

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL DE BRIQUETES  
PRODUZIDOS COM REJEITOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS  
E MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*.**

**JOSÉ EVARISTO GONÇALVES**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Doutor em Agronomia – Programa de Pós-graduação em agronomia “Energia na Agricultura”.

BOTUCATU – SP

Novembro – 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL DE BRIQUETES  
PRODUZIDOS COM REJEITOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS  
E MADEIRA DE *Eucalyptus grandis***

**JOSÉ EVARISTO GONÇALVES**

Orientador: Prof. Dr. ALCIDES LOPES LEÃO

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARIA MÁRCIA PEREIRA SARTORI

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Doutor em Agronomia – Programa de Pós-graduação em agronomia “Energia na Agricultura”.

BOTUCATU – SP

Novembro - 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

U76p      Gonçalves, José Evaristo, 1977-  
Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis* / José Evaristo Gonçalves. - Botucatu : [s.n.], 2010.

xi, 104 f. : il. Color., gráfs., tabs., fots. color.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2010

Orientador: Alcides Lopes Leão

Co-orientador: Maria Márcia Pereira Sartori

Inclui bibliografia.

1. Biomassa. 2. Briquetes. 3. Cromatografia. 4. Energia. 5. Resíduos sólidos urbanos. I. Leão, Alcides Lopes. II. Sartori, Maria Márcia Pereira. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL DE BRIQUETES  
PRODUZIDOS COM REJEITOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E  
MANDEIRA DE *Eucalyptus grandis*"

ALUNO: JOSÉ EVARISTO GONÇALVES

ORIENTADOR: PROF. DR. ALCIDES LOPES LEÃO

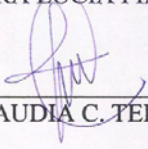
Aprovado pela Comissão Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ALCIDES LOPES LEÃO

  
\_\_\_\_\_  
PROFA. DRA ASSUNTA MARIA MARQUES DA SILVA

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. CLAUDIO CABELLO

  
\_\_\_\_\_  
PROFA. DRA. VERA LUCIA PIMENTEL SALAZAR

  
\_\_\_\_\_  
PROFA. DRA. CLAUDIA C. TEIXEIRA R. A. CAMARINHA

Data da Realização: 17 de novembro de 2010.

A Deus, a minha família...

*Ofereço e Dedico*

## AGRADECIMENTOS

Palavras são poucas próximas de atos,  
Seus atos muito me ajudaram.  
E com todo carinho venho agradecer por isto.  
Muito obrigado por sua ajuda.  
Foi de grande valor!

A Deus por iluminar o meu caminho;

Ao Prof. Dr. Alcides Lopes Leão, pela orientação profissional e pessoal;

A Prof. Dr<sup>a</sup> Maria Marcia Pereira Sartori, pela co-orientação e grandes contribuições no desenvolvimento deste trabalho;

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP);

A Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal de nível Superior (CAPES);

A Universidade Estadual Paulista e a Coordenação do Curso de Pósgraduação pela oportunidade;

E a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para que esta pesquisa acontecesse, muito obrigado!

## SUMÁRIO

	<b>Páginas</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	VII
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	IX
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	XI
<b>1. RESUMO</b> .....	1
<b>2. ABSTRACT</b> .....	3
<b>3. INTRODUÇÃO</b> .....	5
<b>4. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	9
4.1. Aspectos gerais sobre briquetagem.....	9
4.1.1. Definição e histórico.....	9
4.1.2. Tecnologia de compactação.....	11
4.1.2.1. Prensa de pistão mecânico.....	12
4.1.2.2. Prensa com parafuso cônico.....	13
4.1.2.3. Prensa peletizadora.....	14
4.1.3. A briquetagem como forma de recuperação de energia.....	14
4.1.4. Briquetagem com a utilização de aglutinantes.....	15
4.2. Composição da biomassa.....	16
4.2.1. Maneiras de utilização e valorização de um resíduo lignocelulósico.....	17
4.2.2. Compactação da biomassa: conceitos e histórico.....	17
4.2.2.1. Resíduos compactáveis.....	18
4.2.2.2. Efeito do tamanho das partículas.....	19
4.2.2.3. Efeito do teor de umidade.....	19
4.2.2.4. Vantagens e desvantagens da compactação.....	20
4.3. Conversões energéticas para os resíduos agroflorestais.....	21
4.3.1. Pirólise.....	21
4.3.2. Carbonização.....	22
4.3.2.1. Carvão vegetal.....	23

4.3.3. Gaseificação.....	23
4.3.4. Combustão.....	23
4.4. Resíduos de biomassa vegetal para geração de energia.....	24
4.5. Agroindustrialização da mandioca.....	25
4.5.1. Mandioca.....	28
4.6. Resíduos sólidos urbanos RSU.....	29
4.6.1. Os resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	30
4.6.2. Reduzir.....	31
4.6.3. Reutilizar.....	31
4.6.4. Reciclar.....	32
4.6.5. Os rejeitos de resíduos sólidos urbanos RRSU.....	33
4.6.5.1. Briquetes produzidos a partir de RRSU.....	33
4.7. Granulometria.....	34
4.8. Método para determinação do poder calorífico superior PCS.....	34
4.9. Cromatografia gasosa.....	36
4.9.1. Classificação pela forma física do sistema cromatográfico.....	36
4.9.2. Emissão de poluentes.....	37
4.9.2.1. Legislação para emissão de poluentes.....	38
4.10. Análise termogravimétrica TGA.....	41
4.11. Análise de resistência à compressão do briquete.....	41
4.12. Informações sobre a usina de triagem e compostagem de Lixo.....	41
<b>5. MATERIAL E MÉTODO.....</b>	<b>43</b>
5.1. Seleção e preparação dos componentes para a briquetagem.....	44
5.1.1. Rejeito de resíduo sólido urbano RRSU.....	44
5.1.2. Resíduos de serragem de <i>Eucalyptus grandis</i> .....	45

5.1.3. Finos de carvão.....	45
5.1.4. Resíduo lignocelulósico de mandioca.....	46
5.2. Componentes utilizados no processo de briquetagem.....	46
5.2.1. Pilotos realizados e seus respectivos tratamentos.....	47
5.2.2. Tratamentos definitivos a partir dos pilotos.....	48
5.2.3. Teor de umidade dos componentes e correção para cada tratamento...	49
5.3. Preparação e briquetagem dos resíduos.....	50
5.4. Análise do teor de combustíveis e teor de cinzas.....	51
5.5. Análise elementar dos briquetes.....	51
5.6. Determinação do poder calorífico inferior PCI e poder calorífico útil PCU.....	53
5.7. Granulometria para análise cromatográfica.....	54
5.8. Cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massa dos briquetes.....	54
5.9. Análise termogravimétrica TGA.....	55
5.10. Análise de resistência a força de ruptura dos briquetes.....	55
5.11. Análise estatística.....	56
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>57</b>
6.1. Coleta e classificação do RRSU.....	57
6.2. Análises físico-químicas dos briquetes.....	64
6.2.1. Teor de cinzas e combustíveis.....	64
6.2.2. Análise elementar dos Tratamentos.....	66
6.2.3. Poder calorífico (PCS, PCI e PCU).....	70
6.2.4. Análise cromatográfica.....	73
6.2.4.1. Análise qualitativa dos produtos formados na pirólise.....	73
6.2.5. Análise de TGA.....	79

6.2.6. Análise de resistência a força de ruptura perpendicular.....	86
7. <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	91
8. <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	93
9. <b>APÊNDICE</b> - Análises cromatográficas.....	104

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabelas</b>	<b>Página</b>
1. Vantagens e desvantagens do processo de compactação de resíduos de biomassa.....	20
2. Rendimentos dos produtos típicos obtidos por meio de diferentes formas de pirólise de madeira (base seca).....	22
3. Exportações brasileiras de fécula de mandioca no período 2005 – 2007.....	26
4. Definições de resíduos sólidos urbanos.....	29
5. Destino do Lixo da Grande São Paulo.....	30
6. Limites de emissão de poluentes.....	40
7. Informações referentes à Usina de Triagem e Compostagem de Lixo – Lençóis Paulista - SP.....	42
8. Tratamentos realizados no projeto piloto 1.....	47
9. Tratamentos realizados no projeto piloto 2.....	48
10. Tratamentos selecionados.....	49
11. Condições de análise por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa.....	55
12. Composição do RRSU coletado.....	57
13. Limitações técnicas para a briquetagem dos materiais presentes no RRSU.....	59
14. Composição percentual dos termoplásticos presentes no RRSU.....	60
15. Umidade de cada componente após a moagem.....	61
16. Umidade dos tratamentos para a briquetagem do primeiro piloto.....	61
17. Umidade dos tratamentos para a briquetagem do segundo piloto.....	62

18. Proporção de cada componente utilizado nos 21 tratamentos .....	63
19. Teor de cinzas e de combustíveis dos briquetes.....	65
20. Médias da análise elementar (C,H,N,S e O) dos tratamentos definitivos.....	67
21. Valores médios de PCS, PCI e PCU de todos os tratamentos.....	72
22. Poluentes identificados em cada tratamento, pela ordem alfabética (A-D).....	75
23. Poluentes identificados em cada tratamento, pela ordem alfabética (E-H).....	77
24. Poluentes identificados em cada tratamento, pela ordem alfabética (M-T).....	78
25. Comportamento térmico de acordo com os tratamentos.....	86
26. Estatística dos resultados de resistência a força de ruptura perpendicular.....	88

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figuras</b>	<b>Página</b>
1. Prensa de pistão mecânico.....	12
2. Detalhe da prensa de parafuso cônico.....	13
3. Detalhe da peletizadora.....	14
4. Possibilidades de aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos.....	17
5. Classificação cromatográfica.....	36
6. Fluxograma das etapas para o desenvolvimento do experimento.....	44
7. Partículas de RRSU (celulose + termoplásticos), madeira de eucalipto e aglutinantes: resíduo lignocelulósico de mandioca e finos de carvão vegetal.....	46
8. Disposição dos tratamentos nas bandejas para a correção da umidade em estufa.....	50
9. Disposição dos tratamentos nas bandejas para a correção da umidade em estufa.....	50
10. Porcentagem média de carbono (C) por tratamento.....	67
11. Porcentagem média de oxigênio (O) por tratamento.....	68
12. Porcentagem média de enxofre (S) por tratamento.....	69
13. Porcentagem média de nitrogênio (N) por tratamento.....	69
14. Porcentagem média de hidrogênio (H) por tratamento.....	70
15. Valores médios de PCS.....	71
16. Análise de TGA do tratamento B1.....	81
17. Análise de TGA do tratamento B2.....	82
18. Análise de TGA do tratamento B3.....	82

19. Análise de TGA do tratamento B4.....	83
20. Análise de TGA do tratamento B5.....	83
21. Análise de TGA do tratamento B6.....	84
22. Análise de TGA do tratamento B14.....	84
23. Análise de TGA do tratamento B15.....	85
24. Análise de TGA do tratamento B17.....	85
25. Análise de resistência a força de ruptura perpendicular dos briquetes definitivos.....	87
26. Vista lateral do briquete do tratamento B1.....	89
27. Vista lateral do briquete do tratamento B2.....	89
28. Vista lateral do briquete do tratamento B3.....	90
29. Vista lateral do briquete do tratamento B4.....	90

**LISTA DE ABREVIATURAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for testing and material
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DQO	Demanda química de oxigênio
EPA	Environmental Protection Agency
HPA	Hidrocarbonetos poliaromáticos
kg	Quilograma
kJ	Quilojoule
ms	Matéria seca
mu	Matéria umida
OIE	Oferta interna de energia
PABD	Polietileno de alta densidade
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PCU	Poder calorífico útil
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PET	Polietileno Tereftalato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Cloreto de polivinila
RRSU	Rejeito de resíduo sólido urbano
RSU	Resíduo sólido urbano
t	Tonelada
TGA	Análise termogravimétrica

## 1. RESUMO

Este trabalho avaliou energeticamente e ambientalmente briquetes para a geração de energia. Os materiais utilizados para a fabricação dos briquetes foram Rejeitos de Resíduos Sólidos Urbanos (RRSU) com resíduos madeireiros *Eucalyptus grandis* e aglutinantes: resíduo lignocelulósico de mandioca e finos de carvão vegetal. As amostras dos RRSU foram coletadas na Usina de Triagem e Compostagem de Lixo de Lençóis Paulista, atualmente descartados em aterro sanitário municipal e os resíduos madeireiros em serrarias do município de Botucatu-SP. Esse estudo teve o objetivo de gerar alternativas para minimizar a quantidade de material destinado aos aterros com responsabilidade social e ambiental. Os briquetes foram fabricados com 15, 16, 17, 18 e 20% de RRSU na mistura com resíduos madeireiros e aglutinantes. Os resultados da análise do Poder Calorífico Superior (PCS) realizadas nos briquetes mostraram que este valor do PCS aumenta na medida em que a porcentagem dos RRSU aumenta. Briquetes de resíduos de madeira apresentaram Poder Calórico Inferior (PCI) de 19544,20 kJ/kg, valor significativamente menor ao encontrado para briquetes com 20% RRSU, o qual foi de 21617,66 kJ/kg. Este fato anterior se deve a

influência dos produtos derivados do petróleo que estão presentes nos RRSU, como por exemplo, os termoplásticos, com PCS médio na ordem de 34039,67 kJ/kg. É preciso pesquisar o efeito da porcentagem de RRSU sobre a resistência mecânica dos briquetes. Análises cromatográficas foram realizadas para analisar os vapores produzidos na pirólise dos briquetes, visando caracterizar os produtos formados durante a sua decomposição térmica e avaliar preliminarmente o efeito que poderá causar ao meio ambiente. Os resultados evidenciaram a presença de compostos poluidores provenientes da composição dos RRSU como foi o caso do estireno e outros produtos de alta massa molecular. Para avaliar a degradação térmica dos briquetes foram realizadas análises termogravimétricas (TGA), onde foram identificados diferentes picos de temperatura e diferentes porcentagens de massa degradada e cinzas.

## ENERGY AND ENVIRONMENTAL EVALUATION OF BRIQUETTES PRODUCED WITH URBAN SOLID WASTE AND WOOD OF *Eucalyptus grandis*.

Botucatu, 2010. p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: JOSÉ EVARISTO GONÇALVES

Adviser: ALCIDES LOPES LEÃO

### 2. ABSTRACT

This Work evaluates the energy and environmental optimization of briquettes for power generation. The materials used for the production of briquettes were rejects from municipal solid waste (RMSW) wood waste with *Eucalyptus grandis* and binders: residue lignocellulosic cassava and thin charcoal. Samples of RMSW were collected in the recycling and composting plant waste Lençóis, currently discarded in the municipal landfill and waste wood sawmills in the municipality of Botucatu-SP. This study was to generate alternatives to minimize the amount of material destined for landfills with social and environmental responsibility. Briquettes are manufactured with 15, 16, 17, 18 and 20% RMSW in mixture with waste wood and binders. The results of Higher Caloric power analysis (HCP) held in briquettes showed that the value of HCP increases insofar as the percentage of RMSW increases. Waste wood Briquettes made Lower Calorific Power (LCP) 19544.20 kJ/kg significantly lower the value found for briquettes with 20%, which was RMSW 21617.66 kJ/kg. The fact earlier due to influence of oil-derived products that are present in RMSW, as for example, thermoplastics, which have CPs middle 34039.67 kJ/kg. This result can be improved by adjusting the conditions of operation of briquetting machine such as pressure and temperature. The percentage of RMSW effect on the mechanical strength of

briquettes needs to be evaluated. Analyses of gas chromatography with Mass detector were conducted to examine the vapours produced in pyrolysis of briquettes produced, to characterize the products formed during its thermal decomposition and preliminarily assess the effect that can cause to the environment. The results showed the presence of compounds polluters from decomposition of RMSW as was the case of styrene and other products of high molecular weight. The results showed the presence of polluting compounds from the composition of MSW as was the case of styrene and other products of high molecular weight. To assess the thermal degradation of briquettes were performed thermogravimetric analysis (TGA), were identified with different peak temperatures and different percentages of ash and degraded mass.

**Keywords:** chromatography, energy, biomass briquette, residues

### 3. INTRODUÇÃO

A biomassa é uma importante fonte de energia para a humanidade. Ela é a forma natural de armazenar uma fração da energia solar incidente no planeta, e até mesmo os combustíveis fósseis são originários da biomassa. O desafio da humanidade é buscar soluções para usar de forma cada vez mais eficiente esse recurso natural (MCT, 2005).

O uso intenso da biomassa gera também grande quantidade de resíduo, sendo necessárias alternativas para seu uso, tornando as fontes energéticas sustentáveis. Na maioria das vezes esses resíduos, finos ou pó de carvão vegetal e lignocelulósico de mandioca e madeira, subprodutos do beneficiamento industrial, constituem-se num problema, devido a quantidade, nível de dispersão, difícil manuseio e exigência de grandes áreas de armazenamento nas indústrias. Outro problema que deve ser ressaltado é o aproveitamento correto dos Resíduos Sólidos Urbanos – (RSU), gerados em grande escala pela sociedade atual, dentro dos quais encontram-se os Rejeitos de Resíduos Sólidos Urbanos – (RRSU) em diversos setores do mercado, cujo destino são os aterros sanitários municipais (GPCA, 2005).

Os RRSU são misturas complexas de compostos orgânicos, polímeros artificiais, produtos de celulose, materiais inorgânicos (EDUCAR, 2005). Essa complexidade torna difícil a reciclagem química dos RRSU e também seu reaproveitamento em insumos químicos pelo fato das emissões serem poluentes. Esses resíduos são polidispersos dificultando e encarecendo o seu transporte, mas podem ser utilizados no processo de briquetagem, o qual

torna-se uma possível solução para esse problema. No processo os materiais são densificados, concentrando a energia e diminuindo significativamente o volume dos resíduos.

Na Europa e nos Estados Unidos, os briquetes possuem elevada produção, consumo e qualidade sofrendo constante evolução tecnológica. O briquete poder ser produzido a partir das mais diversas matérias-primas, como carvão vegetal, serragem, aparas de madeira, rejeitos de resíduos sólidos urbanos, minérios, e ainda resíduos de produtos agrícolas (resíduos de mandioca, arroz, amendoim, algodão, bagaço de cana-de-açúcar, etc). A busca por alternativas energéticas como o uso da biomassa é compensatória em função de minimizar os efeitos poluidores das atividades antrópicas além de diminuir os custos com aterros sanitários.

Segundo o Balanço Energético Nacional do Ministério de Minas e Energias, no Brasil em 2003, cerca de 41% da Oferta Interna de Energia (OIE) tem origem em fontes renováveis, enquanto no mundo essa taxa é de 14% e, nos países desenvolvidos, de apenas 6%. Dos 41% de energia renovável, 14 pontos percentuais correspondem à geração hidráulica e 27% à biomassa. Os 59% restantes da OIE vieram de fontes fósseis e outras não-renováveis. A matriz energética renovável no Brasil para 2030 terá uma produção de 557 milhões (tep), enquanto que a produção de energia não-renovável no mesmo período será de 297 milhões (tep), ou seja, haverá uma queda na matriz energética não-renovável no Brasil até 2030 (MME, 2008).

Essa característica, bastante particular do Brasil, resulta do grande desenvolvimento do parque gerador de energia hidrelétrica desde a década de 1950 e de políticas públicas adotadas após a segunda crise do petróleo (ocorrida em 1979) e a redução do consumo de combustíveis oriundos dessa fonte e dos custos correspondentes à sua importação, na época, responsáveis por quase 50% das importações totais do País (IBGE, 2004).

A produção de biomassa para fins energéticos renováveis, gera empregos e requer menor investimento por posto de trabalho criado do que os combustíveis fósseis. Além disso, descentraliza a produção regionalmente, tem o ciclo de carbono fechado (o que significa diminuição das emissões de poluentes) e economiza as fontes não-renováveis. Essas são apenas algumas vantagens, porém seu uso deve se dar de forma sustentável, de acordo com técnicas apropriadas de manejo e cultivo e de forma a não concorrer com a agricultura.

A necessidade desta pesquisa surgiu a partir de um projeto anteriormente desenvolvido, no qual verificou-se que os briquetes produzidos a partir de RRSU obtiveram um aumento no poder calorífico, entretanto a análise qualitativa dos produtos gasosos da pirólise

evidenciou a presença de compostos poluidores e nocivos para a saúde humana, tais como: compostos fenólicos, ácidos carboxílicos, estireno, entre outros. Os valores de poder calorífico superior (PCS) superaram os de muitos outros materiais briquetados como, por exemplo, o da madeira de *Eucalyptus grandis* que devido a sua composição química é considerado de alto valor energético (19544,20 kJ/kg), enquanto que o briquete feito a partir da mesma madeira com a adição de 25 % de RRSU atingiu um valor de PCS de 21239,13 kJ/kg, ou seja 7,9 % superior ao briquete de madeira (GONÇALVES, 2006).

Na queima de RRSU, as maiores liberações de poluentes estão nos gases e nos resíduos das cinzas. O presente projeto visa propor alternativas ambientalmente corretas para aproveitar a quantidade de RRSU que são atualmente dispostos em aterros sanitários municipais, contaminando o meio ambiente de forma permanente, a partir do estudo da viabilidade técnica e ambiental para produção de blendas de briquetes de resíduos madeireiros e RRSU para seu uso como combustível.

Também é importante atentar ao estudo sobre o aproveitamento de rejeitos de resíduos sólidos urbanos (RRSU) e resíduos de biomassa no Brasil, para preparar e caracterizar física e quimicamente os briquetes formados por diferentes proporções de resíduos madeireiros e RRSU. Os briquetes serão avaliados quanto ao teor de cinzas e combustibilidade, poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU), análise termogravimétrica (TGA) e caracterizados quanto aos componentes gasosos resultantes da pirólise de briquetes por cromatografia gasosa acoplada com espectrofotômetro de massa propondo alternativas para o uso energético de briquetes com responsabilidade social e ambiental.

O presente trabalho teve por objetivo a otimização energética e ambiental de briquetes para geração de energia, produzidos a partir da utilização de resíduos madeireiros de *Eucalyptus grandis*, finos de carvão vegetal (aglutinante), resíduos lignocelulósicos de mandioca (aglutinante), ambos oriundos de fontes renováveis, e rejeito de resíduos sólidos urbanos (RRSU). Uma maior eficiência energética e ambiental de briquetes produzidos com estes resíduos será possível obtendo-se um aproveitamento dos resíduos agro-industriais e urbanos que irão repercutir positivamente do ponto de vista social. Outro aspecto positivo é a utilização racional dos recursos florestais, resíduos agro-industriais e rejeitos de resíduos sólidos urbanos para geração de energia através da produção de briquetes, aumentando assim o papel da biomassa

dentro da matriz energética nacional. Os resultados deste trabalho poderão contribuir para a obtenção de novas alternativas de minimização dos rejeitos de resíduos sólidos urbanos nos aterros sanitários e lixões, assim também como a utilização deste rejeito para geração de energia.

## **4. REVISÃO DE LITERATURA**

Princípios e conceitos fundamentais empregados na literatura no que diz respeito ao título “Otimização energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeito de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*”, serão aqui apresentados com um propósito didático e objetivando uma melhor compreensão.

### **4.1. Aspectos gerais sobre briquetagem**

#### **4.1.1. Definição e histórico**

Briquetagem é um processo no qual pequenas partículas de materiais são prensadas para formar blocos de forma definida e de maior tamanho. Por meio desse processo, subprodutos de beneficiamento agroflorestal e finos de carvão convertem-se em um material de maior valor comercial (ANTUNES, 1982).

Os resíduos lignocelulósicos, gerados pelas indústrias processadoras de madeira, ocupam grandes volumes de espaço ao se acumularem, além disso, potencializam os riscos de incêndios. O processo de briquetagem, por funcionar através da compressão, transforma os resíduos resultantes do processamento mecânico da madeira em um combustível compacto (TEISANO, 1983).

As serrarias brasileiras produzem grande quantidade de resíduos. Porém, como não existe um mercado de comercialização para estes resíduos, a compactação é uma opção para a utilização energética desses, ainda necessitando de avaliações quanto a viabilidade econômica (BORGES et al, 1993).

A aglomeração manual de finos de carvão teve início com o carvão mineral na China e na Inglaterra, com a utilização de ligantes de origem mineral, vegetal e até mesmo animal. A fabricação comercial mecanizada de briquetes de carvão mineral originou-se na França, em 1842. Até a segunda Guerra Mundial foram produzidas grandes quantidades em diversos países da Europa, sendo utilizados em fornos e caldeiras (ANTUNES, 1982). Em 1915, foi realizada pela primeira vez a briquetagem do carvão vegetal em uma fábrica no Tennessee (EUA), que produzia metanol pela destilação destrutiva da madeira, em que os finos de carvão vegetal, subprodutos do processo, eram briquetados usando-se alcatrão de madeira como aglutinante (MELO, 2000).

Outra usina de briquetagem foi construída muitos anos depois pela “Ford Motors”, em Michigan (EUA), em que as matéria-primas eram aparas de madeira. Estas eram carbonizadas, o carvão moído e briquetado, utilizava como aglutinante o amido (ANTUNES, 1982). Atualmente, ocorre em larga escala a produção de briquetes de finos de carvão mineral e vegetal e de resíduos agroflorestais nos EUA e, nos países da Europa e do Sudeste Asiático.

A crise energética tem exigido novas fontes que substituam aquelas que se tornam escassas, ao mesmo tempo respeitando os ciclos naturais, para não agravar ainda as duas outras crises (água e ar). Em vista destes fatores e com os crescentes aumentos verificados no preço dos combustíveis de origem fóssil, fontes de energias renováveis - como a biomassa - são possíveis soluções para este problema, especialmente o da escassez de recursos não-renováveis, como o petróleo (ROWELL, 1996).

Godemberg (1984), alertou que a maior participação dos recursos da biomassa se tornará viável nas próximas décadas e evitará o aumento da dependência dos combustíveis fósseis e da energia nuclear, previstas nas análises futuras da energia considerando a demanda. Além disso, as estratégias orientadas para o consumo final nos países em desenvolvimento deve ser diferente das estratégias apropriadas para os países industrializados. No primeiro caso, devem levar em consideração a existência da pobreza e da

desigualdade na distribuição de serviços de energia entre a população. Portanto, para os países menos desenvolvidos, a energia deve tornar-se um instrumento para atingir objetivos econômicos e sociais.

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

Um dos maiores problemas do fim do século foi caracterizado pela crise de escassez de recursos que até a metade do século não havia sido identificada. Quatro principais crises podem ser citadas: crise da água, ar, materiais e energia (ROWELL, 1996). As duas primeiras já são sentidas pelo homem em grande extensão e a terceira e a quarta encontram-se em fase de crescimento acelerado. O processo de utilização de resíduos de biomassa para geração de energia pode ajudar a mitigar a crise energética.

#### **4.1.2. Tecnologias de compactação**

Bhattacharya et al. (1989), classificaram os processos de compactação de biomassa em duas categorias principais: compactação quente em alta pressão e compactação fria em baixa pressão. O primeiro tipo é o mais importante em relação à variedade de matérias que pode processar e às características dos produtos obtidos, tanto que se tornou o mais comum e o termo compactação usualmente se refere implicitamente a este tipo de técnica. A conveniência de praticar a compactação em condições de elevada pressão consiste na obtenção de um produto com maior densidade e maior durabilidade, especialmente em relação ao manuseio e transporte. Em relação à temperatura, a compactação em condições acima de 100 °C permite a fluidificação da lignina contida nas células da biomassa, a qual age como um aglutinante entre as partículas, dispensando, assim, o uso de ligantes adicionais na biomassa. Além disso, temperaturas elevadas evaporam parte da umidade da biomassa, melhorando o poder calorífico do produto compactado. Os

equipamentos empregados na compactação podem ser classificados em quatro grupos: Prensas de pistão; Prensas de parafuso cônico; Prensas de rolo; Prensas peletizadoras.

#### 4.1.2.1. Prensa de pistão mecânico

Na prensa de pistão mecânico, a matéria-prima é alimentada e compactada em uma matriz por meio de um pistão que se movimenta alternadamente (Figura 1). A matriz é geralmente constituída por um conduto afunilado de seção circular, que serve para compactar e extrudar na forma de briquetes. A fricção da matéria-prima contra a parede da matriz provoca um aquecimento que varia de 150 à 300 °C (BHATTACHARYA et al., 1989). As prensas de pistão são normalmente movidas por energia elétrica e dotadas de volante, o qual transmite o movimento ao pistão por meio de uma biela (mecanismo de excêntrica). O volante serve para compensar as flutuações na demanda de energia, acumulando energia nos períodos de mínima demanda (retorno e alimentação) e descarregando-a nos períodos de máxima demanda (compactação/extrusão) (BHATTACHARYA et al., 1989).

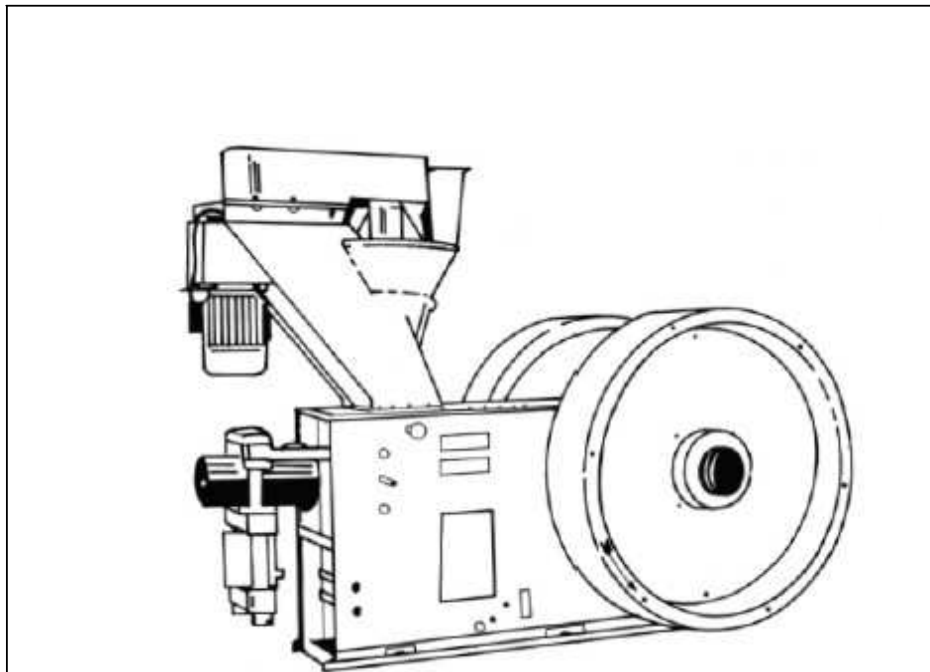


Figura 1. Prensa de pistão mecânico (ERIKSSON et al., 1990).

As prensas de pistão são comumente dimensionadas para capacidades superiores a 1000 kg/h, pois máquinas de capacidades menores não são economicamente viáveis (ERIKSSON et al., 1990). Os briquetes apresentam geralmente forma cilíndrica, com diâmetro entre 50 e 100 mm. O problema típico deste tipo de prensa é o desgaste da matriz e do pistão.

#### 4.1.2.2. Prensa com parafuso cônico

Nesta briquetadeira, o parafuso cônico conduz a matéria-prima e a pré-compacta em uma antecâmara, posteriormente um cabeçote de compressão, compacta e extrusa a biomassa em uma matriz (Figura 2). A matriz pode ser formada por furos múltiplos de 28 mm de diâmetro ou por um único furo de 95 mm. O aquecimento elevado gerado pelo atrito requer um sistema de resfriamento ao redor da matriz. A capacidade produtiva varia entre 600 e 1000 kg/h, dependendo do tipo de material. Apesar da excelente qualidade dos briquetes, o defeito desta máquina é o rápido desgaste da cabeça de reposição (ERIKSSON et al., 1990).

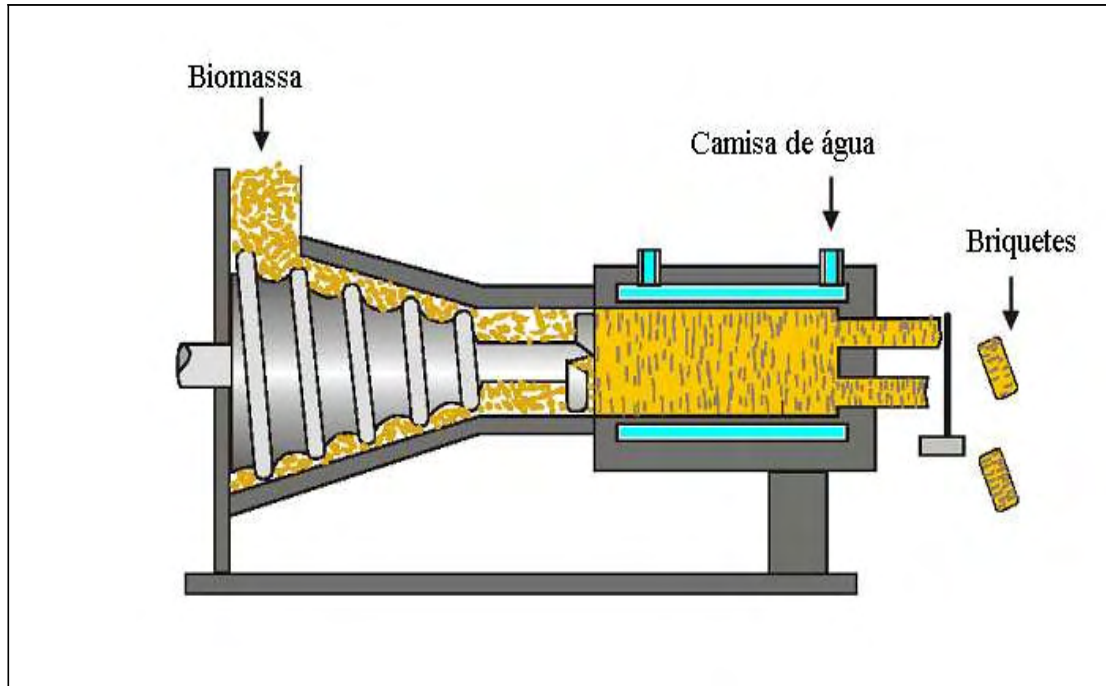


Figura 2. Detalhe da prensa de parafuso cônico (BHATTACHARYA et al., 1989).

#### 4.1.2.3. Prensa peletizadora

A prensa peletizadora consiste em um rolo que gira contra uma matriz dotada de vários furos de pequeno diâmetro (normalmente entre 5 e 15 mm). A matéria-prima é colocada entre o rolo e a matriz e a passagem do rolo provoca a extrusão do material através dos furos (Figura 3). O atrito do material entre as partes provoca o seu aquecimento. O produto extrudado é denominado de pellet (e não briquete) devido ao pequeno diâmetro (BHATTACHARYA et al., 1989).

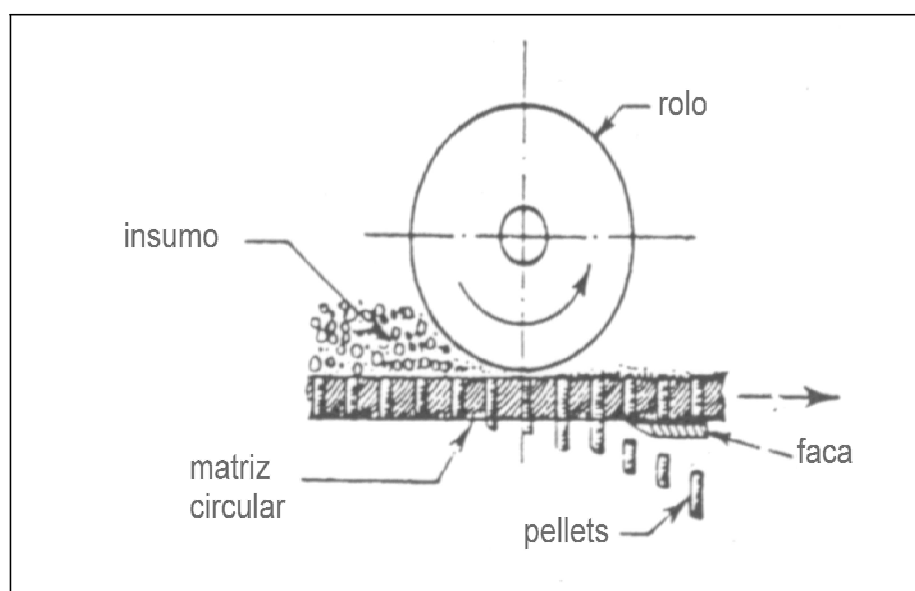


Figura 3. Detalhe da peletizadora.

#### 4.1.3. A briquetagem como forma de recuperação de energia

A briquetagem consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas com ou sem adição de ligantes e com ou sem tratamento térmico posterior (SALAME, 1992). O aproveitamento de produtos naturais, em especial da madeira associada ao lixo urbano significa a agregação de valor à materiais anteriormente considerados resíduos.

Segundo Salame (1992), os resíduos vegetais, que podem ser serragem, bagaço de girassol, palha de milho, casca de arroz, restos de madeira, juntamente com os resíduos urbanos como papéis, alguns polímeros, cascas de vegetais e outros, podem ser reaproveitados na fabricação de briquetes, que são uma forma de proteção ambiental, pois

como ocorre com a serragem, madeira e o lixo não-reciclável, estes resíduos geralmente são destinados a aterros ou queimados gerando altos índices de poluição ao meio ambiente, sem resultar em energia reutilizável.

Estima-se que hoje, só no Brasil, cerca de 20 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos vegetais são desperdiçados pelas fábricas. Para Quirino (1993), o motivo é "a abundância de madeira no país e o descaso dos empresários, que contribuíram para que o processo da briquetagem não fosse difundido. Agora, o que o IBAMA pretende é incrementar esse processo nas indústrias". Aproveitar sobras das indústrias madeireiras para utilização como lenha é a meta dos projetos do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2005).

Segundo Quirino (1987), todo briquete é um combustível, ou seja, é um material cuja queima é utilizada para produzir calor, energia ou luz. A queima ou combustão é uma reação química de oxido-redução, na qual os constituintes do combustível se combinam com o oxigênio do ar. Para iniciar a queima é necessário que a biomassa atinja uma temperatura definida, chamada de temperatura de ignição. O poder calorífico de um combustível é dado pelo número de calorías desprendidas na queima do mesmo e a sua classificação é dada segundo o estado em que se apresenta (sólido, líquido ou gasoso).

Ao misturar o RRSU com os resíduos vegetais, é possível a obtenção de briquetes com maior poder calórico devido à presença de materiais derivados de petróleo, como os polímeros. A briquetagem direta de muitos componentes do RRSU não é possível pelas características do material, além das conseqüências ambientais da queima dos mesmos, como por exemplo, elastômeros e termofixos.

#### **4.1.4. Briquetagem com a utilização de aglutinantes**

A briquetagem propriamente dita resulta da aplicação de pressão, em que prensas sobre a massa e o ligante fazem com que o briquete adquira resistência e formato geométrico definido. Alguns aglutinantes são adicionados com água ao briquete proporcionando uma umidade alta ao produto final. Por esse motivo, devem ser secos, o que geralmente é conseguido com a passagem de ar quente e seco (MARSOLLA, 1998).

O aglutinante é um material que tem a função de unir as partículas a serem compactadas. A escolha do tipo e da quantidade de aglutinante é o ponto mais crítico na manufatura dos briquetes, sendo a etapa mais sensível aos custos do processo (MARSOLLA, 1998).

A escolha do aglutinante a ser utilizado é em função do custo e do uso a ser dado ao briquete. Geralmente, os aglutinantes são bem mais caros que o componente principal, sendo necessário um balanço entre as quantidades destes componentes, a fim de se conseguir um produto economicamente viável.

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

#### **4.2. Composição da biomassa.**

A biomassa celulósica é, na verdade, uma mistura complexa de polímeros naturais de carboidratos conhecidos como celulose, hemicelulose, lignina e uma pequena quantidade de outras substâncias, tais como, extrativos e cinzas. A celulose é a maior porção e representa cerca de 40% a 50% do material. As partes remanescentes são formadas, predominantemente, por lignina e uma quantidade menor de extrativos. A celulose é composta por moléculas de glicose, ligadas umas as outras em longas cadeias que formam uma estrutura cristalina. Para árvores de coníferas, o componente predominante da hemicelulose é a xilose (MOREIRAS, 1997).

A composição da biomassa apresenta um papel importante na distribuição dos produtos de pirólise. Cada material exibe uma característica particular quando é pirolisado devido a proporção dos componentes que o constitui (BRIDGWATER, 2002).

#### 4.2.1. Maneiras de utilização e valorização de um resíduo lignocelulósico.

Um resíduo lignocelulósico pode ser reciclado ou reutilizado como matéria-prima em um processo diferente daquele de origem. Por exemplo, os resíduos podem ser utilizados energeticamente na produção de calor, de vapor ou de eletricidade em grupos geradores, ou termoelétricas. Esses resíduos podem ser aproveitados na forma sólida, como briquete ou carvão vegetal. Pode, ainda, se gaseificado transformar-se em um combustível gasoso ou utilizado como gás de síntese (IBAMA, 2009).

Na figura 4 são demonstradas de forma reduzida as possibilidades de aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos.

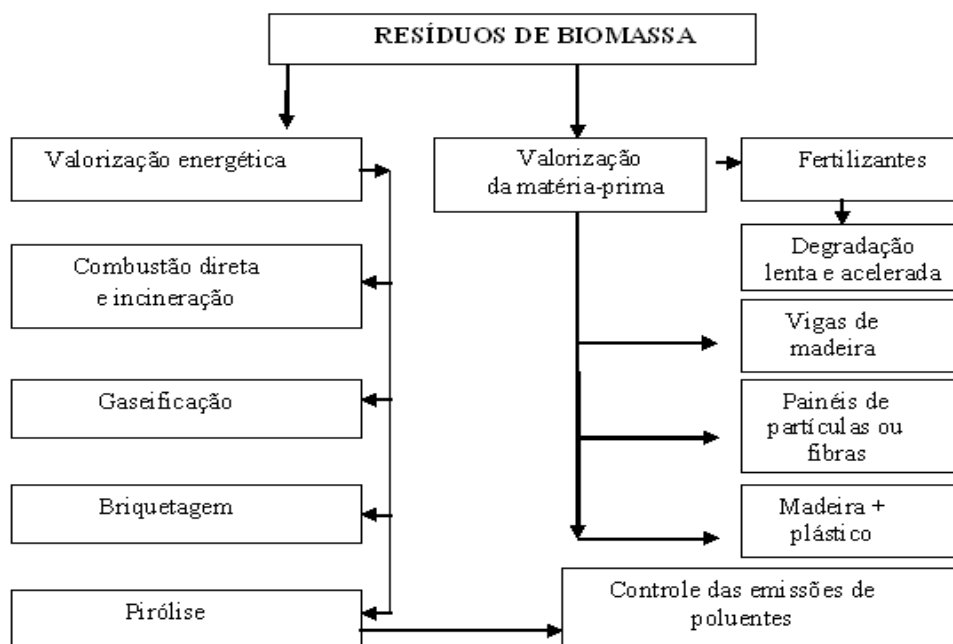


Figura 4. Possibilidades de aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos (IBAMA, 2009).

#### 4.2.2. Compactação de biomassa: conceitos e histórico

Srivastava et al. (1995), relataram que a briquetagem como tecnologia foi inventada no começo do século XIX. Na segunda metade do século XIX foi desenvolvida a primeira máquina a pistão para produzir briquetes de turfa (STAUBER, 1995). Em 1923, a sociedade “Pacific Coal and Wood” de Los Angeles estava já comercializando briquetes de

resíduos de madeira, usando uma prensa especialmente projetada. Os briquetes eram cilíndricos, com diâmetro aproximado de 7,5cm e comprimento de 25cm, amarrados com arame para manter a coesão durante o transporte. Relatos indicam que estes briquetes apresentavam excelentes propriedades de combustão (SRIVASTAVA et al., 1995).

Desde então, várias outras aplicações e tecnologias de briquetagem foram implementadas em vários países do mundo. Bhattacharya et al. (1989), após realizarem um estudo sobre as prensas para compactação de biomassa, encontraram 152 produtores no mundo, sendo a maioria concentrada na Alemanha.

A utilização de resíduos vegetais (galhos, casca de arroz e café, bagaço, serragem, etc.) como combustível representa uma interessante alternativa aos combustíveis sólidos tradicionais (lenha e carvão). O modo mais fácil e simples de utilizar o poder calorífico destes materiais é a combustão direta (SRIVASTAVA et al., 1995).

Os resíduos vegetais possuem baixa densidade e muitos deles se encontram em forma de pó, provocando poeira e poluição, tornando difícil e caro o manuseio, o transporte, o armazenamento e seu uso como combustível. A maioria dos resíduos agro-florestais contém elevada umidade. Portanto, entre 18 e 20% do calor gerado na combustão é consumido para secar a própria biomassa, perdendo assim grande parte de seu potencial energético. Dessa forma, a compactação dos resíduos vegetais em forma de briquetes (briquetagem) pode ser uma solução para alguns desses problemas.

#### 4.2.2.1. Resíduos compactáveis

Os resíduos podem ser agrupados em três categorias principais:

- a) **Resíduos agrícolas**, gerados diretamente no campo durante a colheita da safra (por exemplo: a palha dos cereais);
- b) **Resíduos florestais** (galhos, folhas, etc., gerados na exploração florestal);
- c) **Resíduos agro-industriais**, gerados no beneficiamento de grãos, raízes, gramíneas e madeira (casca de arroz, de café, de amendoim, de nozes, bagaço de cana, serragem, resíduos lignocelulósicos de mandioca, etc.).

Em princípio, todos os resíduos vegetais são potencialmente

compactáveis, desde que se encontrem nas condições apropriadas de umidade e tamanho de partícula. Todavia, os resíduos que realmente despertam interesse para compactação são aqueles que se encontram concentrados em um único lugar, pois – como comentado anteriormente – os custos de coleta e de transporte afetam consideravelmente a viabilidade econômica da produção e venda de briquetes (ERIKSSON et al., 1990).

#### **4.2.2.2. Efeito do tamanho das partículas**

A matéria-prima ideal deveria ser composta por uma mistura de partículas de vários tamanhos, sendo que a medida máxima depende do tipo de material e do diâmetro da matriz. Geralmente é aceitável uma granulometria entre 5 e 10 mm, enquanto que grandes prensas com matrizes de 125 mm de diâmetro aceitam partículas de até 15 mm. O tamanho inicial das partículas influencia também a densidade final dos briquetes. Uma matéria-prima de baixa granulometria resulta em briquetes muito densos, mas requer pressões e temperaturas muito elevadas para aglomerar as partículas sem adição de aglutinantes (ERIKSSON et al., 1990).

Para melhorar o desempenho energético da briquetadeira pode ser instalado um sistema de pré-aquecimento da matéria-prima constituído por um trocador de calor tubular, onde a matéria-prima passa por um tubo central, aquecido em torno por um fluxo de ar quente ou de óleo térmico (GROVER, 1996; BHATTACHARYA et al., 2002). Além dos sistemas de tratamento da matéria-prima, deve ser implementado um sistema de armazenamento para o montante de insumo coletado (resíduos soltos) e para os briquetes produzidos.

#### **4.2.2.3. Efeito do teor de umidade**

Dependendo do tipo de matéria-prima e do processo de compactação existe uma faixa de teor de umidade na qual o material pode ser compactado adequadamente. O excesso de umidade pode provocar explosões devido à formação de vapor. Por outro lado, uma matéria-prima muito seca dificulta os mecanismos de ligação entre as partículas.

Bhattacharya et al. (1989), recomendaram que o valor ótimo de umidade deve estar entre 8 e 12%.

#### 4.2.2.4. Vantagens e desvantagens da compactação

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

Tabela 1. Vantagens e desvantagens do processo de compactação de resíduos de biomassa.

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

### 4.3. Conversões energéticas para os resíduos agroflorestais

Em geral, a utilização de resíduo agroflorestal “in natura” como combustível possui baixa eficiência energética, sendo necessário na maioria dos casos a utilização de processos industriais para tentar corrigir algumas propriedades apresentadas, tais como: baixa densidade, alta umidade e baixo poder calorífico (RAVAGLIA, 1967).

Os principais métodos de conversão termoquímica da biomassa são: a pirólise, a liquefação, a gaseificação e a combustão (MARTINS, 1990).

#### 4.3.1. Pirólise

A pirólise é o processo pelo qual a biomassa é aquecida com taxas de temperatura controlada em ambiente fechado em ausência de agente oxidante (ar ou oxigênio). Gases, vapores d'água, líquidos orgânicos, alcatrão e principalmente carvão são os produtos resultantes do processo (KULESZA, 2003). A pirólise é também chamada de destilação seca, pois ocorre uma decomposição térmica da biomassa, separando-a em vários componentes. Esses componentes obtidos e suas quantidades dependem basicamente de quatro fatores: taxa de aquecimento, temperatura final, tempo de residência à temperatura final e das dimensões da biomassa pirolisada. Através da variação desses parâmetros consegue-se obter produtos diferentes (JUVILLAR, 1980). Rendimentos dos produtos típicos obtidos por meio de diferentes formas de pirólise de madeira (base seca) são mostrados na tabela 2.

Na maioria das biomassas, a evolução dos voláteis com a temperatura se dá da seguinte forma, (MARTINS, 1990):

de 100→200°C: Volatilização da água presente.

de 200→280°C: Evolução de gases de moléculas leves (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O), alcatrão (fenóis, ácidos orgânicos), ácido acético, metanol, entre outros.

de 280→450°C: Hidrocarbonetos pesados.

Tabela 2. Rendimentos dos produtos típicos obtidos por meio de diferentes formas de pirólise de madeira (base seca).

<b>Pirólises</b>	<b>Temperaturas</b>	<b>Líquido (%)</b>	<b>Carvão (%)</b>	<b>Gás (%)</b>
Pirólise rápida	Temperaturas moderadas (450 - 550°C), curtos tempos de residência dos vapores e biomassa com baixa granulometria.	75	12	13
Carbonização	Baixas temperaturas (400 - 450°C), curtos tempos de residência (pode ser de horas ou dias), partículas grandes.	30	35	35
Gaseificação	Alta temperatura (900°C), longo período de residência.	5	10	85

Fonte: BRIDGWATER, 2001.

#### 4.3.2. Carbonização

Quando o objetivo principal é obter somente o carvão sem rígidas especificações, o método mais simples e barato é a carbonização em fornos de superfície. São fornos geralmente feitos de barro com uma porta para a entrada de biomassa, localizados ao ar livre, sendo muito utilizados na produção de carvões siderúrgicos, localizados próximos aos locais de extração de madeira; ao contrário, a pirólise necessita de uma pequena entrada de ar para o início da combustão, a fim de manter o processo de carbonização (JUVILLAR, 1980).

Perde-se, portanto, parte da energia contida para manter o processo e outra parcela pelos gases e voláteis que vão para a atmosfera. As vantagens desse processo são seus baixos custos devido a fatores como a ausência de fonte externa de energia, mão de obra não especializada, manutenção quase nula e a possibilidade de instalação dos fornos próximos ao local, onde se encontra a matéria-prima, diminuindo-se despesas com transportes (JUVILLAR, 1980).

#### 4.3.2.1. Carvão vegetal

Há grande disponibilidade de resíduos de carvão, segundo dados de Melo (2000), que reportou a geração de finos de carvão por volta de 20%, desde a sua fabricação até a entrada nos aparelhos de redução. Devido a sua friabilidade, o carvão vegetal gera finos durante a produção, transporte e manuseio, tornando-se necessário peneirá-lo de acordo com a granulometria mais adequada para sua utilização em altos fornos de redução.

O carvão vegetal por ser um material muito friável, é rejeitado quando se apresenta numa granulometria inferior ao mínimo estabelecido para as operações de alto forno, ou seja, 12 mm. Os finos de carvão, denominação dada as partículas rejeitadas, normalmente são descartadas pelas empresas, sendo vendidos a baixo custo para a mistura com óleo combustível, reduzindo-se consideravelmente o consumo de óleo e mantendo as mesmas propriedades energéticas (MOREIRAS, 1997).

#### 4.3.3. Gaseificação

A gaseificação de biomassa é um processo de transformação da matéria sólida vegetal em gás combustível, gerando CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> como produtos mais importantes. O gaseificador é essencialmente um forno, onde se oxida biomassa em condições controladas, tendo como meio oxidante o oxigênio (ou ar) e vapor d'água. Os processos de gaseificação industrial se realizam no gasogênio ou gaseificador (ASSUMPCÃO, 1981).

#### 4.3.4. Combustão

Processo destrutivo das moléculas carbonadas da biomassa, ocorrendo com excesso de oxigênio, resultando em aumento de temperatura e liberação de energia (GOMES, 1980). As principais reações que ocorrem com os componentes elementares (C, H) da biomassa com o oxigênio da sua própria constituição mais o oxigênio do ar são:



Deve-se ressaltar que a combustão é utilizada somente para obtenção de energia térmica e não para aumentar a eficiência energética da biomassa como em outros processos citados. Um fator relevante na eficiência da combustão é o teor de umidade. Quanto maior a umidade, menor é a eficiência do processo, e menor a energia útil, pois parte da energia de combustão é utilizada para a vaporização da água (GOMES, 1980).

#### **4.4. Resíduos de biomassa vegetal para geração de energia**

Os combustíveis sólidos sempre foram uma fonte energética de grande importância na história do homem. A lenha é utilizada desde os períodos pré-históricos enquanto que o carvão vegetal e mineral foram utilizados em grande escala na evolução industrial durante os séculos XVIII e XIX. Já no século XX, ao lado desses combustíveis sólidos tradicionais, novas formas de energia tomaram grandes proporções em termos de consumo como os derivados de petróleo, energia hidráulica e nuclear (MARTINS, 1990).

Dentre os combustíveis sólidos renováveis, a lenha apresenta grande importância em termos de consumo, principalmente nos setores residenciais, industriais e rurais (MI, 2010).

Os resíduos rurais provenientes da biomassa vegetal incluem todos os tipos de resíduos lignocelulósicos gerados pelas atividades produtivas nas zonas rurais, quer sejam resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais (SARTORI, 2001). A quantificação dos resíduos rurais é feita com base nos "índices de colheita", que expressam a relação percentual entre a quantidade total de biomassa gerada por hectare plantado de uma determinada cultura e a quantidade de produto economicamente aproveitável (SEBRAE, 2005).

A disponibilidade de resíduos rurais é estimada com base na produção agrícola e extração de madeira dos municípios. Alguns exemplos desses resíduos de biomassa são bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz, cascas de café, resíduos florestais e madeireiros, como a serragem e cascas de árvores (SEBRAE, 2005).

O problema de se verificar a disponibilidade e potencial dos resíduos lignocelulósicos é que dificilmente são feitas pesquisas para quantificá-los, como é feito com outros insumos energéticos, onde se quantificam recursos e reservas (petróleo, carvão mineral, gás natural) ou produção anual (cana-de-açúcar e culturas alimentícias).

É necessário, portanto, em grande parte dos casos, estimar-se a disponibilidade dos resíduos. A maioria dessas estimativas pode ser considerada de razoável aceitação quando o objetivo é obter uma ordem de grandeza do potencial real desses resíduos (MME, 2008).

A indústria madeireira tem a característica de gerar grandes volumes de resíduos durante o processo de beneficiamento. Esta geração ocorre nos processos normais ou mesmo antes da madeira ser introduzida no processo propriamente dito, pois através de inspeções, inclui-se que determinadas peças não atingirão os requisitos de qualidade para atender as exigências do mercado consumidor, tornando-se resíduo juntamente com as serragens, maravalhas, costaneiras, aparas, pó de serra, etc. (PEREIRA, 2001). Atualmente estes resíduos são procurados por granjas, mas a oferta de serragem ainda supera em muito a procura e o material muitas vezes não tem uma finalidade específica.

A vantagem de utilizar a serragem na forma de briquetes consiste em um gerenciamento sustentável destes resíduos, como uma forma de gerar energia em volumes compactos a partir de um recurso natural renovável; além de não possuir o caráter poluidor como o de fontes fósseis de energia.

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

#### **4.5. Agroindustrialização da mandioca**

A mandiocultura no Brasil encontra-se em diferentes condições, variando desde a cultura tradicional, de subsistência, com pouca ou nenhuma tecnologia e de baixa produtividade (8 a 12 t/ha), até pólos na região oeste do Paraná, Mato Grosso do Sul e noroeste de São Paulo, com plantio de mandioca empresarial, mecanizados, com tecnologia,

visando alcançar produtividade de até 40 t/ha, já em perfeita sintonia com a indústria e oferecendo segurança de comercialização aos produtores (SCHWENGBER, 2009).

A produção de mandioca no Brasil é de cerca de 26 milhões de toneladas por ano. Segundo a Associação Brasileira dos Produtores de Amido de Mandioca - ABAM (2010), quase a metade é destinada à produção de farinha, 40% é usado para consumo de mesa e ração animal, e 9,5% transformada em amido, principalmente na região Sul. A Tabela 3, mostra os rankings de exportação brasileira de fécula e farinha de mandioca desde o ano de 2005 até junho de 2007 (AGRIANUAL, 2008).

Tabela 3. Exportações brasileiras de fécula de mandioca no período 2005-2007.

País	2005		2006		2007	
	Milhões US\$	t	Milhões US\$	t	Milhões US\$	t
Portugal	268	596	315	633	291	487
EUA	224	369	247	337	206	274
Japão	64,8	63,5	148	177	42,2	40,7
Uruguai	50,6	161	93,6	307	39,5	93,5
Cabo verde	42,1	74,9	48,8	108	50,2	92,2
Itália	17,1	21,8	25,2	32,1	33,6	36,5
Reino Unido	15,6	18,00	18,2	18,6	13,1	14,1
Angola	6,2	5,4	18,1	11,8	35,5	21,7
Luxemburgo	0,0	0,0	14,0	17,0	3,9	3,7
Alemanha	15,00	15,0	11,9	13,4	5,5	5,7
Irlanda	0,0	0,0	11,0	8,5	1,9	1,0
Outros	23,6	58,5	21,3	39,0	23,3	26,6
Total	726	1.387	972	1.701	743	1.096

Fonte: AGRIANUAL 2008.

Na etapa do processamento da mandioca são gerados os principais subprodutos e resíduos, que representam um volume nada desprezível. Por exemplo, no processo de produção da fécula são gerados aproximadamente, por tonelada da raiz, 2,62 m<sup>3</sup> de água de lavagem, 3,68 m<sup>3</sup> de água de extração de fécula, 1,1 m<sup>3</sup> de manipueira e uma quantidade de bagaço (resíduo lignocelulósico) equivalente a 1, 070 kg (CEREDA, 2001).

O aproveitamento dos resíduos ou subprodutos é importante tanto para reduzir os impactos negativos no ambiente quanto para reduzir os custos de produção e aumentar as receitas. O aproveitamento mais racional de subproduto poderá favorecer ainda mais o balanço energético (MENEZES, 1980).

A disposição no ambiente de resíduos gerados em diversas atividades industriais tem resultado em frequentes relatos de problemas de poluição ambiental. Tais problemas levaram as autoridades a elaborar medidas efetivas para minimizar a poluição. Entre essas medidas, podem ser citadas: redução da quantidade de resíduo gerado, utilização de tecnologia que permita gerar resíduos menos poluentes, tratamento adequado antes da disposição no ambiente e aproveitamento dos resíduos em outras atividades.

Atualmente, as alternativas de valorização de resíduos através do seu aproveitamento tem sido muito incentivadas, já que podem contribuir para a redução da poluição ambiental, bem como permitir a valorização econômica desses resíduos tornando-os um subproduto e deste modo agregando valor ao processo de agroindustrialização. Os resíduos gerados no processo de extração de amido, a partir da mandioca, causam sérios problemas ambientais considerando-se os volumes e a composição dos mesmos. São constituídos por partes da planta que passam por diversos processos físicos e/ou químicos que modificam em parte sua composição, que pode variar dependendo do cultivar, a idade da planta, tempo após a colheita e o tipo de equipamento utilizado.

A proteção do meio ambiente gera a necessidade de valorizar os resíduos, aplicando tecnologias que permitam estabelecer novos usos sendo apropriadas e adequadas a cada processo, os resíduos transformados em subprodutos reduzem os impactos no meio ambiente e geram recursos, reduzindo custos (CEREDA, 2001).

A palavra resíduos leva uma imagem depreciativa, onde o produto, analisado no contexto global do processamento, não tem serventia e deve ser descartado. Esse conceito tem sido gradualmente abandonado, substituído por outro como subprodutos e mesmo co-produtos. O conceito altera o contexto do processo e coloca em foco a possibilidade de melhor utilização da matéria-prima. Além disso, fica cada vez mais oneroso tratar os efluentes e resíduos, de forma que sempre que possível é melhor evitar o tratamento e utilizar os resíduos como matéria-prima em novos processos (CEREDA, 1994).

Reduzir custo e o impacto dos resíduos no ambiente deve ser a estratégia a ser intensificada no aproveitamento desses materiais. Na agenda de pesquisa que vise reduzir o impacto dos resíduos no custo final do processo é fundamental incluir ações que completem novos usos. Os resíduos, dentro deste novo contexto, deveriam ser vistos e remunerados como subprodutos. Caso contrário, o valor do produto final da propriedade agrícola, convertido em termos de matéria-prima, será bastante elevado quando comparado com concorrentes diretos, como o milho, por exemplo. Os subprodutos da mandioca, assim como os da batata, são de baixa qualidade e valor comparativamente às outras principais fontes de matéria-prima de amido. Todavia, isso pode se reverter com o ajuste às condições locais, divulgação e adoção das alternativas que possam transformar os resíduos do processo da mandioca em insumos com novos e atuais processos industriais. Paralelo a isso, novas alternativas devem ser pesquisadas (CEREDA, 2001).

#### **4.5.1. Mandioca**

A mandioca é uma planta de origem latino-americana, e sua produção está voltada para o consumo humano. Devido a sua adaptabilidade, é uma planta extremamente cultivada em áreas onde outras espécies amiláceas não se desenvolvem com a mesma desenvoltura. A mandioca pode ser utilizada diretamente para o consumo ou destinada para a indústria na fabricação de farinha ou fécula, e conseqüentemente, a geração de resíduos lignocelulósicos (CASSONI, 2008).

Na industrialização da mandioca são gerados diversos resíduos, tais como casca, resíduos lignocelulósicos e manipueira, que é o resíduo líquido. Os efluentes de uma fábrica de farinha de mandioca podem ser divididos em duas categorias básicas: as águas de lavagem das raízes e a água proveniente da prensagem da massa de mandioca, denominada água de prensa ou manipueira. As águas de lavagem possuem DQO de 2600 mg/L embora em maior quantidade (1 a 3 m<sup>3</sup>/t de mandioca processada) possuem menor poder poluente. A manipueira é bem mais agressiva ao meio ambiente, tanto pelo alto teor de cianeto total quanto pela carga orgânica (PAWLOSKI et al., 1991).

Os resíduos da industrialização da mandioca são partes constituintes da própria planta, gerados em função do processo tecnológico adotado. Uma feccularia que

processa, em média, 200 toneladas de mandioca por dia, gera aproximadamente 183 toneladas por dia de bagaço, com 15% de matéria seca, 73% de amido e 15% de fibras na matéria seca (LEONEL et al., 2001).

#### 4.6. Resíduos Sólidos Urbanos – RSU

Denominam-se como Resíduos Sólidos Urbanos ou Municipais, todo e qualquer tipo de lixo produzido nas cidades, proveniente de atividades humanas, que são lançados no ambiente (RECICLÁVEIS, 2009). A composição dos resíduos sólidos urbanos pode variar conforme as características da cada cidade (OLIVEIRA, 1969). Na tabela 4 são desmonstradas diferentes definições de resíduos sólidos urbanos.

Tabela 4. Definições de resíduos sólidos urbanos.

<b>Lixo:</b> “É todo e qualquer resíduo sólido resultante das atividades diárias do homem em sociedade. Pode encontrar-se nos estados sólidos, líquidos e gasosos” (CAMPINAS, 2010).	PMC
<b>Resíduos Sólidos:</b> “Também conhecidos popularmente como lixo, são despejos sólidos, restos, remanescentes putrecíveis e não putrecíveis (com excessão dos excrementos) que incluem papel, papelão, latas, material de jardim, cadeira, vidro, cacos, trapos, lixo de cozinha e resíduos de indústria, instrumentos defeituosos e até mesmo aparelhos eletrodomésticos imprestáveis” (CETESB, 2009).	CETESB
<b>Resíduos Sólidos:</b> “Resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços de varrição. Ficam incluídos nesta definição, os lodos provenientes do sistema de tratamento de águas, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgostos ou de corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível” (ABNT, 2004).	ABNT
<b>Resíduos Sólidos:</b> “Todo material sólido ou semi-sólido indesejável e que necessita ser removido por ter sido considerado inútil por quem o descarta, em qualquer recipiente destinado a este ato” (IBAM, 2001).	IBAM
<b>Lixo:</b> “Restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis. Normalmente, apresentam-se sob estado sólido, semi-sólido ou semi-líquido (com o conteúdo insuficiente para que possa fluir livremente)” (IBGE, 2009).	IBGE

O desenvolvimento de um país está diretamente relacionado não só ao aumento do consumo energético, mas também ao aumento da geração de lixo por habitante,

visto que, quanto maior a renda da população, maior o consumo de energia. Porém, o lixo pode não se constituir num problema até que o limite da capacidade de seu tratamento adequado seja atingido (IBAMA, 2005). Consumir mais energia do que a capacidade de geração e produzir mais lixo que a capacidade de tratamento adequado são condições insustentáveis (KANAYAMA, 1995).

#### 4.6.1. Os resíduos sólidos urbanos no Brasil

Em 1995, o Brasil produzia 241.614 toneladas de lixo por dia, e 76% ficavam expostos a céu aberto em lixões (CEMPRE, 2005). A produção brasileira de lixo "per capita" hoje gira em torno de 600g/hab/dia com a existência de poucos aterros sanitários ou aterros controlados para esta demanda no Brasil. Em São Paulo, estima-se que cada habitante produz 1 kg de lixo por dia e este valor tende a crescer, tornando a problemática do lixo inexorável e irreversível e legitimando a necessidade de alternativas eficazes e custo-efetivo para o destino do lixo na grande São Paulo (CEMPRE, 2005), (tabela 5).

Tabela 5. Destino do lixo da Grande São Paulo

<b>Locais</b>	<b>Quantidade %</b>
Lixões	70
Aterros Controlados	13
Aterros Sanitários	10
Tratado e re-introduzido na cadeia produtiva.	1

Fonte: (CEMPRE, 2005).

Perto de noventa e sete por cento das Prefeituras brasileiras destinam inadequadamente o lixo produzido em seu território, saturando os lixões mesmo que sua vida útil já esteja no fim como ocorre na maioria dos casos (CEMPRE, 2005).

Nas regiões metropolitanas, o problema atinge um grau de dificuldade quase intransponível devido à falta de novos locais compatíveis para a sua instalação de lixões. Cabe à sociedade e órgãos competentes neste momento dar uma resposta ecologicamente

correta e que tenha apelo econômico, de forma a atrair capitais, nacionais ou não, para resolver este problema (MELLABY, 1982).

Em busca da solução, faz-se necessária uma alteração na forma hoje adotada para o recolhimento do lixo doméstico e industrial, dividido em lixo seco e úmido, em substituição aos complexos métodos de coleta seletiva que foram tentados até agora, de forma a possibilitar um fácil manuseio do mesmo no seu destino final, criando assim um negócio rentável na reciclagem destes materiais (CEMPRE, 2005). Para seleção e classificação dos materiais recicláveis bastaria a instalação de uma Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo e o incentivo à coleta seletiva, onde seriam classificados os materiais: vidros, metais, papéis e papelão e os plásticos, com o mínimo de rejeitos (CEMPRE, 2005).

É possível economizar energia com gerenciamento integrado de Resíduos Sólidos Urbanos, conservando a energia decorrente da redução do consumo, reutilizando ou usando materiais recicláveis no processo de produção, bem como através da queima de resíduos (OLIVEIRA, 1969). Segundo Gripp (1998), o RRSU pode ser: reduzido, reutilizado e principalmente reciclado.

#### **4.6.2. Reduzir**

Pode-se reduzir significativamente a quantidade de lixo quando se consome menos de maneira mais eficiente, sempre racionalizando o uso de materiais e de produtos do dia a dia. A redução na geração de resíduos ao mínimo possível deve ser o objetivo prioritário. Esse processo dependente da integração entre governo, empresas e sociedade, através da conscientização ambiental, investimentos em processos industriais, incentivos governamentais, etc., num processo complexo e de longo prazo (GRIPP, 1998).

#### **4.6.3. Reutilizar**

Esgotadas as possibilidades de redução dos resíduos, os esforços da sociedade devem estar voltados para a reutilização. O desperdício é uma forma irracional de utilizar os recursos e diversos produtos podem ser reutilizados antes de serem descartados, sendo usados na função original ou criando novas formas de utilização (GRIPP, 1998).

#### 4.6.4. Reciclar

É o termo usado quando o produto de origem industrial, artesanal e agrícola é feito, por indústrias especializadas após ser usado e descartado ao fim de seu ciclo de produção e utilização. A reciclagem vem sendo mais usada a partir de 1970, quando se acentuou a preocupação ambiental, em função do racionamento de matérias-primas. É importante que as empresas se convençam de que é antieconômico e destrutivo ao meio ambiente desperdiçar e acumular de forma poluente materiais potencialmente recicláveis (JARDIM, 1995).

Segundo Gripp (1998), o terceiro "R" também poderia ser representado pela palavra "Recuperar", caracterizando um reprocessamento físico e/ou químico do resíduo, sendo reaproveitado no ciclo produtivo, transformando-se de "lixo" em matéria-prima.

Normalmente, esta recuperação está associada à reciclagem e compostagem de resíduos, porém há outras técnicas para se fazer esta recuperação, quando, devido às limitações técnicas de reprocessamento, já não se consegue a reciclagem do resíduo (HOWARD, 1979).

Uma das técnicas é a incineração direta do resíduo em sua forma original, a outra técnica é a briquetagem. A última é uma técnica que permite adensar o produto, concentrando a energia em pequenos volumes, facilitando o transporte e armazenagem do material (PAGLIUSO, 1984).

Esta abordagem pretende demonstrar que é preciso encarar o lixo, como uma oportunidade de negócios e não como um problema insolúvel, enfatizando que tanto o lixo domiciliar quanto o lixo industrial, na maioria das vezes são desperdiçados, sendo uma oportunidade de negócios atualmente desprezada. Mais de 50% do que chamamos lixo e que formará os chamados "lixões" é composto por materiais que podem ser reutilizados ou reciclados (JARDIM, 1995).

#### **4.6.5. Os rejeitos de resíduos sólidos urbanos RRSU**

Os RRSU são aqueles materiais que normalmente são descartados pelas usinas de reciclagem por serem constituídos por materiais de difícil reprocessamento como resinas e polímeros artificiais e até mesmo por materiais recicláveis, mas que devido ao tamanho diminuto ou pela presença de impurezas aderidas e/ou umidade não são separados e destinados à reciclagem (TILLMAN et al., 1989).

A composição do RRSU é extremamente variável, sendo reflexo da sociedade: do nível de renda, da necessidade de comodidade, da busca pela limpeza e higiene, da proliferação dos sistemas de informação e dos avanços tecnológicos, entre outros aspectos. A composição dos resíduos é extremamente complexa, sendo necessário o manejo, tratamento e disposição final de forma adequada para evitar que metais tóxicos, polímeros e outros materiais perigosos prejudiquem o meio ambiente (TILLMAN et al., 1989).

Visto que os RRSU são compostos por diversos materiais, tais como matéria orgânica (alimentos), polímeros e derivados da celulose de difícil reutilização e reciclagem (em função da elevada umidade e impurezas aderidas), estes poderiam ser recuperados na geração de calor ao serem incorporados aos resíduos madeireiros na forma de briquetes, minimizando a problemática dos aterros sanitários e conseqüentemente gerando energia (GRIPP, 1998).

##### **4.6.5.1. Briquetes produzidos a partir de RRSU**

Segundo Gonçalves (2009), a adição de 20 e 25 % de RRSU no processo de briquetagem com a madeira favorece o aumento do poder calorífico superior - PCS devido a sua composição; os termoplásticos derivados do petróleo influenciaram nesse aumento. Os briquetes com a utilização de 5 e 10 % de RRSU apresentaram menores taxas de energia, mostraram-se quebradiços e com baixa resistência.

Gonçalves (2009), indica portanto, a produção de briquetes com a adição de RRSU, mas deve-se ressaltar a necessidade de estudos sobre a emissão de gases provenientes da combustão dos mesmos.

O termoplástico, composto rico no elemento carbono, é maioria na amostra de RRSU, sendo o responsável pela elevação do PCS dos briquetes na medida que aumenta a sua proporção. Consequentemente, quando comparados os briquetes produzidos com 5, 10, 15, 20 e 25% de RRSU e madeira de *Eucalyptus grandis*, o maior valor de PCS foi verificado no caso de 25%, entretanto, observou-se que essa amostra difere estatisticamente apenas do briquete produzido com 5% de RRSU (SARTORI et al., 2009).

#### **4.7. Granulometria**

Atráves do uso de peneiras ocorre a separação mecânica das diferentes frações de tamanho da biomassa, usando-se um conjunto de peneiras padronizadas, de abertura de furos conhecida e colocadas uma acima da outra de forma gradativa, começando pela parte superior com a peneira de maior abertura até a peneira de menor abertura, na parte inferior.

O processo de peneiramento se realiza de forma tal, que uma amostra de material cuidadosamente pesada é colocada na primeira peneira de cima para baixo, sendo submetido o conjunto a vibrações durante um período determinado. Deste modo, as partículas com dimensão característica maior que a abertura da peneira correspondente, ficam retidas na mesma, enquanto as partículas com dimensão característica menor que a abertura da peneira correspondente passarão através dela. Concluído o processo de peneiramento, recolhem-se cada uma das peneiras e pesa-se o material retido em cada uma delas (ABNT NBR-7181/84).

#### **4.8. Método para determinação do poder calorífico superior PCS**

A fonte mais versátil de energia renovável é a biomassa que pode prover grandes quantidades de energia por meio de combustíveis gasosos, líquidos e sólidos (GRASSI et al., 1994). Os combustíveis líquidos, sólidos e gasosos derivados de biomassa podem substituir em partes os derivados de petróleo (ACIOLI, 1994).

A energia contida no resíduo da colheita pode ser avaliada pelo poder calorífico que, segundo DOAT (1977) é a quantidade de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa desse corpo (kJ/kg).

O poder calorífico pode ser representado de três formas distintas: poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU).

O poder calorífico é dito superior quando a combustão se efetua a volume constante e a água formada durante a combustão é condensada. O poder calorífico inferior é aquele cuja a água formada durante a combustão não é condensada (DOAT, 1977).

Uma forma de obtenção do PCI, segundo Brito (1993), é através da fórmula:  $PCI = PCS - 600 (9H/100)$ , que exclui a interferência do vapor de água produzido na combustão do hidrogênio (H) presente no material em combinação com o oxigênio. A maioria dos sistemas de utilização da biomassa para a produção de energia não seca o material abaixo de 10% de umidade, portanto, o poder calorífico que melhor se aproxima da realidade é o PCU, que é derivado do PCI, levando-se em consideração um dado teor de umidade (u), e segundo Vale et al., (2000), é calculado através da fórmula:

$$PCU = PCI (100 - u) / 100$$

As amostras utilizadas para análise do PCS foram moídas, secas e peneiradas, segundo norma ABNT – NBR 8633/84. Esta norma prescreve o método de determinação de poder calorífico superior a volume constante, em uma bomba calorimétrica adiabática, isotérmica ou estática.

Em seguida, as amostras foram prensadas na forma de pastilhas com aproximadamente 1g cada e foram colocadas em estufa a 105° C até a estabilização do peso, indicando que a amostra está seca. Após esse procedimento, as amostras foram novamente pesadas e queimadas em bomba calorimétrica ALEMMAR, modelo KL-5.

O calorímetro tem como unidade de calor cal/g, optou-se em transformar em kcal/kg. A constante K da máquina utilizada foi determinada com ácido benzóico, sabendo-se previamente que o PCS do ácido benzóico é de 6318 kJ/kg. O valor obtido de K foi de 413.1228 cal/°C.

## 4.9. Cromatografia gasosa

É um método físico-químico de separação, baseado na migração diferencial dos componentes de uma mistura, que ocorre devido a diferentes interações, entre duas fases imiscíveis, a fase móvel e a estacionária. Pode ser utilizada para:

- Identificação de compostos, por comparação com padrões previamente existentes;
- Purificação de compostos, separando-se as substâncias indesejáveis e os componentes de uma mistura.

### 4.9.1. Classificação pela forma física do sistema cromatográfico

Na figura 5 é apresentado o fluxograma da classificação cromatográfica.

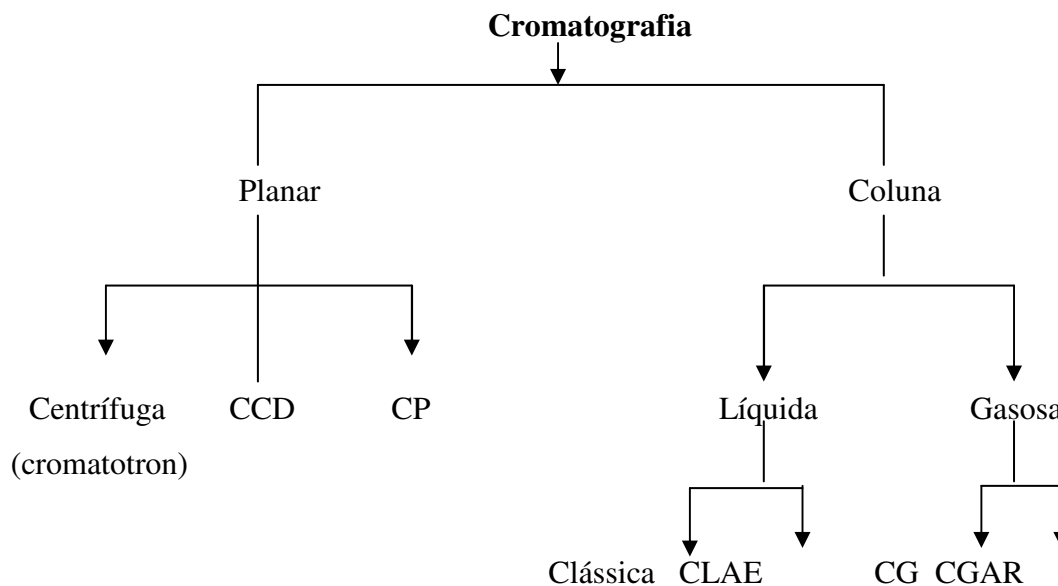


Figura 5. Classificação cromatográfica.

Onde:

CCD: Cromatografia em camada delgada;

CP: Cromatografia em papel;

CLAE: Cromatografia líquida de alta eficiência;

CG: Cromatografia gasosa;

CGAR: Cromatografia gasosa de alta resolução.

A Cromatografia Gasosa (CG) é uma técnica para separação e análise de misturas de substâncias voláteis. A amostra é vaporizada e introduzida em um fluxo de um gás adequado denominado de fase móvel (FM) ou gás de arraste. Este fluxo de gás com a amostra vaporizada passa por um tubo contendo a fase estacionária (FE) na coluna cromatográfica, onde ocorre a separação da mistura (CHAVES, 1996).

A FE pode ser um sólido adsorvente (Cromatografia Gás-Sólido) ou, mais comumente, um filme de um líquido pouco volátil, suportado sobre um sólido inerte (Cromatografia Gás-Líquido com Coluna Empacotada ou Recheada) ou sobre a própria parede do tubo (Cromatografia Gasosa de Alta Resolução). Na cromatografia gás-líquido (CGL), os dois fatores que governam a separação dos constituintes de uma amostra são: - a solubilidade na FE: quanto maior a solubilidade de um constituinte na FE, mais lentamente ele caminha pela coluna (CHAVES, 1996). Quanto mais volátil a substância (ou, em outros termos, quanto maior a pressão de vapor), maior a sua tendência de permanecer vaporizada e mais rapidamente caminha pelo sistema. As substâncias separadas saem da coluna dissolvidas no gás de arraste e passam por um detector; dispositivo que gera um sinal elétrico proporcional à quantidade de material eluído.

O registro deste sinal em função do tempo é o cromatograma, sendo que as substâncias aparecem nele como picos com área proporcional à sua massa, o que possibilita a análise quantitativa (CHAVES, 1996).

#### **4.9.2. Emissão de poluentes**

A utilização da biomassa em larga escala para produção de energia também requer alguns cuidados, pois empreendimentos dessa natureza podem ter impactos ambientais preocupantes. O resultado pode ser destruição da fauna e da flora podendo provocar a extinção de espécies, contaminação do solo, mananciais e poluição atmosférica. O respeito à diversidade e a preocupação ambiental deve reger todo e qualquer projeto de utilização de biomassa (SOARES, 1995).

Quando a combustão de biomassa é completa, as substâncias liberadas são água e dióxido de carbono além do calor. Entretanto, na prática, a combustão nunca é completa e com isto, existe a liberação também de combustível residual (partículas de carbono), monóxido de carbono e outros produtos considerados poluentes, como hidrocarbonetos, óxido de nitrogênio e óxido de enxofre (SOARES, 1995).

Com relação à poluição, a queima da biomassa representa muito pouco quando comparada com a poluição industrial ou de veículos. No contexto mundial, as emissões provenientes da queima de biomassa representam menos de 25% da poluição atmosférica total norte-americana. Além disto, 90% das emissões da queima de biomassa são constituídas de gás carbônico e vapor d'água, que na verdade não são poluentes (BELLIBONI, 1974).

A queima de combustíveis fósseis e seus derivados, como é o caso dos polímeros adicionados à composição dos briquetes, por outro lado, libera, em grandes proporções, vários compostos altamente tóxicos, como monóxido de carbono e óxidos de enxofre e nitrogênio (SOARES, 1995). Nesse sentido, é importante o conhecimento do comportamento das emissões dos briquetes quando em sua composição são adicionados materiais de natureza fóssil.

#### **4.9.2.1. Legislação para a emissão de poluentes**

Ainda são escassas as normas brasileiras relativas à queima de resíduos sólidos urbanos (GRIPP, 1998). A Resolução CONAMA nº 001 de 23/01/1986, dispendo sobre a avaliação do impacto ambiental, estipula que os aterros sanitários, processamento e destino final de resíduos tóxicos ou perigosos dependem de estudo de impacto ambiental e respectivo relatório de impacto ambiental para seu licenciamento.

Segundo GRIPP (1998), há também resoluções que limitam caldeiras, fornos (para áreas classe II e III) e incineradores, todos maiores que 70 MW, a terem emissões de SO<sub>2</sub> não superiores a 2.000 g/10<sup>6</sup> kcal e de material particulado não maiores que 120g/10<sup>6</sup> kcal (a óleo combustível) e 800g/10<sup>6</sup> kcal (a carvão mineral). A densidade calorimétrica não deve ser superior a 20%, equivalente ao padrão N°1 da Escala Ringelmann. Para as unidades

de potência menores que 70 MW, os limites de emissão são menos rigorosos, exceto para a densidade calorimétrica.

A Resolução CONAMA nº 001 de 23/01/1986 estabelece que “Para outros combustíveis, exceto óleo combustível e carvão mineral, caberá aos Órgãos Estaduais do Meio Ambiente o estabelecimento de limites máximos de emissão para partículas totais, dióxido de enxofre e, se for o caso, outros poluentes, quando do licenciamento ambiental do empreendimento” (GRIPP, 1998). Considerando-se que os rejeitos de resíduos sólidos urbanos, juntamente com os resíduos madeireiros, serão o combustível proposto para caldeiras e fornos, os limites máximos de emissão de seus poluentes devem ser estabelecidos pelos órgãos estaduais competentes.

São exigidos monitores contínuos em função da capacidade do sistema. Para capacidades maiores que 1.500 kg/dia são exigidos indicadores registradores nas chaminés para o monóxido de carbono e dióxido de carbono, hidrocarbonetos totais e opacidade. Indicadores e registradores de temperatura devem ser instalados nas duas câmaras de combustão e os de pressão devem ser instalados na câmara primária (BEZZON, 1994)

Para se ter um padrão de emissão e licença de operação, as concentrações de poluentes devem ser comparadas com limites exigidos por órgãos especializados permanecendo dentro da faixa exigida. No Brasil a resolução 316/2002 do CONAMA dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, ou seja, para processos com temperatura acima de 800 °C.

A Environmental Protection Agency (EPA)-40 CRF Part 60 estabelece limites de emissão de poluentes em sistemas de combustão em fontes fixas. Na Alemanha, a legislação que estabelece esses limites é a 17Bundes-Immissionschutz-Verordnung (17.BImSchV), porém são limites de emissão por tempo de operação da fonte fixa. A Dinamarca possui uma regulamentação em se tratando de emissão por processos de combustão instituída por sua agência de proteção ambiental (Danish Environmental Protection Agency) (FLORIANI, 2007). Esses limites de emissão estão relacionados na tabela 6.

Tabela 6. Limites de emissão de poluentes.

Parâmetro	CONAMA 316/2002 (7% O <sub>2</sub> )	EPA 40 CRF Part 60 (7% O <sub>2</sub> )	17.BImSchV 30min (11% O <sub>2</sub> )	17.BImSchV 24h (11% O <sub>2</sub> )	Danish Environmental Protection Agency (11% O <sub>2</sub> )
CO (mg/Nm <sup>3</sup> )	124,94	157 ppmv	100	50	-
Compostos clorados Expressos em HCl (mg/Nm <sup>3</sup> )	80	62	60	10	100
Compostos fluorados expressos em HF (mg/Nm <sup>3</sup> )	5	-	4	1	5
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	570*	388 ppmv	400	200	400*
SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	280	20 ppmv	200	50	400
Dioxinas e furanos (ng-TEQ/Nm <sup>3</sup> )	0,5	0,41	-	-	0,1
HPAs	-	-	-	-	0,005mg de equivalentes em Benzo (a) pireno/Nm <sup>3</sup>
Material particulado (mg/Nm <sup>3</sup> )	70	70	30	10	0,01
Compostos orgânicos expressos e COT (mg/Nm <sup>3</sup> )	-	-	20	10	-
Pb (mg/Nm <sup>3</sup> )	7	0,04	0,5	0,5	1,0
Hg (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,028	0,47	0,05	0,03	0,1

\*Expresso em termos de NO<sub>2</sub>.

Fonte: FLORIANI (2007)

Os efeitos no ambiente provenientes de qualquer equipamento usado para combustão, dependem de diversos fatores, entre eles a natureza, a forma e a concentração das substâncias liberadas (GRIPP, 1998).

#### **4.10. Análise termogravimétrica TGA**

A análise termogravimétrica permite um maior conhecimento da temperatura inicial e final para degradação térmica. Esta análise também pode ser utilizada para investigar a reatividade de materiais carbonosos. A temperatura de pico é identificada no perfil de queima, o ponto no qual a taxa de perda de massa devido à combustão é máxima (DERMIBAS, 2004).

A caracterização termogravimétrica pode auxiliar na escolha de faixas de temperaturas utilizadas no processo de carbonização ou combustão, buscando a economia de energia utilizada nos fornos, além de identificar as principais fases das reações de liberação ou absorção de energia, e perda de massa, que estão diretamente ligados à qualidade do combustível. A relação do rendimento gravimétrico e perda de peso da lignina são fatores importantes para a determinação da qualidade da biomassa (COSTA et al., 2004).

#### **4.11. Análise de resistência à compressão do briquete**

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

#### **4.12. Informações sobre a Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo**

Em 1992, criou-se a Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo de Lençóis Paulista-SP e, em 2003 foi firmado um convênio entre a Prefeitura Municipal de Lençóis Paulista, ADEFILP (Associação dos Deficientes de Lençóis Paulista) e a COOPRELP

(Cooperativa de Reciclagem de Lençóis Paulista). Com este acordo, a cooperativa de reciclagem passou a operar o processo de triagem e comercialização dos materiais recicláveis, proporcionando renda para mais de 50 famílias.

Em 2004, passou por uma nova ampliação com a instalação de uma segunda esteira de triagem e um segundo galpão para armazenagem dos materiais. Neste mesmo ano foi implantado o sistema de Coleta Seletiva, sendo realizada também pelos funcionários da cooperativa. Essa ampliação gerou um incremento de 200% no total de materiais separados pela Usina, além de aumentar a vida útil do aterro sanitário. Informações referentes à Usina de Triagem e Compostagem de Lixo de Lençóis Paulista encontram-se na tabela 7.

Tabela 7. Informações referentes à Usina de Triagem e Compostagem de Lixo – Lençóis Paulista –SP.

<b>Classificação</b>	<b>Quantidade</b>
Nº de Habitantes do Município	63.000
Nº de Bairros	98
Quantidade Total de Resíduos coletados diariamente (toneladas/dia)	42
Recicláveis (toneladas/dia)	7
Compostos Orgânicos (toneladas/dia)	20
RRSU (toneladas/dia)	15
Nº de Caminhões de Coleta	06 (01 reserva)
Funcionários públicos na coleta tradicional	38
Funcionários cooperados na coleta seletiva	12
Quantidade de material proveniente da coleta seletiva (toneladas/mês)	30

## 5. MATERIAL E MÉTODO

A serragem de madeira de *Eucalyptus grandis* utilizada para a briquetagem foi doada pela serraria Moretto, instalada na região de Botucatu/SP.

Os Rejeitos de Resíduos Sólidos Urbanos (RRSU) foram coletados na Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo, localizada no município de Lençóis Paulista à 50 km da cidade de Botucatu/SP.

Os finos de carvão vegetal foram doados pela empresa Ferro Gusa Maringá da cidade de Itapeva/SP. Os resíduos lignocelulósicos de mandioca-brava *Manihot esculenta* foram doados pela empresa Halotec Fadel, localizada no município de Ibirarema/SP.

Os briquetes foram desenvolvidos e analisados considerando as etapas: obtenção das matérias-primas; preparação das matérias-primas; a briquetagem; a avaliação energética e a qualificação dos poluentes emitidos.

Na figura 6 estão demonstradas todas as etapas do experimento desta pesquisa.

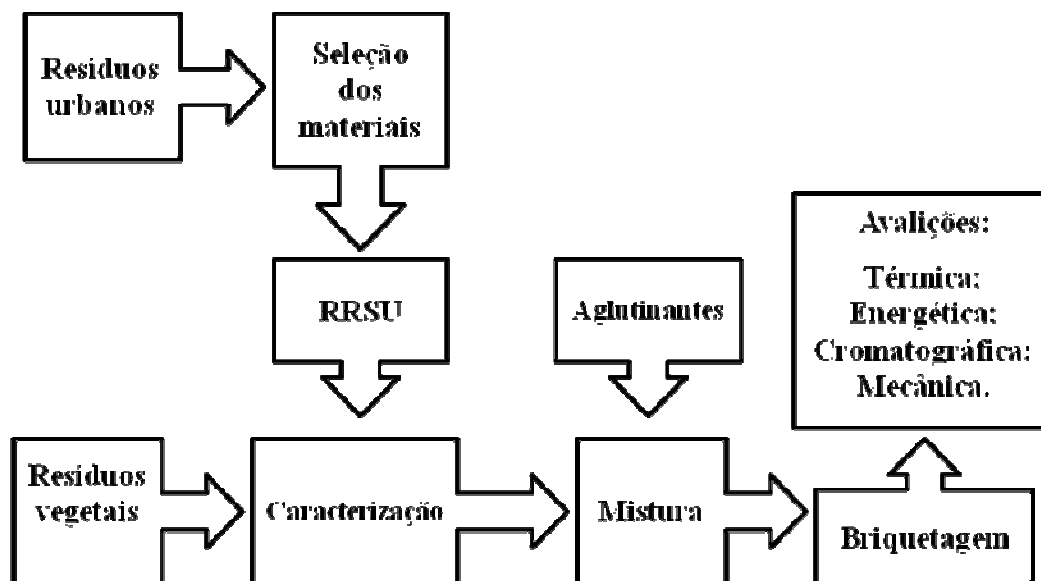


Figura 6. Fluxograma das etapas para o desenvolvimento do experimento.

### 5.1. Seleção e preparação dos componentes para a briquetagem

Durante a preparação, realizada no Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos do Departamento de Recursos Naturais - UNESP-Botucatu, os componentes foram moídos em um triturador de facas, ajustado com peneira de 6 mm, para que as partículas estivessem compreendidas entre 6 e 10 mm. O triturador utilizado foi da marca Seibt e modelo: M6HS 6/230. Posterior ao processo de moagem foi feita a análise do teor de umidade dos tratamentos.

#### 5.1.1. Rejeito de resíduo sólido urbano RRSU

A partir dos 150 kg de RRSU coletados na Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo de Lençóis Paulista foi feita a caracterização física dos resíduos sólidos: foi definida sua composição quanto à sua natureza, expressando-se a porcentagem em peso de cada componente (fração) com base na totalidade dos resíduos. Os materiais foram classificados em uma das seguintes categorias: polímeros artificiais, elastômeros, derivados da celulose, vidros, metais, entulhos, madeira, tecidos e orgânicos.

Segundo a pesagem de cada componente dentro da amostra, foi possível verificar a participação percentual de cada um no total. Devido às diferentes características dos polímeros presentes na amostra, estes foram classificados segundo sua composição química.

Alguns materiais encontrados na amostra foram excluídos dos ensaios por tratarem-se de materiais que poderiam ter outra finalidade e que passaram acidentalmente para a categoria de RRSU na Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo de Lençóis Paulista, como é o caso dos materiais orgânicos (que deveriam ser destinados à compostagem ou aterros), bem como os vidros e metais, que deveriam ser destinados à reciclagem. Já o entulho e pedaços de madeira encontrados, não deveriam fazer parte da amostra por terem uma coleta diferenciada do lixo urbano comum. Elastômeros e termofixos foram excluídos devido à dificuldade em moê-los e agregá-los aos resíduos madeireiros.

Foram selecionados para os ensaios, os termoplásticos e a celulose, que por terem muitas impurezas aderidas e/ou tamanho diminuto não foram destinados à reciclagem.

### **5.1.2. Resíduos de serragem de *Eucalyptus grandis***

Foram coletados 2m<sup>3</sup> de resíduos madeireiros (serragem) de eucalipto na serraria Moretto, situada no município de Botucatu. A serragem utilizada é produto do beneficiamento da madeira para construção civil.

### **5.1.3. Finos de carvão**

A empresa Ferro Gusa Maringá doou 10 kg de finos de carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* para a realização dos experimentos. Esta quantia foi o suficiente para a preparação dos 21 tratamentos.

#### 5.1.4. Resíduo lignocelulósico de mandioca

Foram doados pela empresa Halotec Fadel a quantia de 1000 kg de resíduo lignocelulósico de mandioca. Para os experimentos não houve secagem destes resíduos antes da mistura final com todos os componentes de cada tratamento, pois a umidade de cada material foi determinada antes da mistura para que houvesse um balanceamento, para que daí sim, fosse feita a correção de umidade para a briquetagem.

#### 5.2. Componentes utilizados no processo de briquetagem

Na figura 7 são demonstrados os componentes descritos acima e que fizeram parte deste experimento. Da esquerda para direita encontram-se, com a granulometria correta para briquetagem, os resíduos de madeira de eucalipto, derivados de celulose (RRSU), plásticos (RRSU), resíduo lignocelulósico de mandioca e os finos de carvão vegetal.

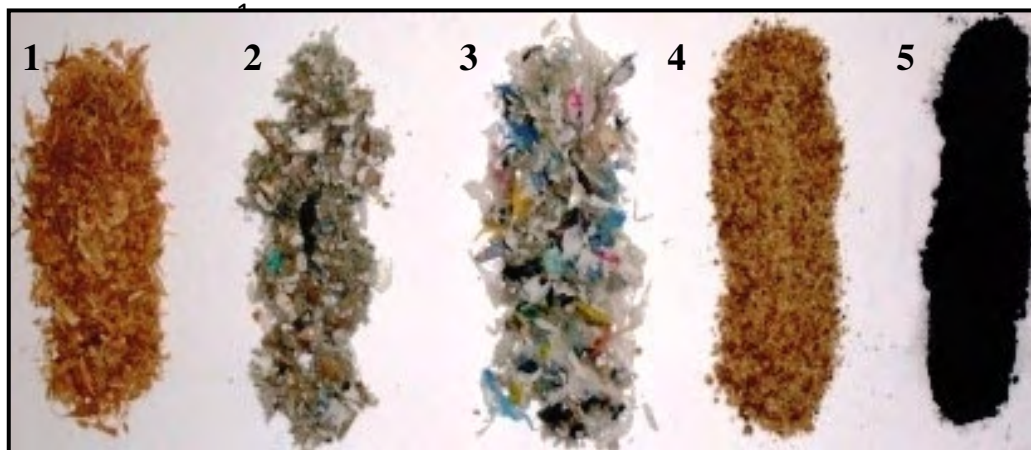


Figura 7. Partículas de eucalipto (1), derivados de celulose (RRSU) (2), plásticos (RRSU) (3), resíduo lignocelulósico de mandioca (4) e os finos de carvão vegetal (5).

### 5.2.1. Pilotos realizados e seus respectivos tratamentos

Os componentes, descritos acima, foram triturados após cinco dias de secagem natural em local fechado e, realizou-se a mistura dos mesmos de acordo com a porcentagem de cada tratamento e com a adição de aglutinantes totalizando 8 Kg cada tratamento.

Para a escolha dos melhores tratamentos foram realizados dois projetos pilotos, onde o primeiro possuía 9 tratamentos briquetados com um diâmetro de 90 mm, descritos na tabela 8 e, o segundo piloto possuía 12 tratamentos briquetados com um diâmetro de 65 mm, descritos na tabela 9.

Tabela 8. Tratamentos realizados no projeto piloto 1.

Tratamentos	Madeira (%)	RRSU (%)	Aglutinantes (%)	
			Mandioca	Carvão
B1	75	15	10	0
B2	75	15	5	5
B3	75	15	0	10
B4	70	20	10	0
B5	70	20	5	5
B6	70	20	0	10
B7	70	15	15	0
B8	70	15	7,5	7,5
B9	70	15	0	15

Tabela 9. Tratamentos realizados no projeto piloto 2.

Tratamentos	Madeira (%)	RRSU (%)	Aglutinantes (%)	
			Mandioca	Carvão
B10	75	15	10	0
B11	75	15	5	5
B12	73	16	11	0
B13	73	16	6	5
B14	73	15	12	0
B15	72	17	11	0
B16	72	17	5,5	5,5
B17	72	16	12	0
B18	72	16	6	6
B19	75	18	7	0
B20	75	18	3,5	3,5
B21	75	18	0	7

Os materiais originados em cada tratamento dos projetos piloto 1 e 2 foram avaliados a partir das análises de PCS, PCI, PCU, cinzas, combustibilidade, umidade e avaliação visual de compactação dos briquetes. A partir dessas análises foram determinados os tratamentos definitivos desta pesquisa, onde do primeiro piloto foram selecionados os briquetes B1 a B6, sendo que B1 a B3 possuíam 15 % de RRSU e, de B4 a B6 possuíam 20 %, ambos com diferentes proporções de aglutinantes. A partir do segundo piloto foram selecionados os briquetes B14, B15 e B17 com as respectivas porcentagens de RRSU: 15, 17 e 16%.

### 5.2.2. Tratamentos definitivos a partir dos pilotos

Os tratamentos que obtiveram melhores resultados nesses aspectos encontram-se na tabela 10 e, foram destinados à avaliação de emissão de poluentes por cromatografia gasosa no Laboratório de Combustíveis Sólidos e Líquidos do Departamento de Química da USP-SP.

Tabela 10. Tratamentos selecionados.

Pilotos	Tratamentos definitivos	Madeira (%)	RRSU (%)	Aglutinantes (%)	
				Mandioca	Carvão
1º piloto	B1	75	15	10	0
	B2	75	15	5	5
	B3	75	15	0	10
	B4	70	20	10	0
	B5	70	20	5	5
	B6	70	20	0	10
2º piloto	B14	73	15	12	0
	B15	72	17	11	0
	B17	72	16	12	0

### 5.2.3. Teor de umidade dos componentes e correção para cada tratamento

Para o processo de briquetagem é necessário que as partículas estejam com o teor de umidade compreendido entre 10 e 13% (QUIRINO, 1987). Para isso, o teor de umidade, base úmida de todas as amostras, foi determinado a partir da secagem das amostras em estufa de ventilação forçada à 105°C por um período de tempo suficiente para que o material apresentasse massa constante. O tempo de estufa foi de 4 horas e 30 minutos à 105°C. Utilizou-se para o cálculo a seguinte expressão:

$$\%u = (\mu - m_s)100/\mu,$$

onde:

$\mu$  = massa (g) de matéria úmida,

$m_s$  = massa (g) de matéria seca

$\% u$  = porcentagem de umidade (base úmida)

Após a caracterização e trituração dos componentes no laboratório, foram feitas as análises de umidade de cada um, para posteriores correções. Após a mistura de cada tratamento verificou-se que, devido aos diferentes teores de umidade, os valores

encontrados estavam bem próximos do ideal para a briquetagem que é entre 10 e 13 %. Para os valores de umidade inferiores a este, adicionou-se água por borrifação e em seguida, misturou-se o material e, para os valores superiores utilizou-se a estufa com ventilação forçada a 60°C para a correção. Nas figuras 8 e 9 são demonstrados os tratamentos dispostos em bandejas para a correção de umidade na estufa.



Figuras 8 e 9. Disposição dos tratamentos nas bandejas para a correção da umidade em estufa.

### 5.3. Preparação e briquetagem dos resíduos

Em todos os ensaios houve a adição de material aglutinante, pois a temperatura dentro da caixa do pistão à 250°C faz com que as moléculas de lignina ao serem fluidizadas transformem-se em produtos com características aglutinantes, o que não foi suficiente sendo necessário a adição de mais dois tipos de aglutinantes, o resíduo lignocelulósico de mandioca e os finos de carvão vegetal.

A briquetadeira utilizada para o primeiro piloto foi a de modelo Biomax B-90/210, produção: 1000 kg/h de briquetes com 90 mm de diâmetro e, a briquetadeira utilizada para o segundo piloto foi a de B-65/160, produção: 600 kg/h de briquetes com 65 mm de diâmetro. No processo de briquetagem, a matéria-prima é conduzida para a parte central do equipamento, sofre intenso atrito e forte pressão, o que eleva a temperatura para 250 °C, fluidificando-a. Posteriormente, o material foi submetido a uma pressão de 1t, tornando-se compacto.

#### 5.4. Análise do teor de combustíveis e teor de cinzas

A determinação destas propriedades é imprescindível para a caracterização dos resíduos. O teor de combustíveis e o teor de cinzas (ou inertes) fornecem informações aproximadas da combustibilidade dos resíduos e, segundo o Guia de Prática de Análise Imediata de Combustíveis Sólidos – UFMG/2008 é obtido através do seguinte procedimento: tritura-se cada tratamento separadamente, mantendo-se a proporcionalidade da sua razão em peso proposta para a briquetagem. Parte dessa mistura (5 g) é colocada em um cadinho de porcelana e seca a 105°C por 4 horas e 30 minutos. Após esfriar, a amostra deve ser pesada e, então é carbonizada em cadinho de porcelana a 800°C por duas horas na mufla. Após esfriar, a amostra é pesada novamente.

O teor de combustíveis é calculado pela seguinte equação:

$$\text{TC} = (c - d)/c \times 100$$

TC = Teor de combustíveis (%)

c = peso da amostra antes da queima (g)

d = peso da amostra após a queima (g)

O teor de cinzas é obtido por:

$$\text{TCZ} = 100 - \text{TC}$$

TCZ = teor de cinzas (%)

TC = teor de combustíveis em porcentagem

#### 5.5. Análise elementar dos briquetes

Para o cálculo do poder calorífico inferior foi necessária a realização de análise elementar das amostras, que consiste na combustão completa da amostra de massa conhecida do material orgânico e determinação da massa de carbono na forma de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e de água (H<sub>2</sub>O) formada (HEATCHCOCK, 1986).

O vapor produzido pela reação é passado por um tubo contendo cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) para reter a água e depois por um outro tubo contendo hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) para reter o gás carbônico em forma de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), necessário para calcular a porcentagem de carbono e de hidrogênio na amostra por meios gravimétricos (HEATCHCOCK, 1986).

Foram retirados 2g de amostra de cada briquete com os diferentes teores de RRSU, madeira de *Eucalyptus grandis* e aglutinantes; esse material foi enviado à Central Analítica do Instituto de Química da USP, onde foi realizada a análise elementar do material com o objetivo de determinar os teores de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio presentes nas amostras.

Para determinação da porcentagem de carbono, hidrogênio e nitrogênio, a norma utilizada foi ASTM D 5373-02 (07) “Standart Test methods for Instrumental Determination of carbon, hydrogen and nitrogen in “Laboratory samples of coal and coke” (CMQ-LCL-PE-017).

Para porcentagem de enxofre total foi utilizada a norma: ASTM D 4239-08 “Standart Test Methods for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High Temperature Tube Furnace Combustion method”, Método C (CMQ-LCL-PE-028). A norma ASTM D 3176-89 (02) “Standart for Ultimate Analysis of Coal and Coke” (CMQ-LCL-PE-072) foi utilizada para a determinação da porcentagem de oxigênio na amostra.

A estimativa da incerteza dos resultados encontrados na análise elementar dos briquetes foi calculada segundo procedimento CMQ-LCL-PO-006.

A porcentagem de Hidrogênio de cada amostra foi utilizada para o cálculo do poder calorífico inferior (PCI).

As amostras utilizadas para análise do PCS foram moídas, secas e peneiradas, segundo norma ABNT – NBR 8633. Esta norma prescreve o método de determinação de poder calorífico superior a volume constante, em uma bomba calorimétrica adiabática, isotérmica ou estática.

Em seguida, as amostras foram prensadas na forma de pastilhas com aproximadamente 1g cada e foram colocadas em estufa a  $105^\circ\text{C}$  até a estabilização do peso, indicando que a amostra está seca. Após esse procedimento, as amostras foram novamente pesadas e queimadas em bomba calorimétrica ALEMMAR, modelo KL-5.

O calorímetro tem como unidade de calor cal/g, optou-se em transformar em kcal/kg. A constante K da máquina utilizada foi determinada com ácido benzóico, sabendo-se previamente que o PCS do ácido benzóico é de 6318 kJ/kg. O valor obtido de K foi de 413.1228 cal/°C.

De cada tratamento com diferentes teores de celulose e termoplásticos (RRSU), madeira de *Eucalyptus grandis* e aglutinantes foram retiradas três amostras, para obtenção de PCS médio:

$$\text{PCS} = \frac{(\text{K} + \text{MH}_2\text{O}) \Delta t}{\text{ms}}$$

onde:

PCS = poder calorífico superior (cal/g);

K = constante do equipamento 413.1228 (cal/°C)

VH<sub>2</sub>O = 2700 (mL)

Δt = diferença de temperatura (°C)

ms = massa seca (g)

### **5.6. Determinação do poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil dos briquetes (PCU)**

O poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico útil (PCU), foram determinados, segundo Brito (1993), pelas fórmulas:

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

$$\text{PCU} = \text{PCI} [(100 - u)/100] - 6u$$

onde:

PCS = poder calorífico superior, determinado através de bomba calorimétrica (cal/g)

PCI = poder calorífico inferior (cal/g)

PCU = poder calorífico útil (cal/g)

H = teor de hidrogênio (%)

u = umidade do material (%)

O PCI foi calculado com o material a 0% de umidade e, o PCU dos pilotos com 12% de umidade.

### **5.7. Granulometria para análise cromatográfica**

As peneiras empregadas foram da série Tyler, fabricadas pela empresa Telastem. A máquina vibratória é de fabricação da mesma empresa, sendo da marca Produtest, modelo “T”. Na pesagem do material foi empregada uma balança digital com resolução de 0,01g, capacidade de 3.100g, série M, modelo M3102, marca Bel.

O tempo de peneiramento foi de 10 min para todos os ensaios realizados. A frequência de vibração empregada foi correspondente à posição 8 do potenciômetro da máquina vibratória, baseado na norma ABNT/NBR – 7181/84.

### **5.8. Cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa dos briquetes**

As amostras dos briquetes foram pirolisadas, onde houve a caracterização dos componentes presentes nos extratos pirolisados por cromatografia a gás acoplada à espectrometria de massas (CG/EM). O equipamento utilizado foi: CG/EM –IT, modelo Saturn 2100 D, constituído pelo Cromatógrafo a Gás modelo CP 3900 e pelo Espectrômetro de Massa Quádrupolo armadilha de íons, fabricado pela Varian.

Para esta análise, pesou-se aproximadamente 2,0 g das amostras em tubo de pirólise. Acoplou-se a saída do tubo em Kitassato contendo 20 mL de diclorometano, efetuou-se a pirólise a 550°C por uma hora. A seguir, secaram-se os extratos pirolisados em sulfato de magnésio.

As condições de análise por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa (CG/EM) são demonstradas na tabela 11.

Tabela 11. Condições de análise por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa.

<b>Cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa</b>	
Método	Cromatografia gasosa.
Amostras	Soluções em diclorometano, volume injetado = 0,8 µL.
Coluna	Capilar, 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm CP – Sil 8CB bleed/MS, 5% difenil, 95% dimetil polisiloxano.
Gás de arraste	He (99,9999); 1,0 mL/min.
Injetor	280°C, modo Split (1:20).
Forno	40°C (4 min) → 280°C (4°C/min); t = 74 min.
Detector	EM – AI <sup>1</sup> ; EI (70 e V), Modo de Varredura 1 seg/scan, Faixa de massa 40 - 650 daltons Linha de transferência: 290°C.

As análises foram realizadas pela Central Analítica do Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas em parceria com a empresa Bioware Tecnologia/Campinas.

### **5.9. Análise termogravimétrica TGA**

Mediram-se as variações térmicas características das transformações ou mudanças de fases das amostras em função da temperatura, 10°C/min a partir de 100°C até 600°C, com balança de precisão acoplada ao aparelho de análise termogravimétrica, modelo 2950 TGA HR, sobre atmosfera de N<sub>2</sub>. As mudanças de fases foram calculadas a partir da primeira derivada (DTG) da curva.

### **5.10. Análise de resistência a força de ruptura dos briquetes**

O teste para avaliar a resistência a força de ruptura dos briquetes foi baseado na ABNT/NBR 6118-2003 sendo realizado no Laboratório de resíduos sólidos e

compósitos do Departamento de Recursos Naturais-UNESP/FCA-Botucatu, em equipamento da marca EMIC/30kN, a máquina foi programada para trabalhar com a unidade em (N). As partes superiores e inferiores de contato com os briquetes possuíam 15 cm de diâmetro e cada amostra obtinha um comprimento de 8 cm.

### **5.11. Análise estatística**

Os poderes caloríficos (PCS, PCI e PCU) e a análise de cinzas dos briquetes foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando necessário, complementado pelo teste de Tukey (GONÇALVES, 2006).

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. Coleta e classificação do RRSU

A quantidade de RRSU coletada na Usina de triagem e compostagem de lixo de Lençóis Paulista-SP, para o experimento foi de 150 kg. Após a coleta verificou-se que a sua composição era de diversos materiais em diferentes proporções, conforme apresentado na tabela 12.

Tabela 12. Composição do RRSU coletado.

<b>Material</b>	<b>Exemplos encontrados</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>% do Total</b>
Derivados de Celulose	Papel ofício, jornais, folders, revistas, etc.	64,98	43,32
Termoplásticos	Copos plásticos, sacolas e saquinhos, embalagens de iogurtes, peças automotivas, embalagens de frios e salgados.	24,75	16,50
*Elastômeros	Pedaços de borrachas, luvas e mangueiras	1,27	0,85
*Termofixos	Peças automotivas	2,23	1,49
*Vidros	Garrafas e vasilhames	2,34	1,56
*Metais	Alumínio e aço inoxidável	1,89	1,26
*Entulhos	Restos de material de construção	3,30	2,20
*Madeira	Tábuas e tacos	4,15	2,77
*Tecidos	Tecidos de algodão e sintéticos	3,42	2,28
*Orgânicos	Restos de vegetais, carnes, grãos	41,62	27,75
<b>Total</b>		<b>150</b>	<b>100</b>

\* Materiais que não serão utilizados no processo de briquetagem.

Representando 43,32 % do total, os derivados de celulose são os materiais mais abundantes na amostra, seguidos dos materiais orgânicos com 27,75 % do total. No entanto, os materiais orgânicos não serão utilizados no processo de briquetagem devido ao alto teor de umidade, o que demandaria maior tempo de secagem do material em relação à celulose e aos polímeros, conseqüentemente encareceria o processo.

Além desse aspecto, o fato de um quarto da amostra ser constituído por material orgânico, proveniente de restos de alimentos, deve-se a certa ineficiência no processo de separação do RRSU, pois o primeiro poderia ser destinado à compostagem, desde que houvesse adequado tratamento do composto de forma que o mesmo estivesse livre de metais pesados ou qualquer tipo de substância tóxica.

Caso não fosse possível esse procedimento por questões técnicas ou orçamentárias da Usina, os resíduos orgânicos deveriam ser encaminhados aos aterros sanitários, como acontece com a maior parte desse tipo de material presente no lixo urbano, que é coletado pela Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo de Lençóis Paulista.

Outros materiais presentes no RRSU também foram descartados por apresentarem limitações técnicas à briquetagem (abela 13) e potencial para outras finalidades, como os vidros e metais que passaram despercebidos pela esteira de triagem de lixo, sendo que deveriam ter sido encaminhados à reciclagem. Entulhos não deveriam fazer parte do lixo enviado para a Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo, pois possuem coleta diferenciada no município de Lençóis Paulista (em caçambas) e deveriam ser encaminhados a obras de terraplanagem. Algumas limitações ocorreram na briquetagem dos materiais presentes no RRSU, como mostra a tabela 13.

Tabela 13. Limitações técnicas para a briquetagem dos materiais presentes no RRSU.

<b>Material</b>	<b>Limitações Técnicas à Briquetagem dos Materiais</b>
Orgânicos	Elevada umidade; dificuldade de moagem em partículas entre 5 e 10 mm.
Vidros	Material inerte na geração de calor.
Metais	Material inerte na geração de calor na temperatura de briquetagem; difícil agregação aos resíduos madeireiros e RRSU.
Entulhos	Material inerte na geração de calor.
Madeira	Dificuldade de moagem em partículas entre 5 e 10 mm.
Elastômeros	Difícil agregação por produzirem óxido de enxofre na queima.
Termofixos	Dificuldade de moagem em partículas entre 5 e 10 mm.

Uma das razões da existência da grande quantidade de papel na amostra de RRSU deve-se à propriedade absorvente desse material, que retém a umidade da água e outros fluídos presentes no lixo, dificultando a reciclagem. O fato é que grande parte dos papéis presente no RRSU é do tipo papel-toalha, utilizado na cozinha para absorver gorduras, e papéis higiênicos. Estes, devido às impurezas aderidas, não são destinados à reciclagem.

Os termoplásticos foram classificados quanto a sua natureza química (tabela 14), onde se destacou o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) com 14,10 %, sendo a maior parte desse material encontrado na forma de saquinhos e sacolas plásticas. Embora os termoplásticos possam ser reciclados, a presença dos mesmos no RRSU deve-se ao excesso de impurezas aderidas (como restos de alimentos que dificultam a reciclagem), ao tamanho diminuto de alguns fragmentos ou mesmo por terem passado despercebidos na esteira de triagem da Usina.

Tabela 14. Composição percentual dos termoplásticos presentes no RRSU

<b>Termoplásticos</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>% do Total</b>
PEAD (Polietileno de Alta Densidade)	0,495	0,33
PEBD (Polietileno de Baixa Densidade)	21,15	14,10
PET (Polietileno Tereftalato)	1,605	1,07
PS (Poliestireno)	1,005	0,67
PP (Polipropileno)	0,50	0,33
PVC (Policloreto de Vinila)	0	0,00
<b>Total</b>	<b>24,75</b>	<b>16,50</b>

Segundo Gonçalves (2006), os termoplásticos encontrados na composição dos RRSU possuem grandes quantidades de resinas e pigmentos, o que ocasiona uma maior quantidade de poluentes emitidos na queima. Para este trabalho foram excluídos todos os termoplásticos coloridos, permanecendo os transparentes e brancos, totalizando uma perda de 18,18% de 24,75 kg.

Após verificar a proporção dos componentes do RRSU, notou-se que para cada quilo de RRSU existem 763g de celulose e 237g de termoplásticos, em seguida estes componentes foram moídos e misturados, obtendo-se 85,23kg, ou seja, 56,82% do total coletado. Cada elemento apresentou um diferente valor de umidade após o processo de moagem, como demonstrado na tabela 15.

Tabela 15. Umidade de cada componente após a moagem.

<b>Componentes</b>	<b>Umidade após o processo de moagem (%)</b>
Madeira	23,60
Plásticos (RRSU)	1,54
Celulose (RRSU)	9,91
Resíduo do processamento de mandioca (aglutinantes)	13,85
Finos de carvão vegetal (aglutinantes)	9,82

A briquetagem dos tratamentos especificados como ensaios 1 e 2 ocorreu com umidade próxima a 12%, como demonstrado nas tabelas 16 e 17, respectivamente. Os briquetes foram produzidos na empresa Ipaussu Briquetes, situada no município de Ipaussu - SP nos meses de junho e novembro de 2009.

Tabela 16. Umidade dos tratamentos para a briquetagem do primeiro ensaio.

<b>Tratamentos do 1º ensaio</b>	<b>Umidade para a briquetagem (%)</b>
B1	11
B2	11
B3	11
B4	11
B5	12
B6	12
B7	13
B8	12
B9	11

Tabela 17. Umidade dos tratamentos para a briquetagem do segundo ensaio.

<b>Tratamentos do 2º ensaio</b>	<b>Umidade para a briquetagem (%)</b>
B10	13
B11	12
B12	12
B13	11
B14	11
B15	11
B16	11
B17	12
B18	12
B19	11
B20	11
B21	12

Na tabela 18 são apresentadas as proporções de cada componente utilizado na produção dos 21 tratamentos realizados neste trabalho, cada briquete apresenta quantidades diferentes de RRSU, resíduo madeireiro, resíduo lignocelulósico de mandioca e finos de carvão vegetal.

Entre os 21 tratamentos utilizados, os selecionados para as análises cromatográfica e termogravimétrica estão destacados em negrito (tab. 18). Estes foram selecionados segundo a avaliação energética, de resistência, cinzas e combustibilidade, sendo assim, os briquetes que apresentaram características favoráveis foram os de B1 a B6, B14, B15 e B17.

Tabela 18. Proporção de cada componente utilizado nos 21 tratamentos.

Tratamentos	Madeira (%)	RRSU (%)	Aglutinantes (%)	
			Mandioca	Carvão
<b>B1</b>	<b>75</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>0</b>
<b>B2</b>	<b>75</b>	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>B3</b>	<b>75</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>10</b>
<b>B4</b>	<b>70</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>0</b>
<b>B5</b>	<b>70</b>	<b>20</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>B6</b>	<b>70</b>	<b>20</b>	<b>0</b>	<b>10</b>
B7	70	15	15	0
B8	70	15	7,5	7,5
B9	70	15	0	15
B10	75	15	10	0
B11	75	15	5	5
B12	73	16	11	0
B13	73	16	6	5
<b>B14</b>	<b>73</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>0</b>
<b>B15</b>	<b>72</b>	<b>17</b>	<b>11</b>	<b>0</b>
B16	72	17	5,5	5,5
<b>B17</b>	<b>72</b>	<b>16</b>	<b>12</b>	<b>0</b>
B18	72	16	6	6
B19	75	18	7	0
B20	75	18	3,5	3,5
B21	75	18	0	7

\*Os tratamentos em negrito referem-se aos selecionados para o experimento definitivo.

Na tabela 18 pode-se observar que entre os nove tratamentos selecionados, apenas os identificados por B3 e B6 não continham resíduo lignocelulósico de mandioca na sua constituição, demonstrando que apenas 44% dos nove tratamentos definitivos para este trabalho foram produzidos com finos de carvão.

## **6.2. Análises físico-químicas dos briquetes**

### **6.2.1. Teor de cinzas e combustíveis**

O teor de combustíveis é um índice importante para a briquetagem, pois indica o potencial de geração de calor de cada material. Já o teor de cinzas corresponde à porcentagem de material inerte na geração de calor presente na amostra.

Visto ser desejável que após a queima dos briquetes haja a menor quantidade de resíduos possível, indicando que grande parte do material foi utilizada na geração de calor sobrando apenas as cinzas, verificou-se que briquetes com menores porcentagens de RRSU resultam em menor quantidade de cinzas após a queima, ou seja, possuem maior teor de combustíveis que briquetes com percentual maior de RRSU.

O comportamento do teor de cinzas é inversamente proporcional ao encontrado para o teor de combustíveis (ensaio 19). Nota-se que os briquetes com menores quantidades de cinzas foram os briquetes com menor quantidade de RRSU. Destacaram-se nesta avaliação os briquetes B14, B15 e B17, cujos resultados de combustibilidade estavam bem próximos do valor máximo encontrado (98,51 %). Para os ensaios foram propostas porcentagens de RRSU compreendidas entre 15 e 20%, portanto os teores de combustíveis apresentaram-se na faixa entre 96,50 e 98,51 %, conforme a tabela 19.

Tabela 19. Teor de Cinzas e de Combustíveis dos briquetes.

Ensaio	Tratamentos	RRSU (%)	Teor de cinzas (%)	Teor de Combustíveis (%)
1º ensaio	<b>B1*</b>	<b>15</b>	<b>2,50</b>	<b>97,50</b>
	<b>B2</b>	<b>15</b>	<b>2,60</b>	<b>97,40</b>
	<b>B3</b>	<b>15</b>	<b>3,00</b>	<b>97,00</b>
	<b>B4</b>	<b>20</b>	<b>3,50</b>	<b>96,50</b>
	<b>B5</b>	<b>20</b>	<b>3,40</b>	<b>96,60</b>
	<b>B6</b>	<b>20</b>	<b>3,00</b>	<b>97,00</b>
	B7	15	2,00	98,20
	B8	15	1,69	98,31
	B9	15	2,11	97,89
	B10	15	1,89	98,11
	B11	15	1,65	98,35
	B12	16	1,54	98,46
	B13	16	1,90	98,10
	2º ensaio	<b>B14</b>	<b>15</b>	<b>2,00</b>
<b>B15</b>		<b>17</b>	<b>1,80</b>	<b>98,20</b>
B16		17	1,49	98,51
<b>B17</b>		<b>16</b>	<b>1,70</b>	<b>98,30</b>
B18		16	1,66	98,34
B19		18	1,67	98,33
B20		18	1,49	98,51
B21		18	1,66	98,34

\*Os tratamentos em negrito referem-se aos selecionados para o experimento definitivo.

Segundo Gonçalves (2006), os briquetes produzidos com porcentagens de 15 e 20% de RRSU apresentaram respectivamente os seguintes valores percentuais de combustível de 96,70 e 95,68, quando comparados com os briquetes definitivos produzidos neste trabalho, observa-se o aumento para 98,00% no briquete produzido com 15% de RRSU e para 97,00% no que foi produzido com 20% de RRSU. Sendo assim houve uma otimização na combustibilidade dos briquetes produzidos.

Quando comparados os tratamentos definitivos quanto à influência dos dois tipos de aglutinantes utilizados (Tabela 18), nota-se que ao mesmo tempo em que

deveria haver um aumento na porcentagem de combustível para os briquetes aglutinados com carvão vegetal houve também adições maiores de RRSU (Tabela 19), tendo por consequência quantidades maiores de cinzas e diminuindo a porcentagem de combustíveis. O tratamento B17 com 72% de madeira, 16% de RRSU e 12% de resíduo de mandioca demonstrou-se mais favorável no item combustibilidade entre os tratamentos definitivos.

### **6.2.2. Análise elementar dos tratamentos**

Na tabela 20 são apresentados os resultados médios da análise elementar (C, H, N, S e O) dos tratamentos selecionados e denominados definitivos.

Tabela 20. Médias da análise elementar (C, H, N, S e O) dos tratamentos definitivos.

Tratamentos	Carbono %	Hidrogênio %	Nitrogênio %	Enxofre %	Oxigênio %
B1	48,97	6,55	0,3	0,046	41,63
B2	49,14	6,31	0,2	0,038	41,71
B3	49,41	6,12	0,3	0,035	41,13
B4	48,17	6,07	0,2	0,032	42,02
B5	47,90	6,05	0,2	0,034	42,41
B6	49,91	6,20	0,2	0,027	40,66
B14	47,73	6,21	0,2	0,026	43,83
B15	49,52	6,33	0,2	0,020	42,13
B17	48,31	6,27	0,2	0,040	43,48

As figuras de 10 a 14 expressam separadamente as porcentagens de cada componente identificado na análise elementar.

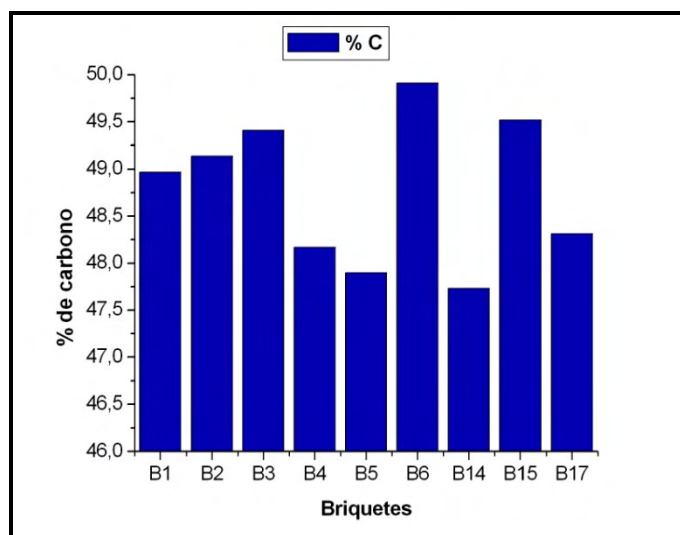


Figura 10. Porcentagem média de carbono (C) por tratamento.

No processo de combustão, a composição do combustível é essencial em se tratando de avaliação de queima e, especialmente, de emissões gasosas.

As análises mostram altas quantidades de carbono fixo como demonstrado na figura 10, sendo que o maior valor foi do tratamento B6, o que explica o seu poder calorífico estar entre os mais altos, este maior valor encontrado deve-se a sua proporção (Tabela 18), onde foram adicionados 10% de carvão vegetal como aglutinante.

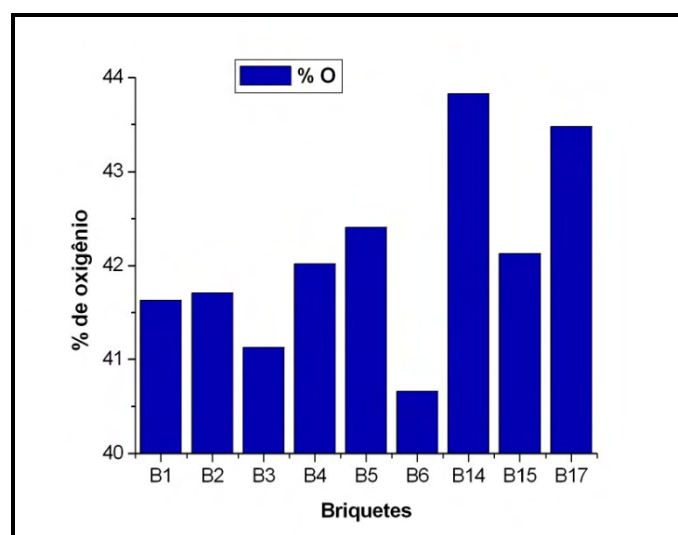


Figura 11. Porcentagem média de oxigênio (O) por tratamento.

O valor da porcentagem do elemento oxigênio encontrado nos briquetes (figura 11) varia entre 40,66 e 43,83, onde o menor valor encontrado foi no briquete B6. O menor valor encontrado neste briquete deve-se a sua proporção (tabela 18), onde foram adicionados 10% de carvão vegetal e sem a adição de resíduo lignocelulósico de mandioca.

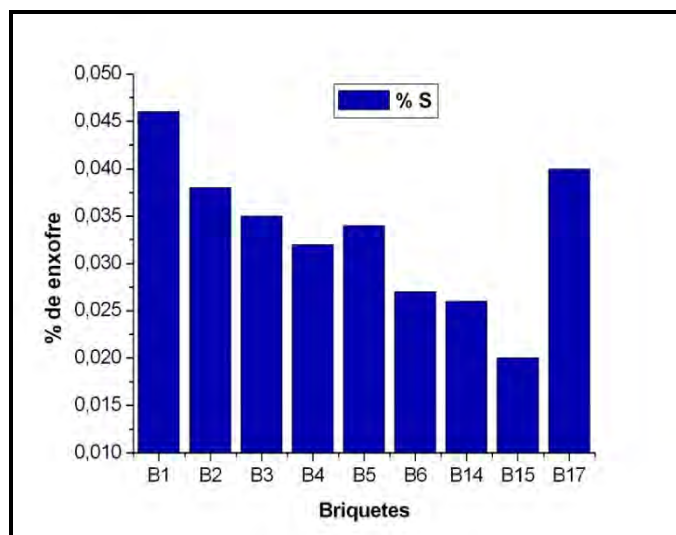


Figura 12. Porcentagem média de enxofre (S) por tratamento.

Entre as porcentagens do elemento enxofre (figura 12) encontrados na composição dos briquetes produzidos, destacam-se os valores de 0,046% no B1 e 0,040% no B17. O menor valor encontrado foi de 0,020% no B15.

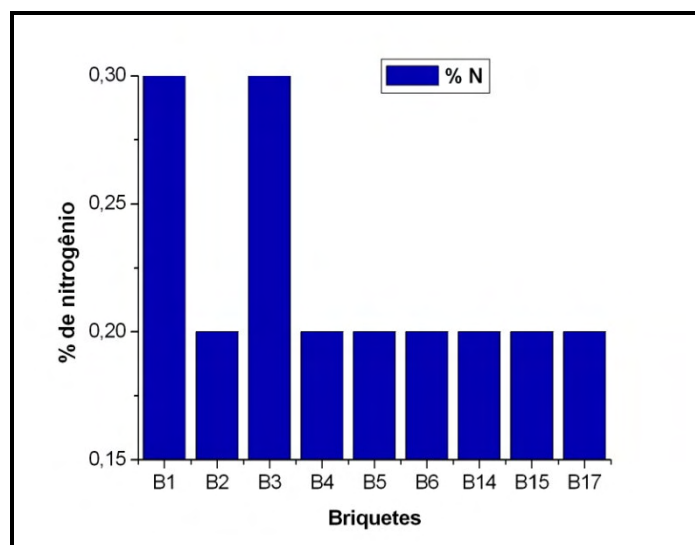


Figura 13. Porcentagem média de nitrogênio (N) por tratamento.

A média da porcentagem do elemento nitrogênio (figura 13) na composição de cada amostra foi de 0,22%, valor inferior ao encontrado por Gonçalves

(2006), que foi de 0,29% para briquetes produzidos com 15% de RRSU e 0,25% para briquetes produzidos com 20% de RRSU.

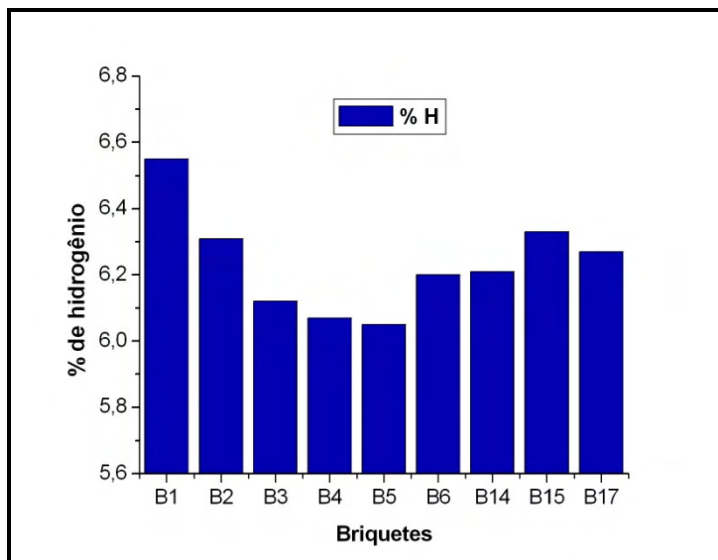


Figura 14. Porcentagem média de hidrogênio (H) por tratamento.

Entre os elementos identificados, o elemento hidrogênio (figura 14) apresentou uma variação de 6,05% a 6,55%. A porcentagem deste elemento interfere nos resultados das análises de poder calorífico inferior, quanto maior a quantidade de hidrogênio menor será o valor de poder calorífico inferior.

### 6.2.3. Poder calorífico (PCS, PCI e PCU)

Para que o briquete seja um produto competitivo no mercado, é importante que seu poder calorífico esteja dentro dos padrões desejados para as finalidades às quais se destina, seja em caldeiras, fornalhas ou na geração de eletricidade. Para tanto, é necessário atentar à quantidade de RRSU e madeira adicionada à sua composição para que aquela não comprometa a geração de calor durante a queima do briquete. Na figura 15 são apresentados os valores médios de poder calorífico superior dos 21 tratamentos.

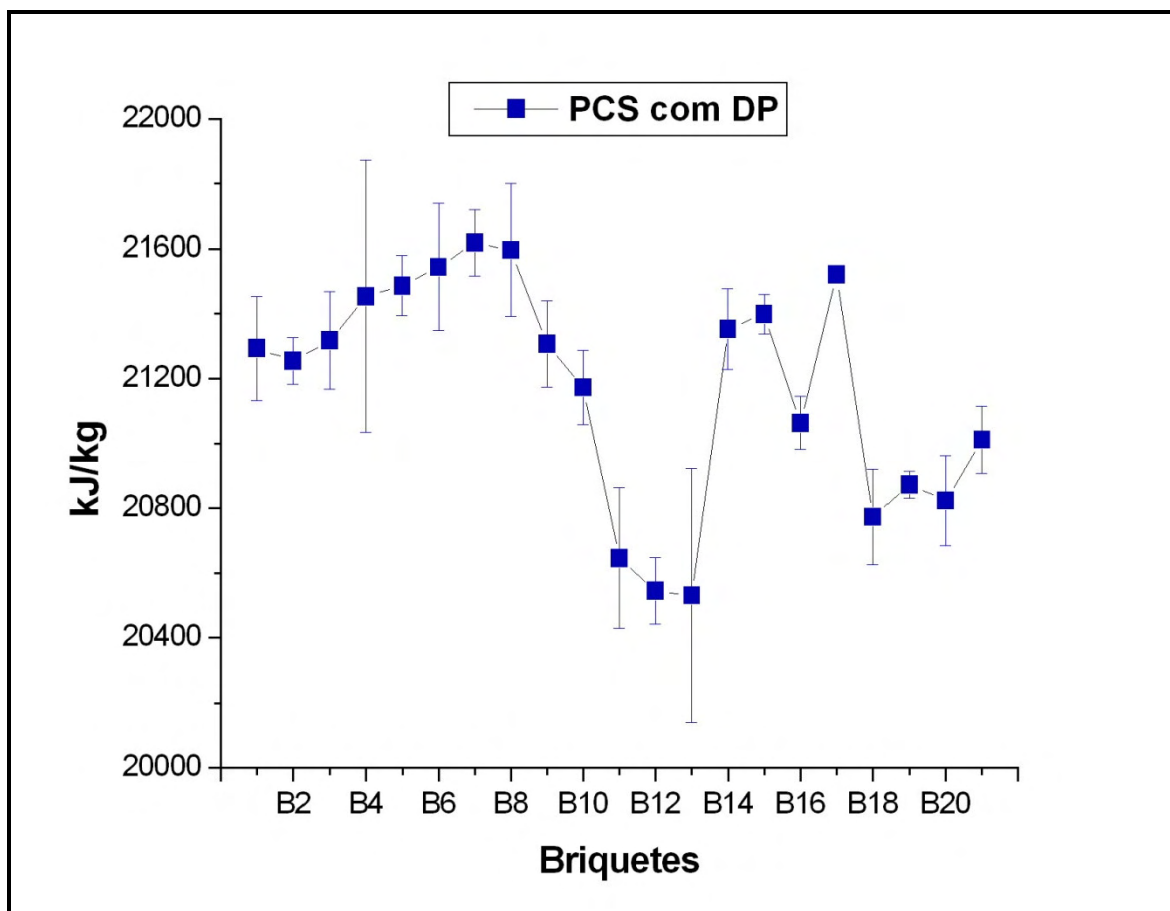


Figura 15. Valores médios de PCS.

Na tabela 21 são apresentados os valores médios de PCS, PCI e PCU de todos os tratamentos e, na figura 15 destacam-se os valores médios de PCS.

Na figura 15 são apresentados os valores médios de poder calorífico superior dos tratamentos. O valor do desvio-padrão para os tratamentos B4 e B13, apresentaram-se bem acima dos demais tratamentos, justifica-se este aumento devido às partículas de RRSU distribuídas na amostra utilizada na análise de poder calorífico superior, realizada em triplicata, onde pode existir a ocorrência de uma das repetições possuir uma maior quantidade de termoplásticos.

Tabela 21. Valores médios de PCS, PCI e PCU de todos os tratamentos.

Tratamentos	Média PCS (kJ/kg)	Média PCI (kJ/kg)	Média PCU (kJ/kg)
<b>B1</b>	<b>21293,10</b>	<b>19812,23</b>	<b>17262,70ab</b>
<b>B2</b>	<b>21254,31</b>	<b>19827,70</b>	<b>17363,62ab</b>
<b>B3</b>	<b>21317,08</b>	<b>19933,43</b>	<b>17491,36ab</b>
<b>B4</b>	<b>21453,44</b>	<b>20081,09</b>	<b>17584,55a</b>
<b>B5</b>	<b>21486,66</b>	<b>20118,84</b>	<b>17498,18ab</b>
<b>B6</b>	<b>21543,58</b>	<b>20141,84</b>	<b>17534,37ab</b>
B7	21617,66	20215,92	17345,38
B8	21596,02	20194,28	17476,32
B9	21306,76	19905,02	17443,62
B10	21172,26	19770,52	16940,63
B11	20645,29	19243,55	16530,63
B12	20544,09	19142,35	16422,55
B13	20530,53	19128,78	16393,39
<b>B14</b>	<b>21352,26</b>	<b>19948,26</b>	<b>17116,01b</b>
<b>B15</b>	<b>21398,24</b>	<b>19977,10</b>	<b>17114,50b</b>
B16	21062,03	19660,29	16871,01
<b>B17</b>	<b>21521,35</b>	<b>20103,79</b>	<b>17229,31ab</b>
B18	20772,79	19371,05	16600,64
B19	20872,57	19470,83	16705,38
B20	20823,11	19471,37	16635,82
B21	21011,13	19609,38	16793,32

\*médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey.

Pode-se observar que os briquetes que apresentaram maior poder calorífico foram todos identificados pela letra (a), demonstrando que apenas os briquetes B14 e B15 diferem estatisticamente do briquete B4.

Na tabela 21 e na figura 15, nota-se que o maior poder calorífico superior médio encontrado foi do tratamento B7 (com 15% de RRSU) que apresentou 21617,66 kJ/kg, ultrapassando o poder calorífico superior médio da madeira (19544,20 kJ/kg).

Assim como ocorreu com o PCS, o PCI foi crescente à medida que aumentou a porcentagem de RRSU adicionada ao briquete. Em relação ao briquete 100% madeira, a adição de RRSU trouxe vantagens do ponto de vista energético.

Segundo Gonçalves (2006), pode-se verificar que dos materiais utilizados na fabricação dos briquetes, os termoplásticos têm um PCS maior quando comparados aos outros materiais. Isso se deve ao fato desses plásticos serem hidrocarbonetos (derivados de petróleo), sendo que sua adição no briquete aumenta o PCS em função da proporção usada.

Como os briquetes não serão comercializados com 0% de umidade, os poderes caloríficos - inferior e útil - tornam-se a base mais realista para a comparação de combustíveis. Para o cálculo do PCI foi usado o teor percentual de hidrogênio obtido por análise elementar das amostras e, para o PCU, as respectivas umidades.

#### **6.2.4. Análise Cromatográfica**

##### **6.2.4.1. Análise qualitativa dos produtos formados na pirólise**

As amostras foram analisadas por Cromatografia Gasosa, com o equipamento QP-500 – Shimadzu, pelo laboratório da Central Analítica (Unicamp). As amostras foram aquecidas a 500°C, sob atmosfera de nitrogênio e os vapores recolhidos em diclorometano. Os resultados desta análise encontram-se no Apêndice.

A análise de cromatografia gasosa apresentou hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), bem como os seus derivados nitrados (Dimetil Pirazol) e oxigenados (Guaiacol) - ver tabelas 22, 23 e 24. Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos são uma família de compostos caracterizada por possuírem dois ou mais anéis aromáticos condensados, provenientes da combustão incompleta de material orgânico.

De maneira geral, tanto os HAPs como os seus derivados estão associados ao aumento da incidência de diversos tipos de câncer no homem. São poluentes orgânicos de grande persistência ambiental, e muitos deles são capazes de reagir, após transformações metabólicas, tornando-se carcinogênicos e potenciais mutagênicos.

O HAP mais estudado é o benzo[a]pireno, potente agente carcinogênico, não encontrado em nenhuma das amostras analisadas. A complexidade e composição de misturas de HAPs depende das suas fontes, como visto nas diferentes amostras analisadas. As misturas encontradas são complexas, contendo uma grande variedade de HAPs em diferentes níveis de concentração de acordo com a porcentagem de área da análise (A), e podem ser associadas a prejuízos à saúde humana.

Quando a combustão de biomassa é completa, os elementos liberados pelo fogo são apenas água, dióxido de carbono e calor. Entretanto, na prática, a combustão nunca é completa e com isso, existe a liberação de combustível residual (partículas de carbono), monóxido de carbono e outros produtos considerados poluentes, como hidrocarbonetos e óxido de nitrogênio, os quais dependem da composição elementar do combustível. Se os elementos da biomassa forem orgânicos, serão degradados termicamente mediante o processo de pirólise, dando como resultado produtos líquidos, sólidos e gasosos de composição variada.

Os briquetes produzidos visam seu uso como combustível para a geração de calor. A análise elementar mostra que se a combustão for realizada de maneira completa, além de calor seria obtido vapor de água, CO<sub>2</sub>, gases de enxofre (SO, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>) e NOx. Os compostos de enxofre e de nitrogênio formados são considerados poluentes quando a concentração se encontra acima da permitida por legislação.

Os limites de emissão dependem da capacidade do sistema (Tabela 6), onde no Brasil a resolução CONAMA 316/2002 dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, ou seja, para processos com temperatura acima de 800 °C. Pode-se observar ainda que o limite de emissão para dioxinas e furanos não é bastante rigoroso, pelo CONAMA o limite é de 0,5mg/Nm<sup>3</sup>, para EPA 40 é de 0,41mg/Nm<sup>3</sup> e para Danish Environmental Protection Agency é de 0,1mg/Nm<sup>3</sup> (tabela 6).

A análise cromatográfica apresenta resultados qualitativos dos poluentes emitidos e seus derivados a uma margem de temperatura entre 100°C e 600°C,

sendo assim, impossibilita a comparação com os limites determinados nas legislações vigentes. Os poluentes encontrados em cada briquete na análise de cromatografia são demonstrados em ordem alfabética nas tabelas 22, 23 e 24. As concentrações de cada composto variaram entre os briquetes, permitindo a identificação daqueles tratamentos com menores emissões.

Tabela 22. Poluentes identificados em cada tratamento, pela ordem alfabética (A-D).

<b>Composto</b>	<b>B 1</b>	<b>B 2</b>	<b>B 3</b>	<b>B 4</b>	<b>B 5</b>	<b>B 6</b>	<b>B14</b>	<b>B15</b>	<b>B17</b>
Ácido Dimetóxi Hidróxi Fenil Acético	3,28	2,52	2,47	1,50	1,21		1,13		1,68
Ácido Hidróxi Metóxi Benzeno Acético		0,45							
Ácido Metil Aspártico		0,25							
Álcool Furfurílico				<b>4,28</b>	1,25		0,79		
Bis Metil Fenol	1,06								
Ciclopentenodiol		1,07							
Corilone	1,07								
Dietil Ftalato			0,36		1,28				
Dihidro Sigmasterol		0,27							
Dimetil Pentanal			<b>5,07</b>	<b>6,03</b>	<b>3,93</b>	<b>2,77</b>	1,48		2,38
Dimetil Pirazol		3,54							
Dimetilmetóxi Propenil Fenol				0,94					
Dimetóxi Fenol	<b>9,48</b>	<b>7,46</b>	<b>8,24</b>	<b>6,38</b>	<b>4,85</b>	<b>2,89</b>	<b>4,24</b>		<b>4,87</b>
Dimetóxi Hidróxicinamaldeído			1,77		0,87	0,91	0,71		0,93
Dimetóxi Propenil Fenol	<b>5,57</b>	<b>9,54</b>	<b>8,15</b>	<b>5,59</b>	<b>5,06</b>	<b>3,54</b>	<b>3,01</b>		<b>4,63</b>
Diocil Ftalato	0,76	0,35							

\*os valores numéricos da tabela 22, referem-se às áreas identificadas de cada composto em porcentagem.

Nas tabelas 22, 23 e 24 destacam-se em negrito as maiores áreas identificadas de cada composto poluidor nos briquetes analisados. Gonçalves (2006), afirma que não é possível identificar alguns compostos devido a condição bibliográfica atribuída pelo software do equipamento, além disso, alguns compostos sofrem co-eluição, isto é, não foram bem separados nas condições cromatográficas de análise.

Identificaram-se na tabela 22 alguns compostos derivados da classe furano, como por exemplo, álcool furfurílico encontrado em área de 4,28% no briquete do tratamento B4. Já na distribuição de compostos fenólicos, os briquetes dos tratamentos B1, B2 e B3 apresentaram respectivamente consideráveis áreas de 9,48%, 7,46% e 8,24%. Nesta tabela nota-se que as maiores concentrações dos poluentes encontrados localizam-se nos briquetes dos tratamentos B1, B2, B3 e B4.

Gonçalves (2006) constatou por análise cromatográfica que o briquete produzido com 15% de RRSU apresentou área total identificada dos derivados da classe furano de 6,5%. Nota-se que os briquetes dos tratamentos B1 e B3 possuindo mesma proporção de RRSU e sem os termoplásticos pigmentados, apresentaram respectivamente 0 e 3,22% de áreas totais identificadas, havendo assim uma queda de até 49,53%.

Tabela 23. Poluentes identificados em cada tratamento, pela ordem alfabética (E-H)

<b>Composto</b>	<b>B 1</b>	<b>B 2</b>	<b>B 3</b>	<b>B 4</b>	<b>B 5</b>	<b>B 6</b>	<b>B 14</b>	<b>B15</b>	<b>B17</b>
Etil Benzeno					1,85				2,43
Éter Metílico		0,23							
Éster Dimetil Dietil		1,12	0,98	2,07	1,22	0,90	1,13		1,78
Estireno					0,65		1,68	<b>2,64</b>	
Fenol			0,87						
Furancarboxaldeído (furfural)				<b>11,43</b>	<b>11,44</b>	<b>2,96</b>	<b>20,26</b>	<b>40,3</b>	<b>30,8</b>
Furarona		3,26							
Guaiacol	<b>3,94</b>	3,58	2,70			0,07	1,99		
Hidróxi Dimetóxi Benzaldeído	3,32		2,12	0,80	0,75	1,32			0,8
Hidróxi Dimetóxi Fenil Etanona	1,71	2,60	1,76	1,63	0,63		0,66		0,01
Hidróxi Metil Ciclopentenona			2,36	1,95	1,58	1,79			
Hidróxi Metil Furancarboxaldeído			1,72			2,38	0,90		0,51
Hidróxi Metóxi Benzaldeído			0,63			0,24	0,68		
Hidróxi Metóxi Fenil Propanona	1,38		1,82	0,73	1,47				0,82
Hidróxi Metóxicinamaldeído	1,73	<b>3,80</b>	1,35			1,02			
Hidróxi Propenil Fenol				0,66					

\*os valores numéricos da tabela 23, referem-se às áreas identificadas de cada composto em percentagem.

A adição de RRSU nos resíduos de madeira juntamente com os aglutinantes provoca a aparição de compostos poluentes na fase gasosa, produtos da pirólise de plásticos. Entre os poluentes mais prejudiciais pode-se mencionar os estirenos, fenóis,

furanos, benzenos, dióxidos e monóxidos; entretanto, dois dos 9 tratamentos avaliados apresentaram as menores quantidades de áreas identificadas, B6 e B14.

Tabela 24. Poluentes identificados em cada tratamento, pela ordem alfabética (M-T)

<b>Composto</b>	<b>B 1</b>	<b>B 2</b>	<b>B 3</b>	<b>B 4</b>	<b>B 5</b>	<b>B 6</b>	<b>B 14</b>	<b>B15</b>	<b>B17</b>
Metil Bendediol						0,13			
Metil Cicloexanol					1,55				
Metil Fenol					1,84				
Metil Furancarboxaldeído		1,44	0,48		2,42	0,86	2,24	<b>3,19</b>	2,68
Metil Furarona		1,55	1,02		2,21	1,89	0,86		
Metil Heptenona	2,27								
Metil Trimetóxi Benzeno			2,97						
Metóxi Benzenodiol		0,84							
Metóxi Etil Fenol		1,00	1,02		0,49	0,99			0,58
Metóxi Fenol				4,17	<b>4,63</b>	1,41		1,44	2,74
Metóxi Metil Fenol	<b>4,83</b>	3,50	<b>3,45</b>	3,41	2,34	1,62	1,74	0,97	2,34
Metóxi Pirocatecol			0,39			0,35			
Metóxi Propenil Fenol		<b>7,28</b>				1,16			
Metóxi Propil Fenol		1,95	0,97			0,70	1,43		1,18
Metóxi Vinil Fenol	3,29	2,76	2,53	3,74	2,61	1,73	1,83		3,07
Metóxicoumaranolona	3,61	<b>4,35</b>		<b>7,98</b>	<b>4,40</b>	<b>10,88</b>	<b>4,71</b>		<b>4,63</b>
Nonanol								<b>42,10</b>	
Octacosanoato de Metila					0,38				
Propionato de Vinila		0,79			0,68	0,40	0,89		
Sigmasterol					0,45				
Trimetóxi Benzeno	<b>14,2</b>	3,14	<b>10,97</b>	<b>8,59</b>	<b>6,37</b>	3,79	<b>6,02</b>		<b>7,19</b>
Trimetóxi Metil Benzeno	2,47	3,24	0,45	2,27		<b>4,02</b>	1,77		1,87
Total % Área Identificada	64,05	71,88	66,62	74,15	68,41	50,72	60,09	90,64	78,00

\*os valores numéricos da tabela 24, referem-se às áreas identificadas de cada composto em porcentagem.

Na tabela 24 observa-se que o briquete B15 apresentou a menor quantidade de compostos identificados na análise cromatográfica, porém possui a maior porcentagem de área da classe furfural detectada (40,3%).

O briquete B6 quando comparado com os outros, não apresenta predominância dos compostos derivados da classe fenólica, furfural, benzeno e estireno e assim, sendo ambientalmente mais correto quanto à emissão de poluentes.

### **6.2.5. Análise de TGA**

A análise termogravimétrica representa a perda de massa em função do aumento da temperatura e foi realizada em atmosfera inerte (N<sub>2</sub>). Geralmente as perdas de massa em temperaturas inferiores a 100°C, referem-se à liberação de umidade contida na biomassa. O maior pico representa a liberação dos voláteis e por este motivo também indica a temperatura de ignição, essa é uma região de queima rápida.

Diferentes briquetes dos tratamentos definitivos foram analisados por termogravimetria, comparando as características de degradação dos diferentes tratamentos notou-se que a perda de peso inicial ocorrida entre 50-100°C se deve principalmente à evaporação da umidade, água existente na amostra. A região de temperatura variando de 220-300°C é atribuída principalmente à despolimerização térmica da hemicelulose e quebra de ligações glicosídicas da celulose.

O pico largo na região de 200-500°C é uma contribuição de componentes de lignina e a degradação da celulose ocorre entre 275 e 400°C (ALVAREZ et al., 2004). As figuras 16 a 24, referem-se as curvas de termogravimetria (TGA) e termogravimétricas derivadas (DTG) dos briquetes dos tratamentos definitivos. Na Figura 18, referente aos briquetes do tratamento B3, ocorre uma redução brusca na perda de peso a uma temperatura de 260 °C, que é esperado, principalmente devido à contribuição da hemicelulose. Sabe-se que a hemicelulose se decompõe antes da lignina e celulose. A baixa estabilidade térmica da hemicelulose é devido à presença de grupos acetil (SHEBANI et al., 2008).

Na figura 18, a curva de DTG referente aos briquetes do tratamento B3 mostra um pico de 362,14°C (perda de massa 64,47%), que é devido à decomposição térmica da celulose- $\alpha$  (ALVAREZ et al., 2004).

A curva de DTG, referente aos briquetes do tratamento B4 (figura 19), mostra dois picos, o pico do primeiro ombro em cerca de 359,99°C corresponde à decomposição térmica da  $\alpha$ -celulose (Lu et al., 2008; Ray et al., 2002; Shebani et al., 2008). O segundo pico em 465,98°C (perda de massa 6,79%) quando a quantidade de mandioca é maior na mistura, ocorre um também aumento de 6,7% de perda de massa.

A curva DTG (figura 23), referente aos briquetes do tratamento B15 também apresenta dois picos. O primeiro pico corresponde a decomposição principal em cerca de 357,85°C (perda de massa 63,30%) é atribuída à decomposição  $\alpha$ -celulose da madeira e celulose. Nas Figuras 23 e 18, referentes aos briquetes dos tratamentos B15 e B3, repectivamente, há uma mudança na temperatura de decomposição 362° para 357°C.

Na figura 18 pode-se observar que a temperatura de degradação dos briquetes do tratamento B3 é maior do que o de B4 e B15. Essa forte associação entre a hemicelulose e fibrilas de celulose é acreditado para diminuir a cristalinidade média das fibrilas de celulose (DUCHESNE et al., 2001). Estas impurezas podem iniciar mais sítios ativos e acelerar o início da degradação térmica.

Há uma distinção entre os valores dos resíduos das fibras remanescentes após 600°C (Tabela 26). Os resultados mostram que a 600°C, o resíduo de carbono mais elevado foi obtido nos briquetes do tratamento B14 e o resíduo de carbono menor foi obtido por B1. O tratamento B5 também mostra uma quantidade relativamente pequena de resíduo de carbono em comparação com os briquetes dos outros tratamentos.

As curvas apresentadas nas figuras 16, 19, 20, 21 e 23, referentes aos briquetes dos tratamentos B1, B4, B5, B6 e B15, apresentaram após a diminuição da taxa de perda de massa, alguns picos menores, representando a queima lenta do carbono residual.

As maiorias das amostras iniciaram a perda de peso em torno dos 150°C e, ao final, em torno de 600°C, todo material orgânico foi perdido, restando apenas material mineral decorrente da atmosfera inerte utilizada na análise. As curvas

termogravimétricas apresentaram perdas de peso com o aumento da temperatura caracterizada em três principais fases de queima: (fase 1: água livre), (fase 2: degradação de matéria orgânica), cujos principais componentes são celulose, hemicelulose e lignina (RIEGEL, 2008), maior fração presente na amostra, sendo que parte dessas perdas são grupos funcionais como ácido carboxílicos, cetonas, lactonas e fenóis (Órfão et al., 1999) e perda de água proveniente de hidróxido metílicos  $\text{Me-OH} \rightarrow \text{MeO} + \text{H}_2\text{O}$  (BEYER et al., 1998). E por fim a fase 3 representando a queima lenta do carbono residual.

Verifica-se que os picos das análises em atmosfera inerte aparecem em temperaturas próximas comprovando que a maior taxa de perda de massa ocorreu entre 200°C e 400°C e verificou-se o início de liberação do material volátil em temperatura inferior a 220°C. As figuras de 16 a 24 apresentam os resultados de variação de massa em relação à temperatura obtidos na análise de TGA dos briquetes dos tratamentos definitivos.

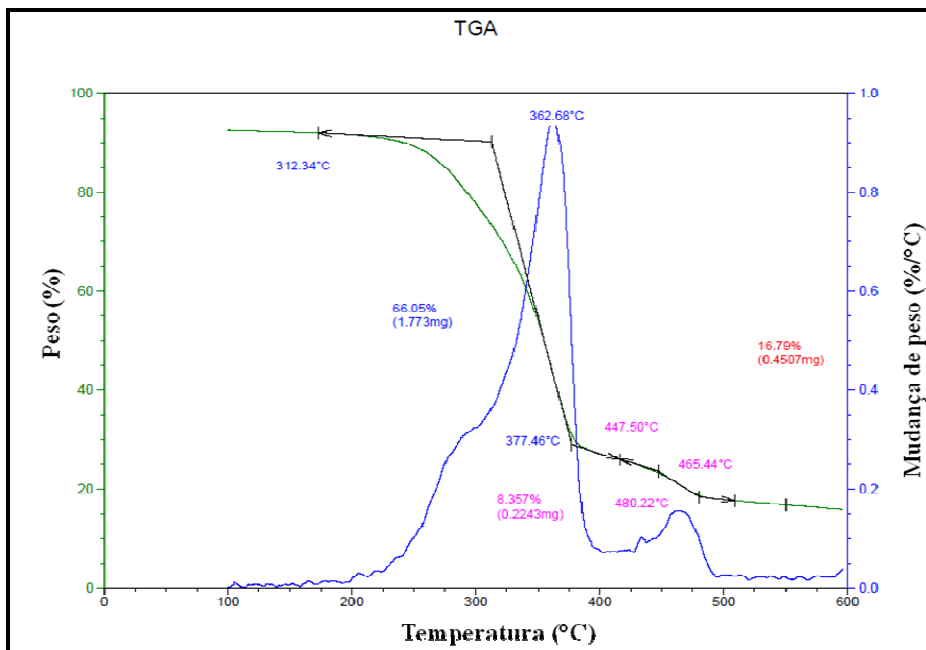


Figura 16. Análise de TGA do tratamento B1.

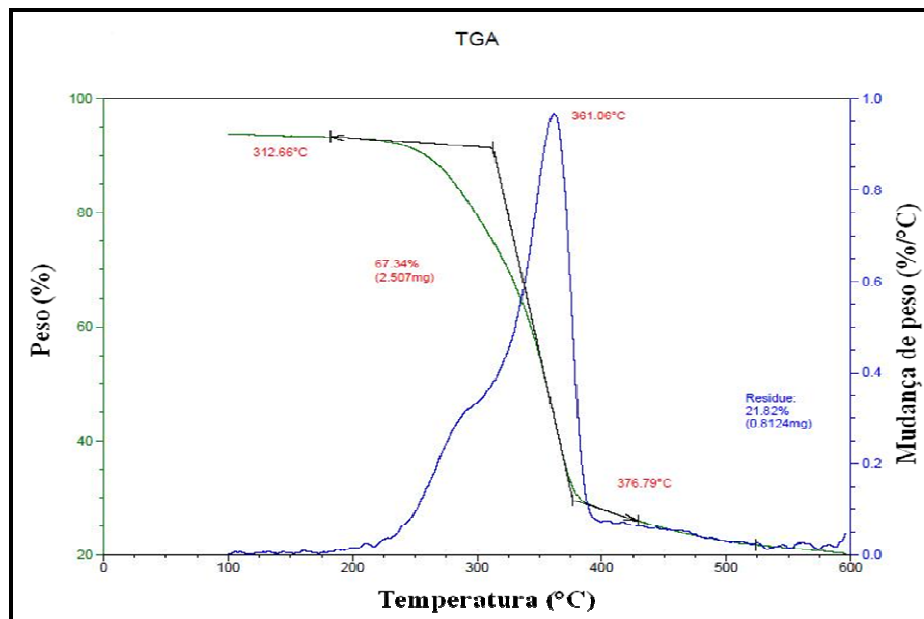


Figura 17. Análise de TGA do tratamento B2.

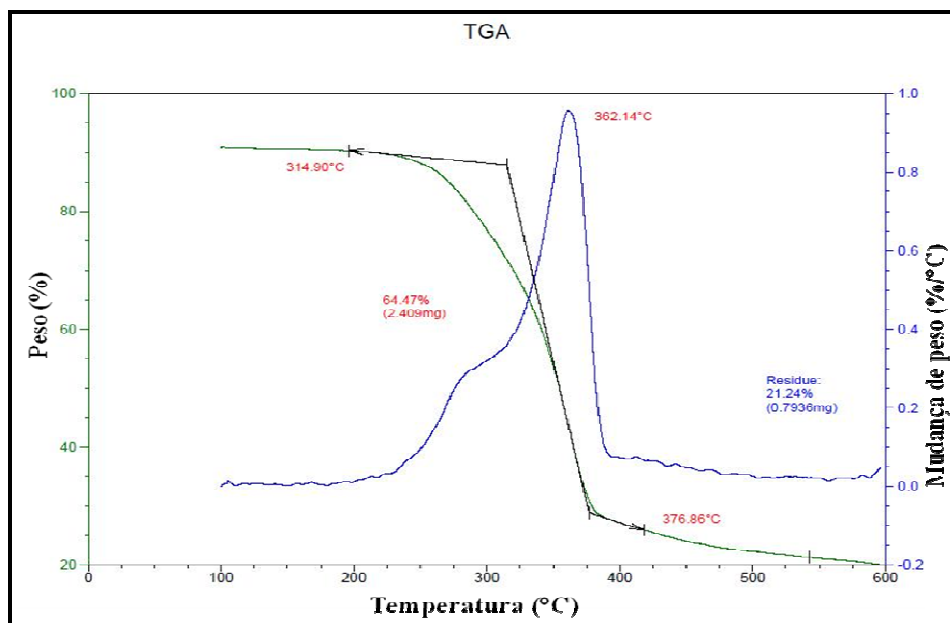
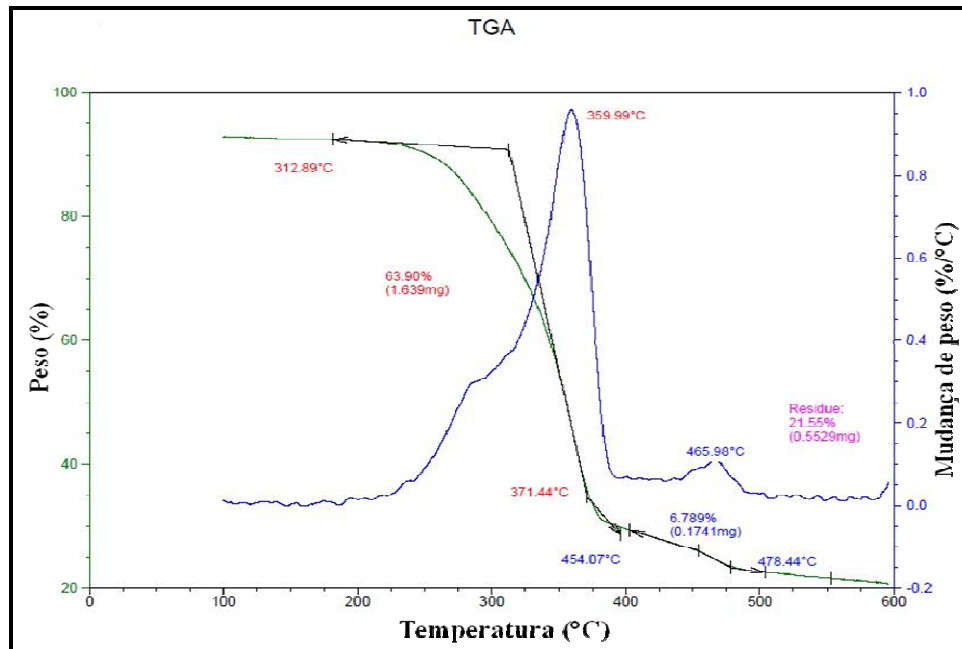


Figura 18. Análise de TGA do tratamento B3.



1Figura 19. Análise de TGA do tratamento B4.

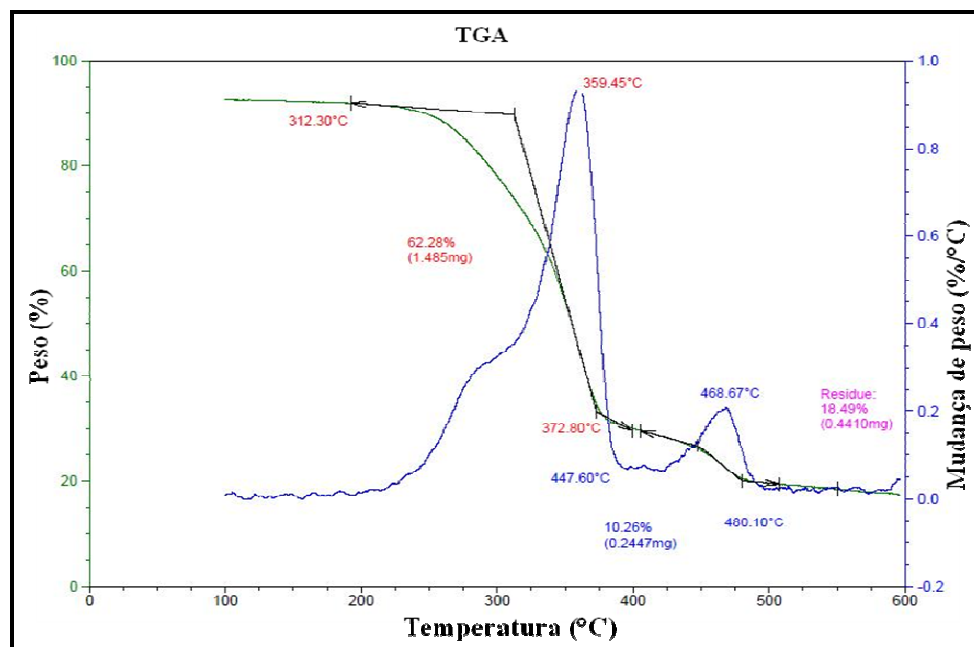


Figura 20. Análise de TGA do tratamento B5.

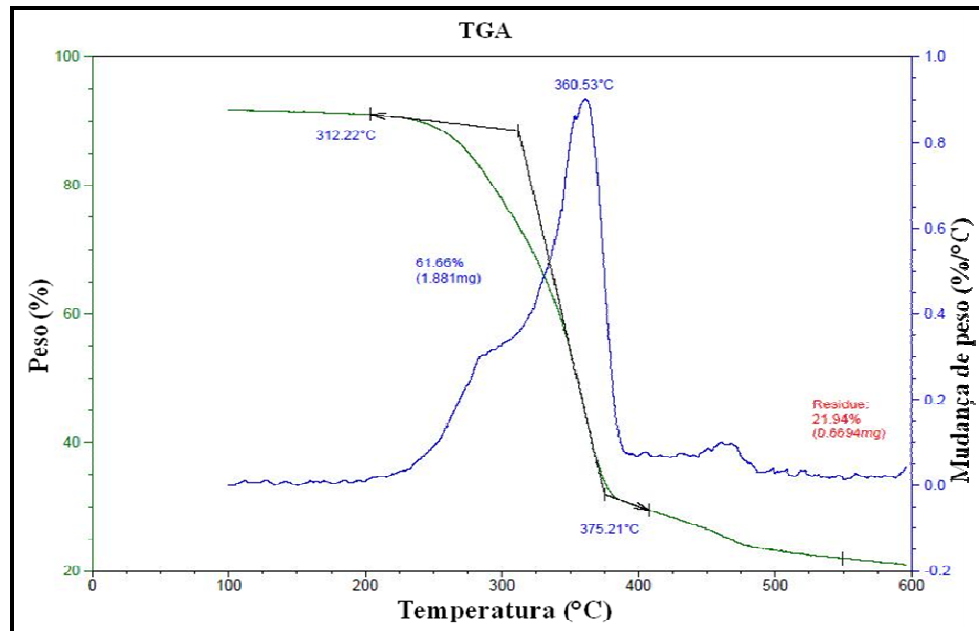


Figura 21. Análise de TGA do tratamento B6.

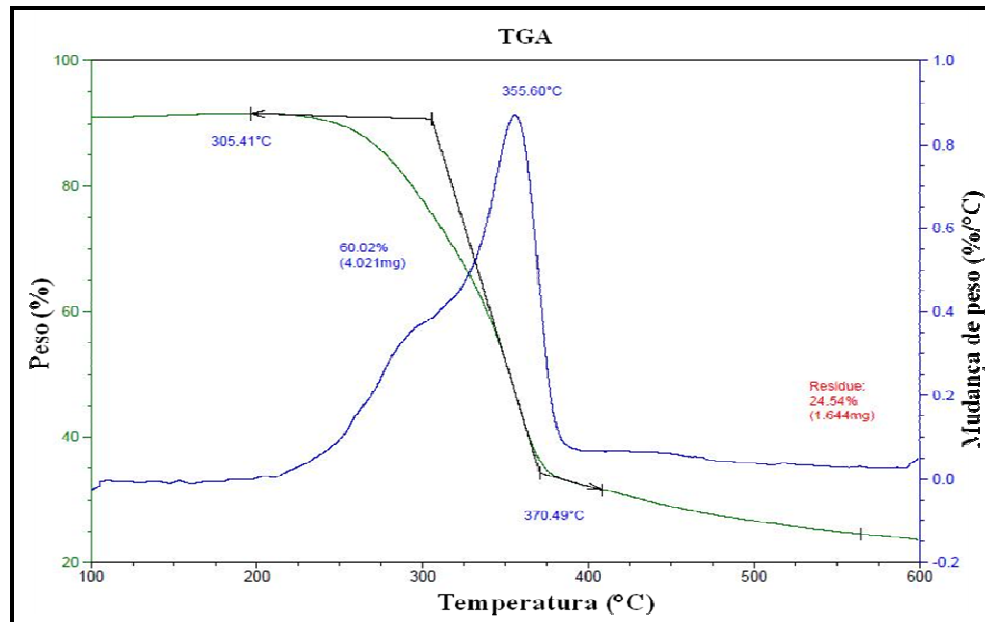


Figura 22. Análise de TGA do tratamento B14.

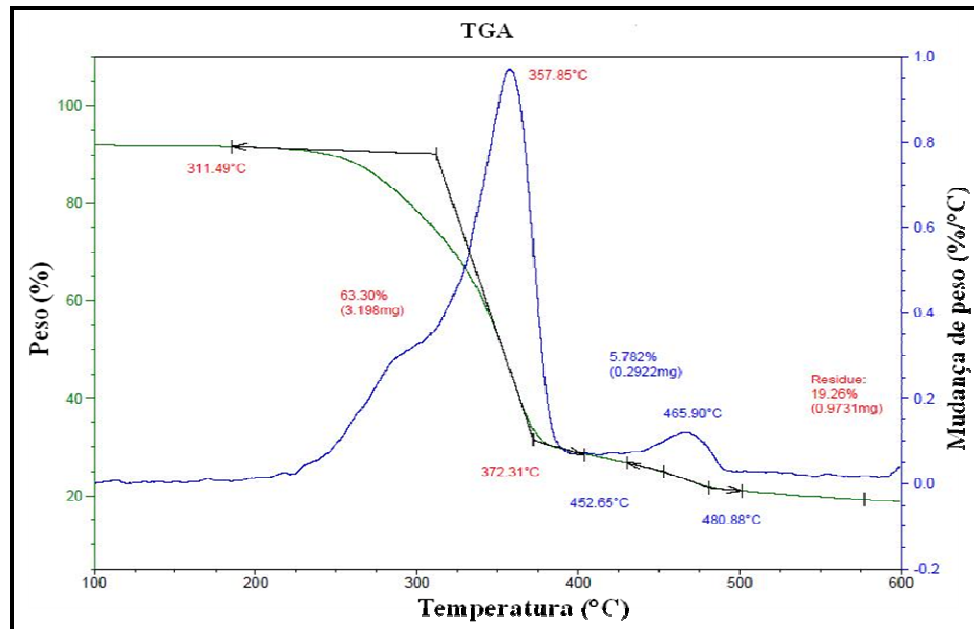


Figura 23. Análise de TGA do tratamento B15.

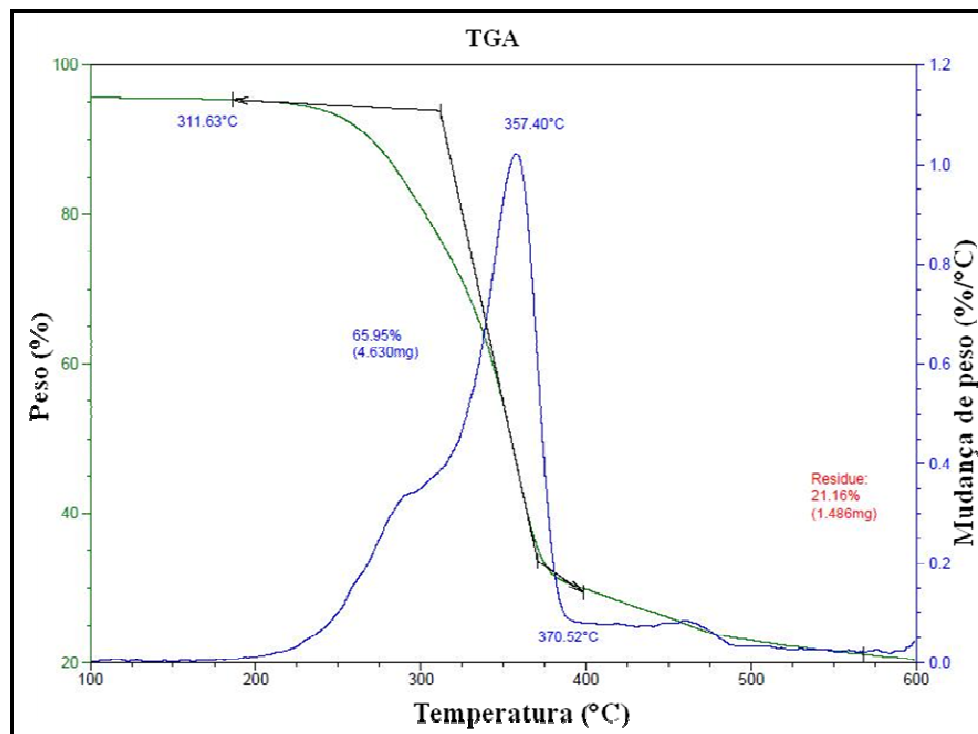


Figura 24. Análise de TGA do tratamento B17.

Na tabela 25 é apresentado o comportamento térmico dos briquetes dos tratamentos definitivos.

Tabela 25. Comportamento térmico de acordo com os tratamentos.

<b>Tratamentos</b>	<b>Pico de temperatura* (°C)</b>	<b>Degradação (%)</b>	<b>Teor de cinzas 600 (°C)</b>
B1	362,68	66,05	16,79
B2	361,06	67,34	21,82
B3	362,14	64,47	21,24
B4	359,99	63,90	21,55
B5	359,45	62,28	18,49
B6	360,53	61,66	21,94
B14	355,60	60,02	24,54
B15	357,85	63,30	19,26
B17	357,40	65,95	21,16

\* A temperatura máxima corresponde à decomposição térmica da celulose.

#### **6.2.6. Análise de resistência a força de ruptura perpendicular**

Na figura 25 encontram-se os valores médios da análise de resistência a ruptura perpendicular dos briquetes.

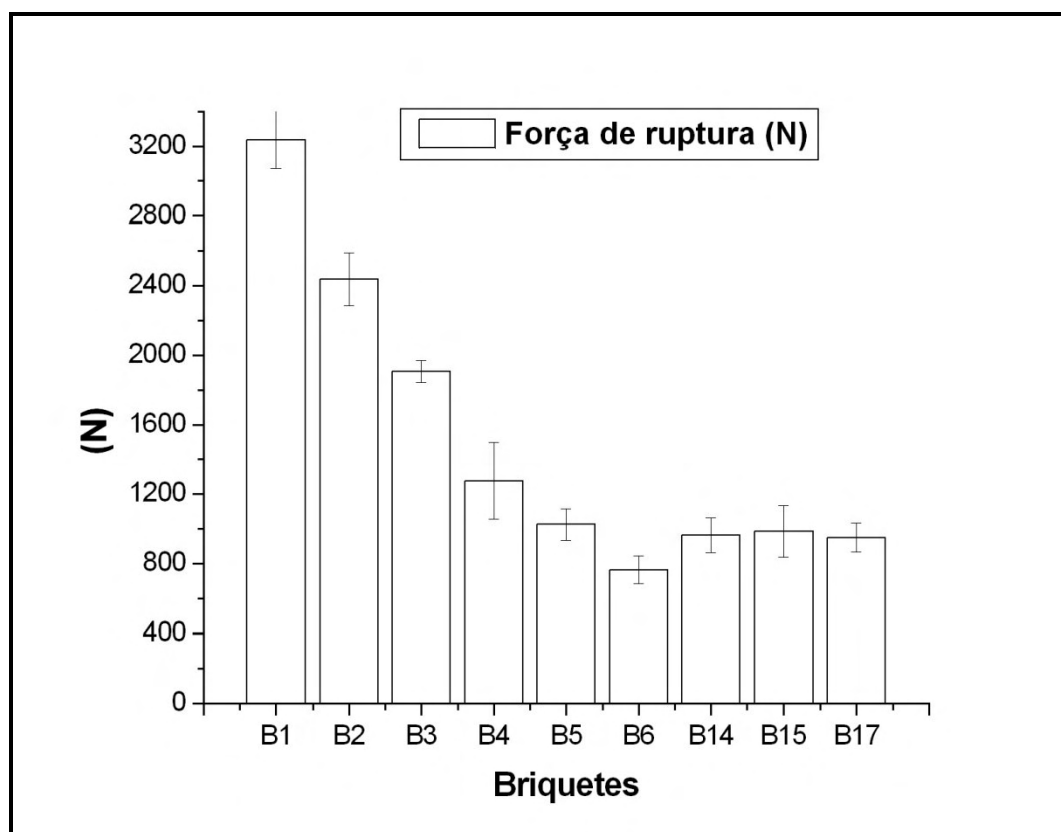


Figura 25. Análise de resistência a força de ruptura perpendicular dos briquetes definitivos.

Pode-se observar que se destacaram nesta análise os briquetes dos tratamentos B1, B2, B3 e B4, que obtiveram respectivamente os seguintes valores de resistência a ruptura perpendicular em (N): 3236, 2432, 1902 e 1274.

Os briquetes que apresentaram o menor valor com 764 N foram os do tratamento B6, tendo em vista a sua composição (Tabela 13), quanto maior a quantidade de RRSU menor a resistência a força de ruptura perpendicular. Quando comparados os valores obtidos neste trabalho com os de MELO (2000), que testou briquetes com a mesma área de contato, conseguindo um valor de resistência a ruptura na ordem de 1911 N. Os briquetes dos tratamentos B1 e B2 apresentam melhores condições de manuseio e armazenamento entre os demais.

Na tabela 26 são apresentados os resultados estatísticos referentes à análise de resistência a força de ruptura.

Tabela 26. Estatística dos resultados de resistência a força de ruptura perpendicular.

<b>Tratamentos</b>	<b>Médias (N)</b>
B1	3236a
B2	2432b
B3	1902c
B4	1274d
B5	1010de
B6	765e
B14	961de
B15	981de
B17	951de

\*médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey.

Pode-se observar que os briquetes que apresentaram maior resistência a força de ruptura perpendicular (Tabela 26) foram os briquetes dos tratamentos B1, B2, B3 e B4; todos os identificados pelas letras a, b e c diferem estatisticamente dos demais.

As figuras de 26 a 29 demonstram a vista lateral dos briquetes com maior resistência a força de ruptura.



Figura 26. Vista lateral do briquete do tratamento B1.



Figura 27. Vista lateral do briquete do tratamento B2.



Figura 28. Vista lateral do briquete do tratamento B3.



Figura 29. Vista lateral do briquete do tratamento B4.

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A busca de novas soluções para o aproveitamento dos resíduos urbanos é necessária e deverá ser realizada em curto prazo. A briquetagem composta de RRSU com resíduos de madeira para seu uso como combustível é uma alternativa a esse problema que deverá ser avaliada de forma mais rigorosa em futuros trabalhos.

Embora os resultados experimentais tenham mostrado que a adição de RRSU favorece ao incremento do PCS, PCI e PCU dos briquetes, a análise dos produtos gasosos da pirólise evidenciou a presença de compostos poluidores e nocivos para a saúde humana, tais como: compostos fenólicos, furanos, ácidos carboxílicos, estireno, entre outros.

A briquetagem das misturas mostrou-se satisfatória para os briquetes produzidos com 15% de RRSU e diâmetro de 90 mm, pois estes apresentaram melhor compactação na máquina briquetadeira, quantidade positiva de cinzas quando comparado com outros briquetes, e um PCU na ordem de 16550 kJ/kg.

Quanto aos poluentes emitidos, os briquetes mais satisfatórios foram os dos tratamentos B6 e B14, que apresentaram respectivamente as menores áreas identificadas com 50,72% e 60,09%. Os briquetes do tratamento B15, mesmo tendo

obtido a maior área de identificação de poluentes demonstraram ser entre todos, os que possuíram menor variedade de poluentes.

A partir das blendas estudadas poderá ser feito um melhor planejamento experimental de mistura, tomando como base critérios mais rigorosos para a definição das composições e componentes adicionados. A caracterização dos componentes participantes das blendas ajuda a definir a origem dos compostos formados durante a sua termoconversão; assim como, verificar a interação química desses compostos depois de formados.

A cromatografia gasosa com espectrometria de massa permite identificar diferentes composições de compostos orgânicos nas diferentes amostras, sendo em sua maioria compostos pertencentes à família dos hidrocarbonetos aromáticos, potencialmente poluentes e prejudiciais a saúde. Entretanto, outras técnicas de análises complementares são necessárias para identificar os efeitos causados ao homem e ao meio ambiente. O estudo da composição dos gases e vapores provenientes da combustão direta das blendas é um caminho que ajuda a identificar de forma direta os possíveis poluentes contidos na fase gasosa.

A adequação às emissões de poluentes regulamentados pelas normas ambientais é indispensável para a produção de briquetes. Entretanto, a análise qualitativa é subjetiva para afirmação de quais compostos podem ser potencialmente prejudiciais por não conhecermos a concentração de cada um desses na fase gasosa.

Os resultados deste trabalho mostram um caminho a seguir na procura de soluções técnicas ambientalmente corretas para o aproveitamento energético dos resíduos urbanos e agroindustriais visando a minimização destes e conseqüente preservação do meio ambiente.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIOLI, J. L. **Fontes de energia**. Brasília, DF: Editora UnB, 1994. 138 p.

ALVAREZ, V. A.; VA'ZQUEZ, A. Thermal degradation of cellulose derivatives/starch blends and sisal fiber biocomposites. **Polymer Degradation and Stability**, Rio de Janeiro, v. 84, n. 1, p. 13-21, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3176-89 (02)**: standart practice for ultimate analysis of coal and coke: CMQ-LCL-PE-072. West Conshohocken, 1989. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4239-08**: standart test methods for sulfur in the analysis sample of coal and coke using high temperature tube furnace combustion method: method C (CMQ-LCL-PE-028). West Conshohocken, 2008. 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5373-02 (07)**: standart test methods for Instrumental determination of carbon, hydrogen and nitrogen in laboratory samples of coal and coke: (CMQ-LCL-PE-017). West Conshohocken, 2002. 16 p.

ANTUNES, R. C. Briquetagem de carvão vegetal. In: PENEDO, W. R. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. v. 1, p. 197-206.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118/2003**: análises de resistência em corpos cilíndricos. Rio de Janeiro, 2003. 221 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181/84**: análise granulométrica de partículas. Rio de Janeiro, 1984. 82 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 36 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE AMIDO DE MANDIOCA. **China proíbe etanol de milho e investe em mandioca**. Paranaíba, 2007. Disponível em: <<http://www.abam.com.br/not.php?id=277>>. Acesso em: 10 jan. 2010.

ASSUMPCÃO, R. M. V. **Gaseificação de madeira e carvão vegetal**: princípios e aplicações, in gaseificação de madeira e carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC, 1981. v. 1, 11 p.

BELLIBONI, C. **Combustão de gases**. São Paulo: Editora UNESP, 1974. 3 p.

BEYER, L.; DESLIS, K.; VOGT, B. Estimation of organic matter composition according to a simple thermoanalytical approach. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 29, p. 1277-1297, 1998.

BEZZON, G. **Síntese de novos combustíveis sólidos a partir de resíduos agroflorestais e possíveis contribuições no cenário energético brasileiro**. 1994. 195 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

BHATTACHARYA, S. C. Fuel for thought, renewable energy word. **Renewable Energy World**, Oxford, v. 7, n. 6, p. 122-130, 2004.

BHATTACHARYA, S. C.; LEON, M. A.; RAHMAN, M. M. A study on improved biomass briquetting. **Energy for Sustainable Development**, Bangalore, v. 6, n. 2, p. 67-71, June 2002.

BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S.; SHRESTHA, R. M. State of the art for biomass densification. **Energy Sources**, New York, v. 11, n. 3, p. 161-182, 1989.

BORGES, A. S.; CINIGLIO, G.; BRITO, J. O. Considerações energéticas e econômicas sobre resíduos de madeira processada em serrarias. **Silvicultura**, São Paulo, v. 2, p. 603-606, set. 1993.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 4 abr. 2005.

BRASIL. Ministério da Infra Estrutura. Disponível em: <<http://www.mi.gov.br>>. Acesso em: 8 jul. 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. Brasília, DF, 2003. 18 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 7 abr. 2008.

BRIDGWATER, A. V. **Fast pyrolysis of biomass**: a handbook. Birmingham: Aston University, Bioenergy Research Group, 2001. v. 2.

BRITO, J. O. Madeira para a floresta: a verdadeira realidade do uso de recursos florestais. **Silvicultura**, Piracicaba, v. 11, n. 41, p. 188-193, 1986.

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ. Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV. Vom 14.08.2003. Berlin, 2003. 27 p.

CAMPINAS. Prefeitura Municipal. **Programa de coleta seletiva municipal**. Disponível em: <<http://www.campinas.sp.gov.br>>. Acesso em: 20 maio 2009.

CASSONI, V. **Valorização de resíduo de processamento de farinha de mandioca (manipueira) por acetificação**. 2008. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Botucatu, 2008.

CEMPRE. Compromisso empresarial para reciclagem. São Paulo. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br>>. Acesso em: 5 set. 2005.

CEREDA, M. P. Manejo, uso e tratamento de subprodutos da industrialização da mandioca. In: \_\_\_\_\_. **Caracterização dos subprodutos da industrialização da mandioca**. São Paulo: Fundação Cargill, 2001. v. 4, p. 13-37. (Série culturas de tuberosas amiláceas Latino Americanas).

CEREDA, M. P. Resíduos da industrialização da mandioca. In: \_\_\_\_\_. **Caracterização dos subprodutos da industrialização da mandioca**. São Paulo: Paulicéia, 1994. p. 11-50.

CHAVES, H. J. **Introdução à cromatografia gás-liquido de alta resolução**. Póvoa de Santa Iria: Dias de Sousa, 1996. 207 p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Glossário ecológico ambiental**. São Paulo, 2009. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/institucional/glossario/glossario\\_a.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/institucional/glossario/glossario_a.asp)>. Acesso em: 18 maio 2009.

COSTA, T. M. S.; MARTINELLI, J. R.; MATOS, J. R. Análise térmica aplicada a estudos de eficiência do bambu para processos de carbonização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DOS MATERIAIS, 16., 2004, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Dias de Sousa 2004. p. 7.

DERMIBAS, A. Combustion characteristics of different of biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 30, p. 219-230, 2004.

DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. **Bois et Forêts des Tropiques**, Montpellier, n. 172, p. 33-48, 1977.

DUCHESNE, I. et al. The influence of hemicellulose on fibril aggregation of kraft pulp fibers as revealed by FE-SEM and CP/MAS 13C-NMR. **Cellulose**, Dordrecht, v. 8, p. 103-111, 2001.

EDUCAR . Programa educar. São Carlos: USP. Disponível em: <<http://www.educar.sc.usp.br>>. Acesso em: 10 mar. 2005.

ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 4**: determination of moisture content in stack gases. Washington, DC, 2000. 27 p.

ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY. **Code of federal regulation**: title 40, part 60. Washington, DC, 1997. 44

ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel**. Rome: FAO, 1990. 11 p.

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

FLORIANI, S. L. **Potencial de resíduos sólidos industriais como fonte de energia e avaliação das emissões gasosas em combustro em escala piloto.** 2007. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

GIL PORTUGAL CONSULTORES AMBIENTAIS ASSOCIADOS. **Guia de prática de análise imediata de combustíveis sólidos.** Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/praticas/pratai.htm>>. Acesso em: 4 abr. 2005.

GODEMBERG, J. Energia para o desenvolvimento. In: ENERGIA PARA SOBREVIVÊNCIA E O DESENVOLVIMENTO, 6., 1984, Roma. **Anais...** Roma: Academia Pontifícia de Ciências, Jardins do Vaticano, 1994. p. 1-7.

GOMES, P. A. **Uso da madeira para fins energéticos.** Belo Horizonte: CETEC, 1980. v. 1, p. 27-42.

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

GONÇALVES, J. E. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, n. 5, v. 13, 657-661p, set. 2009.

GRASSI, G.; PALZ, W. O futuro da biomassa na União Européia. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, n. 76, p. 28-34, 1994.

GRIPP, W. G. **Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: considerações sobre a proposta para São Paulo.** São Carlos: USP, Escola de Engenharia de São Carlos, 1998. 208 p.

GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. **Biomass briquetting**: technology and practices. Bangkok: FAO, 1996. 8 p.

GUIA de prática de análise imediata de combustíveis sólidos. Belo Horizonte: UFMG, 2008. 16 p.

HOWARD, J. O. **Wood for energy in the Pacific Northwest**: an overview. Washington, DC: US Forest Service, 1979. 59 p. General technical report 50-24.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. **Gestão integrada de resíduos sólidos**: manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2001. 200p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.com.br>>. Acesso em: 18 maio 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.com.br>>. Acesso em: 18 dez. 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br>>. Acesso em: 16 set. 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br>> Acesso em: 18 set. 2009.

JARDIM, N. S.; WELLS C. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT; CEMPRE, 1995. 278 p.

JUVILLAR, J. B. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. v. 1, p. 67-82.

KANAYAMA, P. H. **Minimização de resíduos sólidos urbanos e conservação de energia**. 1995. 130 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KULESZA, K.; GERMAN, K. Chlorinated pyrolysis products of co-pyrolysis of poly(vinyl chloride) and poly(ethylene terephthalate). **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 1, p. 52-56, 2003.

LEONEL, M.; CABELLO, C. Hidrólise enzimática do farelo de mandioca: glicose e álcool. In: CEREDA, M. P. (Coord.). **Manejo, uso e tratamento de subprodutos da industrialização da mandioca**. São Paulo: Fundação Cargill, 2001. v. 4, cap. 22, p. 280-290. (Série culturas de tuberosas amiláceas latino americanas).

LU, J.; WANG, T.; DRZAL, L. T. Preparation and properties of microfibrillated cellulose polyvinyl alcohol composite materials. **Composites Part A**, Surrey, v. 39, p. 738-746, 2008.

MARSOLLA, A. **Planta de briquetagem de carvão vegetal**. São Paulo: Rosa Madeireira, 1998. 76 p.

MARTINS, H. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1990. v. 1, p. 9-26.

MELLANBY, K. **Biologia da poluição**. São Paulo: EPU; EdUSP, 1982. 152 p..

MELO, V. P. **Produção de briquetes de carvão vegetal com alcatrão de madeira**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. 96 p.

MENEZES, T J. B. **Etanol, o combustível do Brasil**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 229 p.

MOREIRAS, E. R. **Caracterização de briquetes produzidos a partir de carvão vegetal e resíduos da agro-indústria da mandioca.** 1997. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

OLIVEIRA, W. E. Introdução ao problema do lixo. **Revista DAE**, São Carlos, v. 74, p. 58-69, 1969.

ORFÃO, J. J. M.; ANTUNES, F. J. A.; FIGUEIREDO, J. L. Pyrolysis Kinetics of lignocellulosic materials three independent reactions model. **Fuel**, London, v. 78, p. 349-358, 1999.

PAGLIUSO, J. D. **Combustíveis e combustão.** São Carlos: USP, EESC, 1984. 127 p, Apostila.

PAWLOSKY, U. et al. **Curso de tratamento de efluentes industriais:** industrialização de mandioca. Curitiba: SUREHMA, 1991. 126 p.

PEREIRA JÚNIOR, V. B. Alternativas para a co-geração de energia de uma indústria de chapas de fibra de madeira. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 17, n. 1, p. 34-37, 2001.

PRODUÇÃO brasileira de mandioca. **AGRIANUAL 2008:** anuário da agricultura brasileira, São Paulo, p. 374, 2009.

QUIRINO, W. F. **Briquetagem de carvão vegetal e resíduos agrícolas.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 4., 1987, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CBE, 1987. p. 36-41.

RAVAGLIA, E. **Projeto de uma caldeira.** Mauá: Escola de Engenharia, 1967. 88 p.

RAY, D. et al. Study of the thermal behaviour of alkali-treated jute fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 85, p. 2594-2599, 2002.

RECICLÁVEIS. **Classificação dos termoplásticos e termofixos**. São Paulo. Disponível em: <<http://www.reciclaveis.com.br>>. Acesso em: 22 jul. 2009.

RIEGEL, I. et al. Análise termogravimétrica da pirólise da acácia-negra (*Acaciaeurnsi de wild.*) cultivada no Rio grande do sul, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 533-543, 2008.

ROWELL, R. Utilization of natural fibers in plastics composites problems and opportunities. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGNOCELLULOSICS PLASTICS COMPOSITES, 1., 1996, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Científica, 1996. p. 23-52.

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

SARTORI, M. M. P. **Otimização da produção de energia e biomassa do resíduo de colheita em variedades de cana-de-açúcar**. 2001. 121 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

SARTORI, M. M. P.; GONÇALVES, J. E.; LEÃO, A. L. Modelo de determinação da quantidade de RRSU e madeira para produção de briquetes. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS, CONTROL AND APPLICATIONS, 8., 2009, Bauru. **Abstracts...** Bauru: FEB, 2009. p. 68.

SCHWENGBER, D. R. **Mandioca: a raiz do Brasil**. 2006. Disponível em: <<http://www.agronline.com.br/artigos/artigo.php?id=302>>. Acesso em: 11 mar. 2009.

SERVIÇO DE APOIO ÀS PEQUENAS EMPRESAS DE SÃO PAULO. Disponível em: <<http://www.sebraesp.com.br>>. Acesso em: 20 abr. 2005.

SHEBANI, A. N.; VAN REENEN, A. J.; MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 471, p. 43-50, 2008.

SOARES, R. V. Queimas controladas: prós e contras. In: In: FÓRUM NACIONAL SOBRE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 1., 1995, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 1995. 1 CD-ROM.

SRIVASTAVA, P. K.; MAHESHWARI, R. C.; OJHA, T. P. **Biomass briquetting and utilization**. New Delhi: Jain Brothers, 1995. 12 p.

STAUBER, E. **Machine for disintegrating and compressing peat**. São Paulo, 1995. US Patent 537909.

TEISANO, T. Briquetes comprimidos de aparas de serragem. **Revista da Madeira**, São Paulo, v. 32, n. 383, p. 11-12, nov. 1983.

TILLMAN, D. A.; ROSSI, A.; VICK, K. M. **Incineration of municipal and hazardous solid wastes**. New York: Academic, 1989. 184 p.

VALE, A. T. et al. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill ex-M Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

## **9. APÊNDICE**