Combustíveis obtidos do processamento de oleaginosas (biodiesel). Exemplos: Soja, milho, mamona, girassol, babaçu, etc.       |
| <b>Resíduos Urbanos</b>                                   | Resíduos sólidos, líquidos e gasosos provenientes do processamento dos esgotos e lixos industriais, comerciais e domésticos.  |

**Fonte: Adaptado de Reis, Fadigas e Carvalho (2005)**

Todavia, para haver uma efetiva conversão das fontes de biomassa em biocombustíveis, utilizam-se rotas de transformação como: conversão termoquímica, bioquímica ou processos físico-químicos (BRASIL, 2014). Segundo a Aneel (2008), essas técnicas podem ser:

- combustão da matéria-prima: queima direta do material para geração de calor;
- pirólise ou carbonização: técnica que extrai o material volátil da lenha ou outro combustível sólido transformando-os em carvão vegetal (com até o dobro da densidade energética inicial), alcatrão ou ácido piro-lenhoso, sob altas temperaturas e níveis baixíssimos de ar;
- gaseificação: utiliza de reações termoquímicas que transformam a biomassa sólida em gás;
- digestão anaeróbia: realiza a digestão da matéria orgânica proveniente de dejetos animais, na ausência de oxigênio, gerando biogás;
- fermentação: converte os açúcares de plantas em etanol pela ação de micro-organismos fermentadores;
- transesterificação: reação que transforma óleos vegetais em biodiesel ou glicerina utilizando para isso um produto obtido através de metanol ou etanol + uma base.

Além dessas técnicas citadas pela Aneel (2008), pode-se incluir também a técnica de compactação da biomassa em aglomerados de resíduos lignocelulósicos. Dentre eles, destacam-se os resíduos provenientes da produção agrícola e madeireira que são gerados em grandes quantidades e possuem um potencial energético que pode ser aproveitado.

### 3.2 RESÍDUOS AGRÍCOLAS

A atividade agrícola brasileira tem crescido nos últimos anos e isso se deve a melhoria das políticas públicas, na característica empreendedora dos produtores, bem como nos aumentos de produtividade (BRASIL, 2014a).

Diversas culturas movimentam o setor agrícola do país, onde dentre os cereais, oleaginosas e leguminosas destacam-se os cultivos da soja, milho, arroz e trigo (Tabela

1), que apresentaram as maiores porcentagens na produção brasileira em estudo realizado nos primeiros meses de 2016 (IBGE, 2016).

Essas culturas são denominadas como temporárias, pois seus períodos vegetativos são menores que um ano. Além disso, tais cultivos necessitam de replantio para se reproduzirem novamente (BRASIL, 2014).

**Tabela 1- Participação na produção brasileira de diversas culturas, nos primeiros meses de 2016**

| <b>Participação na produção</b> |       |
|---------------------------------|-------|
| Soja em grão                    | 48,2% |
| Milho em grão                   | 39,1% |
| Arroz em casca                  | 5,5%  |
| Trigo em grão                   | 2,9%  |
| Feijão em grão                  | 1,5%  |
| Algodão herbáceo                | 1,1%  |
| Sorgo em grão                   | 1,0%  |
| Aveia em grão                   | 0,2%  |
| Amendoim em casca               | 0,2%  |
| Cevada em grão                  | 0,1%  |
| Girassol em grão                | 0,1%  |

**Fonte: IBGE (2016)  
Elaboração Própria**

Como o ciclo dessas plantas são curtos, a cada colheita, limpeza e processamento delas há uma grande geração de resíduos. Estes resíduos são constituídos basicamente de palha, folhas e caules (CORTEZ, LORA E AYARZA, 2008) e podem ser reaproveitados tanto na adubação e enriquecimento do solo como na geração de energia.

A geração dos resíduos provenientes das principais culturas brasileiras no ano de 2010 está disposta na Tabela 2 (BRASIL, 2014). Nela nota-se uma maior geração destes materiais em culturas que também apresentam maiores produções no Brasil, tais como milho, soja e trigo.

**Tabela 2- Produção de resíduos das principais culturas brasileiras em 2010, com exceção da cana-de-açúcar**

| <b>Produção de resíduos 2010 (Mt/ano)</b> |     |
|---|-----|
| Palha de Milho                            | 101 |
| Palha de Soja                             | 94  |
| Palha de Trigo                            | 17  |
| Ramas de Mandioca                         | 16  |
| Palha de Arroz                            | 14  |
| Palha de Feijão                           | 4   |
| Bagaço de laranja                         | 2   |
| Casca de arroz                            | 2   |
| Resíduos de Algodão                       | 1   |

**Fonte: BRASIL (2014)**  
**Elaboração própria**

Assim, considerando-se as três culturas que possuem maior produção e geração de resíduos no Brasil, algumas informações adicionais podem ser apresentadas:

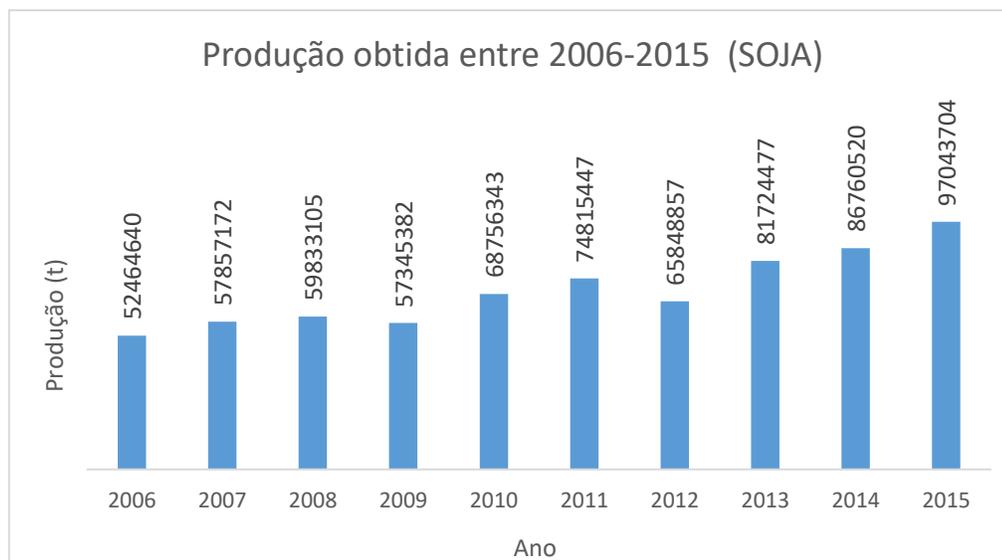
### 3.2.1 Soja

A soja é uma leguminosa que não possui muita importância para o homem na forma “in natura”, seu valor se dá na utilização como matéria-prima de óleos, rações

animais e farelo ou tortas obtidas como subprodutos do óleo extraído (PUZZI e ANDRADE, 2000).

Quanto ao mercado desta leguminosa, a Companhia Nacional de Abastecimento-CONAB (2014) cita que ele é liderado por quatro países: EUA, Brasil e Argentina (produção) e a China (principal compradora).

No que se refere a produção, a Figura 3 expõe este índice entre os anos de 2006 e 2015, segundo dados do IBGE (2016). Observa-se que dos anos elencados, 2015 apresentou a maior produção dentre os demais, com um montante de 97.043.704 toneladas.

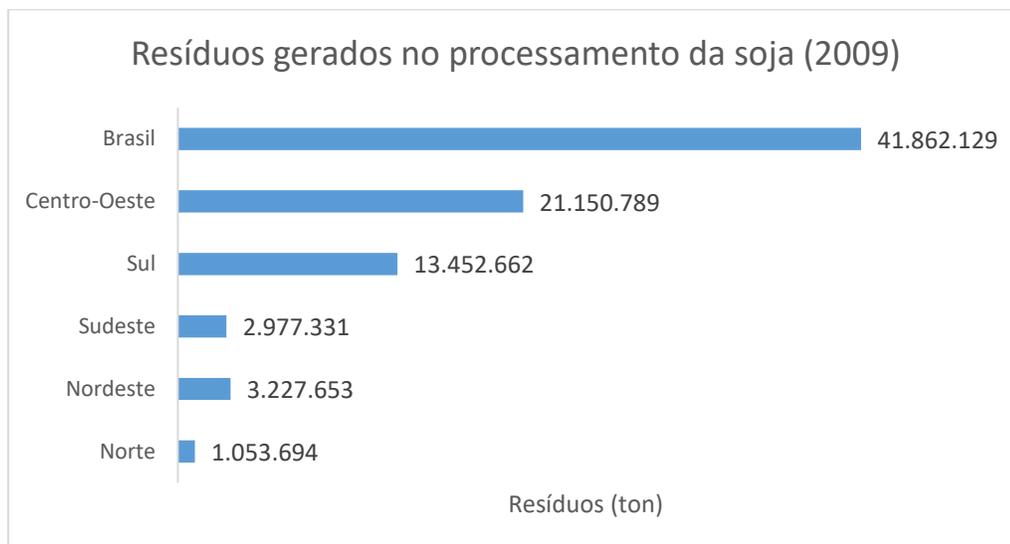


**Figura 3- Produção do cultivo de soja entre os anos 2006-2015**

**Fonte: IBGE (2016)**

**Elaboração Própria**

A Figura 4, por sua vez, apresenta a estimativa de resíduos provenientes desse cultivo para Brasil e grandes regiões, referente ao ano de 2009 (IPEA, 2012). Nela pode-se observar que das 41.862.129 toneladas de resíduos gerados no Brasil, 21.150.789 toneladas são provenientes da região Centro-Oeste.



**Figura 4- Resíduos gerados no processamento da Soja no ano de 2009**  
**Fonte: Ipea (2012)**  
**Elaboração Própria**

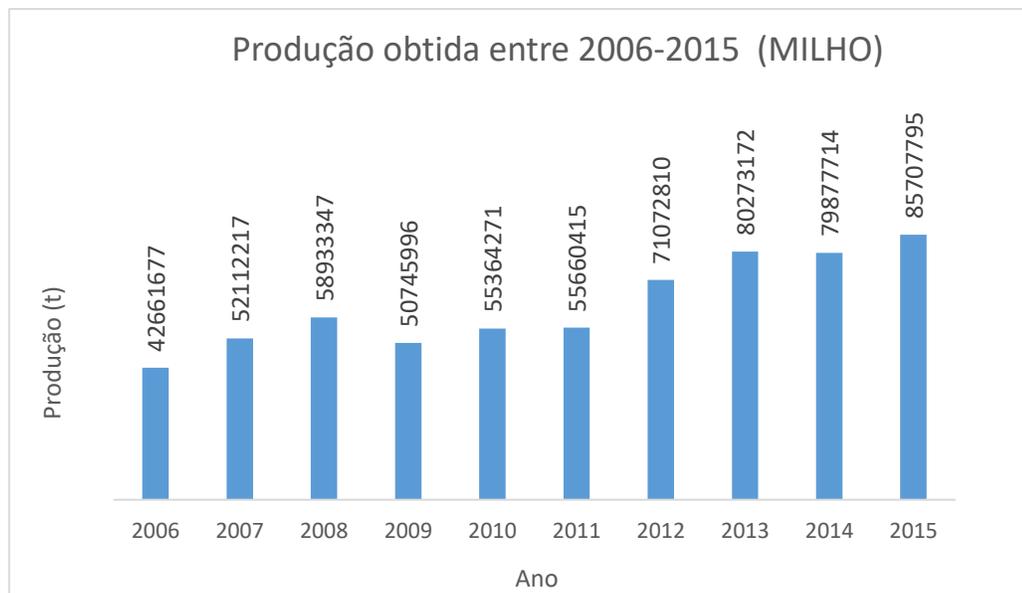
Quanto à composição, os resíduos provenientes do cultivo de soja são basicamente constituídos de palha (NOGUEIRA E LORA, 2002 apud BRASIL, 2014). Segundo Bose e Martins Filho (1984, apud PAULA, 2010) a palhada chega a atingir de 12 a 15% o peso dos grãos.

### 3.2.2 Milho

A cultura do milho possui grande importância em vários setores agropecuários que vai desde a sua utilização na alimentação animal, como na produção de biocombustíveis (CONAB, 2014).

Este grão pode ser plantado em qualquer solo, clima ou altura do mundo, sendo que sua produtividade oscilará de acordo com a fertilidade do solo e o gerenciamento das colheitas (BRASIL, 2014).

A produção para este cultivo pode ser verificada na Figura 5 (IBGE, 2016). Nela, pode-se notar um montante de 85.707.795 toneladas no ano de 2015, a maior dentre os anos elencados.

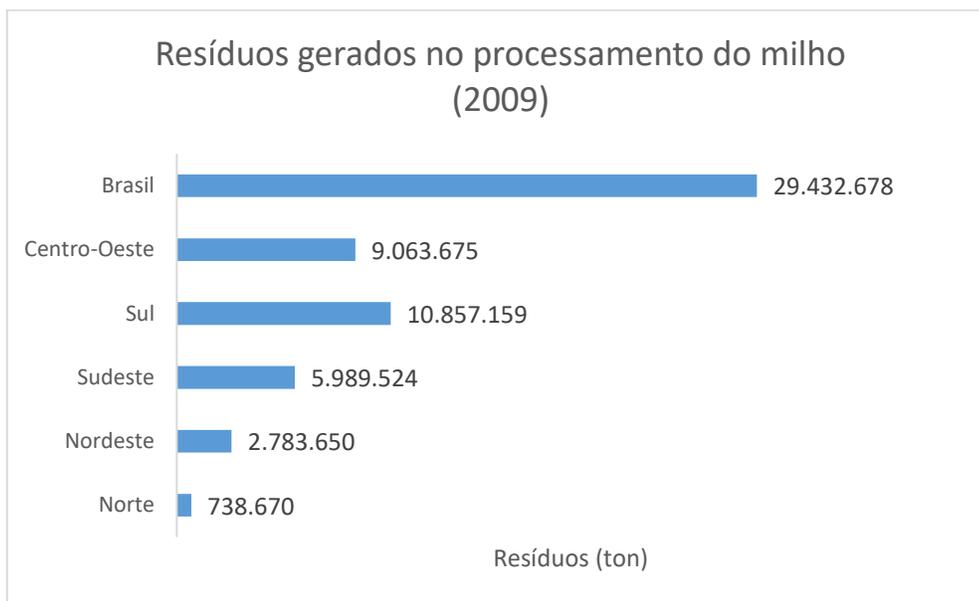


**Figura 5- Produção do cultivo do milho entre os anos 2006-2015**  
**Fonte: IBGE (2016)**  
**Elaboração Própria**

Os resíduos provenientes dessa cultura no campo são constituídos por caules, folhas (denominadas palha do milho) e na indústria, por sabugos. Estima-se que exista uma geração entre 2,2 e 2,7 toneladas de talos e folhas, bem como entre 0,3 e 0,9 toneladas de sabugos, por tonelada de milho colhido (DIAS et al., 2012).

A produção em toneladas dos resíduos provenientes do processamento do milho no ano de 2009 estão presentes na Figura 6. Como pode ser observado, o Brasil

apresentou 29.432.678 toneladas de resíduos neste ano, onde deste valor 10.857.159 toneladas é proveniente da região Sul do país.

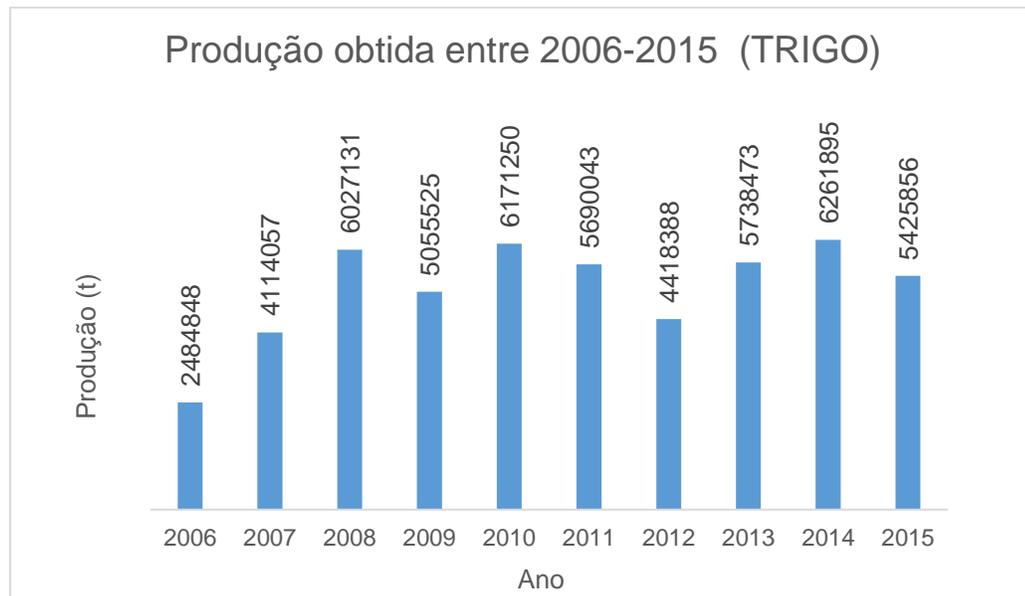


**Figura 6- Resíduos gerados no processamento do milho no ano de 2009**  
Fonte: Ipea (2012)  
Elaboração Própria

### 3.2.3 Trigo

O trigo é um cereal que é muito consumido ao redor do mundo. Quando não atinge uma qualidade ideal para consumo humano, pode ser utilizado na produção de ração animal. Quanto ao ciclo deste cultivo, ele é caracterizado como anual, tendo ocorrência nas estações da primavera e inverno (BRASIL, 2014).

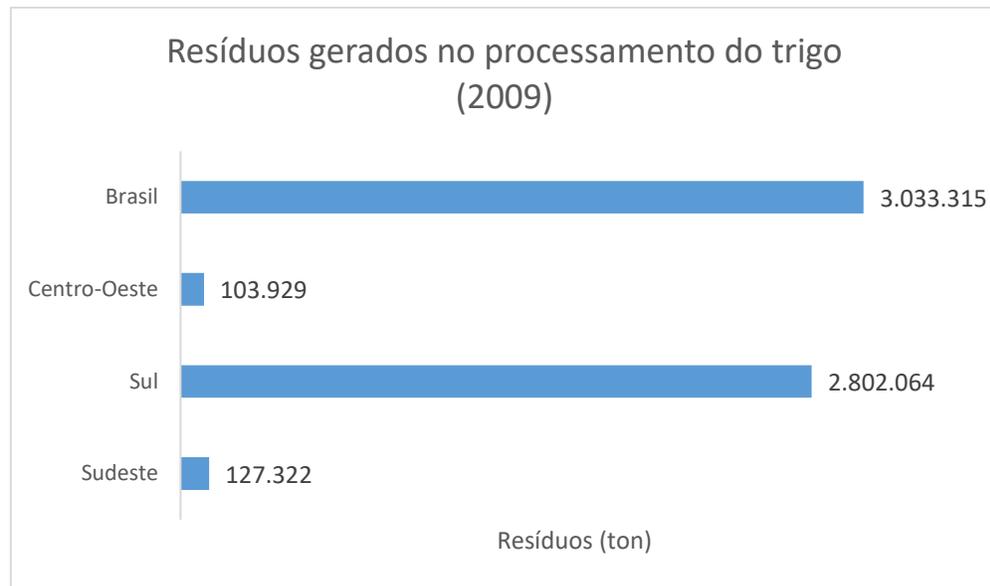
Na Figura 7, pode-se verificar sua produção no Brasil ao longo dos anos de 2006 a 2015 (IBGE, 2016). Nota-se que a maior produção ocorreu no ano de 2014, com um montante de 6.261.895 de toneladas.



**Figura 7- Produção do cultivo do trigo entre os anos 2006-2015**  
**Fonte: IBGE (2016)**  
**Elaboração Própria**

Os resíduos gerados no processamento da cultura do trigo são compostos pela palha deste grão. Esta palha, segundo Nogueira e Lora (2002, apud BRASIL, 2014) possui uma produção entre 4,5 e 6,5 toneladas de biomassa por hectare.

A produção de resíduos deste cultivar para o ano de 2009 está disposta na Figura 8 (IPEA, 2012). Dias et al. (2012) citam que a cultura deste grão está fortemente ligada à região Sul do Brasil, prova disto está na alta geração de resíduos nesta região. Destaca-se o estado do Paraná, que gerou 1.489.666 toneladas em 2009, o que corresponde a 49,1 % de todos os resíduos gerados no Brasil.



**Figura 8- Resíduos gerados no processamento do trigo no ano de 2009**

**Fonte: Ipea (2012)**

**Elaboração Própria**

### 3.3 RESÍDUOS DA MADEIRA

O setor florestal é responsável por considerável parcela da economia brasileira, gerando empregos e renda para os brasileiros, além de fornecer produtos para exportação e consumo interno (IPEA, 2012).

A madeira, que é o principal produto deste setor, é um material orgânico de origem vegetal amplamente utilizado no mundo, seja na construção civil ou em indústrias para fabricação de móveis ou sub-produtos da madeira, como na geração de energia dentro dos mais diversos processos.

Quanto as formas e o montante de produção deste material, obteve-se 122.159.595 m<sup>3</sup> de madeira na forma de tora (onde 87,5% corresponde a florestas cultivadas e 12,5% de vegetações nativas), 65.345.680 m<sup>3</sup> na silvicultura e 41.565.728 m<sup>3</sup> para outros fins (construção civil e naval, fabricação de móveis, etc), no ano de 2009 (IPEA, 2012).

Nos processos de corte, colheita e processamento da madeira em cada setor produtivo citado, há uma geração de resíduos em quantidade e características diferentes. Segundo Quirino (2003), a heterogeneidade destes resíduos se deve às diferentes granulometrias e formas em que eles se apresentam.

O Ipea (2012) dividiu estes resíduos em três categorias: os provenientes da colheita florestal; da produção de papel e celulose e do processamento mecânico da madeira.

A geração de resíduos no Brasil provenientes do setor de papel de celulose foi estimada em 10.916.640 toneladas, no ano de 2010. Os provenientes da colheita apresentaram um montante de 34.795.898,44 m<sup>3</sup> e o processamento mecânico 50.778.566,33 m<sup>3</sup>, em 2009 (IPEA, 2012). O processamento mecânico apresenta a maior geração de resíduos dentre os setores.

Estes materiais são constituídos basicamente por serragem que, segundo Teixeira (2005) são provenientes da atividade de serras e máquinas que desbastam a madeira. Ainda de acordo com o autor, cada tipo de aparelho forma um tipo de material diferente que são denominados como: serragem fina (pó de serra de diferentes granulometrias) e serragem grossa (lascas, flocos, cavacos e cepilho).

O cepilho, que também é conhecido por maravalha, é um tipo de serragem grossa que segundo Fontes (1994) e IBDF/DPq – LPF (1998) citados por IPEA (2012) é gerado em instalações de serraria/beneficiamento e beneficiadoras, podendo chegar a 20% do total da matéria-prima em indústrias beneficiadoras.

### 3.4 BRIQUETAGEM

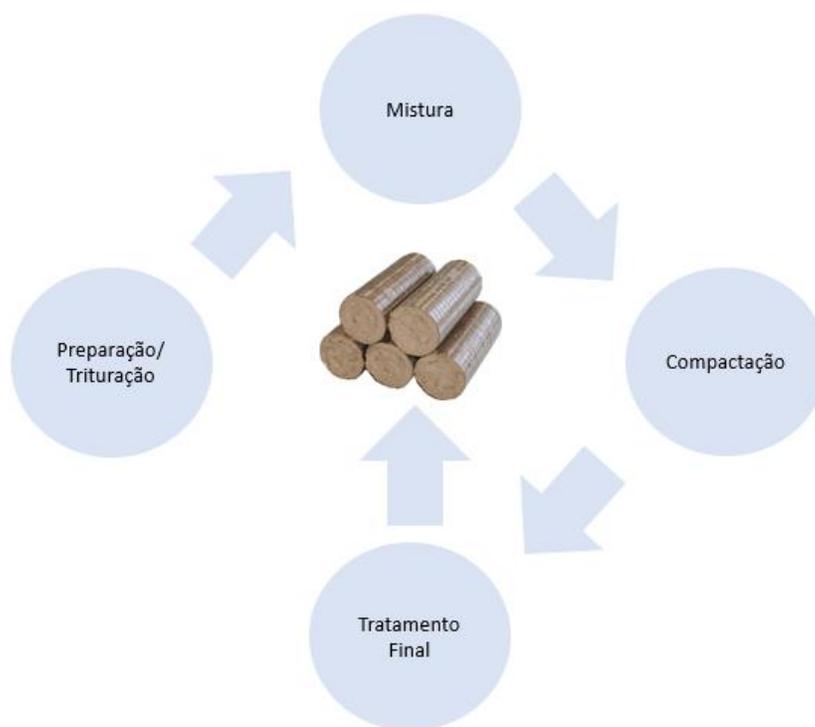
#### 3.4.1 Definição e processo

Os resíduos agrícolas bem como os provenientes do processamento da madeira podem ser reaproveitados energeticamente por meio do processo de briquetagem. De

acordo com Quirino e Brito (1991) o processo em questão é uma forma de concentrar a energia disponível na biomassa que, quando compactada gera aglomerados sólidos denominados como briquete.

Este material possui alta densidade e uniformidade e pode ser utilizado como combustível já que se for considerada a densidade a granel e poder calorífico da matéria-prima, o briquete pode apresentar ao menos cinco vezes mais energia do que o material utilizado para sua produção (DEEPAK E JNANESH, 2013; QUIRINO E BRITO, 1991).

De acordo com Rendeiro (2006 apud ILHA FILHO, HALASZ E OHNUMA JUNIOR, 2011), o processo de produção dos briquetes consiste em quatro etapas básicas conforme pode ser visto na Figura 9.



**Figura 9- Processo de fabricação de briquetes  
Elaboração Própria**

Na primeira etapa é feita a preparação da matéria-prima, por meio da correção granulométrica e do teor de umidade. Na segunda, misturam-se aglomerantes caso haja necessidade, visto que alguns materiais que possuem consideráveis quantidades de lignina, muitas vezes não necessitam da adição de aglutinante. Na próxima etapa ocorre a compactação do material, que pode ocorrer a baixas pressões (com adição de aglutinante) ou a altas pressões (sem adição de aglutinante). Por fim, realiza-se o tratamento final do briquete por meio do desmolde, secagem, resfriamento, e embalagem do mesmo (RENDEIRO, 2006 apud ILHA FILHO, HALASZ e OHNUMA JUNIOR, 2011).

### 3.4.2 Características da matéria-prima, briquete e processo produtivo

Alguns fatores são muito importantes para a caracterização da biomassa a ser compactada; avaliar a qualidade do combustível produzido e como proceder com a briquetagem, tais como: as dimensões padrões dos briquetes; granulometria das partículas; densidade, poder calorífico e umidade tanto do briquete como resíduos; teores de cinzas, carbono fixo, volátil; além da ação de aglutinantes, pressão e temperatura a serem aplicados no processo produtivo.

#### 3.4.2.1 Dimensão

De acordo com Dias et al. (2012) as dimensões do briquete variam de acordo com a solicitação do cliente ou por determinações internacionais. De forma geral o diâmetro do biocombustível varia entre 50 e 100 mm e o comprimento de 100 a 400mm (DIAS ET. AL, 2012; GENTIL, 2008), no entanto, vale ressaltar que no Brasil não existem normas quanto ao tamanho padrão para briquetes.

### 3.4.2.2 Granulometria

De acordo com Eriksson e Prior (1990) a granulometria/tamanho da partícula da matéria-prima a ser utilizada para a fabricação do briquete é um ponto fundamental para a qualidade do produto. Dias et al. (2012) indicam que quanto menor a partícula, menor a porosidade, gerando em consequência um combustível com maior densidade.

Todavia, os autores enfatizam que porosidades muito baixas promovem menor quantidade de espaços vazios necessários para que os gases difundam, prejudicando assim a queima do combustível. Caso as partículas sejam muito grandes pode haver o comprometimento de alguns equipamentos/maquinários, visto que podem causar entupimento.

O ideal é que, com exceção de materiais mais finos, as partículas estejam entre 6-8mm (DIAS et. al, 2012; MANDE, 2007). Para máquinas maiores pode-se usar matéria-prima com partículas entre 8-10mm (ERIKSSON E PRIOR, 1990).

### 3.4.2.3 Densidade

Segundo Dias et al. (2012) a densidade é um parâmetro importante pois quanto maior ela for, maior será a relação entre energia e volume do combustível.

Sendo assim, combustíveis com alta densidade são preferíveis em relação a transporte, armazenamento e manuseio. De forma geral, a densidade a granel dos briquetes raramente excede  $500 \text{ kg.m}^{-3}$  (DIAS et al., 2012).

### 3.4.2.4 Teor de umidade

O teor de umidade indica a quantidade de água presente no material estudado. Para Hahn (2004 apud GARCIA, CARASCHI E VENTORIM, 2012) altos índices deste

parâmetro podem ocasionar baixo poder calorífico, ignição e durabilidade; causar perdas energéticas, além de reduzir o período de estocagem, bem como provocar explosões devida à formação de vapores (FILIPPETTO, 2012).

Alves Júnior (2003) indica que a faixa ideal de umidade para a matéria-prima utilizada no processo de briquetagem está entre 8 e 15%. Já para os briquetes ela geralmente está entre 8-12%, conforme Quirino (2003).

#### 3.4.2.5 Teor de material volátil

As matérias voláteis fazem parte da mistura de substâncias no estado gasoso que são expelidas por meio do aquecimento do material. Em síntese, elas estão relacionadas ao comportamento do combustível em meio à sua decomposição (BORSATO, GALÃO E MOREIRA, 2009; HAHN, 2004 apud GARCIA, CARASCHI E VENTORIM, 2012).

De acordo com Vieira (2012) um alto teor de voláteis na biomassa é preferível, visto que ele promove uma maior facilidade de queima do material.

#### 3.4.2.6 Teor de cinzas

Teor de cinzas é a quantidade de material residual sólido após a queima completa do briquete, dada em porcentagem. Ela engloba os compostos minerais do combustível que advém da fossilização e sais minerais presentes nos vegetais (DIAS et al., 2012; BORSATO, GALÃO E MOREIRA, 2009).

Este índice deve ser baixo nos combustíveis provenientes da biomassa visto que, segundo Hahn (2004 apud CARASCHI, GARCIA E VENTORIM, 2012) um alto teor de

cinzas gera resíduos, inviabiliza o processo, aumenta os custos do combustível além de elevar a necessidade de manutenção.

#### 3.4.2.7 Teor de carbono fixo

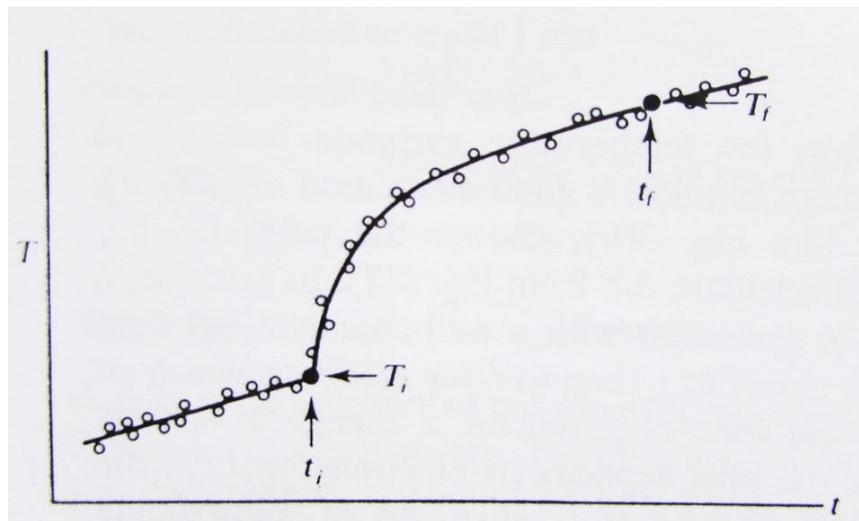
Borsato, Galão e Moreira (2009) definem o teor de carbono fixo como todo carbono que pode sofrer combustão. Segundo NBR 8112 ABNT (1986), ele é um parâmetro obtido de forma indireta por meio da quantidade do teor de cinzas e voláteis do material analisado. Ele é um índice que faz parte da análise imediata da biomassa juntamente com o teor de cinzas e voláteis, sendo a porcentagem do material que queima no estado sólido (BRITO E BARRICHELO, 1978).

#### 3.4.2.8 Poder calorífico

Para Bezzon (1994), o poder calorífico expressa no processo de combustão a liberação de dada quantidade de energia por unidade de massa, sob dadas condições. Este parâmetro pode ser definido como superior e inferior.

O superior pode ser determinado teoricamente por meio da composição elementar do material (PAULA, 2010) ou por meio de bomba calorimétrica, de modo que a água usada neste processo esteja no estado líquido (ABNT, 1984).

Para determinação do poder calorífico superior por bomba calorimétrica, dada quantidade de material previamente seco e triturado (geralmente 1-2g) é queimado em ambiente fechado com oxigênio, sendo este ambiente mergulhado em água que possui sua temperatura monitorada (RENDEIRO et. al, 2008). Um típico calorímetro dará como resposta uma curva semelhante a apresentada na Figura 10, de acordo com Shoemaker, Garland e Nibler (1982).



**Figura 10 - Curva de temperatura X tempo**  
**Fonte: Shoemaker, Garland e Nibler (1982)**

Quanto ao poder calorífico inferior ele é calculado por meio do superior, considerando a energia na forma de calor utilizada para condensar a água presente na biomassa (BEZZON, 1994).

#### 3.4.2.9 Aglutinantes

Os briquetes podem ser fabricados com ou sem a ação de aglutinante. Barros (2013) indica que o emprego do aglutinante é importante quando o material não possui resistência à compressão e impacto, depois da compactação.

De acordo com o autor, muitos resíduos lignocelulósicos não necessitam deste agente visto que possuem lignina que age como um aglutinante natural.

Para Dias et. al (2012), existem mais de 50 ligantes orgânicos e inorgânicos utilizados no processo de compactação, sendo que no Brasil os mais utilizados são o amido de milho, alcatrão vegetal, melação de cana-de-açúcar, fécula de mandioca e resinas sintéticas.

#### 3.4.2.10 Pressão de compactação

A pressão a ser utilizada no processo de compactação é de extrema importância para que se obtenha um material de qualidade e durabilidade.

Este processo pode ser realizado em baixas pressões (até 5 MPa), intermediárias (5-100 MPa) e altas (acima de 100 MPa), dependendo do tipo de material (ERIKSSON E PRIOR, 1990).

Dias et al. (2012) indicam que altas pressões favorecem os aglutinantes naturais como o amido e lignina, colaborando com a coesão das partículas.

Para avaliar o efeito dos ligantes naturais, ensaios devem ser realizados em laboratório, onde haverá a aplicação de pressões sobre a biomassa em máquina de ensaio universal ou prensa hidráulica, por meio de molde e êmbolo (DIAS et al., 2012).

#### 3.4.2.11 Temperatura

De acordo com Filippetto (2008) a temperatura utilizada no processo de compactação da biomassa possui uma função muito relevante no que diz respeito às propriedades finais do combustível bem como no consumo energético durante o processo.

Mande (2007), aponta que sob altas temperaturas, a umidade presente na biomassa é transformada em vapor, que hidrolisa a hemicelulose e lignina presente no material em carboidratos de baixo peso molecular, produtos de lignina e polímeros de açúcar. No entanto, o autor indica que a temperatura deve ser mantida em valores inferiores a 300°C, visto que acima disso a biomassa começa a sofrer processo de pirólise.

Dias et. al (2012) enfatizam que com o aquecimento é possível obter maior estabilidade em menores dimensões, quando comparados à outros materiais de mesma composição só que compactados sem a interferência da temperatura. O autor indica ainda que no processo de pré-tratamento da matéria-prima a temperatura máxima deve se restringir a faixa de 250 a 300°C.

### 3.5 VANTAGENS E UTILIZAÇÃO DO BIOCOMBUSTÍVEL

A utilização dos briquetes possui diversas vantagens tais como o tamanho que facilita o transporte, estoque e queima uniforme de qualidade; a maior regularidade térmica; redução de impactos ambientais; colabora na conservação de florestas; possui matéria-prima disponível em várias regiões; e eliminam resíduos (BHATTACHARYA, 2004 apud SILVA, 2007; PAULA, 2010).

Além destas, existe outra vantagem que é considerada muito importante: o briquete é um substituto direto da lenha. No Quadro 2 pode-se observar a comparação entre ambos combustíveis, que vão desde o melhor poder calorífico do briquete até sua ampla disponibilidade, em relação à lenha.

**Quadro 2- Vantagens do briquete sobre a lenha**

| <b>Característica</b>               | <b>Lenha</b>   | <b>Briquete</b>  |
|-------------------------------------|--|--|
| Poder Calorífico                    | Menor  | Maior  |
| Umidade                             | Alta   | Baixa  |
| Rendimento                          | Irregularidade térmica, baixa uniformidade e temperatura de chama                      | Regularidade térmica, alta uniformidade e temperatura de chama |
| Resíduos de cinzas, fuligem, fumaça | Alto volume  | Baixo volume   |
| Manuseio, mão de obra               | Dificuldade por não existir uniformidade, trabalhoso                                   | Facilidade por ter forma e embalagem padronizada               |
| Espaço físico armazenamento         | Ocupação de grande espaço  | Ocupa pequeno espaço   |
| Higiene, Limpeza                    | Sujeira, umidade, bichos, contaminação   | Limpo, seco, sem bichos e contaminação                         |
| Licença ambiental                   | Necessidade de licenciamento e guia de transporte ATPF/RET do IBAMA, com taxas a pagar | Dispensado de guia de transporte e fiscalização, sem custos    |
| Comercialização                     | Por m <sup>3</sup> (impreciso)   | Por peso (exato)   |
| Disponibilidade                     | Irregular, inseguro  | Regular, constante   |

**Fonte: Adaptado de Biofogo (2008)**

Quanto à utilização, os briquetes possuem ampla aplicação em seguimentos industriais e comerciais. De acordo com Fernandes et al (2012), estes biocombustíveis são utilizados em hotéis que possuem sistema de aquecimento de água, lavanderias internas, clubes que utilizam piscinas e saunas. No meio agrícola podem ser utilizados

em abatedouros, secadores de soja, milho e outros cereais e em torradores de café, farinha de milho e mandioca.

Já no ambiente urbano o material é aplicado em recauchutagens de pneus, tinturarias, padarias, pizzarias e em diversos segmentos que utilizam caldeiras no processo produtivo (FERNANDES et al., 2012).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do presente estudo utilizaram-se resíduos provenientes de uma agroindústria localizada no norte do estado do Paraná.

Os resíduos agrícolas são oriundos dos cultivos de soja, milho e trigo. Já o gerado no processamento da madeira e cepilho (maravalha), foi adquirido pela própria agroindústria.

Realizaram-se duas coletas seguindo as especificações da NBR 10007 (ABNT, 2004) que dispõe a amostragem de resíduos sólidos. Após amostragem, realizou-se a caracterização dos resíduos no Laboratório de Tecnologias de Conversão de Energia, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Londrina-PR.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

A caracterização dos resíduos foi feita a partir dos seguintes parâmetros:

#### 4.1.1 Teor de Umidade

O teor de umidade das amostras foi realizado em triplicata conforme metodologia proposta pela NBR 8112 (1986) da Associação Brasileira de normas técnicas (ABNT).

Primeiramente os cadinhos utilizados na análise foram dispostos em estufa à  $105^{\circ}\text{C} \pm 24\text{h}$ , sendo pesados após este período. Paralelamente selecionaram-se amostras representativas dos resíduos, por meio da metodologia de quarteamento, presente na NBR 10007 (ABNT, 2004).

As amostras foram dispostas nos cadinhos até que se completasse o conteúdo dos mesmos. Eles foram acondicionados em estufa à 105°C ± 48h e pesados depois de frios. A equação (1) foi utilizada para determinar o teor de umidade.

$$U = \left( \frac{m_0 - m_1}{m_0} \right) \times 100\% \quad (1)$$

Onde:

U= teor de umidade (%);

m<sub>0</sub>= massa inicial da amostra (g);

m<sub>1</sub>= massa final da amostra (g).

#### 4.1.2 Granulometria

Os resíduos provenientes do ensaio de umidade foram classificados quanto à granulometria no Laboratório de Solos da UTFPR em sete tipos de peneiras previamente pesadas, conforme Quadro 3.

**Quadro 3- Abertura das peneiras utilizadas no ensaio granulométrico**

| <b>MALHA</b> | <b>ABERTURA (mm)</b> |
|--------------|----------------------|
| 3/8 pol      | 9,52                 |
| 4            | 4,76                 |
| 10           | 2,00                 |
| 16           | 1,19                 |
| 30           | 0,59                 |
| 40           | 0,42                 |
| 100          | 0,149                |
| Base         | -                    |

Assim, o conteúdo dos cadinhos foi pesado em béqueres e adicionado ao conjunto de peneiras (Figura 11) utilizando-se uma vibração adequada para separação do material.



**Figura 11- Peneiras utilizadas no ensaio granulométrico**  
**Fonte: Própria**

Após cada ensaio realizou-se a pesagem das peneiras com o material retido, acondicionando seus respectivos conteúdos em copos descartáveis vedados com plástico filme.

#### 4.1.3 Teor de materiais voláteis

Para a determinação do teor de voláteis, os cadinhos foram previamente calcinados em forno mufla ( $T= 550^{\circ}\text{C} \pm 20\text{min}$ ) e pesados. Cerca de 1g dos resíduos isentos de umidade foram pesados com base na porcentagem granulométrica destes. Para isso, uma quantidade de material de cada copo do ensaio granulométrico foi pesada em balança de alta precisão e adicionada aos cadinhos calcinados.

O ensaio foi realizado em triplicata, conforme adaptação das normas NBR 8112 (ABNT, 1986) e D 1762 (ASTM, 2007), onde foi realizado um aquecimento por rampa, a fim de evitar a ignição das amostras.

O procedimento consistiu em introduzir em forno mufla previamente aquecido a  $150^{\circ}\text{C}$  os cadinhos com os resíduos. A cada 20 minutos, a temperatura do forno foi aumentada em  $50^{\circ}\text{C}$  até que alcançasse  $500^{\circ}\text{C}$ . As amostras permaneceram nesta condição por mais 20 minutos, onde após este período, foram dispostas em dessecador e pesadas. O teor de materiais voláteis foi determinado pela equação (2).

$$MV = \left( \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_0} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

MV= teor de voláteis (%);

$p_0$ = peso do cadinho seco (g);

$p_1$ = peso do cadinho + amostra inicial (g);

$p_2$ = peso do cadinho + amostra final (g).

#### 4.1.4 Teor de cinzas

Para determinação dos teores de cinzas utilizou-se os cadinhos provenientes do ensaio de material volátil. Eles foram dispostos em forno mufla a  $750^{\circ}\text{C} \pm 4$  horas. Após isto, as amostras foram dispostas em dessecador e pesadas. Para esta análise também foram adaptadas as especificações da NBR 8112 (ABNT, 1986) e D 1762 (ASTM, 2007). Este parâmetro foi obtido por meio da equação (3).

$$CZ = \left( \frac{p_3 - p_0}{p_1 - p_0} \right) \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

CZ= teor de cinza (%);

$p_0$ = peso do cadinho seco (g);

$p_1$ = peso do cadinho + amostra inicial (g);

$p_3$ = peso do cadinho + amostra final (g).

#### 4.1.5 Teor de Carbono fixo

O teor de Carbono Fixo foi obtido por meio da equação (4), considerando os teores de cinzas e voláteis adquiridos (ABNT, 1986).

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (4)$$

Onde:

CF= teor de carbono fixo (%);

CZ= teor de cinzas (%);

MV= teor de materiais voláteis (%).

#### 4.1.6 Densidade a granel

A densidade foi determinada conforme NBR 6922 (ABNT, 1981). Para isso as amostras foram adicionadas em recipiente de volume e massa conhecidos; em seguida realizou-se a pesagem do recipiente contendo a amostra. Este parâmetro foi definido por meio da equação (5):

$$d = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (5)$$

Onde:

$m_1$ = massa do recipiente vazio (kg);

$m_2$ = massa do recipiente cheio (kg);

$V$ = volume do recipiente ( $m^3$ );

$d$ = massa específica ( $kg.m^{-3}$ ).

## 4.2 ADAPTAÇÃO DE BOMBA CALORIMÉTRICA PRECYZJA TIPO KL-5

No presente trabalho realizou-se a adaptação de um calorímetro Precyzja tipo KL-5 (Figura 12a). Antes da sua modificação, as medidas de temperatura eram feitas por meio de dois termômetros de mercúrio, onde um era alocado dentro do vaso e o outro na camisa calorimétrica.

As leituras de temperatura dentro do vaso eram feitas de forma visual com o auxílio de uma lupa e da sinalização indicada por uma mesa de controle (Figura 12b). Esta mesa de controle emitia sinais sonoros bem como possuía lâmpadas que indicavam

as etapas das medições, ela também controlava o agitador mecânico (responsável por estabilizar a temperatura dentro do vaso), bem como era responsável por acionar a descarga elétrica que queimava o fio adicionado à amostra dentro da bomba calorimétrica.

Demais especificações e informações sobre o funcionamento do calorímetro estão especificadas de forma mais detalhada no ANEXO A.



**Figura 12- Calorímetro Precyzja tipo KL-5 antes das modificações, à esquerda (a); mesa de controle à direita (b)  
Fonte: Própria**

Mediante isso, as seguintes modificações foram feitas:

1. trocou-se o agitador mecânico por outro com voltagem de 24V;
2. realizou-se o revestimento da parte externa da camisa calorimétrica com manta de fibra de vidro a fim de isolar a mesma;
3. com o intuito de proteger o operador do calorímetro contra a ação das fibras que se soltam desta, adicionou-se uma bombona azul de polietileno ao redor da mesma, conforme Figura 13 e;
4. acoplou-se um banho-maria refrigerado com circulação ultratermostatizado da American Lab, com o intuito de controlar a temperatura dentro da camisa calorimétrica.



**Figura 13- Calorímetro depois das modificações**  
**Fonte: Própria**

A mesa de controle foi retirada e uma nova foi montada (Figura 14). Para isso acoplou-se uma fonte chaveada de alimentação 24V, 5A, 100W, bivolt sobre a caixa metálica utilizada para a montagem do novo controlador. Na caixa adicionou-se uma placa arduíno e o circuito de monitoramento de queima do filamento.

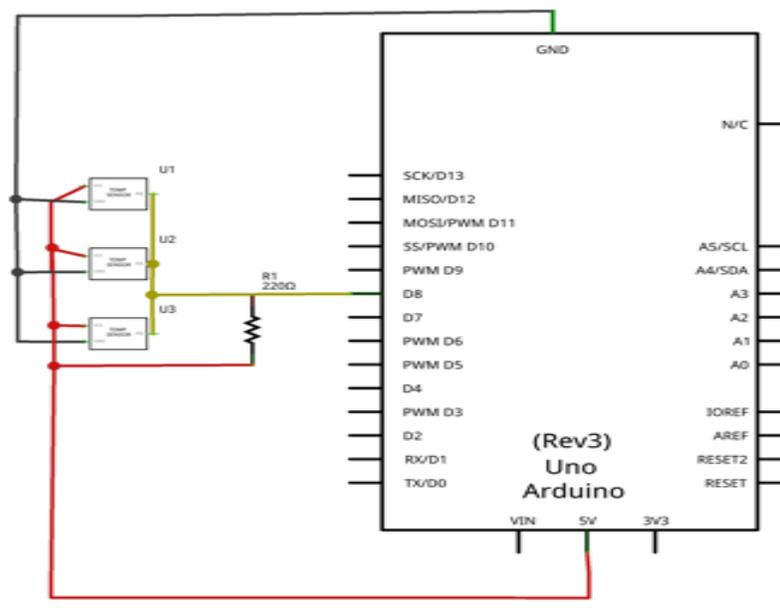


**Figura 14- Controlador do calorímetro montado**  
**Fonte: Própria**

Assim, o monitoramento da temperatura no vaso calorimétrico bem como na camisa foi realizado empregando sensores digitais de temperatura DS18B20 modelo 560, envelopado em aço inox, com amplitude de temperatura de  $-55$  a  $125^{\circ}\text{C}$ , fabricado pela Maxim Integrated Products (San José, CA, EUA).

O sistema de aquisição de dados de temperatura foi constituído por uma placa Arduino UNO REV 3 e a comunicação entre a rede de sensores de temperatura DS18B20 e a placa foi realizada por meio de uma das portas digitais. O valor do resistor de pull up foi  $2\text{ K}\Omega$ , devido ao baixo consumo unitário do sensor, cerca de 4 miliamperes (mA). A alimentação da rede composta por 3 sensores foi realizada através do regulador de tensão da placa Arduino.

A comunicação entre a placa Arduino e o sensor é realizada por meio do barramento 1-wire que possibilita aquisição no modo master/slave. Neste sistema de barramento, o pino digital 8 da placa Arduino (dispositivo master) identifica o sensor usando o código de 64 bits, permitindo aquisição de dados dos três sensores em rede por meio de um único cabo de comunicação (Figura 15).



**Figura 15- Diagrama esquemático das conexões dos sensores de temperatura DS18B20 a placa Arduino**

A escrita e compilação do algoritmo de coleta de dados foi realizada empregando o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) do Arduino, um software livre baseado em linguagem C++. As linhas de comando podem ser vistas no ANEXO B (ARDUINO, 2016).

O monitoramento do acionamento do sistema de ignição da bomba calorimétrica é realizado através de um circuito de detecção de malha aberta (Figura 16), onde a corrente de ignição do filamento flui através de dois diodos 1N5408G em paralelo. A queda de tensão provocada pela corrente que flui no diodo em polarização direta é responsável pelo acionamento de um transistor tip41C permitindo que exista corrente entre o emissor e coletor. Ligado em série foi adicionado um LED, que é acionado quando o filamento se rompe. Assim quando a corrente através do diodo é cessada o transistor é desligado, interrompendo a corrente entre o emissor e coletor, apagando o LED.

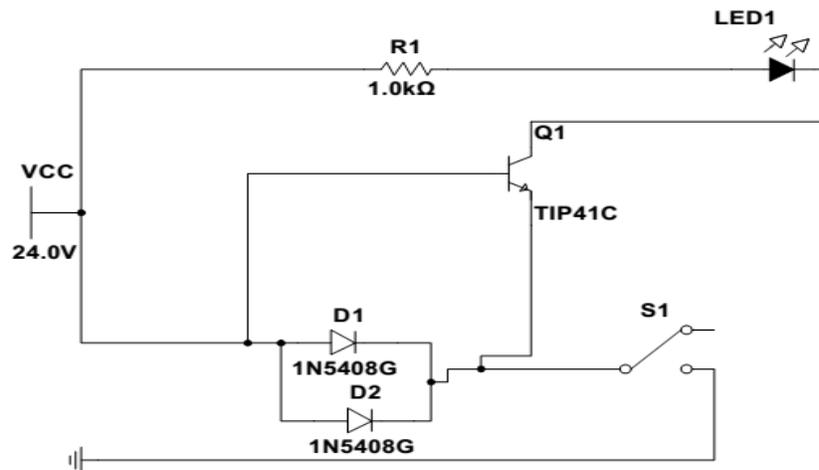


Figura 16- Diagrama esquemático do circuito de ignição do filamento

#### 4.2.1 Poder Calorífico Superior

O presente ensaio foi realizado por meio das instruções contidas no manual do calorímetro (ANEXO A) bem como normas FprEN 14918 (2009) e NBR 8633 (ABNT, 1984). Vale salientar que tal experimento foi realizado sem repetições, com o intuito

apenas de mostrar que após as modificações, o calorímetro pode ser utilizado em ensaios de poder calorífico.

Para tanto, utilizou-se ácido benzoico para calibração do equipamento. O procedimento consistiu em adicionar dada massa de ácido benzoico pelletizada juntamente com fio de ignição na bomba calorimétrica, sob  $P_{O_2} = 10$  bar, com tempo de ensaio total de 20 min, considerando os cinco primeiros minutos para estabilização da temperatura no meio.

Considerando para este composto  $\Delta U = -3228,29 \pm 0,24$  kJ/mol (DARTMOUTH COLLEGE, 2010) sua quantidade de mols e a  $\Delta T$  do ensaio, calculou-se um fator de correção dado pela seguinte expressão (6):

$$f_c = \frac{\Delta U}{\Delta T} \quad (6)$$

Onde:

$f_c$  = fator de correção (kJ/K);

$\Delta U$  = variação de energia interna (kJ/mol);

$\Delta T$  = variação de temperatura no ensaio (K).

Vale ressaltar que após o ensaio, a água de lavagem da bomba foi quantificada quanto à formação de  $HNO_3$ , a partir de uma titulação, utilizando-se solução de NaOH  $\approx 0,1M$  e fenolftaleína como indicador.

Quanto aos ensaios realizados com os resíduos trigo NV e DC, o poder calorífico foi calculado pela seguinte expressão (7):

$$PCS = \frac{\Delta T \times f_c}{m} \quad (7)$$

Onde:

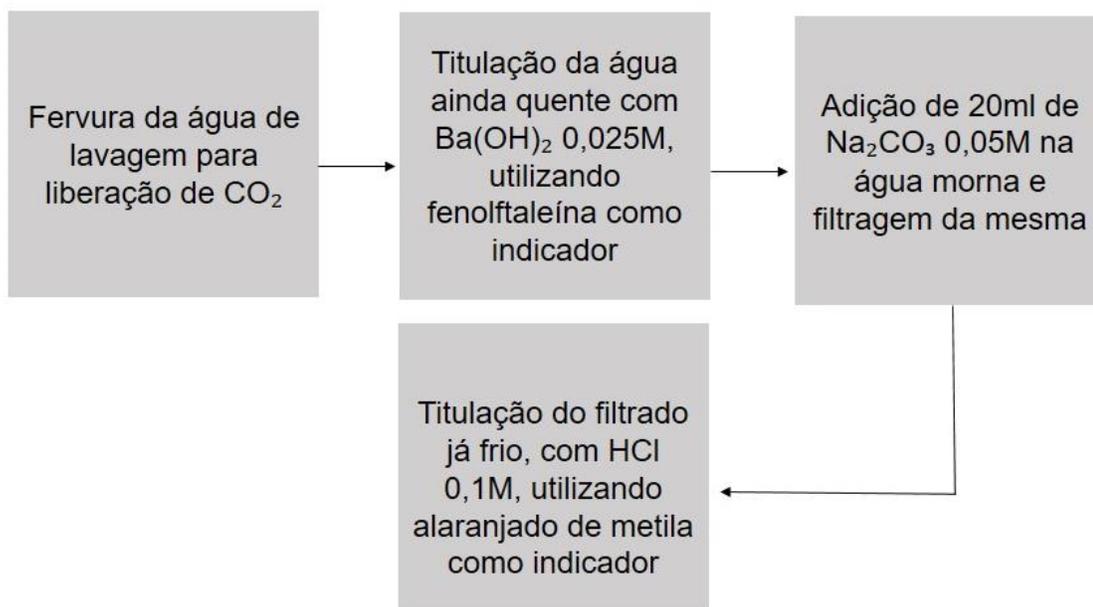
PCS= poder calorífico superior (kJ/g);

$\Delta T$ = variação de temperatura do ensaio (K);

fc= fator de correção do ácido benzoico (kJ/K);

m= massa da amostra utilizada (g).

A água de lavagem proveniente deste ensaio foi analisada quanto à produção de  $H_2SO_4$  e  $HNO_3$ , de acordo com o procedimento presente na Figura 17:



**Figura 17- Procedimento para quantificação de ácidos formados**

Para a correção pela formação de ácidos, considerou-se o número de mols formados de  $H_2SO_4$  e  $HNO_3$ , e que, segundo Parr Instrument Company (2015), o calor de formação destes compostos é aproximadamente 302 e 60 J/mMol, respectivamente.

As porcentagens de enxofre nas amostras foram calculadas pela expressão 8:

$$\%S = 32 \times q \times \frac{100\%}{1g} \quad (8)$$

Onde:

%S= porcentagem de enxofre na amostra (%);

32= massa molar do enxofre (g.mol<sup>-1</sup>);

q= quantidade de mols de enxofre na amostra (mol).

### 4.3 PRODUÇÃO DOS BRIQUETES

A produção dos briquetes foi realizada em conformidade com os itens:

#### 4.3.1 Escolha e preparação das amostras

Para produção dos briquetes utilizou-se os resíduos da madeira (cepilho), trigo e soja. O proveniente do cultivo de soja por apresentar alta umidade quando coletado foi adicionado em estufa à 80°C ± 24h para secagem.

Com o intuito de simular a produção de briquetes realizada pela agroindústria utilizou-se no presente estudo os resíduos *in natura*, ou seja, os mesmos não foram previamente triturados ou selecionados granulometricamente para a produção dos biocombustíveis.

#### 4.3.2 Proporção dos resíduos

As proporções de cada resíduo utilizado na produção dos briquetes foram avaliadas de acordo com a utilizada na agroindústria. Assim, misturou-se 12L de cada

amostra, estabelecendo-se uma proporção de 1/3 de cada tipo, gerando cerca de 36 L da mistura. Este volume foi calculado previamente para a produção dos 11 briquetes delimitados para o trabalho.

#### 4.3.3 Compactação das amostras

A carga necessária para a compactação dos materiais foi delimitada entre 2 e 5 bar e temperatura de 150 a 250°C. Para o ensaio utilizou-se o modelo DCCR conforme apresentado no Quadro 4. Para isso, foram realizados um total de onze ensaios no Laboratório de Cerâmica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Londrina-PR.

**Quadro 4- Modelo do DCCR**

| <b>Ensaio</b> | <b>Temperatura (°C)</b> | <b>Carga (bar)</b> |
|---------------|-------------------------|--------------------|
| 1             | 165                     | 2,44               |
| 2             | 235                     | 2,44               |
| 3             | 165                     | 4,56               |
| 4             | 235                     | 4,56               |
| 5             | 150                     | 3,50               |
| 6             | 250                     | 3,50               |
| 7             | 200                     | 2,00               |
| 8             | 200                     | 5,00               |
| 9             | 200                     | 3,50               |
| 10            | 200                     | 3,50               |
| 11            | 200                     | 3,50               |

Utilizou-se no presente ensaio prensa hidráulica SKAY com carga máxima de 30 toneladas e molde feito de bronze com diâmetro interno de 10cm, conforme Figura 18.



**Figura 18- Molde utilizado no ensaio de compactação**  
**Fonte: Própria**

Para a fabricação dos briquetes adicionou-se primeiramente ao molde 1800ml da mistura de resíduos, sendo este volume compactado em seguida. Na sequência foi adicionado mais 1200ml de material e iniciou-se a etapa de aquecimento do conjunto até a temperatura desejada por meio de uma fita de aquecimento com capacidade máxima de 300°C, monitorada por meio de dois termopares.

Quando alcançada a temperatura delimitada para o ensaio em questão, o corpo do molde foi deixado nesta condição por 10 minutos, realizando em seguida a compactação do restante de amostra adicionada. Mediante isso, esperou-se o resfriamento do conjunto, extraindo o briquete quando a temperatura estava em 45°C aproximadamente.

Vale salientar que para diminuir perdas energéticas e com o intuito de alcançar as temperaturas delimitadas para cada ensaio, o sistema foi isolado com manta de fibra de vidro e papel alumínio conforme Figura 19.



**Figura 19 - Montagem do sistema de compactação**  
**Fonte: Própria**

#### 4.4 DENSIDADE APARENTE DOS BRIQUETES

A densidade aparente dos briquetes foi obtida através da pesagem destes e da determinação de seus volumes. Os volumes foram determinados por meio das dimensões aferidas por fita métrica. Este parâmetro foi dado pela equação (9):

$$d = \frac{m}{V} \quad (9)$$

Onde:

m= massa do material (kg);

V= volume do material (m<sup>3</sup>);

d= densidade do material (kg.m<sup>-3</sup>).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente trabalho foram realizadas duas coletas de resíduos. Na primeira, os resíduos agrícolas provenientes do cultivo de trigo, soja e milho estavam decompostos e dispostos em ambiente aberto, sob condições temporais. Já na segunda coleta, os resíduos eram novos (com exceção da soja) e estavam dispostos em local fechado. Assim, para os resíduos decompostos, denominou-se a condição DC e para os novos, a sigla NV foi utilizada.

### 5.1 TEOR DE UMIDADE

Os valores encontrados para o teor de umidade estão dispostos na Tabela 3.

**Tabela 3 - Teores de umidade obtidos**

| Resíduo | Condição          | Umidade Média (%) |
|---------|-------------------|-------------------|
| Milho   | DC                | 64,68 ± 0,002     |
|         | NV                | 25,15 ± 2,764     |
| Trigo   | DC                | 48,32 ± 0,528     |
|         | NV                | 12,70 ± 0,096     |
| Soja    | DC <sup>(a)</sup> | 21,39 ± 1,050     |
|         | DC <sup>(b)</sup> | 25,73 ± 0,647     |
| Cepilho | NV                | 11,75 ± 0,110     |

**Nota:** (a) Resíduo de soja decomposto (ambiente aberto);  
(b) Resíduo de soja decomposto (ambiente fechado)

Observa-se que os teores de umidade do cepilho e trigo (NV) foram os menores dentre os demais (11,75 e 12,70%, respectivamente) que estão dentro da faixa ideal para produção de briquetes, que segundo Alves Júnior (2003) está entre 8 – 15%. Apesar do resíduo proveniente do cultivo do trigo apresentar umidade maior que o encontrado na literatura- 7,7% (FERNANDÉZ et al, 2013).

Além disso, o valor encontrado para o cepilho está próximo ao encontrado por Menezes (2013), conforme Tabela 4. O IPEA (2012) enfatiza que, para resíduos provenientes do beneficiamento da madeira, o valor ideal para este índice gira em torno de 15%.

**Tabela 4 - Teores de umidade encontrados na literatura**

| <b>Biomassa</b> | <b>Teor de Umidade (%)</b> | <b>Referência</b>       |
|-----------------|----------------------------|-------------------------|
| Resíduo de Soja | 12,23                      | Vieira (2012)           |
| Sabugo de Milho | 16,93                      | Vieira (2012)           |
| Palha de Trigo  | 7,70                       | Fernández et. al (2013) |
| Cepilho         | 11,3                       | Menezes (2013)          |

Quanto aos outros resíduos caracterizados, verificam-se altos valores para umidade, tanto para diferentes condições (novo ou decomposto) quanto para o tipo de armazenamento (local fechado ou aberto).

No presente trabalho obtiveram-se valores de 64,68 e 25,15% para os resíduos de milho (DC e NV) que apresentaram valores superiores ao encontrado por Vieira (2012). O resíduo de trigo DC apresentou 48,32% de umidade e soja DC<sup>(a)</sup> e DC<sup>(b)</sup>, 21,39 e 25,73%, respectivamente; valores diferentes dos encontrados nos trabalhos de Fernández et. al (2013) e Vieira (2012), presentes na Tabela 4.

Ao analisar a influência do local de armazenamento, valores superiores para o teor de umidade foram encontrados quando o resíduo está disposto em ambiente aberto. Segundo Brand (2010, apud CAPOTE, 2012) a umidade é altamente influenciada por diversos fatores tais como local de armazenamento, estação do ano, local de coleta, parte utilizada do vegetal, entre outros.

Além disso, destacam-se os altos valores de umidade para o resíduo de milho (DC) e trigo (DC), 64,68 e 48,32% respectivamente. Tal fato pode ser justificado pelo chorume gerado pela decomposição inadequada da matéria, devido à ausência de aeração e excesso de água no material, por exemplo (NUNES, 2009). Bidone e Povidelli (1999) apud Santos e Flores (2012) indicam que para que o processo ocorra com

sucesso, deve-se estabelecer índices em torno de 55%, salientando, no entanto, que, valores maiores que 60% podem causar anaerobiose e menores que 40% diminuem a atividade microbiana.

Assim, em relação a estes resíduos com valores altos de umidade, para que a este parâmetro esteja ideal para o processo de briquetagem, deve-se realizar a secagem prévia dos resíduos, visto que valores de umidade relativamente altos demandam uma maior quantidade de energia para a queima (VIEIRA, 2012). Entretanto, vale salientar que muitas vezes o investimento em secadores pode aumentar custos operacionais das empresas, principalmente se estes sistemas demandarem secagens rápidas e controladas (ERIKSSON E PRIOR, 1990; DIAS et. al, 2012).

## 5.2 GRANULOMETRIA

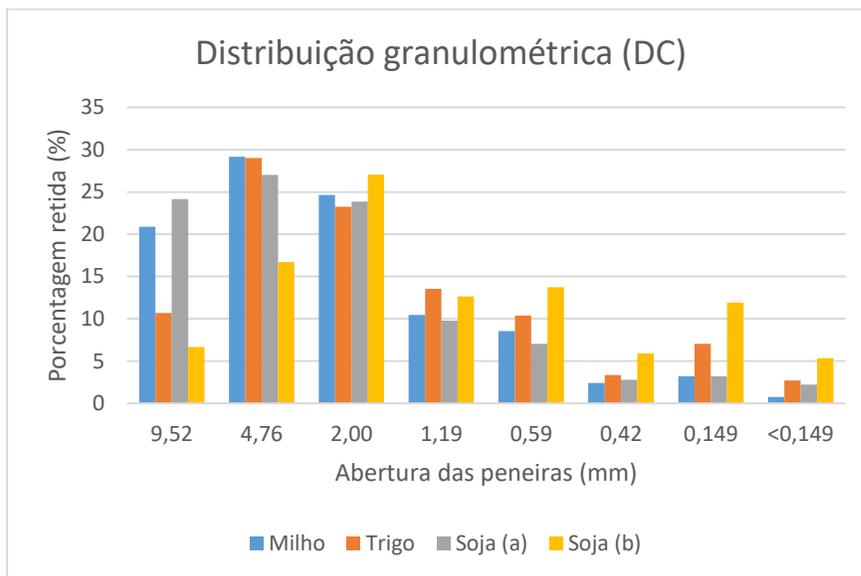
Na Tabela 5 estão dispostas as porcentagens granulométricas dos resíduos analisados.

**Tabela 5- Resultados do ensaio granulométrico**

| Abertura<br>(mm) | DC (%) |       |          |          | NV (%) |       |         |
|------------------|--------|-------|----------|----------|--------|-------|---------|
|                  | Milho  | Trigo | Soja (a) | Soja (b) | Milho  | Trigo | Cepilho |
| 9,52             | 20,87  | 10,71 | 24,14    | 6,66     | 25,09  | 2,73  | 1,43    |
| 4,76             | 29,15  | 29,02 | 27,01    | 16,69    | 15,49  | 5,85  | 8,87    |
| 2,00             | 24,65  | 23,25 | 23,86    | 27,04    | 19,62  | 50,21 | 19,67   |
| 1,19             | 10,46  | 13,54 | 9,77     | 12,64    | 12,78  | 14,65 | 16,46   |
| 0,59             | 8,54   | 10,40 | 7,05     | 13,73    | 9,75   | 11,63 | 21,37   |
| 0,42             | 2,41   | 3,35  | 2,77     | 5,93     | 3,83   | 4,50  | 10,19   |
| 0,149            | 3,18   | 7,03  | 3,19     | 11,95    | 7,57   | 6,70  | 17,24   |
| <0,149           | 0,75   | 2,71  | 2,21     | 5,35     | 5,86   | 3,73  | 4,77    |

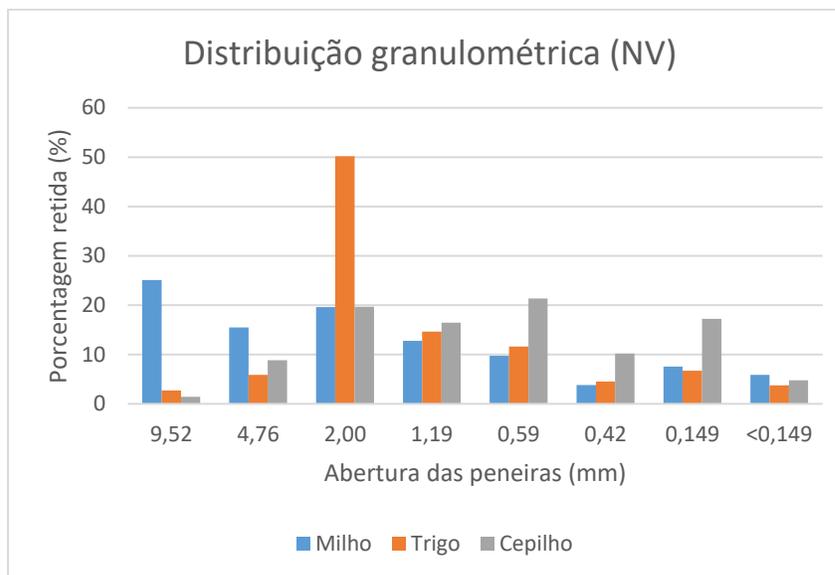
A partir dela pode-se inferir que dos quatro resíduos decompostos analisados, os denominados milho, trigo e soja (a) apresentaram maior porcentagem de materiais com granulometria de 4,76 mm, enquanto que a soja (b), partículas com 2mm apresentaram-se em maior quantidade. Em relação às menores porcentagens encontradas, partículas

<0,149 mm (base) foram menos evidentes para os quatro tipos de resíduos (DC). Na Figura 20 é apresentada a distribuição do tamanho das partículas para os materiais utilizados.



**Figura 20- Distribuição granulométrica dos resíduos decompostos**  
**Elaboração Própria**

Quanto aos resíduos NV; milho, trigo e cepilho, houve uma dispersão maior do tamanho das partículas com maiores porcentagens retidas em 9,52; 2,00 e 0,59 mm, respectivamente. No que se refere à menor quantidade retida, para trigo e cepilho, isso ocorreu em peneira de maior granulometria (9,52 mm), enquanto que o milho foi de 0,42 mm a menor porcentagem (3,83%). Na Figura 21 pode-se observar o comportamento da granulometria para os resíduos NV.



**Figura 21- Distribuição granulométrica dos resíduos NV  
Elaboração Própria**

De acordo com Mande (2007), partículas entre 6 a 8mm são mais indicadas para o processo de briquetagem. Além disso, Quirino (1991) indica que a maior homogeneidade de forma e granulometria são preferíveis, visto que melhoram a eficiência de queima, podendo em alguns casos até duplicar o rendimento das caldeiras.

Silva (2007) cita que ao se reduzir o tamanho das partículas da biomassa há uma melhora na densidade e fluidez deste, reduzindo assim o consumo energético durante a densificação. Quirino et. al (2012) ao analisarem a influência do tamanho das partículas na densidade de briquetes produzidos com resíduos madeireiros verificou que os biocombustíveis confeccionados com granulometria fina apresentaram maiores densidades do que àqueles produzidos com granulometria grossa, justificando este fato devido a melhor acomodação das partículas de menor tamanho quando comparadas com as outras.

### 5.3 TEOR DE VOLÁTEIS, CINZAS E CARBONO FIXO

Na Tabela 6, estão elencados os valores encontrados para os teores médios de matérias voláteis, cinzas e carbono fixo da biomassa analisada, juntamente com seus respectivos desvios padrões.

**Tabela 6- Resultados obtidos para os teores de carbono volátil, fixo e cinzas**

| Resíduo | Condição          | Teor de Voláteis (%) | Teor de Cinzas (%) | Carbono Fixo (%) |
|---------|-------------------|----------------------|--------------------|------------------|
| Milho   | DC                | 84,31 ± 0,152        | 14,72 ± 0,202      | 0,97 ± 0,071     |
|         | NV                | 80,72 ± 3,404        | 18,89 ± 3,529      | 0,39 ± 0,132     |
| Trigo   | DC                | 75,66 ± 4,729        | 22,48 ± 4,179      | 1,86 ± 0,572     |
|         | NV                | 91,12 ± 0,458        | 6,95 ± 0,663       | 1,94 ± 0,470     |
| Soja    | DC <sup>(a)</sup> | 84,56 ± 1,663        | 13,26 ± 1,105      | 2,18 ± 0,605     |
|         | DC <sup>(b)</sup> | 81,85 ± 2,784        | 16,86 ± 2,747      | 1,29 ± 0,075     |
| Cepilho | NV                | 97,82 ± 0,353        | 1,94 ± 0,172       | 0,24 ± 0,193     |

Observando-se os dados presentes na Tabela 6, notam-se baixos teores de carbono fixo para todas as amostras, com valores variando de 0,24 a 2,18%. De acordo com Brito e Barrichelo (1978) este parâmetro determina a característica de queima do material e, segundo Sant'Anna et. al (2012) altos valores para este índice são preferíveis, visto que esta condição possibilita uma queima mais lenta do combustível, bem como um dispêndio menor da massa do material utilizado no processo de queima, ocasionando em um aumento na produtividade (KURAUCHI, 2014).

Na Tabela 7, tem-se valores encontrados na literatura para os teores de voláteis, cinzas e carbono fixo. Os valores de carbono fixo encontrados no presente trabalho, para os resíduos do milho, trigo soja e cepilho; estão bem abaixo dos encontrados na literatura, conforme Paula (2010), Vieira (2012) e Horst (2013).

**Tabela 7- Valores de referência para materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo**

| <b>Biomassa</b>  | <b>Resíduo</b> | <b>MV (%)</b> | <b>CZ (%)</b> | <b>CF (%)</b> | <b>Referência</b> |
|------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
| Resíduo do Milho | Sabugo         | 81,31         | 1,16          | 18,06         | Paula (2010)      |
|                  |                | 98,19         | 0,70          | 1,11          | Vieira (2012)     |
|                  | Palha          | 81,68         | 1,58          | 17,05         | Paula (2010)      |
|                  |                | 81,70         | 1,58          | 16,72         | Horst (2013)      |
| Resíduo do Trigo | Palha          | 83,90         | 9,30          | 6,80          | Horst (2013)      |
| Resíduo de Soja  | -              | 89,90         | 3,29          | 6,81          | Vieira (2012)     |
| Cepilho          | -              | 83,19         | 0,13          | 16,66         | Paula (2010)      |

**Nota:** MV – material volátil; CZ – teor de cinzas; CF – teor de carbono fixo

Quanto ao teor de voláteis, valores encontrados para o resíduo do milho (DC e NV) estão próximos dos encontrados por Paula (2010) e Horst (2013). Vieira (2012), no entanto, obteve um teor de carbono volátil de 98,19%, superior ao apresentado no presente trabalho.

O resíduo do trigo por sua vez, com valores 75,66% (DC) e 91,12% (NV), apresentou valor abaixo do encontrado por Horst (2013) para o resíduo decomposto e acima para o novo. Para os resíduos de soja (DC e NV) o valor encontrado por Vieira (2012) apresenta-se um pouco superior. Já o índice encontrado para o cepilho apresenta-se superior ao elencado por Paula (2010).

De acordo com Brito e Barrichello (1978) os componentes voláteis do combustível também influenciam sua queima já que, estes ao serem aquecidos saem do material e se queimam na forma gasosa. Este parâmetro é importante na fase inicial de combustão da biomassa influenciando na ignição desta (SANT' ANNA et al, 2012). De acordo com Kurauchi (2014), altos valores deste índice facilitam a ignição do combustível, no entanto, tendem a promover uma chama com maior quantidade de fumaça.

No que se refere aos teores de cinzas encontrados, os resultados não foram satisfatórios para a maioria dos resíduos avaliados. Todos tiveram resultados maiores que os presentes na literatura conforme Tabela 7, com exceção do resíduo do trigo (NV).

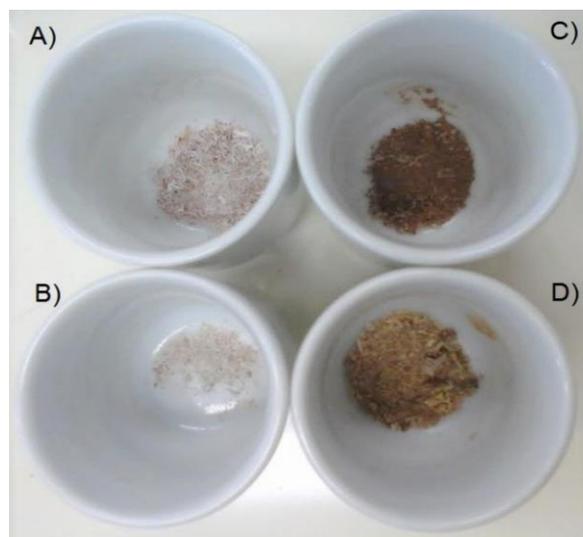
Este índice, em grande quantidade após a queima de combustíveis ou biomassa, podem causar problemas de acumulação, bloqueio e entupimento de grelhas, diminuir a

produção energética bem como emitir poluentes (RENDEIRO E NOGUEIRA, 2008; CAPOTE, 2012).

Carvalho (2010) (apud, SANT'ANNA et al, 2012) indica que o ideal para combustíveis sólidos são valores menores que 3% para este parâmetro, além disso, Mande (2009) (apud DIAS et. al, 2012) aponta que valores superiores a 4% podem causar corrosão em queimadores e desgastes em equipamentos por abrasão.

Mediante isso, observa-se que o resíduo de trigo possui valores compatíveis com a literatura, porém ele apresenta valor superior ao desejável. O único resíduo dentre os caracterizados que apresentou baixo teor de cinzas em relação aos propostos pelos autores Carvalho (2010) e Mande (2009) foi o cepilho, com 1,94%.

Na Figura 22 observa-se a diferença entre as quantidades de cinzas dos resíduos do trigo NV (a) e cepilho NV (b) com as do milho NV (c) e soja DC (d). Segundo Rendeiro et. al (2008) isso pode ser influenciado pela presença de fragmentos de argila, areia, sais, e pirita agregados à biomassa bem como de resquícios de solo misturados quando realizada a colheita/manuseio.



**Figura 22- Cinzas provenientes dos resíduos de trigo, milho, soja e cepilho (NV)**

Para Shutz, Anami e Travessini (2010) o expressivo valor de cinzas em resíduos provenientes de cultivos agrícolas é esperado, visto que estes podem apresentar altos

teores de sílica nos substratos. Barros (2012) por sua vez, ao obter alto teor de cinzas para resíduo do milho indicou que uma possível explicação para tal fato seria de que plantas com menor sazonalidade possuem maiores taxas de incorporação de nutrientes minerais por volume de biomassa gerada.

Assim, apesar da problemática envolvida com as cinzas relacionadas à sua destinação, Rajj (1991 apud CAPOTE, 2012) indica que caso estas não apresentem metais pesados, podem ser utilizadas como fertilizantes em solos pobres em nutrientes, visto que correspondem a fração mineral proveniente do processo de combustão.

#### 5.4 DENSIDADE A GRANEL

Os valores relacionados a densidade a granel dos resíduos avaliados bem como seus respectivos desvios padrões estão dispostos na Tabela 8.

**Tabela 8- Valores obtidos para a densidade a granel dos resíduos**

| <b>Resíduo</b> | <b>Condição</b>   | <b>Densidade a granel (kg.m<sup>-3</sup>)</b> |
|----------------|-------------------|---|
| Milho          | DC                | 195 ± 0,017                                   |
|                | NV                | 139 ± 0,001                                   |
| Trigo          | DC                | 167 ± 0,000                                   |
|                | NV                | 132 ± 0,006                                   |
| Soja           | DC <sup>(a)</sup> | 76 ± 0,001                                    |
|                | DC <sup>(b)</sup> | 190 ± 0,037                                   |
| Cepilho        | NV                | 149 ± 0,003                                   |

Ao analisar os valores encontrados para a densidade da biomassa estudada (Tabela 8) com os encontrados na literatura (Tabela 9), verifica-se que com exceção do resíduo do milho (NV) e Soja (DC<sup>(a)</sup>), que todos os outros são maiores que os encontrados nas referências (SHUTZ, ANAMI E TRAVESSINI, 2010; FERNANDÉZ ET. AL, 2013; QUIRINO, 1991).

**Tabela 9 - Densidade dos resíduos segundo a literatura**

| Resíduo | Condição | Densidade<br>(kg.m <sup>-3</sup> ) | Referência                       |
|---------|----------|------------------------------------|----------------------------------|
| Milho   | DC       | 100                                | Shutz, Anami e Travessini (2010) |
|         | NV       | 160                                | Shutz, Anami e Travessini (2010) |
| Trigo   | -        | 27                                 | Fernández et. al (2013)          |
| Soja    | DC       | 110                                | Shutz, Anami e Travessini (2010) |
|         | NV       | 140                                | Shutz, Anami e Travessini (2010) |
| Cepilho | -        | 112                                | Quirino (1991)                   |

Segundo Dias et. al (2012) a biomassa utilizada no processo de briquetagem possui densidades variando de 50 a 180 kg.m<sup>-3</sup>. Ao comparar esta faixa delimitada pelo autor com a obtida neste trabalho, nota-se que das sete biomassas avaliadas, apenas a proveniente do milho (DC) e soja (DC<sup>(b)</sup>) apresentaram valores superiores, com 195 e 190 kg.m<sup>-3</sup> respectivamente.

Garcia, Caraschi e Ventorim (2013) enfatizam que este parâmetro é importante, visto que a partir dele é possível obter informações que auxiliarão na logística e transporte destes, bem como fornecem o grau de compactação de um material em relação ao outro (como no caso da matéria-prima em relação ao briquete ou pellet).

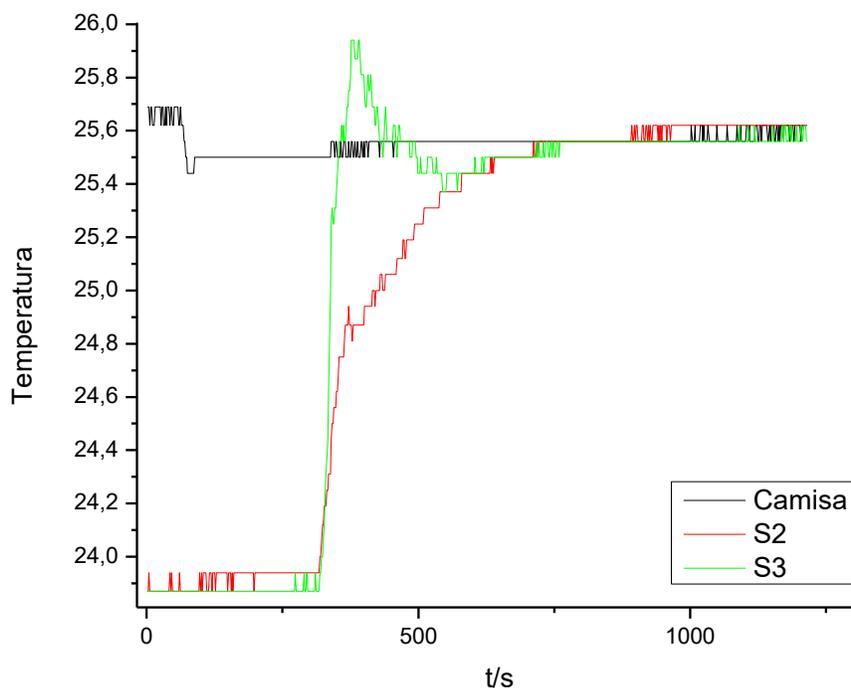
Ele é um parâmetro relacionado também com a granulometria do material, onde quanto menor o tamanho da partícula, menor a porosidade (quantidade de espaços vazios) ocasionando em uma maior densidade (GARCIA, CARASCHI E VENTORIM, 2013; DIAS et. al, 2012).

Este fato pode justificar a grande diferença obtida para os resíduos de soja DC<sup>(a)</sup> e DC<sup>(b)</sup>, visto que o primeiro apresenta maiores porcentagens de materiais com partículas grandes, promovendo assim uma diminuição significativa em sua densidade a granel.

Mediante o exposto, pode-se inferir que caso os resíduos avaliados no presente trabalho estivessem com suas granulometrias reduzidas, suas respectivas densidades poderiam ser ainda maiores do que as encontradas, ocasionando em uma maior razão energia/volume da biomassa (DIAS et.al, 2012).

## 5.5 ANÁLISE DO CALORÍMETRO E PODER CALORÍFICO SUPERIOR DAS AMOSTRAS

Na Figura 23 tem-se o gráfico de temperatura X tempo para o ensaio com ácido benzoico. A partir dele, pode-se observar que a temperatura da camisa calorimétrica se manteve constante ao longo do ensaio, indicando que o calorímetro comporta-se como adiabático.



**Figura 23- Gráfico de temperatura x tempo (ácido benzoico)**

Ao verificar as curvas S2 e S3, referente aos dois sensores dispostos no vaso calorimétrico, nota-se que a segunda curva demonstrou um pico de temperatura, que pode ser devido à maior proximidade da bomba calorimétrica durante o ensaio. Além disso, observou-se que a interferência do agitador mecânico sobre o sistema foi ausente, como observado no começo do ensaio.

Em relação as Figuras 24 e 25, tem-se as curvas obtidas para os ensaios realizados com Trigo NV e DC, respectivamente. Estas curvas foram utilizadas para a determinação do  $\Delta T$  de cada experimento.

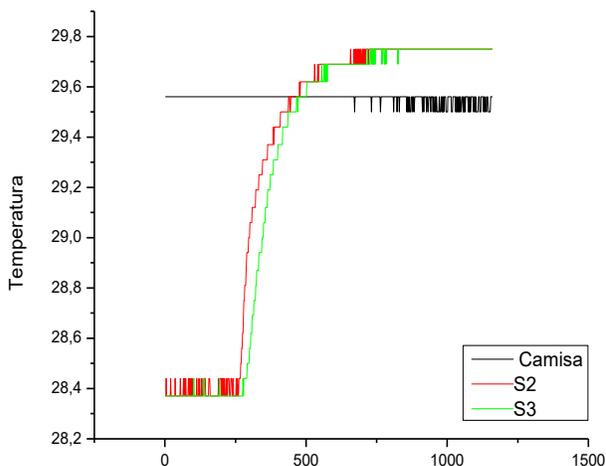


Figura 24 - Gráfico de temperatura x tempo (Trigo NV)

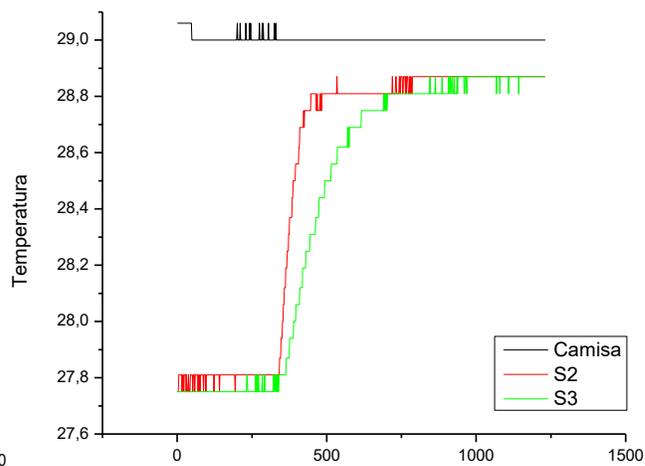


Figura 25- Gráfico de temperatura x tempo (Trigo DC)

Na Tabela 10, estão expostos os resultados obtidos para os ensaios:

**Tabela 10 - Resultados obtidos no ensaio de Poder calorífico superior (PCS)**

| Amostra        | $\Delta T$ (K) | Correção $H_2SO_4$ (kJ) | % Enxofre | Correção $HNO_3$ (kJ) | PCS (kJ/g)       |
|----------------|----------------|-------------------------|-----------|-----------------------|------------------|
| Ácido Benzoico | 1,68           | -                       | -         | Desprezível           | 26,44            |
| Trigo NV       | 1,38           | $34,24 \times 10^{-3}$  | 0,38      | Desprezível           | $17,78 \pm 0,64$ |
| Trigo DC       | 1,09           | $25,67 \times 10^{-3}$  | 0,27      | Desprezível           | $14,11 \pm 0,51$ |

A partir das análises, pode-se afirmar que não foram observadas concentrações mensuráveis de  $HNO_3$ . Considerando que o teor médio de nitrogênio de resíduos agrícolas gira em torno de 3,7% (OSHIRO, 2016), pode-se inferir que a metodologia não foi capaz de determinar a formação deste composto.

Tal resultado pode ser justificado pelo fato do nitrogênio ser gerado na forma de  $\text{NO}_2$  no processo de queima e, por apresentar constante da lei de Henry de  $7,0 \times 10^{-3} \text{ M.atm}^{-1}$  (LEE E SCHWARTZ, 1981), possui menor solubilidade do que o  $\text{SO}_2$ , com constante de  $1,2 \text{ M.atm}^{-1}$  (TOKUNAGA, 1974).

Assim, supõe-se que o  $\text{NO}_2$  durante tal processo estava na forma gasosa, podendo então ter sido liberado para a atmosfera com a abertura da bomba calorimétrica.

Quanto ao poder calorífico, na Tabela 11 estão presentes os valores de referência para os resultados apresentados:

**Tabela 11- Valores de referência para PCS**

| <b>Amostra</b>     | <b>PCS (kJ/g)</b> | <b>Referência</b>                   |
|--------------------|-------------------|-------------------------------------|
| Ácido Benzoico     | 26,42             | Souza et. al (2009)                 |
| Trigo              | 15,69             | ABIB (2011) apud Dias et al. (2012) |
|                    | 20,75             | Horst (2013)                        |
| Resíduos Agrícolas | 15,95 a 19,31     | Paula (2012)                        |

**Nota:** PCS = Poder calorífico superior

A partir dos dados presentes nas Tabelas 10 e 11, nota-se que os valores de poder calorífico superior (PCS) obtidos no presente estudo estão próximos da literatura, ainda que não tenham sido realizadas repetições. Além disso, observa-se uma diminuição do poder calorífico do resíduo novo para o decomposto, que pode ser devido ao teor de cinzas do resíduo do trigo DC ser bem maior que do trigo NV, 22,48 e 6,95 %, respectivamente. De acordo com Paula (2012) altos teores de cinzas promovem uma diminuição no PCS.

Em relação aos resultados de porcentagem de enxofre das amostras, os valores encontrados de 0,38 (Trigo NV) e 0,27% (Trigo DC) estão próximos dos trabalhos de Horst (2013), Oshiro (2016) e Paula (2012), conforme Tabela 12.

**Tabela 12 - Porcentagem de enxofre de acordo com a literatura**

| <b>Amostra</b>     | <b>% Enxofre</b> | <b>Referência</b> |
|--------------------|------------------|-------------------|
| Trigo              | 0,1              | Horst (2013)      |
| Resíduos Agrícolas | 0,1 a 0,45       | Oshiro (2016)     |
|                    | 0,1 a 0,4        | Paula (2012)      |

Vale salientar, no entanto, que de acordo com Paula (2012), altos teores de enxofre são indesejáveis, visto que pode ocasionar corrosões após o processo de combustão, devido a liberação de SO<sub>2</sub>.

#### 5.4 AVALIAÇÃO DOS BRIQUETES PRODUZIDOS

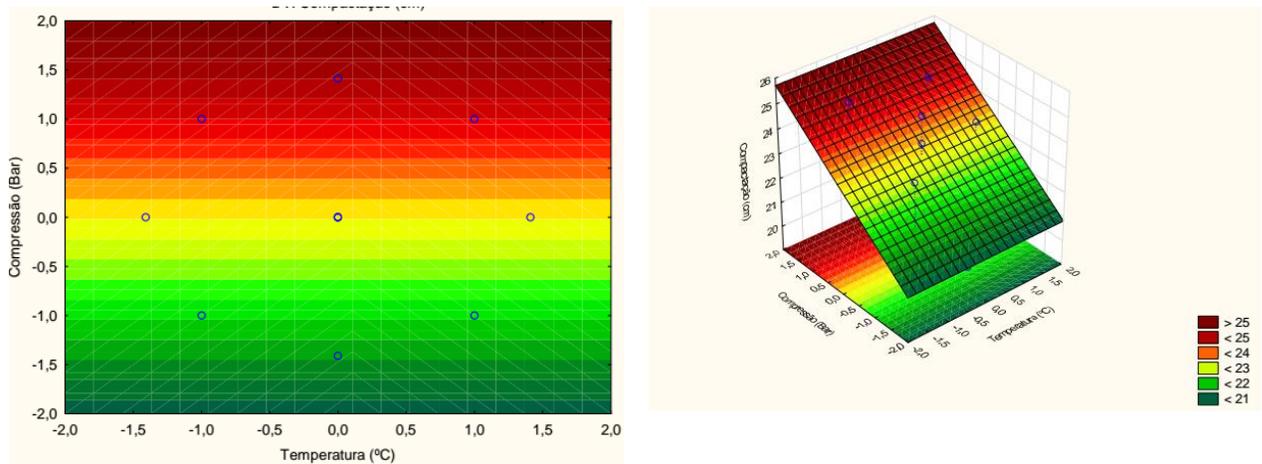
##### 5.4.1 Ensaio de compactação

O sistema de delineamento composto central rotacional (DCCR) utilizado para determinação das variáveis significativas e do processo de compactação associado a temperatura foi realizado em conformidade com a Tabela 13.

**Tabela 13 - Valores e resultados do DCCR com as variáveis temperatura e compressão**

| <b>Ensaio</b> | <b>Temperatura (°C)</b> |       | <b>Carga (Bar)</b> |       | <b>Compressibilidade (cm)</b> |
|---------------|-------------------------|-------|--------------------|-------|-------------------------------|
| 1             | 165                     | -1    | 2,44               | -1    | 23,7                          |
| 2             | 235                     | 1     | 2,44               | -1    | 21,3                          |
| 3             | 165                     | -1    | 4,56               | 1     | 25,5                          |
| 4             | 235                     | 1     | 4,56               | 1     | 24,9                          |
| 5             | 150                     | -1,41 | 3,50               | 0     | 22,7                          |
| 6             | 250                     | 1,41  | 3,50               | 0     | 23,6                          |
| 7             | 200                     | 0     | 2,00               | -1,41 | 19,9                          |
| 8             | 200                     | 0     | 5,00               | 1,41  | 23,2                          |
| 9             | 200                     | 0     | 3,50               | 0     | 24,8                          |
| 10            | 200                     | 0     | 3,50               | 0     | 23,7                          |
| 11            | 200                     | 0     | 3,50               | 0     | 23,0                          |

A partir dos resultados obtidos foi confeccionado o gráfico de superfície gerado pelo método DCCR com 90% de confiança em software estatístico (vide Figura 26).

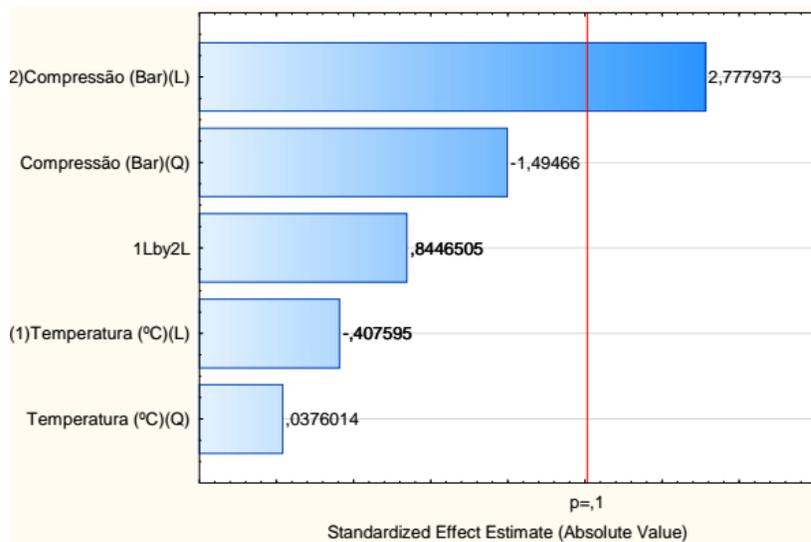


**Figura 26 - Gráficos de superfície em 2 dimensões (a) e em 3 dimensões (b)**

A Figura 26 apresenta a tendência de aumento da compactação em conformidade ao aumento da pressão exercida na prensa hidráulica. Observa-se que a variável compressão predomina sobre a variável temperatura.

A variação de compactação apresentou valores menores que 21,0 cm lineares para pressões próximas de 1,5 bar e valores maiores que 25,0 cm lineares para valores acima de 5,0 bar.

Ou seja, a variável compressão possui maior significância que a variável de temperatura (vide Figura 27).



**Figura 27- Gráfico de Pareto com efeitos das variáveis sobre o sistema e sua significância**

No gráfico de Pareto é possível verificar que os efeitos significativos são a compressão linear e a interação entre a compressão e a temperatura, com maior significância para a compressão. O sistema é modelado pela equação (9):

$$y = 60,245 + (3,391 \times \text{compressão}) + (3,325 \times \text{compressão} \times \text{temperatura}) \quad (9)$$

Desta forma, pode-se averiguar que para compressibilidade linear a pressão é o fator predominante. No entanto, vale ressaltar que no ensaio em questão, foi aferida a temperatura externa do sistema, visto que não foi possível medir este parâmetro internamente. Assim, existe a possibilidade da temperatura interna não se apresentar igual a externa.

Deve-se observar, no entanto, que apesar dos detalhes citados, a temperatura permite uma melhor conformidade e formação lateral mais estável do briquete devido a liberação de lignina e outros compostos, que agem como aglutinantes naturais no processo.

#### 5.4.2 Densidade Aparente

Na Tabela 14 estão dispostas as densidades dos briquetes produzidos.

**Tabela 14 - Valores de densidade aparente obtidos**

| Ensaio | Densidade aparente<br>(kg.m <sup>-3</sup> ) |
|--------|---|
| 1      | 547   |
| 2      | 646   |
| 3      | 648   |
| 4      | 852   |
| 5      | 583   |
| 6      | 647   |
| 7      | 685   |
| 8      | 855   |
| 9      | 805   |
| 10     | 748   |
| 11     | 619   |

Ao verificar os valores de densidade aparente dos briquetes produzidos, nota-se que a biomassa compactada apresenta maior densidade que a natural, justificando assim a importância do processo e a de aumentar a densidade dos resíduos. Além disso, Dias et. al (2012) enfatiza que a análise de densidade relativa dos briquetes é importante, visto que ajuda no controle de qualidade dos mesmos.

Ainda segundo o autor, este parâmetro varia de 500 a 1200 kg.m<sup>-3</sup> nestes biocombustíveis. Os briquetes produzidos no presente trabalho (Figura 28) apresentaram densidades em torno de 547 a 855 kg.m<sup>-3</sup>, que estão dentro da faixa usual apresentada pelo autor.



**Figura 28 - Briquetes produzidos**  
**Fonte: Própria**

Paula (2012) ao produzir briquetes a partir da maravalha e resíduo da soja obteve valores de  $850$  e  $815 \text{ kg.m}^{-3}$ , respectivamente. Quirino e Brito (1991) ao estudarem briquetes produzidos no Brasil, notaram que suas densidades variavam de  $710$  a  $910 \text{ kg.m}^{-3}$ . Portanto, pode-se inferir que os valores encontrados por estes autores estão próximos aos obtidos no presente estudo.

Gentil (2008) e Barros (2012) no entanto, encontraram valores superiores aos obtidos neste trabalho, com valores de  $1060 \text{ kg.m}^{-3}$  (*Pinus cabaia*, maçaranduba e casca de algodão) para o primeiro autor e  $1177,2 \text{ kg.m}^{-3}$  (resíduo de côco);  $1404,3 \text{ kg.m}^{-3}$  (sabugo de milho) e  $1344,5 \text{ kg.m}^{-3}$  (casca de maracujá), para o segundo.

Vale salientar que o processo de densificação é influenciado por diversos fatores como umidade e granulometria da biomassa, carga aplicada no processo, temperatura, uso de aglutinantes, bem como o tipo de prensa utilizada na compactação. Quirino (1991) aponta que para prensas hidráulicas, como a utilizada no presente estudo, a pressão aplicada por elas é menor que em outros métodos (como pistão mecânico e rosca sem fim), além disso, ela não utiliza um método extrusivo assim como as outras prensas citadas.

## 6. CONCLUSÃO

A execução desta pesquisa possibilitou a avaliação de resíduos agrícolas e madeireiros quanto a geração de energia. Assim, diante das análises e dos resultados obtidos e discutidos neste trabalho pode-se concluir que quanto aos parâmetros umidade, teor de voláteis e cinzas, a maravalha e o resíduo do trigo (NV) apresentaram melhores índices, porém, o teor de carbono fixo (uma das propriedades principais para a caracterização) para estas e demais amostras é extremamente baixo. No que se refere ao teor de voláteis e densidade da biomassa estudada, todas apresentaram valores próximos aos usuais.

Quanto ao calorímetro adaptado no presente trabalho verifica-se que este pode ser uma ótima alternativa para análises de poder calorífico de diversas amostras.

Analisando-se o processo de compactação dos briquetes, verifica-se que a variável compressão possuiu maior significância que a variável de temperatura, no entanto, vale ressaltar que a temperatura colabora na liberação de aglutinantes naturais dos resíduos. Em relação à densidade dos biocombustíveis, nota-se que os valores obtidos no presente trabalho foram satisfatórios.

Desta forma, a fim de minimizar os impactos relacionados à disposição e utilização inadequada deste tipo de biomassa bem como a degradação de florestas por meio da extração de lenha, estes resultados indicam que estes resíduos podem ser utilizados na fabricação de briquetes, desde que haja uma melhoria nas condições destes materiais, tais como armazenamento e coleta.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL).

**Atlas de energia elétrica do Brasil.** 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243p. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>>. Acesso em: 21 out. 2015.

\_\_\_\_\_. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2015.

ALVES JUNIOR, Francisco Tarcísio et al. **Utilização de biomassa para briquetagem como fonte de energia alternativa e a disponibilidade deste recurso na região do Cariri-CE.** In: 23º Encontro Nac. de Eng. de Produção, 2003. Ouro Preto: Abepro, 2003. p. 1 - 8. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2003\\_tr1003\\_0215.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2003_tr1003_0215.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D 1762: **Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal.** Estados Unidos: Astm, 2007. 2 p.

ARDUINO. **Libraries.** 2016. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Reference/Libraries>>. Acesso em: 03 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 6922: **Carvão vegetal- ensaios físicos: determinação da massa específica (densidade à granel).** Rio de Janeiro: Abnt, 1981. 2 p.

\_\_\_\_\_. 8112: **Carvão vegetal: Análise imediata.** Rio de Janeiro: Abnt, 1986. 5 p.

\_\_\_\_\_. 10007: **Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro: Abnt, 2004. 21 p.

\_\_\_\_\_. 8633: **Carvão Vegetal: determinação de poder calorífico.** Rio de Janeiro: Abnt, 1984. 1-13p.

BARROS, Vanessa Cabral Costa. **Briquetes produzidos com resíduos de poda urbana e embalagens cartonadas**. 2013. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013. Disponível em: <[http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/12544/Monografia\\_VanessaCabralCosta.de.Barros.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/12544/Monografia_VanessaCabralCosta.de.Barros.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 22 out. 2015.

BARROS, Luana de Oliveira. **Densidade energética de briquetes produzidos a partir de resíduos agrícolas**. 2012. 37 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2012. Disponível em: <[http://bdm.unb.br/bitstream/10483/4448/1/2012\\_LuanadeOliveiraBarros.pdf](http://bdm.unb.br/bitstream/10483/4448/1/2012_LuanadeOliveiraBarros.pdf)>. Acesso em: 27 out. 2016.

BEZZON, Guilherme. **Síntese de novos combustíveis sólidos a partir de resíduos agroflorestais e possíveis contribuições no cenário energético brasileiro**. 1994. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994

BIOFOGO COMBUSTÍVEIS. **Briquetes (Lenha ecológica): Um produto ambientalmente correto**. Ressaquinha, MG: 2008. Disponível em: <[http://www.biofogo.com.br/site/folder\\_briquetes.htm](http://www.biofogo.com.br/site/folder_briquetes.htm)>. Acesso em: 12 mai. 2016.

BORSATO, Dionísio; GALÃO, Olívio Fernandes; MOREIRA, Ivanira. **Combustíveis Fósseis: Carvão e petróleo**. Londrina: Eduel, 2009. 166 p

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Inventário Energético de Resíduos Rurais**. Rio de Janeiro: EPE, 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2015%20-%2014%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20Rurais.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2015.

\_\_\_\_\_. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Plano agrícola e pecuário 2014/2015**. 2014a. Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/PAP%202014-2015.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/PAP%202014-2015.pdf)>. Acesso em: 07 abr. 2016.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia (MME). **Resenha Energética Brasileira: exercício de 2014**. Brasília: 2015, 29p. Disponível em:

<<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Energ%C3%A9tica+-+Brasil+2015.pdf/4e6b9a34-6b2e-48fa-9ef8-dc7008470bf2>>. Acesso em: 01 abr. 2016.  
BRITO, José Otávio; BARRICHELO, Luiz Ernesto George. **Características do eucalipto como combustível: Análise química imediata da madeira e da casca**. IPEF, Piracicaba, n. 16, p.63-70, 1978. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr16/cap05.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2016

CAPOTE, Franciele Gesleine. **Caracterização e classificação de co-produtos compactados da biomassa para fins energéticos**. 2012. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado Interinstitucional em Bioenergia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <<http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/29703/R++D++FRANCIELE+GESLEINE+CAPOTE.pdf;jsessionid=E4391B6A3171BC53EDCFA533AD0477EA?sequence=1>>. Acesso em: 24 out. 2016.

CARASCHI, José Cláudio; GARCIA, Dorival Pinheiro; VENTORIM, Gustavo. **Caracterização física e química dos pellets de madeira produzidos no Brasil**. In: Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira, 13, 2012, Vitória: Ufes, 2012. 9 p. Disponível em: <[http://www.abipel.com.br/media/10037/CARACTERIZACAO\\_FISICA\\_E\\_QUIMICA\\_DO\\_S\\_PELLETS\\_DE\\_MADEIRA\\_PRODUCIDOS\\_NO\\_BRASIL\\_XIII\\_EBRAMEM.pdf](http://www.abipel.com.br/media/10037/CARACTERIZACAO_FISICA_E_QUIMICA_DO_S_PELLETS_DE_MADEIRA_PRODUCIDOS_NO_BRASIL_XIII_EBRAMEM.pdf)>. Acesso em: 14 mai. 2016.

GARCIA, Dorival Pinheiro; CARASCHI, José Cláudio; VENTORIM, Gustavo. Caracterização energética de pellets de madeira. **Revista da Madeira**, Caxias do Sul, n. 135, maio 2013. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=1665&subject=Pellets&title=Caracteriza%E7%E3o%20energ%E9tica%20de%20pellets%20de%20madeira](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1665&subject=Pellets&title=Caracteriza%E7%E3o%20energ%E9tica%20de%20pellets%20de%20madeira)>. Acesso em: 26 out. 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Perspectivas para a agropecuária**. v.2 – Brasília: Conab, 2014. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14\\_09\\_10\\_18\\_03\\_00\\_perspectivas\\_2014-15.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_09_10_18_03_00_perspectivas_2014-15.pdf)>. Acesso em: 08 abr. 2016.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; AYARZA, Juan Arturo Castañeda. Biomassa no Brasil e no mundo. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (Org.). **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008. Cap. 1. p. 15-29.

DARTMOUTH COLLEGE. **Enthalpy of Combustion via Calorimetry**. Chemistry 75. 2010. Disponível em: <<http://www.dartmouth.edu/~pchem/75/pdfs/BombCal.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2016.

DEEPAK, K.B.; JNANESH, N.A. **An experimental study of various characteristics of biomass briquettes made from areca leaves: An alternative source of energy**. In: National Conference On Challenges In Research & Technology In The Coming Decades (CRT 2013), Ujire: 2013.

DIAS, José Manuel Cabral de Sousa et al. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/952626/1/DOC13.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2016.

EUROPEAN STANDARD. **FprEN 14918**: Solid biofuels - Determination of calorific value. CEN, 2009. 1-60 p.

ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/t0275e/t0275e00.HTM>>. Acesso em: 05 mai. 2016.

FERNANDES, Carolina Rovira Pereira et al. **Produção de briquete industrial: energia limpa e sustentável**. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO. Goiânia: 2012. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2012/X-007.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2015

FERNÁNDEZ, Roberto García et al. Influence of physical properties of solid biomass fuels on the design and cost of storage installations. **Waste Management**. Amsterdã, p. 1151-1157. maio 2013. Disponível em: <[http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/19587/1/InfluencWM\\_8550 v2.0.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/19587/1/InfluencWM_8550 v2.0.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2016.

FONTES, Paulo José Prudente de. **Auto-suficiência energética em serraria de *Pinus* e aproveitamento dos resíduos**. 1994. 153p. Dissertação (Mestrado)- Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Ciências agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994. Disponível em: <

<http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/28882/D%20-%20PAULO%20JOSE%20PRUDENTE%20DE%20FONTES.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 14 mai. 2016.

FILIPPETTO, Daniele. **Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento de Sistemas Energéticos, Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

GENTIL, Luiz Vicente Bocorny. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília. Brasília. DF, p. 215, 2008.

HORST, Diogo José. **Avaliação da produção energética a partir de ligninas contidas em biomassas**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2013. Disponível em: <<http://www.pg.utfpr.edu.br/dirppg/ppgep/dissertacoes/arquivos/216/Dissertacao.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2016.

ILHA FILHO, Aderbal Batista Ilha; HALASZ, Marcos Roberto Teixeira; OHNUMA JUNIOR, Alfredo Akira. **Caracterização de briquetes produzidos com cascas de eucalipto e rejeitos de papel e celulose**. In: VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-Americano sobre edificações e comunidades sustentáveis, 2011, Vitória. Disponível em: <[http://www.elecs2013.ufpr.br/wpcontent/uploads/anais/2011/2011\\_artigo\\_041.pdf](http://www.elecs2013.ufpr.br/wpcontent/uploads/anais/2011/2011_artigo_041.pdf)>. Acesso em: 30 out. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento sistemático da produção agrícola**: Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. Rio de Janeiro v.29 n.2 p.1-79, 2016. Disponível em: <[ftp://ibge.gov.br/Producao\\_Agricola/Levantamento\\_Sistematico\\_da\\_Producao\\_Agricola\\_\[mensal\]/Fasciculo/lspa\\_201602.pdf](ftp://ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/lspa_201602.pdf)>. Acesso em: 07 abr. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas**. Relatório de pesquisa. Brasília: IPEA, 2012. Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917\\_relatorio\\_residuos\\_organicos.pdf](http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917_relatorio_residuos_organicos.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2015.

KURAUCHI, Martim Hideki Nakayama. **Uma abordagem de ensaio de resistência mecânica de carvão vegetal**. 2014. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

LEE, Y.-n.; SCHWARTZ, S. E.. Reaction Kinetics of Nitrogen Dioxide with Liquid Water at Low Partial Pressure. **The Journal Of Physical Chemistry**. New York, p. 840-848. 17 out. 1981.

MANDE, Sanjay P. N. Thermochemical conversion of biomass. In: **Renewable energy engineering and technology**. New Delhi, 2007. p. 705-728. Disponível em: <[http://elearn.teriuniversity.ac.in/file.php?file=/1/APGDRE/module8/week\\_55.pdf](http://elearn.teriuniversity.ac.in/file.php?file=/1/APGDRE/module8/week_55.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2016.

MENEZES, Marta Juliana Schmatz. **Poder calorífico e análise imediata da maravalha de Pinus (Pinus sp) e Araucária (Araucaria angustifolia) de reflorestamento como resíduos de madeira**. 2013. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013. Disponível em: <[http://projetos.unioeste.br/pos/media/Dissertacao\\_Marta\\_J\\_S\\_Menezes.pdf](http://projetos.unioeste.br/pos/media/Dissertacao_Marta_J_S_Menezes.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2016.

NUNES, Maria Urbana Corrêa. **Compostagem de Resíduos para Produção de Adubo Orgânico na Pequena Propriedade**. Aracaju: Embrapa, 2009. 7 p. Disponível em: <[http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes\\_2010/ct\\_59.pdf](http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2010/ct_59.pdf)>. Acesso em: 28 nov. 2016.

OLIVEIRA, Adriano Santhiago de. **Análise das modalidades e procedimentos simplificados do mecanismo de desenvolvimento limpo: Projetos de pequena escala e a geração de energia renovável para atendimento das residências rurais e isoladas**. 2003. 208 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/asoliveira.pdf>>. Acesso em: 03 abr. 2016.

OSHIRO, Thaís Liemi. **Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos lignocelulósicos**. 2016. 58p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

PARR INSTRUMENT COMPANY. Compensated Jacket Calorimeter: Operating Instruction Manual. Molline: 2015. 68p.

PAULA, Luana Elis de Ramos e. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. 2010. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010. Disponível em: <[http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/2447/1/DISSERTAÇÃO\\_Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos.pdf](http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/2447/1/DISSERTAÇÃO_Produção_e_avaliação_de_briquetes_de_resíduos_lignocelulósicos.pdf)>. Acesso em: 24 out. 2015.

PROTÁSIO, T. P. et al. **Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos**. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, n. 68, p.273283, 26 dez. 2011. Embrapa Florestas. Disponível em: <<http://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/288/227>>. Acesso em: 02 nov. 2015

PUZZI, Domingos; ANDRADE, Armando Navarro de. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 2000. 666 p.

QUIRINO, Waldir Ferreira. **Utilização Energética de Resíduos Vegetais**. Laboratório de Produtos Florestais - LPF/IBAMA. Brasília, 2003. 35p. Disponível em: <<http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>>. Acesso em: 14 maio 2016.

QUIRINO, Waldir Ferreira; BRITO, José Otávio. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. 1991. 19 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Florestais, Universidade de São Paulo, Brasília, 1991. Disponível em: <<http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/indice.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2015.

QUIRINO, Waldir Ferreira. **Briquetagem de resíduos ligno-celulósicos**. 1991. 10p. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/leresiduos3\\_000g823ugcv02wx5ok0u5nfp9o181zj.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/leresiduos3_000g823ugcv02wx5ok0u5nfp9o181zj.pdf)>. Acesso em: 20 out. 2016.

QUIRINO, Waldir Ferreira et al. Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p.525-536, dez. 2012. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr96/cap11.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2016.

REIS, Lineu Belico dos; FADIGAS, Eliane A. Amaral; CARVALHO, Cláudio Elias. **Energia, Recursos Naturais e a Prática do Desenvolvimento Sustentável**. Barueri: Manole, 2005. 415 p.

RENDEIRO, Gonçalo et al. **Combustão e gasificação de biomassa sólida: Soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 192 p.

SANT'ANNA, Mikele Cândida Sousa et al. Caracterização de briquetes obtidos com resíduos da Agroindústria. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p.289-294, 2012.

SANTOS, Domiedson Alves Dias dos; FLORES, Milena. **Compostagem acelerada de resíduos alimentares utilizando o acelerador de compostagem Embiotic® Line**. 2012. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Saneamento Ambiental, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2012. Disponível em: <[http://www.kmambiente.com.br/docs/Embiotic\\_Acelerador\\_de\\_Compostagem.pdf](http://www.kmambiente.com.br/docs/Embiotic_Acelerador_de_Compostagem.pdf)>. Acesso em: 26 nov. 2016.

SOUZA, Cristiane Daliassi Ramos de et al. Avaliação do poder energético de espécies oleaginosas presentes no estado do Amazonas. In: Reunião anual da SBPC, 61., 2009, Manaus. **Resumos de comunicações livres**. Manaus: Sbpcc, 2009. Disponível em: <<http://www.sbpccnet.org.br/livro/61ra/resumos/resumos/5072.htm>>. Acesso em: 28 nov. 2016.

SHOEMAKER, D.P.; GARLAND, C. W.; NIBLER, J. W.. **Experiments in Physical Chemistry: Laboratory Manuals**. 5. ed. New York: Mcgraw-hill, 1989. 879 p

SCHUTZ, Fabiana Costa Araujo; ANAMI, Marcelo Hidemassa; TRAVESSINI, Rosana. Desenvolvimento e ensaio de briquetes fabricados a partir de resíduos lignocelulósicos da agroindústria. **Inovação e Tecnologia**, Medianeira, v. 1, n. 1, p.3-8, 2010. Disponível em: <<https://revistas.utfpr.edu.br/recit/article/viewFile/21/2642>>. Acesso em: 25 out. 2016.

SILVA, Claudinei Augusto da. **Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos madeireiros para fins energéticos**. 2007. 68 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

TEIXEIRA, Marcelo Geraldo. **Aplicação de conceitos da ecologia industrial para a produção de materiais ecológicos: o exemplo do resíduo de madeira.** 2005. 159 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005. Disponível em: <[http://www.teclim.ufba.br/site/material\\_online/dissertacoes/dis\\_marcelo\\_g\\_teixeira.pdf](http://www.teclim.ufba.br/site/material_online/dissertacoes/dis_marcelo_g_teixeira.pdf)> . Acesso em: 14 maio 2016.

TOKUNAGA, Junji. Solubilities of Sulfur Dioxide in Aqueous Alcohol Solutions. **Journal Of Chemical And Engineering Data.**Suita, p. 162-165. 1974.

VIEIRA, Ana Carla. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas.** 2012. 72p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012. Disponível em: <[http://www4.unioeste.br/portalpos/media/File/energia\\_agricultura/pdf/Dissertacao\\_Ana\\_C\\_Vieira.pdf](http://www4.unioeste.br/portalpos/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Ana_C_Vieira.pdf)>. Acesso em: 15 mai. 2016.

## ANEXO A – Manual e especificações do calorímetro Precyzja tipo KL-5

### Montagem do equipamento

- a) Colocar a mesa em local designado para realizar as medições;
- b) Introduzir a camisa calorimétrica dentro do orifício da mesa;
- c) Colocar a haste guia do lado esquerdo, parafuse-a;
- d) Conectar o agitador mecânico na haste, soltar o parafuso apertando-o depois;
- e) No lado direito, soltar o parafuso do vibrador, colocar o tubo de iluminação na haste e reapertar o parafuso;
- f) Ligar o agitador, ignição e iluminador na mesa de controle (soquetes são diferenciados);
- g) Colocar o termômetro calorimétrico no guia do termômetro, passando-o pela lupa e vibrador (prendê-lo com o grampo);
- h) Inserir a borracha na camisa e introduzir o termômetro de mercúrio (0-50°C), utilizado para aferir a temperatura dentro da camisa.

### Características dos componentes

#### Bomba calorimétrica

- Feita de aço resistente à ácido;
- Constituída de corpo cilíndrico e cabeça;
- Possui duas válvulas (uma de saída e outra de entrada), além de um eletrodo (onde será colocado o fio de ignição).

#### Vaso calorimétrico

- Possui capacidade de 4L;

- Fica dentro da camisa calorimétrica e abriga a bomba calorimétrica.

### **Camisa calorimétrica**

- Protege o vaso calorimétrico de influências térmicas externas;
- Possui capacidade de aproximadamente 16L;
- Possui bobinas que regulam a temperatura da água na camisa por meio do aquecimento interno;
- Possui um dispositivo “agitador manual” que regula a temperatura dentro da camisa.

### **Agitador mecânico**

- Mistura a água no vaso calorimétrico;
- Possui rotações definidas pelo fabricante;
- Se necessário mudar as rotações deve-se remover a blindagem do motor e mudá-las com o auxílio de um potenciômetro P1;
- P1: controla vibração do gerador (período de 6s) - TYP-144-220K.

## **Manual de instruções**

### **1. Condições do ambiente**

- a) Temperatura ambiente entre 18-21°C, não pode exceder 25°C;
- b) Sala sem correntes de ar (portas e janelas fechadas) e calorímetro longe de fornos, aquecedores, lâmpadas, aquecimento solar.

## 2. Materiais necessários:

- Bomba calorimétrica;
- Balão com capacidade de 2,7 L;
- Ácido benzoico;
- Cadinhos de quartzo calcinados e limpos;
- Balança;
- Prensa para peletização;
- Fio de ignição;
- Água destilada;
- Pipeta de 5mL;
- Cilindro de O<sub>2</sub>;
- Capilar;
- Indicadores fenolftaleína e alaranjado de metila;
- Erlenmeyers para titulação;
- Titulador.

## 3. Preparo das amostras

- a) Pesar 1g ou mais do combustível em cadinho limpo e calcinado

**OBS 1: Se o combustível possuir queima lenta, a amostra deve ser misturada com uma quantidade anteriormente pesada de ácido benzoico ou carvão nobre (do qual se conhece PC)**

**OBS 2: Precisão das pesagens de 0,0002g**

- b) Se for utilizar em forma de pellet, pesar o fio metálico antes, fazer a peletização e depois pesar o pellet com o fio novamente.

**OBS 3: O fio deve ter de 10-12cm comprimento, 0,1mm diâmetro e calor de fusão de 1600 cal/g.**

- c) Fixar os terminais do fio nos eletrodos, abrindo e fechando as braçadeiras.

**OBS 4: Realizar este procedimento com a cabeça da bomba em seu suporte.**

4. Preparo da camisa do calorímetro (água)

**OBS 5: A camisa é abastecida com água cuja temperatura é ajustada com a do ambiente usando o aquecimento interno.**

**OBS 6: A água não deve ser renovada sem uma nova calibração com ácido benzoico.**

**OBS 7: A cada leitura de temperatura deve-se girar o agitador manual várias vezes. A diferença de temperatura entre o ambiente e a água da camisa não deve exceder 0,5°C.**

**OBS 8: A temperatura da água no vaso deve ser menor que da camisa, mas deve ser maior ao fim do ensaio (para isso ocorrer a água do vaso deve ser de 1-1,5°C mais fria que a da camisa, antes do ensaio).**

a) Colocar 2,7L de água no vaso para que as válvulas da bomba fiquem imersas em 2/3. Pesar o vaso com água (o valor deve ser próximo do usado na calibração com limite de erro de 0,5g)

5. Preparo da bomba

a) Colocar dentro da bomba de 2 a 5mL de água destilada;

b) Retirar a cabeça da bomba do suporte, conectar ao corpo e fechar;

c) Encher a bomba com O<sub>2</sub> até a pressão de:

- 10 ± 2 kg.cm<sup>-2</sup>: para carvão de pedra;
- 25 ± 2 kg.cm<sup>-2</sup>: para antracite;
- 30-35 kg.cm<sup>-2</sup>: carvão com elevado teor de cinzas.

a) Para isso, realizar os seguintes procedimentos:

- Conectar o tubo redutor no cilindro de  $O_2$ ;
- Conectar o capilar no tubo redutor;
- Colocar a bomba em seu suporte na posição vertical;
- Abrir a válvula de entrada da bomba e conecte a outra ponta do capilar nela;
- Abrir a válvula de saída da bomba (sentido horário);
- Ajustar a pressão desejada da bomba no cilindro de oxigênio (30atm);
- Abrir a válvula do tubo redutor e então fechar a válvula de saída da bomba (sentido anti-horário);
- Ao chegar na pressão requerida, fechar a válvula do tubo redutor, desconectar o capilar da válvula de entrada da bomba e feche a válvula;
- Transferir a bomba para o vaso calorimétrico, conectando o cabo elétrico aos pinos

**OBS 9: Verificar se há formação de bolhas, se isso ocorrer é porque está tendo vazamento de oxigênio.**

**OBS 10: Não lubrificar nenhuma parte da bomba com graxa pois pode causar perigo de explosão**

6. Procedimento de medição

a) Preparação do calorímetro

- Colocar o agitador mecânico no vaso calorimétrico (Atenção: não tocar a bomba);
- Tampar o calorímetro com a meia tampa de trás;
- Soltar o parafuso do vibrador, girar a haste junto com o guia do termômetro, colocá-los em posição de trabalho e reapertar o parafuso;

- Soltar a presilha, colocar o termômetro e prender a presilha (Não tocar mais no termômetro, bomba ou vaso);
- Inserir o termômetro no vaso, verificar se o termômetro não toca a bomba ou o vaso;
- Colocar a segunda parte da tampa;
- Verificar a posição da lupa;
- Ligar o botão de força e do agitador mecânico (1º e 2º de baixo para cima);
- Depois de ligada a força a lâmpada vermelha ao lado do botão de força fica acesa e após ligar o agitador as lâmpadas a esquerda se acendem; o vibrador entra em ação logo em seguida.

b) Medidas calorimétricas

- Esperar de 5 a 10 min depois que foi ligado o agitador (a fim de estabilizar a temperatura);
- Ligar a luz do termômetro (3º botão), ler e anotar a temperatura;
- Repetir as leituras a cada minuto (o momento das leituras é sinalizada pela lâmpada superior a esquerda, pelo monitor, e pela campainha caso seja acionada – 4º botão)

**OBS 11: As leituras devem ser lidas com o auxílio da lupa e iluminação (precisão de 0,002°C), para isso, a lupa deve estar no nível do menisco do mercúrio (o topo da coluna deve ser visto como uma linha reta e estreita).**

c) Fases da tomada de medidas

-Período Inicial

- Dura 5 min e estabelece o equilíbrio entre calorímetro e meio ambiente;
- São tomadas seis medidas, uma a cada minuto;

- Após a sexta medida apertar o botão de ignição (5º Botão)

**OBS 12: Se a lâmpada ao lado do botão de ignição ficar acesa por mais de 20s enquanto estiver apertando o botão, houve falha na fusão do arame.**

-Período principal

- Dura de 10 a 11 min e começa logo após a ignição;
- As temperaturas são feitas a cada minuto de acordo com a sinalização;
- Este período se encerra quando duas leituras consecutivas forem iguais ou a segunda for menor que a primeira

-Período Final

- Estabelece a troca térmica entre o calorímetro e o meio ambiente;
- Começa com a primeira temperatura após a maior temperatura do período principal;
- Cinco medidas são feitas, uma a cada minuto;
- Tomadas de temperatura se encerram com a última leitura deste período.

7. Cuidados após ensaio

- Desligar agitador, vibrador, iluminador, iluminação do termômetro, aviso sonoro e a força (Botões 2, 3, 4 e 1);
- Retirar meia tampa da frente, tirar termômetro do vaso (verificar se a presilha está bem fechada), desrosquear o parafuso atrás do vibrador, girar o termômetro até a roda de feltro;
- Retirar as duas tampas do calorímetro, desconectar cabo elétrico, retirar agitador do vaso;
- Retirar a bomba do vaso, enxugá-la e liberar os gases abrindo a válvula de escape;

- Tirar a cabeça e pôr no suporte, verificar se a combustão foi completa;
- Pesar o arame que não fundir;

**OBS 12: Se o combustível conter enxofre e nitrogênio deve-se lavar o interior da bomba, partes internas da cabeça e o cadinho com água destilada.**

- Com a água de lavagem, realizar análise quantitativa de enxofre e nitrogênio

## ANEXO B – Linhas de comando do arduíno

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Wire.h>
const int ONE_WIRE_BUS = 8;
OneWire ourWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&ourWire);
#define ONE_WIRE_BUS 8
#define LOG_INTERVAL 20000
#define SYNC_INTERVAL 1000
uint32_t syncTime = 0;
#define ECHO_TO_SERIAL 1
#define WAIT_TO_START 0
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DeviceAddress T1 = {0x28, 0xFF, 0xC4, 0x17, 0x61, 0x16, 0x03, 0x61};
DeviceAddress T2 = {0x28, 0xFF, 0x62, 0xFA, 0x60, 0x16, 0x03, 0xB1};
DeviceAddress T3 = {0x28, 0xFF, 0x31, 0xE8, 0x61, 0x16, 0x04, 0x7D};
const int chipSelect = 10;
int incomingByte;
float temp;
float tp[43];
float tempC;
void setup(void)
{
  Serial.begin(57600);
  Serial.println();
  pinMode( Rele1, OUTPUT );
  #if WAIT_TO_START
  Serial.println("Type any character to start");

```

```
    while (!Serial.available());
#endif
    pinMode(8, OUTPUT);
    Serial.begin(56000);
    Serial.println();

#if WAIT_TO_START
    Serial.println("Type any character to start");
    while (!Serial.available());
#endif //WAIT_TO_START
    Wire.begin();
    sensors.begin();
    sensors.setResolution(T1, 12);
    sensors.setResolution(T2, 12);
    sensors.setResolution(T3, 12);
}

void printTemperature(DeviceAddress deviceAddress)
{
    tempC = sensors.getTempC(deviceAddress);
    delay (10);
    if (tempC == -127.00) {
        Serial.print("Erro ao ler temperatura !");
    } else {

    }
}

void loop(void)
{
```

```
sensors.requestTemperatures();
temp = sensors.getTempCByIndex(0);
sensors.requestTemperatures();
Serial.print("!");
printTemperature(T1);
tp[1]=tempC;
  Serial.print(tp[1]);
  Serial.print("@");
  printTemperature(T2);
  tp[2]=tempC;
  Serial.print(tp[2]);
  Serial.print("@");
  printTemperature(T3);
  tp[3]=tempC;
  Serial.print(tp[3]);
  Serial.print("@");
  Serial.print("t");

}
```