

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

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E ENERGÉTICA DE BRIQUETES
PRODUZIDOS COM REJEITOS DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS E MADEIRA DE *Eucalyptus grandis***

JOSÉ EVARISTO GONÇALVES

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

BOTUCATU – SP
Outubro de 2006

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

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E ENERGÉTICA 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: Dra. Maria Márcia Pereira Sartori

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestrado em Agronomia – Programa de pós – graduação em agronomia “Energia na Agricultura”.

BOTUCATU – SP

Outubro de 2006

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

G635c Gonçalves, José Evaristo, 1977-
Caracterização química e energética de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira *Eucalyptus grandis* / José Evaristo Gonçalves. - Botucatu, [s.n.], 2006.
ix, 75 f. : il. color., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) -Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2006
Orientador: Alcides Lopes Leão
Inclui bibliografia

1. Briquetes. 2. Cromatografia de gás. 3. Agricultura e energia. 4. Energia da biomassa. I, Leão, Alcides Lopes. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

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

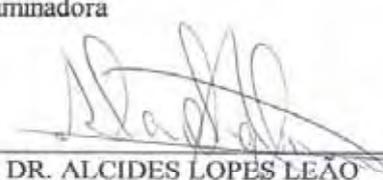
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: "CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E ENERGÉTICA DE BRIQUETES
PRODUZIDOS COM REJEITOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBA-
NOS E MADEIRA DE EUCALIPTO"**

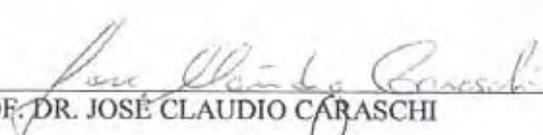
ALUNO: JOSÉ EVARISTO GONÇALVES

ORIENTADOR: PROF. DR. ALCIDES LOPES LEÃO

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. ALCIDES LOPES LEÃO



PROF. DR. JOSÉ CLAUDIO CARASCHI



PROF. DR. CLAUDIA CRISTINA TEIXEIRA NICOLAU MENDONÇA

Data da Realização: 31 de agosto de 2006.

A Deus

Pela minha vida, saúde e sabedoria

Ao meu pai

Evaristo José da Silva Gonçalves

Pelo desenvolvimento do meu carácter

A minha querida mãe

Benedita Alfredo Gonçalves

Pela educação, força, carinho, amor, compreensão, ...

A minha irmã

Maria Angélica Gonçalves

Pelo companheirismo e por estar presente não só nos bons momentos, mas também nas dificuldades.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus plea ajuda em todos os momentos.

Ao professor Dr. Alcides lopes Leão pela orientação.

A minha Co-orientadora Profa. Dra. Maria Márcia pereira Sartori

A Faculdade de Ciências Agronômicas e ao Departamento de Recursos Naturais – UNESP –
Botucatu.

A usina de reciclagem e compostagem de lixo - Lençóis Paulista.

A empresa Indusparket – Tiete.

Aos colegas do curso de pós-graduação, em especial Vera, Aline, Francisco e a todos que de
alguma maneira colaboraram na realização deste trabalho.

A toda a minha família pela ajuda e compreensão.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	IX
1. RESUMO.....	1
2. SUMMARY.....	3
3. INTRODUÇÃO.....	5
4. REVISÃO DA LITERATURA.....	8
4.1. Resíduos Sólidos Urbanos –RSU.....	8
4.2. Escassez de investimentos.....	9
4.2.1. Falta de áreas disponíveis para aterro próximas aos centros urbanos	9
4.3. Crescimento dos custos operacionais por tonelada.....	9
4.3.1. Os resíduos urbanos no Brasil.....	10
4.3.2. Reduzir.....	11
4.3.3. Reutilizar.....	11
4.3.4. Reciclar.....	11
4.4. Os rejeitos de resíduos sólidos urbanos (RRSU).....	12
4.5. Resíduos de biomassa para a geração de energia.....	13
4.5.1. Disponibilidade de resíduos agrícolas e florestais.....	14
4.6. Energia de biomassa.....	14
4.7. Análise elementar.....	15
4.8. Principais conversões energéticas utilizáveis para os resíduos agroflorestais.....	15
4.8.1. Pirólise.....	16
4.8.2. Carbonização.....	17
4.8.3. Gaseificação.....	17
4.8.4. Combustão.....	17

4.9. Os resíduos madeireiros como fonte de energia.....	18
4.9.1. A briquetagem como forma de recuperação de energia.....	19
4.9.2. Emissão de poluentes.....	20
4.9.3. Legislação para a emissão de poluentes.....	21
4.9.4. Cromatografia gasosa.....	24
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
5.1. Preparação das amostras.....	27
5.1.2. Acondicionamento e seleção dos componentes das amostras de RRSU.....	27
5.2. Resíduos de serragem de eucalipto.....	29
5.3. Partículas de resíduos para a briquetagem.....	29
5.4. Teor de umidade da matéria para a briquetagem.....	30
5.5. Método para a preparação e briquetagem dos resíduos.....	30
5.6. Método para análise do teor de combustíveis e teor de cinzas.....	31
5.7. Método para análise elementar dos briquetes.....	32
5.8. Método para determinação do poder calorífico superior (PCS).....	33
5.9. Método para determinação do poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil dos briquetes (PCU).....	34
5.10. Cromatografia gasosa acoplada à espectrofotometria de massas dos briquetes.....	34
5.11. Análise estatística.....	35
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
6.1. Informações sobre a usina de reciclagem e compostagem de lixo.....	36
6.2. Coleta e classificação do RRSU.....	37
6.3. Análises físico-químicas dos briquetes.....	41
6.3.1. Teor de cinzas e de combustíveis.....	41
6.3.2. Poder calorífico superior (PCS).....	44
6.3.3. Análise de emissões de poluentes dos briquetes.....	55
6.3.4. Amostra de madeira (M).....	66
6.3.5. Amostras de R1, R2, R3, R4 e R5.....	67

7. CONCLUSÕES.....	68
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabelas	Página
1. Custo operacional dólar/ tonelada do lixo urbano.....	9
2. Destino do lixo na grande São Paulo.....	10
3. Rendimento dos produtos típicos obtidos por meio de diferentes formas de pirólise de madeira (base seca).....	16
4. Limites de emissão por capacidade de sistema para a queima de resíduos.....	23
5. Plano de ensaios de briquetes em função da composição percentual de resíduos sólidos urbanos e madeireiros	31
6. Informação referentes a usina de reciclagem e compostagem do lixo.....	37
7. Composição da amostra de RRSU.....	38
8. Limitações técnicas para a briquetagem dos materiais presentes na amostra de RRSU....	39
9. Composição percentual dos termoplásticos presentes no RRSU.....	40
10. Índices para o cálculo do teor de combustíveis e teor de cinzas dos ensaios.....	41
11. Teor de cinzas e teor de combustíveis dos briquetes.....	42
12. Poder calorífico superior dos briquetes com diferentes porcentagens de resíduos.....	44
13. PCS médio dos materiais componentes dos briquetes.....	45
14. PCS médio dos briquetes e dos materiais componentes dos briquetes.....	46
15. Análise elementar da madeira e do RRSU (C, N, H).....	48
16. PCS, PCI e PCU dos briquetes.....	48
17. Legenda e identificação das amostra.....	55
18. Compostos identificados na amostra (M).....	56
19. Compostos identificados na amostra R5.....	58

20. Compostos identificados na amostra R10.....	59
21. Composto identificados na amostra R15.....	61
22. Compostos identificados na amostra R20.....	63
23. Compostos identificados na amostra R25.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
1. Oferta interna de energia no mundo (2000).....	6
2. Oferta interna de energia no Brasil (2002).....	6
3. Projeto e principais etapas para o desenvolvimento do projeto.....	27
4. Esteira de RRSU na usina	27
5. Partículas de RRSU (celulose + termoplásticos) e madeira de eucalipto.....	29
6. Comparação dos teores de combustíveis e de cinzas.....	43
7. Poder calorífico superior médio das amostras.....	47
8. Vista frontal do briquete com 95% de madeira e 5% de RRSU.....	49
9. Vista lateral do briquete com 95% de madeira e 5% de RRSU.....	49
10. Vista frontal do briquete com 90% de madeira e 10% de RRSU.....	50
11. Vista lateral do briquete com 90% de madeira e 10% de RRSU.....	50
12. Vista frontal do briquete com 85% de madeira e 15% de RRSU.....	51
13. Vista lateral do briquete com 85% de madeira e 15% de RRSU.....	51
14. Vista frontal do briquete com 80% de madeira e 20% de RRSU.....	52
15. Vista lateral do briquete com 80% de madeira e 20% de RRSU.....	52
16. Vista frontal do briquete com 75% de madeira e 25% de RRSU.....	53
17. Vista lateral do briquete com 75% de madeira e 25% de RRSU.....	53
18. Vista frontal do briquete com 100% de madeira de eucalipto.....	54
19. Vista lateral do briquete com 100% de madeira de eucalipto.....	54
20. PCS e PCI dos briquetes em função da porcentagem de RRSU.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS

KJ	Quilojoule
Kg	Quilograma
ms	Matéria seca
um	Matéria úmida
RRSU	Rejeito de resíduos sólidos urbanos
RSU	Resíduos sólido urbano
PCS	Poder calorífico Superior
PCI	Poder calorífico inferior
PCU	Poder calorífico útil

1.RESUMO

Este trabalho avalia técnica e ambientalmente o uso de 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*. As amostras dos RRSU foram coletadas na Usina de Reciclagem 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 objetivou gerar alternativas para minimizar a quantidade de material destinado aos aterros com responsabilidade social e ambiental.

Os briquetes foram fabricados com 0, 5, 10, 15, 20 e 25% de RRSU na mistura com resíduos madeireiros. Os resultados da análise do Poder Calórico Superior (PCS) realizadas nos briquetes mostraram que o valor do PCS aumenta na medida em que a porcentagem dos RRSU aumentado. Briquetes de resíduos de madeira apresentaram Poder Calórico Inferior (PCI) de 18135,68 kJ/kg, valor significativamente menor ao encontrado para briquetes com 25% RRSU, o qual foi de 19860,00 kJ/kg. Essa mesma tendência foi verificada para todos os briquetes estudados. O fato anterior se deve a influência dos produtos derivados do petróleo que estão presentes nos RRSU, como por exemplo, os termoplásticos, os quais tem PCS médio na ordem de 34039,67 kJ/kg.

A briquetagem dos materiais foi realizada com o material contendo 12% de umidade, obtendo-se briquetes pouco resistentes e quebradiços. Esse resultado

poderá ser melhorado ajustando as condições de operação da máquina de briquetagem tais como pressão e temperatura. Também é preciso pesquisar o efeito da porcentagem de RRSU sobre a resistência mecânica dos briquetes.

Análises de Cromatografia Gasosa com Detector de Massa foram realizadas analisar os vapores produzidos na pirólise dos briquetes produzidos, 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 decomposição dos RRSU como foi o caso do estireno e outros produtos de alta massa molecular.

CHEMICAL CHARACTERIZATION AND ENERGY OF BRIQUETTES PRODUCED WITH REJECT OF RESIDUES URBAN SOLIDS AND WOOD OF (*Eucalyptus grandis*). Botucatu, 2006. 67p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: JOSÉ EVARISTO GONÇALVES

Adviser: ALCIDES LOPES LEÃO

2. SUMMARY

This research project evaluates technique and ambient the use of blend of briquettes for the generation of energy. The materials used for the production of the blend were Reject of Urban Solid Residues - RRSU and residues lumbermen (*Eucalyptus grandis*). The samples of RRSU were collected in the Plant of Recycling and Compossite of Garbage of Sheets From São Paulo, now discarded in municipal sanitary embankments and the residues lumbermen in sawmills of the municipal district of Botucatu-SP, material of great readiness in the area. That study, lens to generate alternatives to minimize the amount of material destined to the embankments with social and environmental responsibility.

Briquettes were manufactured with 0, 5, 10, 15, 20 and 25% of RRSU in the mixture with residues lumbermen. The results of the analysis of the Superior Caloric Power - PCS accomplished to the briquettes, they showed that PCS increases in the measure in that the percentage of RRSU is larger. Briquettes of wood residues, presented to Can Caloric Inferior - PCI of 18135,68 kJ/kg, value significantly smaller to the found for briquettes with 25% RRSU, which was of 19860,00 kJ/kg. That same tendency was verified for all of the studied blend. The previous fact is due influences her/it of the derived products of the petroleum that are present in RRSU, as they are the plastics, which he/she has a PCS in the order of 34039,67 kJ/kg.

The briquetagem of the blendas was accomplished with the material containing 12% of humidity, being obtained briquettes visually little resistant and brittle. That result can be improved adjusting the conditions of operation of the machine of such

briquetting as: the pressure and the temperature. It is also necessary to research the effect of the percentage of RRSU on the mechanical resistance of the briquettes.

Analyses of Gaseous Cromatografy with Detector of Mass were accomplished to the steams products of the pyrolysis of the formed blend, seeking to characterize the products formed during his/her thermal decomposition and to evaluate preliminary the effect caused to the environment. The results evidenced the presence of coming pollutant compositions of the decomposition of RRSU as it was the case of the estireno and other products of high molecular weight. The emission of pollutant products can be minimized adjusting the conditions of operation of the combustíble of the briquette, studying the individual effect of the components of the samples of RRSU and foreseeing systems of wash of the gases products.

Keywords: cromatografy, energy, briquettes, residues

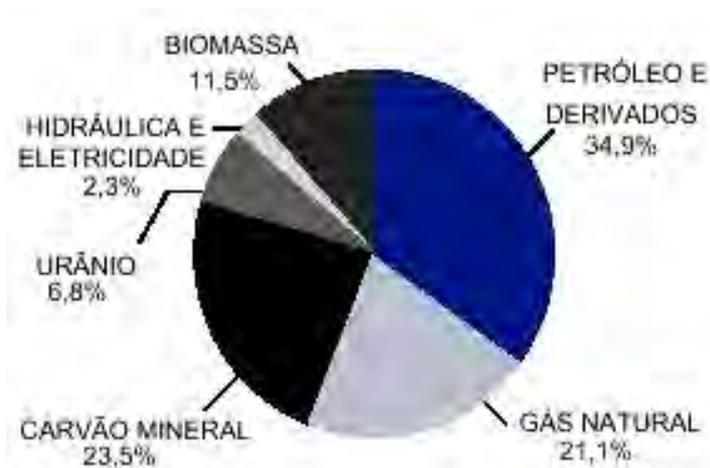
3. INTRODUÇÃO

A biomassa sempre foi e continuará sendo 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).

Essa busca é compensatória em razão dos grandes benefícios ocasionados pelo uso energético da biomassa, principalmente na realidade brasileira. Segundo o Balanço Energético Nacional do Ministério de Minas e Energias, em 2003 no Brasil, 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 (CETESB, 1998).

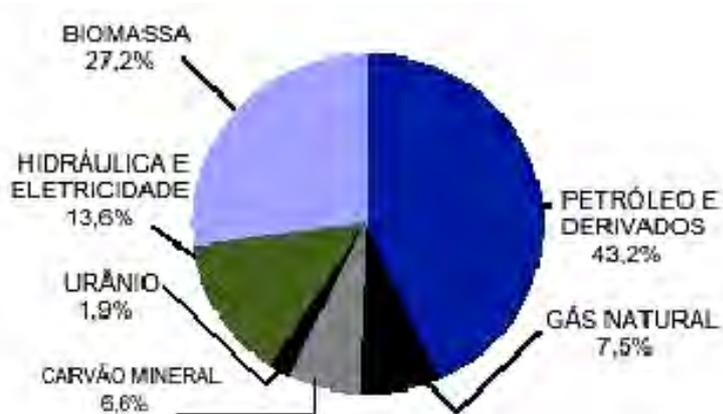
Essa característica, bastante particular do Brasil, resulta do grande desenvolvimento do parque gerador de energia hidrelétrica desde a década de 1950 e de políticas públicas adotadas após a segunda crise do petróleo (ocorrida em 1979) e a redução do consumo de combustíveis oriundos dessa fonte e dos custos correspondente à sua importação, na época, responsáveis por quase 50% das importações totais do País (IBGE, 2004). (Figuras 1 e 2).

Figura 1. Oferta interna de energia mundial (2000).



Na figura 1, nota-se 11,5% de oferta interna de energia de biomassa mundialmente. Já no quantidade de energia proveniente da biomassa corresponde a 27,2% (figura 2).

Figura 2. Oferta interna de energia nacional (2002).



Fonte das figuras 1 e 2: Balanço Energético Nacional do Ministério de Minas e Energias, 2003.

Por outro lado, a produção de biomassa para fins energéticos é renovável, gera mais 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 alimentícia. Juntamente com o aspecto agrícola, o desenvolvimento das tecnologias de processamento da biomassa são igualmente importantes e fundamentais.

Outro problema que deve ser ressaltado é o aproveitamento correto dos Resíduos Sólidos Urbanos – (RSU). O estímulo ao consumo e à produção em larga escala na sociedade atual, gera grandes quantidades de (RSU), dentro dos quais se encontram os Rejeitos de Resíduos Sólidos Urbanos – (RRSU) em diversos setores do mercado, cujo destino é os aterros municipais (GPCA, 2005).

Os RRSU são misturas complexas de compostos orgânicos, polímeros artificiais, produtos de celulose, inorgânicos (EDUCAR, 2005). Essa complexidade torna difícil a reciclagem química dos RRSU para a produção de energia e/ou insumos químicos pelo fato das emissões serem poluentes. Por outro lado, esses resíduos por serem polidispersos, o que dificulta e encarecem seu transporte. Portanto a briquetagem é uma possível solução a esse problema. Este é um processo no qual os materiais são densificados, pois concentra a energia e diminui significativamente o volume dos resíduos.

Esta pesquisa tem por objetivo criar alternativas para aproveitar a quantidade de RRSU e madeira de *Eucalyptus grandis*, sendo estes analisados química e energeticamente e avaliada a viabilidade técnica e ambiental da queima dos briquetes para a geração de energia.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Resíduos Sólidos Urbanos – RSU

Denominam-se como Resíduos Sólidos Urbanos ou municipais, todo e qualquer tipo de lixo produzido nas cidades, provenientes de atividades humanas, que são lançados no ambiente (RECICLÁVEIS, 2005). A composição dos resíduos sólidos urbanos pode variar conforme as características da cada cidade (OLIVEIRA, 1969).

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).

A necessidade de buscar soluções para os problemas de geração de lixo em centros urbanos está baseada nos seguintes fatores:

4.2. Escassez de investimentos

A maioria dos municípios brasileiros destina seus resíduos em lixões por se constituírem na forma mais barata, enquanto que a compostagem, a incineração e a reciclagem requerem investimentos maiores (KANAYAMA, 1995). Em geral os serviços de coleta de lixo absorvem entre 7 e 15% dos recursos de um orçamento municipal (JARDIM, 1995).

4.2.1. Falta de áreas disponíveis para aterros sanitários próximos aos centros urbanos

A maioria das cidades não dispõe de espaços para a construção de aterros, além disso, a proximidade aos centros urbanos pode ocasionar problemas de poluição atmosférica e sanidade à população vizinha. Conseqüentemente, a tendência é que essas áreas de destinação do lixo sejam implantadas em locais distantes de suas fontes geradoras, aumentando o custo com transporte (KANAYAMA, 1995).

4.3. Crescimento dos custos operacionais por tonelada

O aumento do custo pode ser atribuído a fatores como a necessidade de obras para o escoamento do chorume cada vez mais em níveis superficiais; obras referentes a acessos cada vez mais difíceis pela presença de carretas nos aterros; e obras decorrentes do alteamento crescente dos aterros chegando até 50m acima do nível original (CEMPRE, 2005). O aumento dos custos operacionais é apresentado na tabela 1:

Tabela 1. Custo operacional Dólar / Tonelada do lixo urbano

Ano	Dólar/ Tonelada
1980	2 a 3
1984	3 a 4
1988	4 a 5
1992	7 a 8

Fonte: (CEMPRE, 2005)

4.3.1. Os resíduos urbanos no Brasil

Em 1995, o Brasil produzia 241.614 toneladas de lixo por dia, e 76% ficavam exposto 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 2).

Tabela 2. Destino do lixo da Grande São Paulo

Locais	Quantidade %
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.

4.3.2. 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 depende 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).

4.3.3. 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).

4.3.4. Reciclar

É o termo usado quando o produto de origem industrial, artesanal e agrícola é refeito, 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).

4.4. 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, 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).

4.5. 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 (MINISTÉRIO DA INFRA ESTRUTURA, 1992).

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 e resíduos florestais e madeireiros, como a serragem e cascas de árvores (SEBRAE, 2005).

4.5.1. Disponibilidade de resíduos agrícolas e florestais

O problema de se verificar a disponibilidade e potencial dos resíduos lignocelulósicos é que dificilmente são feitas pesquisas pra 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, estimarem-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 (MINISTÉRIO DA INFRA ESTRUTURA, 1992).

4.6. Energia de Biomassa

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 & PALZ, 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: $PCI = PCS - 9H/100$, que exclui a interferência do vapor de água produzido na combustão do hidrogênio H presente no material em combinação com o oxigênio (Cunha et al.,1989).

A maioria dos sistemas de utilização da biomassa para a produção de energia não secam 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 é calculado através da fórmula: $PCU=PCI(1-u)-600u$ (Vale & BRASIL, 1997).

4.7. Análise elementar

Para o cálculo do poder calorífico inferior foi necessário 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_2) e de água (H_2O) formada (HEATCHCOCK,1986).

O vapor produzido pela reação é passado por um tubo contendo cloreto de cálcio ($CaCl_2$) para reter a água e depois por um outro tubo contendo hidróxido de sódio ($NaOH$), para reter o gás carbônico em forma de carbonato de sódio (Na_2CO_3) necessária para calcular a porcentagem de carbono e de hidrogênio na amostra por meios gravimétricos (HEATCHCOCK,1986).

4.8. Principais conversões energéticas utilizáveis 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).

4.8.1. 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 3.

A evolução dos voláteis com a temperatura na maioria das biomassas 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, CO₂, H₂O), alcatrão (fenóis, ácidos orgânicos), ácido acético, metanol, entre outros.

De 280→450°C: Hidrocarbonetos pesados, H₂, CO, CO₂.

Tabela 3. Rendimentos dos produtos típicos obtidos por meio de diferentes formas de pirólise de madeira (base seca).

Pirólises	Temperaturas	Líquido%	Carvão%	Gás%
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), longos tempos de residência.	5	10	85

fonte: BRIDGWATER, 2002

4.8.2. 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, localizado 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 a biomassa entrar em combustão, a fim de manter o processo de carbonização se fonte externa de calor, como ocorre na pirólise (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).

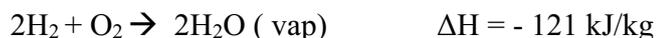
4.8.3. Gaseificação

A gaseificação de biomassa é um processo de transformação da matéria sólida vegetal em gás combustível, gerando CO, H₂ e CH₄ 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 gasôgênio ou gaseificador (ASSUMPÇÃO, 1981).

4.8.4. 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 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).

4.9. Os resíduos madeireiros como fonte energética

A indústria madeireira tem a característica de gerar grandes volumes de resíduos no processo de beneficiamento de madeira (ZANOTTO, 1986). 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 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).

4.9.1 A briquetagem como forma de recuperação de energia

Briquetagem é um processo no qual pequenas partículas de material sólido são prensadas para formar blocos de forma definida e de maior tamanho. Por meio deste processo, subprodutos de beneficiamento agroflorestal convertem-se em um material de maior valor comercial (ANTUNES, 1982). A aglomeração manual de finos 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 de briquetes em diversos países da Europa, sendo utilizados em fornos e caldeiras.

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 Motor Co”, em Michigan, EUA, em que as matérias-primas eram aparas de madeira. As aparas eram carbonizadas, o carvão moído e briquetado, utilizando como ligante amido (ANTUNES, 1982). Atualmente nos EUA e nos países da Europa e do Sudeste Asiático, ocorre em larga escala a produção de briquetes de finos de carvão mineral, carvão vegetal e de resíduos agroflorestais.

Estima-se que hoje, só no Brasil, cerca de 20 milhões de m³ de rejeitos vegetais são desperdiçados pelas fábricas. Para QUIRINO (1987), 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 de um combustível é necessário que ele atinja uma temperatura definida, chamada de temperatura de ignição. O poder calorífico de um combustível é dado pelo número de calorias desprendidas na queima do mesmo e os combustíveis são classificados segundo o estado em que se apresentam (sólido, líquido ou gasoso).

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 conversão de materiais aparentemente sem nenhum aproveitamento em produtos de valor comercial.

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 rejeitos de 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.

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 presentes no RRSU, como os polímeros. A briquetagem direta de muitos componentes do RRSU não é possível pelas características do material, além das consequências ambientais da queima dos mesmos.

4.9.2. Emissão de poluentes

Apesar das vantagens citadas, 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 e 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 pela combustão é 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 e óxido de nitrogênio e óxido e 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 constituída 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.

4.9.3. Legislação para a emissão de poluentes

Ainda são escassas as normas brasileiras relativas à queima de resíduos sólidos urbanos (GRIPP, 1998). A Resolução CONAMA de 23/01/1986, dispendo sobre a avaliação do impacto ambiental, diz no artigo 2º, inciso X, que “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 SO₂ não superiores a 2.000 g/10⁶ kcal e de material particulado não maiores que 120g/10⁶ kcal (a óleo combustível) e 800g/ 10⁶ kcal (a carvão mineral). A Densidade Colorimétrica não deve ser superior a 20%, equivalente ao padrão Nº1 da Escala Ringelmann. Para as unidades

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

No artigo 3º do mesmo artigo 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 e 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 órgão estaduais competentes.

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), órgão fiscalizador da SEMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente de São Paulo, tem seus critérios de fiscalização baseados na Norma CETESB E-15011 para a fiscalização de incineradores. Medições de temperatura, análise dos gases de saída da chaminé e água residuária do lavador de gases são englobados pela norma.

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). Os limites de emissão dependem da capacidade do sistema e são mostrados na tabela 4.

Tabela 4. Limites de emissão por capacidade do sistema para a queima de resíduos

Poluente	< 200 kg/dia base seca a 7% O ₂ ⁽¹⁾	200 a 1500 kg/dia base seca a 7% O ₂ ⁽¹⁾	>1500 kg/dia base seca a 7% O ₂ ⁽¹⁾
Material particulado	120 mg/Nm ³	70 mg/Nm ³	50 mg/Nm ³
Sox (Expresso em SO ₂)	250 mg/Nm ³	250 mg/Nm ³	250 mg/Nm ³
Nox (Expresso em NO ₂)	400 mg/Nm ³	400 mg/Nm ³	400 mg/Nm ³
Ácido clorídrico(HCl)	100 mg/Nm ³ e 1,8 kg/h	100 mg/Nm e 1,8 kg/h ³	70 mg/Nm ³
Ácido fluorídrico(HF)	5 mg/Nm ³	5 mg/Nm ³	5 mg/Nm ³
Substâncias Classe I ⁽²⁾	0,28 mg/Nm ³	0,28 mg/Nm ³	0,28 mg/Nm ³
Substâncias classe II ⁽³⁾	1,4 mg/Nm ³	1,4 mg/Nm ³	1,4 mg/Nm ³
Substâncias ClasseIII ⁽⁴⁾	7 mg/Nm ³	7 mg/Nm ³	7 mg/Nm ³
Dioxinas e Furanos ⁽⁵⁾	-	0,14 * mg/Nm ³	0,14 mg/Nm ³
CO	125 mg/Nm ³	125 mg/Nm ³	125 mg/Nm ³

fonte: CETESB, 1997

⁽¹⁾ desde que não haja injeção de oxigênio puro

⁽²⁾ somatória das emissões de Cd, Hg, e Ti

⁽³⁾ somatória das emissões de As, Co, Ni, Se e Te

⁽⁴⁾ somatória das emissões de Sb, Pb, Cr, CN, F, Cu, Mn, Pt, Pd, Rh, V e Sn

⁽⁵⁾ em 2, 3, 7, 8 TCDD FET (toxicidade equivalente)

* poderá ser dispensada a coleta e análise destes poluentes, a critério da CETESB

Observa-se que para capacidades maiores que 1500 kg/dia, o limite de emissão para dioxinas e furanos é bastante rigoroso. Estes acompanham as diretrizes estabelecidas por outros países, onde as legislações pertinentes à queima de resíduos sólidos foram evoluindo de acordo com o maior grau de conhecimento da própria tecnologia, bem como em função de pressões da sociedade junto às autoridades de países no sentido de restringir ao máximo as fontes poluidoras. Porém, no que diz respeito aos Resíduos Sólidos Urbanos, não há nenhuma legislação que regule especificamente a queima deste material e estabeleça parâmetros de projeto e emissão de poluentes, como faz a CETESB para os Resíduos Sólidos de Saúde (GRIPP, 1998).

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).

Na queima de Resíduos Sólidos Urbanos, as maiores liberações estão nos gases, nos resíduos das cinzas e, ocasionalmente, em águas residuais. Este projeto de pesquisa visa propor alternativas ambientalmente corretas para aproveitar a quantidade de RRSU que são atualmente jogados em aterros sanitários municipais, contaminando o meio ambiente de forma permanente, estudando a 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 PCS, PCI e PCU, assim como caracterizar os componentes gasosos resultantes da pirólise briquetes por cromatografia gasosa acoplada com espectrofotometro de massa e propor alternativas para o uso energético de briquetes com responsabilidade social e ambiental.

4.9.4. Cromatografia gasosa

Para a avaliação da emissão dos poluentes emitidos pelos briquetes, foram realizadas análises de cromatografia a gás (análise físico-químico de separação).

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 (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 eluido.

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).

5. MATERIAL E MÉTODO

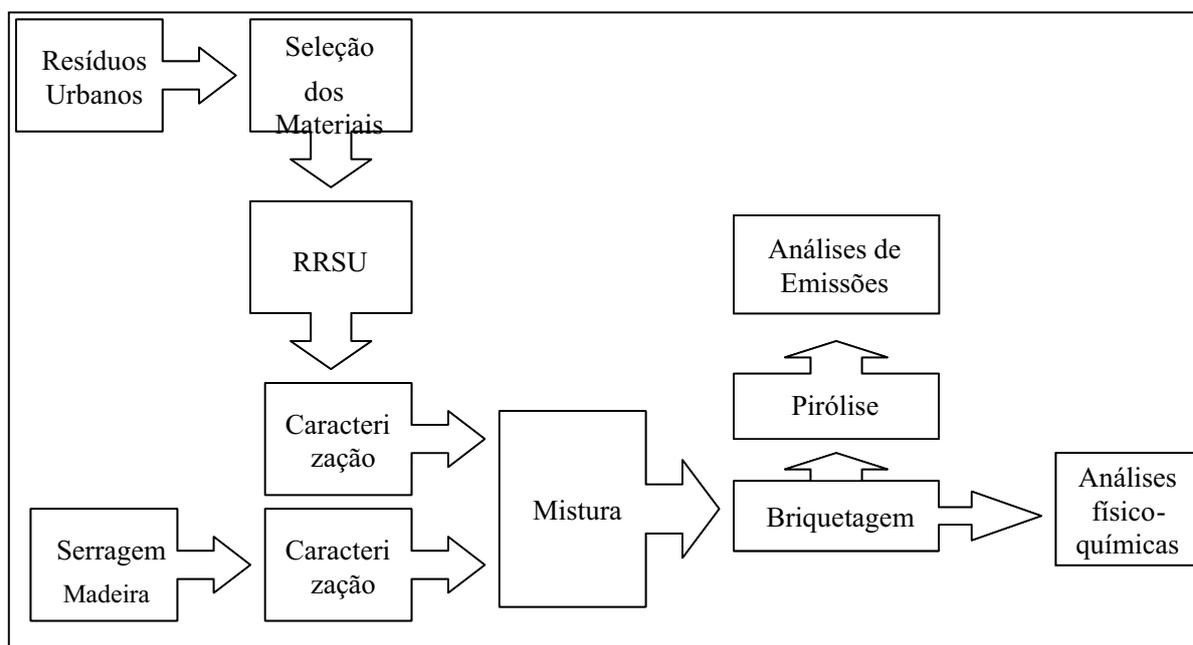
A serragem de *Eucalyptus grandis* utilizada para a briquetagem foi coletada em serrarias do município de Botucatu pelo fato de ser um resíduo abundante na região.

Os Rejeitos de Resíduos Sólidos Urbanos (RRSU) foram coletados na Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo, localizada no município de Lençóis Paulista.

Os briquetes foram desenvolvidos e analisados por etapas contituída em três momentos importantes, conforme diagrama (figura 3):

- A briquetagem
- A avaliação energética
- E a qualificação dos poluentes emitidos

Figura 3. Projeto e principais etapas para o desenvolvimento do projeto.



5.1. Preparação das amostras

5.1.2. Acondicionamento e seleção dos materiais componentes das amostras dos RRSU.

- Foi coletada uma amostra de 90 kg de RRSU;
- A figura 4 demonstra a esteira de RRSU na usina de reciclagem e compostagem de lixo de Lençóis



Figura 4. Esteira de RRSU na Usina.

A partir do material coletado na Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo de Lençóis Paulista foi feita a caracterização física dos resíduos sólidos: foi feito um perfil da sua composição quanto à sua natureza, expressando-se este perfil em função da 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 de 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. Estes são os Rejeitos de Resíduos Sólidos Urbanos.

A mistura de celulose e termoplásticos foi moída de modo que o tamanho das partículas ficou compreendido entre 5 e 10 mm.

Foi feita a análise do teor de umidade da mistura sem que esta passasse por nenhuma forma de tratamento ou secagem desde o momento da coleta. As partículas de RRSU (celulose + termoplásticos) e madeiras de eucalipto são demonstradas na figura 5.

Figura 5. Partículas de RRSU(celulose + termoplásticos) e madeiras de eucalipto



5.2. Resíduos de serragem de eucalipto

Foram coletados 150kg de resíduos madeireiros (serragem) de eucalipto no dia 13 de junho de 2005 em serrarias situadas no município de Botucatu.

A serragem utilizada é produto do beneficiamento de *Eucalyptus grandis*.

O material foi moído de modo que a granulometria de suas partículas estivessem próximas de 5 mm.

5.3. Partículas dos resíduos para a briquetagem

Para a trituração dos resíduos foi utilizado um triturador com facas onde ele foi ajustado para que as partículas estivessem compreendidas entre 5 e 10 mm.

O triturador utilizado foi da marca Seibt e modelo: M6HS 6/230.

As partículas foram trituradas no departamento de Recursos Naturais assim como também foram realizadas as análises de PCS, PCI e PCU e combustibilidade.

5.4. Teor de umidade da matéria para a briquetagem

Para o processo de briquetagem é necessário que as partículas estejam com o teor de umidade compreendido entre, 10 e 15%. Para isso o teor de umidade, base úmida, das amostras de RRSU e Eucalipto, foi determinado com a colocação das amostras em estufa de ventilação forçada à 105°C por um período de tempo suficiente para que o material atingisse o teor desejado. O tempo de estufa para o RRSU foi de 3h e 45 min para o resíduo madeireiro foi de 4h e 25 min em estufa. Utilizou-se para o cálculo a seguinte expressão:

$$\%u=(um-ms)100/um,$$

onde

um= massa (g) de matéria úmida,

ms=massa (g) de matéria seca

%u= porcentagem de umidade (base úmida)

5.5. Método para a preparação e briquetagem dos resíduos

O RRSU (termoplásticos + celulose) e a madeira moídos foram misturados nas proporções propostas para a briquetagem, apresentadas na tabela 5.

Tabela 5. Plano de ensaios de briquetes em função da composição percentual de resíduos sólidos urbanos e madeireiros.

Ensaio	% de Resíduos Madeireiros	% de RRSU (termoplásticos + celulose)
1	95	5
2	90	10
3	85	15
4	80	20
5	75	25

Em nenhum ensaio houve a adição de material aglutinante (como amido, por exemplo), 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.

Os ensaios com diferentes teores de madeira e RRSU foram briquetados com umidade aproximada em 12%, desenvolvidos na empresa Indusparket, situada na Rodovia SP 127, Km 75,5, no município de Tietê-SP no dia 19 de Dezembro de 2005.

A briquetadeira utilizada foi a de modelo Biomax b-95/210, Motor 75 cv, Produção: 1550 kg/h de briquetes e segue o seguinte processo: a matéria é conduzida para a parte central do equipamento, sofre intenso atrito e forte pressão, o que leva a temperatura para 250 °C, fluidificando-a. Posteriormente o material é submetido a uma pressão de 1t, tornando-se compacto.

5.6. Método para 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 é obtido através do seguinte procedimento:

Tritura-se cada elemento componente dos resíduos (papel, plástico, etc.) separadamente. As partes obtidas acima são misturadas, mantendo-se a proporcionalidade da sua razão em peso e acrescenta-se os resíduos madeireiros na proporção proposta para a briquetagem. Parte dessa mistura (10g) é colocada num cadinho de porcelana e seca a 105° C por quatro horas.

Após esfriar, a amostra deve ser pesada. A amostra é então 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:

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

TC = Teor de combustíveis (%)

c = peso antes da queima (g)

d = peso após a queima (g)

O teor de cinzas é obtido por:

$$TCZ = 100 - TC$$

TCZ – teor de cinzas (%)

TU = teor de umidade (%)

TC = teor de combustíveis

5.7. Método para análise elementar dos briquetes

Foram retirados 2g de amostra de cada briquete com os diferentes teores de RRSU e madeira de *Eucalyptus grandis* 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.

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

5.8. Método para determinação do poder calorífico superior (PCS)

As amostras utilizadas para análise do PCS foram moídas, secas e peneiradas em peneira ABNT 70, segundo norma ABNT – NBR 8633 e prensadas na forma de pastilhas com aproximadamente 1g cada uma e foram levadas 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. A metodologia para obtenção do poder calorífico superior foi baseada no Manual de Instruções do Calorímetro e adaptado segundo a norma ABNT-NBR 8633.

O calorímetro tem como unidade de calor cal/kg, optou-se em transformar em kJ/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.

De cada ensaio com diferentes teores de celulose e termoplásticos + madeira foram retiradas cinco amostras, para obtenção de PCS médio de cada blenda:

$$PCS = \frac{(K + M_{H_2O}) * \Delta T}{M_{seca}}$$

5.9. Método para 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 formulas:

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

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

Sendo

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

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 (%)

μ = massa em base úmida (g)

m_s = massa em base seca (g)

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

5.10. Cromatografia gasosa acoplada à espectrofotometria de massas dos briquetes

Equipamento: CG/EM-IT, modelo Saturn 2100D, constituído pelo Cromatografo a Gás modelo CP3900 e Espectrômetro de Massas Quadrupolo armadilha de íons modelo Saturn 2100, fabricados pela Varian.

As análises foram realizadas pela Central Analítica do Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas.

5.11. Análise estatística

O poderes caloríficos dos briquetes foram submetido a análise de variância (ANOVA) e quando necessário complementados pelo teste de Tukey.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Informações sobre a Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo.

A Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo de Lençóis Paulista foi criada em 1992 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 reciclados, 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 Reciclagem e Compostagem de Lixo, encontram-se na tabela 6.

Tabela 6. Informações referentes à Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo.

Classificação	Quantidade
Nº de Habitantes do Município	60.000
Nº de Bairros	93
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	9
Quantidade de material proveniente da coleta seletiva (toneladas/mês)	22

6.2. Coleta e classificação do RRSU

A quantidade de amostra de RRSU coletada na Usina de reciclagem e compostagem de lixo para o experimento foi de 90kg. Após análise, verificou-se que a amostra apresentava aproximadamente 28,25 de umidade e que sua composição era composta de diversos materiais em diferentes proporções, conforme apresentado na tabela 7.

Tabela 7. Composição da amostra de 90 kg de RRSU.

Material	Exemplos encontrados	Peso (kg)	% do Total
Derivados de Celulose	Papel officio, papel higiênico, jornais, folders, revistas, etc.	39,192	43,80
Termoplásticos	Copos plásticos, sacolas e saquinhos, embalagens de iogurtes, peças automotivas, embalagens de frios e salgados.	14,763	16,50
*Elastômeros	Pedaços de borrachas, luvas e mangueiras	0,765	0,85
*Termofixos	Peças automotivas	1,335	1,49
*Vidros	Garrafas e vasilhames	1,395	1,56
*Metais	Alumínio e aço inoxidável	1,125	1,26
*Entulhos	Restos de material de construção	1,965	2,20
*Madeira	Tábuas e tacos	2,475	2,77
*Tecidos	Tecidos de algodão e sintéticos	2,040	2,28
*Orgânicos	Restos de vegetais, carnes, grãos	24,94	27,88
Total		90	100

* Materiais que não serão utilizados no processo de briquetagem

Representando 43,80% do total, os derivados de celulose é o material mais abundante na amostra, seguido dos materiais orgânicos com 27,88% 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, provenientes de restos de alimentos, deve-se à certa ineficiência no processo realizado de separação deste 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 (tabela 7) e por terem 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 forma de 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 na amostra de RRSU, como mostra a tabela 8.

Tabela 8. Limitações técnicas para a briquetagem dos materiais presentes na amostra de RRSU.

Material	Limitações Técnicas à Briquetagem dos Materiais
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 9 e o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) foi o mais abundante da amostra, com 15,26% do total de RRSU, 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 9. Composição percentual dos termoplásticos presentes no RRSU

Termoplásticos	*Características e Aplicação	Peso (kg)	% do Total
PEAD (Polietileno de Alta Densidade)	Material leve, inquebrável e rígido . Muito usado em embalagens domiciliares como detergentes, amaciantes, sacos e sacolas de supermercado.	0,219	0,24
PEBD (Polietileno de Baixa Densidade)	Material flexível, leve, transparente e impermeável. Pelas suas qualidades é muito usado em embalagens flexíveis como sacolas e saquinhos para supermercados, leites e iogurtes.	12,690	14,10
PET (Polietileno Tereftalato)	Transparente e inquebrável. É usado principalmente na fabricação de embalagens de bebidas carbonatadas (refrigerantes), óleos vegetais .	0,960	1,07
PS (Poliestireno)	Material impermeável, leve, transparente, rígido e brilhante. Usado em potes para iogurtes, sorvetes, doces, pratos e tampas,.	0,600	0,67
PP (Polipropileno)	Normalmente é encontrado em peças técnicas, caixarias em geral, utilidades domésticas, fios e cabos, potes e embalagens mais resistentes.	0,294	0,33
PVC (Policloreto de Vinila)	Material transparente, leve, resistente a temperatura, inquebrável, utilizado para a produção de tubos de conexão e esgoto	0,0000	0,00
Total		14,763	16,50

*Fonte: www.reciclaveis.com.br

Após verificar a proporção dos componentes do RRSU, a celulose e os termoplásticos foram moídos e misturados, obtendo-se 53,94 kg da mistura, ou seja, 59,94% do total coletado.

6.3. Análises físico-químicas dos briquetes

6.3.1. Teor de cinzas e combustíveis

O teor de combustíveis é um índice importante para a briquetagem, pois indica a porcentagem de materiais com potencial de geração de calor que farão parte dos ensaios. 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 utilizado 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. Os índices para os cálculos de combustíveis e de cinzas estão demonstrados na tabela 10.

Tabela 10. Índices para cálculo do Teor de Combustíveis e Teor de Cinzas dos ensaios.

Amostra (% de RRSU)	*Umidade (%)	*Peso da amostra seca (g)	*Peso da amostra após a queima (g)
5	13,86	4,3084	0,0778
10	14,26	4,1905	0,1332
15	14,09	4,3039	0,1420
20	14,30	4,2919	0,1850
25	11,50	4,4307	0,2744
100	12,11	4,3971	0,7824

*Média da análise de três repetições de cada amostra segundo a porcentagem de RRSU.

O teor de cinzas foi crescente à medida que aumenta o percentual de RRSU adicionado à composição do briquete e conseqüentemente o inverso ocorre em relação

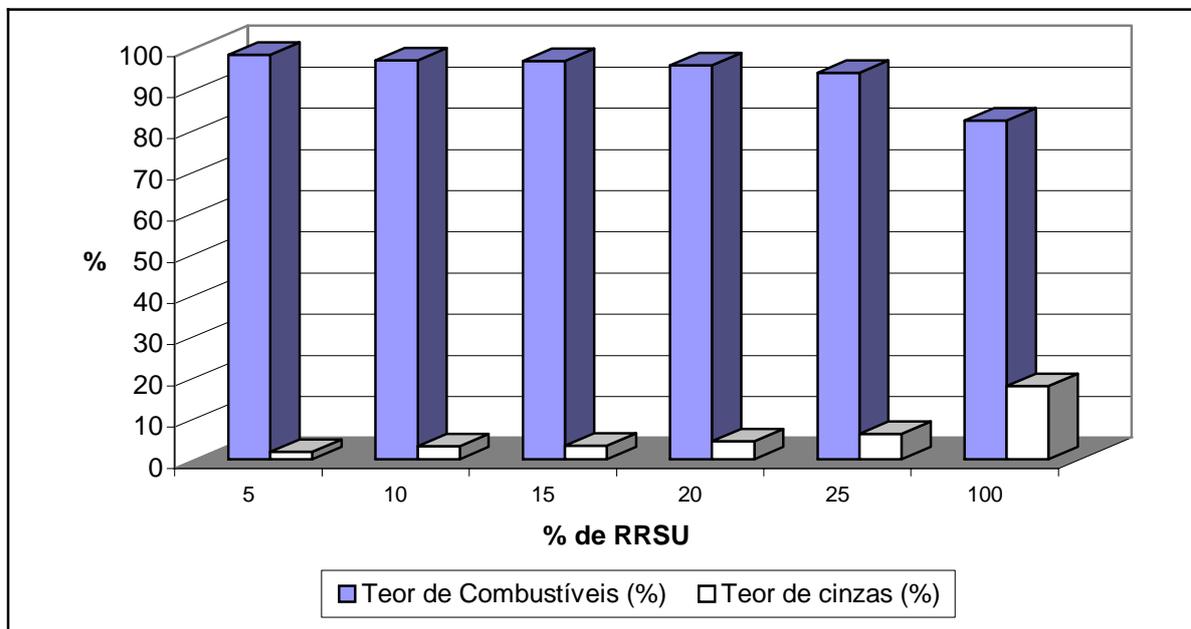
ao teor de combustíveis, que é decrescente. Para os ensaios foram propostas porcentagens de RRSU compreendidas entre 5 e 25%, portanto os teores de combustíveis devem estar numa faixa entre 98,19% e 93,80% conforme a tabela 11.

Tabela 11. Teor de Cinzas e Teor de Combustíveis dos briquetes.

% de Madeira	(% de RRSU)	Massa da amostra seca (g)	Massa de cinzas (g)	Teor de cinzas (%)	Teor de Combustíveis (%)
95	5	4,3084	0,0778	1,8058	98,1942
90	10	4,1905	0,1332	3,1786	96,8214
85	15	4,3039	0,1420	3,2993	96,7007
80	20	4,2919	0,1850	4,3105	95,6895
75	25	4,4307	0,2744	6,1932	93,8068
0	100	4,3971	0,7824	7,7934	92,2066

A razão do aumento do teor de cinzas à medida que aumenta a porcentagem de RRSU, representado na figura 6, deve-se principalmente ao fato de haver grande quantidade de impurezas aderidas, tais como terra e outros materiais inertes na geração de calor.

Figura 6. Comparação dos Teores de Combustíveis e Cinzas dos Ensaio.



O comportamento do teor de cinzas é inversamente proporcional ao encontrado para o teor de combustíveis (figura 6). Nota-se que os briquetes com menores quantidades de cinzas foram os briquetes com 5, 10, 15% de RRSU, tendo valores semelhantes nas quantidades de cinzas.

A partir do briquete com 20% de RRSU que o teor de cinzas aumenta. Sendo assim os briquetes que apresentaram condições favoráveis na análise de (combustibilidade x cinzas) foram os briquetes com 5, 10, 15% de RRSU.

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 ele se destina, seja em caldeiras, fornalhas ou na geração de eletricidade. Para tanto, é necessário atentar à quantidade de RRSU adicionado à sua composição para que esta não venha a comprometer a geração de calor pela queima do briquete devido à diminuição em seu teor de combustíveis.

6.3.2. Poder calorífico superior (PCS)

Na tabela 12 estão os valores do PCS obtido dos briquetes para diferentes proporções de RRSU.

Tabela 12. Poder calorífico superior dos briquetes com diferentes porcentagens de resíduos.

% de RRSU	Massa seca (g)	Ti (°C)	Tf (°C)	PCS (kJ/kg)	PCS médio (kJ/kg)
5%	0,4762	21,70	22,38	18612,21	19717,66
	1,0671	18,48	20,13	20153,81	
	1,0680	18,58	20,25	20380,91	
	0,5026	18,50	19,28	20227,89	
	0,5020	17,67	18,41	19213,49	
10%	0,7527	18,97	20,15	20433,30	20197,39
	1,0374	18,99	20,64	20730,80	
	0,7950	19,21	20,45	20329,79	
	0,8190	18,10	19,41	20848,07	
	0,4474	21,47	22,11	18645,00	
15%	0,9122	20,44	21,90	20861,29	20599,83
	1,0610	20,10	21,77	20515,37	
	0,7276	19,94	21,11	20959,05	
	0,4565	21,20	21,92	20557,49	
	0,4862	20,45	21,20	20105,95	
20%	0,8342	18,14	19,50	21249,42	20623,99
	0,7675	18,65	19,90	21228,05	
	0,9328	18,49	19,96	20540,32	
	0,8258	20,48	21,76	20202,89	
	0,5895	20,89	21,79	19899,27	
25%	0,8033	18,57	19,90	21580,04	21239,13
	0,9210	18,70	20,21	21369,56	
	0,5977	18,89	19,87	21370,82	
	0,8391	23,73	25,03	20193,33	
	0,7334	23,38	24,6	21681,90	

Na tabela 12 o poder calorífico superior médio do briquete com 25% de RRSU é (21239,13 kJ/kg), ultrapassa o poder calorífico superior médio das amostra de madeira (19544,20 kJ/kg). (Tabela 13)

Tabela 13. PCS Médio dos materiais componentes dos briquetes

Material	Massa seca (g)	Ti (°C)	Tf (°C)	PCS (kJ/kg)	PCS médio (kJ/kg)
Madeira	1,0086	18,36	19,87	19513,55	19544,20
	1,0053	18,63	20,03	18151,42	
	0,8870	18,80	20,17	20131,46	
	1,0762	18,85	20,53	20346,73	
	0,9720	19,34	20,8	19577,85	
Termoplástico	0,4046	21,39	22,38	31892,44	34039,68
	0,5022	21,42	22,77	35037,69	
	0,3746	21,38	22,29	31663,00	
	0,5106	21,77	23,1	33950,74	
	0,5029	22,30	23,67	35507,27	
Papéis	0,5829	22,99	23,83	18784,55	19312,76
	0,7937	17,25	18,35	18064,03	
	0,8019	17,79	19,03	20154,86	
	0,5235	18,70	19,49	19669,29	
	0,4849	19,03	19,77	19891,06	

Na tabela 14, observou-se que o poder calorífico superior médio das amostras de termoplásticos apresenta o maior valor chegando a ultrapassar 34000 kJ/kg de energia desprendida.

Tabela 14. PCS médio dos briquetes e dos materiais componentes dos briquetes

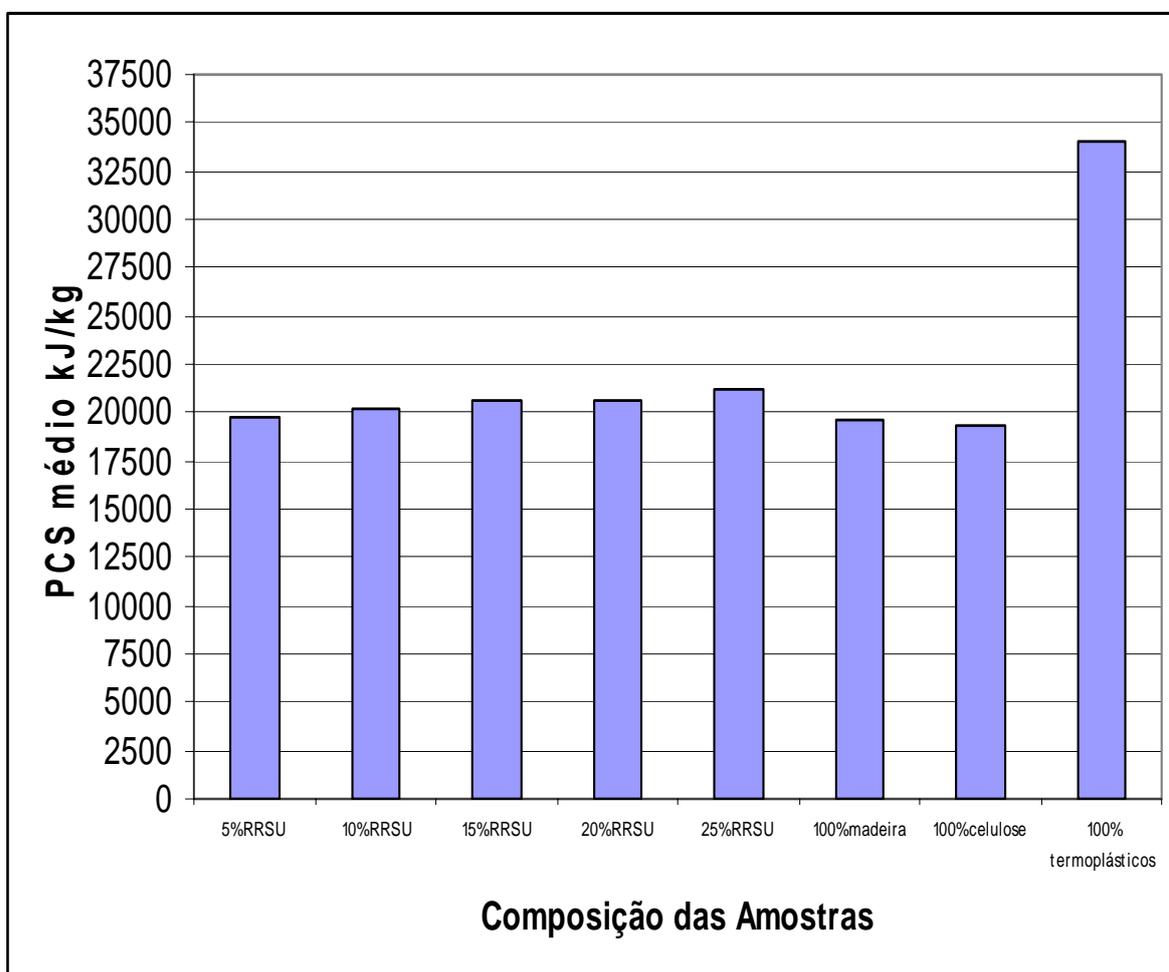
Amostra	PCS Médio (kJ/kg)
5% de RRSU	19717,66 a
10% de RRSU	20197,39 ab
15% de RRSU	20599,83 ab
20% de RRSU	20623,99 ab
25% de RRSU	21239,13 b
100% Madeira	19544,20
100% Papel	19312,76
100% Termoplástico	34039,68

*média seguida de letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey

Pode-se verificar que, dos materiais utilizados na fabricação dos briquetes, os termoplásticos têm um PCS maior quando comparado com os outros materiais apresentados na tabela 14. Isso se deve ao fato de esses plásticos serem hidrocarbonetos (derivados de petróleo), sendo que sua adição no briquete aumenta o PCS em função da proporção em que seja usado. Na (figura 7) está representado o comportamento do PCS médio das amostras.

A amostra do briquete produzido com 25% de RRSU apresentou, maior poder calorífico superior que os briquetes produzidos com as demais porcentagens de RRSU, no entanto pode-se observar que ela difere estatisticamente apenas do briquete produzido com 5% de RRSU conforme tabela 14.

Figura 7. Poder calorífico superior médio das amostras.



Constatou-se que o aumento do PCS médio dos briquetes à medida que aumentou a porcentagem de RRSU dos mesmos decorreu em função do aumento da concentração de polímeros (termoplásticos), visto que o PCS da madeira e do papel são semelhantes, enquanto o PCS médio dos termoplásticos é 74,17% maior que o PCS médio da madeira.

Como os briquetes não serão comercializados com 0% de umidade, o poder calorífico inferior e útil constitui em uma base mais realista para a comparação de combustíveis. Para o cálculo do poder calorífico inferior foi usado o teor percentual de hidrogênio obtido por análise elementar das amostra e para PCU com 12% de umidade como mostra a tabela 15.

Tabela 15. Análise elementar da madeira e do RRSU (C,H,N)

<u>% de Madeira</u>	<u>% de RRSU</u>	<u>% de Carbono</u>		Média
100	0	44,65	46,45	45,55
95	5	48,53	44,21	46,37
90	10	46,09	48,29	47,19
85	15	48,09	48,03	48,01
80	20	49,85	47,83	48,84
75	25	50,21	49,21	49,71
<u>% de Madeira</u>	<u>% de RRSU</u>	<u>% de Hidrogênio</u>		Média
100	0	6,31	6,15	6,23
95	5	6,17	6,98	6,58
90	10	6,32	6,13	6,23
85	15	6,25	6,58	6,42
80	20	6,34	6,06	6,20
75	25	6,22	5,98	6,10
<u>% de Madeira</u>	<u>% de RRSU</u>	<u>% de Nitrogênio</u>		Média
100	0	0,23	0,24	0,24
95	5	0,31	0,23	0,27
90	10	0,25	0,18	0,22
85	15	0,23	0,34	0,29
80	20	0,22	0,28	0,25
75	25	0,40	0,31	0,36

Na tabela 16 são apresentados os valores PCI e PCU dos briquetes.

Tabela 16. PCS, PCI e PCU dos briquetes.

<u>% de Madeira</u>	<u>% de RRSU</u>	<u>PCS (kJ/kg)</u>	<u>% H</u>	<u>PCI (kJ/kg)</u>	<u>PCU(kJ/kg)</u>
100	0	19544,20	6,23	18135,68a	15657,94a
95	5	19717,66	6,58	18230,00ab	15740,96ab
90	10	20197,39	6,23	18788,87ab	16358,35ab
85	15	20599,83	6,42	19148,35ab	16549,10ab
80	20	20623,99	6,20	19222,24ab	16614,13ab
75	25	21239,13	6,10	19860,00b	17175,35b

*média seguida de letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey

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. A seguir são apresentadas as figuras de vista frontal e lateral dos briquetes produzidos:



Figura 8. Vista frontal do briquete com 95% de madeira e 5% RRSU.



Figura 9. Vista lateral do briquete com 95% de madeira e 5% RRSU.



Figura 10. Vista frontal do briquete com 90% de madeira e 10% de RRSU.



Figura 11. Vista lateral do briquete com 90% de madeira e 10% de RRSU



Figura 12. Vista frontal do briquete com 85% de madeira e 15% de RRSU



Figura 13. Vista lateral do briquete com 85% de madeira e 15% de RRSU



Figura 14. Vista frontal do briquete com 80% de madeira e 20% de RRSU.



Figura 15. Vista lateral do briquete com 80% de madeira e 20% de RRSU.



Figura 16. Vista frontal do briquete com 75% de madeira e 25% de RRSU.



Figura 17. Vista lateral do briquete com 75% de madeira e 25% de RRSU.

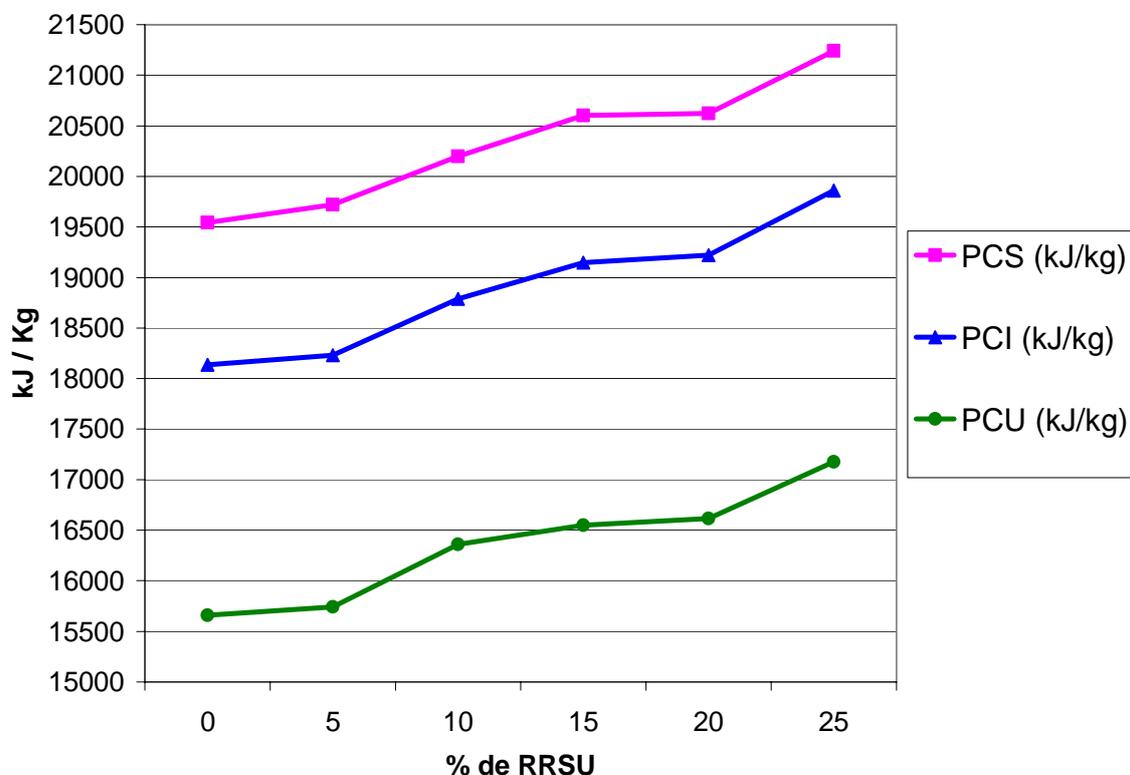


Figura 18. Vista frontal do briquete com 100% de madeira de eucalipto.



Figura 19. Vista lateral do briquete com 100% de madeira de eucalipto.lateral

Figura 20. PCS e PCI e PCU dos briquetes em função da porcentagem de RRSU



Na figura 20 está representado o aumento do PCS e PCI e PCU das misturas estudadas.

6.3.3. Análise de emissões de poluentes dos briquetes.

Para a discussão da análise das substâncias emitidas na pirólise dos briquetes foi utilizada a legenda de identificação das amostras tabela 17.

Tabela 17. Legenda de identificação das amostras.

Amostras	Identificação
Madeira (100%)	M
RRSU (5%)	R5
RRSU (10%)	R10
RRSU (15%)	R15
RRSU (20%)	R20
RRSU (25%)	R25

As amostras formadas com diferentes proporções de RRSU foram degradadas termicamente através do processo de pirólise em atmosfera de nitrogênio.

Os vapores resultantes da pirólise foram analisados por cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massa.

Para a identificação dos compostos detectados em cada uma das amostras utilizou-se a base de dados de espectros de massas NIST98 (129.136 espectros de massas), e o programa AMDIS (Automated Mass Spectral Deconvolution mass & Identification System). A amostra M apresentou um perfil cromatográfico relativamente complexo. A composição dos componentes identificadas na amostra M esta apresentado na tabela 18.

Tabela 18. Compostos identificados na amostra M.

Pico ¹	t_{RET} ²	Composto ³	Qualidade ⁴	% A ⁵
2	3,8	Furano, 2,5-dimetil	90	1,9
3	5,6	Ácido acético, metil ester	88	2,3
5	7,7	Pirazol, 1,4-dimetil	84	17,9
7	13,0	2-furanocarboxaldeido, 5-metil	C	3,1
8	18,0	Mequinol	92	5,1
9	22,0	2metoxi - 4 – metil, furano	95	6,5
10	25,0	Fenol, 4-etil-2-metox	94	1,9
11	26,3	2-metox-4-vinilfenol	95	3,6
12	27,6	Fenol, 2,6-dimetox-fenol	93	9,7
14	30,7	1,2,4-trimetoxbenzeno	84	9,3
15	30,9	Trimetoxbenzeno + fenol, 2-metox- 4-(1-profenil)	B	3,6
16	31,1	2-metoxi-4-propil-fenol	C	1,9
20	34,3	1-(3,4-dimetoxi-fenil)	84	7,6
19	33,2	2-propanona, 1-(4-hirox-3-metoxfenil)	B	1,7
20	34,3	Etanona, 1-(3,4-dimetoxfenil)	84	7,6
21	35,4	Fenol, 2,6-dimetoxi-4-(2propenil)	87	1,8
22	38,3	Fenol, 2,6-dimetoxi-4-(2-propenil)	87	9,7

¹Número do pico pela ordem de eluição da coluna.

² t_{RET} = Tempo de retenção do composto na coluna, minutos.

³Nome do composto identificado.

⁴Índice de qualidade de pesquisa na base de dados que reflete a similaridade do espectro de massas obtido com aquele registrado na biblioteca. Adotam-se sempre índices de qualidade > 80%.

Onde marcado com B a qualidade foi inferior ao valor predefinido e aonde marcado com C, a identificação foi realizada através da comparação dos espectros de massas com tempos de retenção muito próximos de outras amostras.

⁵ %A = Porcentagem de área normalizada. A quantificação exata somente é possível com a construção de curvas de calibrações.

⁶nd = Componente não determinado.

Pode-se observar no cromatograma a componente predominante com tempo de retenção (t_{RET}) de 7,7 minutos atribuído a um composto nitrogenado. Identificou-se também alguns derivados da classe furano, alguns compostos da classe cetona (Picos 19 e 20) e uma ampla distribuição de compostos fenólicos (picos 8,9, 10,11,12,16,21 e 22).

Cabe ressaltar que não foi possível identificar alguns compostos devido a baixa qualidade de pesquisa bibliográfica atribuída pelo software do equipamento, além disso, alguns compostos sofreram co-diluição, isto é, não foram bem separados nas condições cromatográficas de análises.

A amostra R25 apresentou um perfil cromatográfico semelhantes à amostra anterior, como mostrado no cromatograma correspondente com predominância do componente relativo ao pico 20 com t_{RET} de 33,1 minutos.

A tabela 19 mostra os compostos que foram identificados. Nota-se a presença de três derivados de furano (Picos 2, 6 e 11), compostos da classe cetona (Picos 21 e 23) e uma variedade de compostos fenólicos (picos 9, 10, 13, 15, 16, 19 e 25) Observou-se a co-eluição de alguns compostos e também a presença de um pico largo na faixa de tempos de retenção entre 32,0 a 34,0 minutos com espectros de massas de baixa qualidade. Esse sinal na identificação de alguns compostos fenólicos.

Tabela 19. Compostos identificados na amostra R25.

Pico ¹	t _{RET} ²	Composto ³	Qualidade ⁴	% A ⁵
1	3,6	Nd	nd	0,9
2	3,8	2,5-dimetil-furano	94	1,0
3	5,6	Ácido acético, metil ester	85	0,8
4	7,7	Pirazol, 1,4-dimetil	80	8,3
5	7,9	2,4-dimetil-1-hepteno	C	1,0
6	13,0	2-furanocarboxaldeido, 5-metil	C	1,7
7	13,1	Nd	nd	1,1
8	14,6	2,4-imidazolidinadiona, 3-metil	91	1,9
9	18,0	Mequinol	C	2,5
10	22,0	2-metox-4-metil-fenol	C	3,3
11	23,4	2-furanocarboxaldeido, 5-hidroxi-metil	90	4,7
12	24,1	Nd	nd	1,1
13	25,0	Fenol, 4-etil-2-metoxi	C	0,8
14	25,9	Nd	nd	0,9
15	26,3	2-metox-4-vinilfenol	C	2,4
16	27,6	Fenol-2,6-dimetoxi	C	4,4
17	30,7	1,2,4-trimetoxbenzeno	C	4,9
18	30,9	Trimetoxbenzeno+fenol, 2-metox-	B	1,8
19	31,0	Fenol, 2-metox-4-propil	89	1,8
20	33,1	Benzeno, 1,2,3-trimetoxi-5-metil	B	31,8
21	33,2	2-propanona, 1-(4-hidroxi-3-metoxifenil)	B	7,6
23	34,3	Etanona, 1-(3,4-dimetoxifenil)	85	3,9
24	35,7	Nd	nd	0,9
25	38,3	Fenol, 2,6-dimetoxi-4-(2-propenil)	84	5,6
26	39,3	C ₁₁ H ₁₄ O ₄	B	0,9
27	40,0	C ₁₁ H ₁₄ O ₄	B	1,8

A amostra R10 apresentou um perfil cromatográfico semelhante as duas amostras anteriores com predominância do composto relativo ao pico 17 com t_{RET} de 33,0 minutos . A identificação desses compostos é mostrada na tabela 20.

Tabela 20. Compostos identificados na amostra R10.

Pico ¹	t _{RET} ²	Composto ³	Qualidade ⁴	% A ⁵
1	7,7	, 1,4-dimetil-pirazol	82	7,0
2	7,9	2,4-dimetil-1hepteno	C	1,0
3	10,0	Estireno	C	1,4
4	13,0	2-furanocarboxaldeido, 5-metil	C	1,4
5	14,6	2,4- imidazolidinadiona, 3-metil	C	1,0
6	18,0	Mequinol	C	2,5
7	21,9	2-metoxi-4-metil-fenol	C	3,6
8	23,4	2-furanocarboxaldeído, 5-hidroxmetil	C	5,3
9	25,0	4-etil-2-metoxi-fenol	C	1,2
10	26,3	2-metox-4-ninilfenol	C	3,1
11	27,5	2,6-dimetoxi-fenol	C	6,1
12	30,6	1,2,4-trimetoxbenzeno	C	6,9
13	30,8	Trimetoxbenzeno + fenol, 4-(1-propenil)	B	2,3
14	31,0	2-metox-4-propil-fenol	C	1,9
17	33,0	Benzeno, 1,2,3-trimetox-5-metil	B	13,3
18	33,2	2-propanona, 1-(4-hidrox-3-metoxfenil)	B	4,8
20	34,3	Etanona, 1-(3,4-dimetoxfenil)	84	5,7
21	35,3	2,6-dimetox-4-(2-propenil)-fenol	86	1,2
22	36,8	C ₁₁ H ₁₄ O ₃	B	1,7
23	37,1	Benzoaldeído, 4-hidrox-3,5-dimetox	90	1,5
24	38,3	2,6-dimetoxi-4-(2-propenil)-fenol	83	9,8
25	39,0	Etanona, 1-(4-hidrox-3,5-dimetoxfenil)	92	1,1
26	39,3	C ₁₁ H ₁₄ O ₄	B	1,3
27	40,0	C ₁₁ H ₁₄ O ₄	B	3,9

Como pode ser observado, os compostos fenólicos (Picos 6, 7, 9, 10, 14, 21 e 24) são majoritários. Também foi verificado, como na amostra R25 um pico largo com t_{RET} entre 32,0 e 34,0 minutos.

A amostra R15 apresentou um perfil cromatográfico análogo aos das três amostras anteriores. Observa-se que o composto predominante é o correspondente ao pico 22. A identificação de compostos está mostrada na tabela 21.

Tabela 21. Compostos identificados na amostra R15.

Pico ¹	t _{RET} ²	Composto ³	Qualidade ⁴	% A ⁵
1	3,2	Etanona, 1-ciclopropil	87	1,2
2	3,4	n-heptanol	91	1,1
4	3,8	2,5-dimetil-furano	94	1,6
5	7,7	1,4-dimetil-pirazol	C	8,5
6	7,9	2,4-dimetil-1-hepteno	C	1,7
8	10,0	Estireno	C	3,9
9	13,0	2-furanocarboxaldeído, 5-metil	93	1,4
10	18,0	Mequinol	C	2,1
11	22,0	2-metoxi-4-metil-fenol	C	2,5
12	23,4	2-furanocarboxaldeído, 5-hidroxmetil	C	3,5
13	26,3	2-metoxi-4-vinilfenol	C	1,9
14	27,5	2,6dimetoxi-fenol	C	3,3
15	30,6	1,2,4-trimetoxbenzeno	C	3,7
16	30,8	Trimetoxbenzeno + fenol, 2-metox-4-(1-propenil)	B	1,5
17	31,1	2-metox-4-propil-fenol	C	1,5
20	33,0	1,2,3-trimetox-5-metil-benzeno	B	9,2
22	33,2	2-propanona, 1-(4-hidrox-3-metoxfenil)	B	12,57
24	34,3	Etanona, 1-(3,4-dimetoxfenil)	86	3,6
26	38,7	2,6-dimetox-4-(2-propenil)-fenol	82	4,1
27	40,0	C ₁₁ H ₁₄ O ₄	B	1,2

Foram identificados alguns compostos da classe cetona (Picos 1, 22 e 24), derivados da classe furano (Picos 4, 9 e 12), derivados do benzeno substituídos (Picos 8, 15 e 20) e predominância de compostos fenólicos (Picos 10, 11, 13, 14, 17 e 26). Nesta amostra observou-se uma maior interferência do pico largo entre 32,0 e 34,0 minutos.

A amostra R20 apresentou um cromatograma relativamente complexo com um perfil muito semelhante as das quatro amostras anteriores, com predominância do composto atribuído ao pico 6. Os compostos identificados estão indicados na tabela 22.

Tabela 22. Compostos identificados na amostra R20.

Pico ¹	t _{RET} ²	Composto ³	Qualidade ⁴	% A ⁵
1	3,5	n-heptanol	91	1,4
3	3,8	2,5-dimetil-furano	94	1,9
4	5,4	Tolueno	93	1,8
6	7,7	1,4-dimetil-pirazol	C	11,3
7	7,9	2,4-dimetil-1-hepteno	C	2,5
8	8,7	Etilbenzeno	94	2,6
10	10,0	Estireno	C	9,1
11	13,0	2-furanocarboxaldeído, 5-metil	C	2,5
12	18,0	Mequinol	C	3,4
13	22,0	2-metoxi-4-metil-fenol	C	4,9
14	23,4	2- furanocarboxaldeído, 5-hidroxi-metil	C	4,2
15	25,0	4-etil-2-metoxi-fenol	C	1,4
16	26,3	2-metox-4-vinilfenol	C	3,0
17	27,6	2,6-dimetoxi-fenol	C	5,4
18	30,6	1,2,4-trimetoxbenzeno	C	6,2
19	30,9	Trimetoxbenzeno+fenol, 2-metox- 4-(1-propenil)	B	2,3
20	31,1	2-metoxi-4-propil-fenol	C	1,6
22	33,1	1,2,3-trimetoxi-5-metil-benzeno	B	3,0
23	33,2	2-propanona, 1-4-hidroxi-3-metoxifenil	B	1,8
24	34,3	Etanona, 1-(3,4-dimetoxifenil)	85	4,6
25	38,3	2,6-dimetoxi-4-(2-propenil)-fenol	88	7,1
26	40,0	C ₁₁ H ₁₄ O ₄	B	2,7

Nota-se, mais uma vez a predominância de compostos fenólicos (Picos 12, 13, 15, 16, 17, 20 e 25). Neste caso a presença do pico largo, mencionado anteriormente, é mínima.

A amostra R25 apresentou um perfil cromatográfico semelhante ao apresentado por todas as amostras anteriores . Foi possível a identificação de algumas classes de compostos as quais estão discriminadas na tabela 23, com predominância do composto relativo ao pico 19.

Tabela 23. Compostos identificados na amostra R25.

Pico ¹	t _{RET} ²	Composto ³	Qualidade ⁴	% A ⁵
1	3,2	Etanona, 1-coclopropil	867	1,3
2	3,5	n-heptanol	91	1,7
4	3,8	2,5-dimetil-furano	92	1,8
5	3,9	Nd	nd	0,8
6	5,4	Toluene	93	1,1
7	7,7	1,4-dimetil-pirazol	C	4,3
8	7,9	2,4-dimetil-1-hepteno	87	3,0
9	8,8	Etilbenzeno	C	1,3
10	10,0	Estireno	C	7,0
11	18,0	Mequinol	C	0,8
12	22,0	2-metox-4-metil-fenol	C	1,3
13	23,4	2-furanocarboxaldeído, 5-hidroxi-metil	C	1,0
14	26,3	2-metox-4-vinilfenol	C	0,8
15	27,5	2,6-dimetoxi-fenol	C	1,9
16	30,6	1,2,4-trimetosbenzeno	C	2,4
17	31,1	2-metox-4-propil-fenol	C	0,7
20	33,0	1,2,3-trimetoxi-5-metil-fenol	B	6,9
21	33,2	2-propanona, 1-(4-hidrox-3-metoxifenil)	B	4,2
22	33,7	Nd	B	1,4
23	34,3	Etanona, 1-(3,4-dimetoxifenil)	86	2,2
25	38,3	2,6-dimetox-4-(2-propenil)-fenol	81	4,0
26	40,0	C ₁₁ H ₁₄ O ₄	B	1,9

Identificaram-se vários compostos fenólicos, predominantes nesta matriz (Picos 11, 12, 14, 15 e 17), alguns compostos da classe cetona (Picos 1, 21 e 23), compostos da classe furano (Picos 4, 13) e derivados do benzeno (Picos 6, 9, 10, 16 e 20).

6.3.4. Amostra de madeira (M)

Os compostos identificados nesta amostra (compostos fenólicos, ácidos carboxílicos, etc) compõem fumaça emitida durante o processo de pirólise a 550°C . Se for jogado ao meio ambiente como acontece nos processos de fabricação de carvão tradicionais, além de poluir, podem causar doenças e até a morte a pessoas que respirem essa fumaça. Porém, se esses compostos são recuperados na sua forma líquida, chamada na literatura de alcatrão ou bio-óleo, podem ser usados como combustível ou insumo químico, como por exemplo: ácido pirolenhoso.

Entre as aplicações energéticas tem-se:

Queima direta em fornalhas para aplicação térmica em caldeiras ou geração de vapor.

Uso como aditivo para emulsões de petróleo pesado.

Precursor para biodiesel. Como fonte renovável de ácidos graxos o bio-óleo reage com etanol em meio básico produzindo biodiesel por esterificação de ácidos graxos (não é transesterificação por que apenas uma carboxila reage e não três como nos triglicerídeos).

As aplicações não-energéticas destacam-se:

Substituto parcial de fenol petroquímico em formulações de resinas fenólicas;

Aditivo alimentar na defumação;

Aditivo para produção de cimento;

Fertilizante de liberação lenta pode ser obtido pela reação do bio-óleo com sais de amônio e fixadores de enxofre proveniente da queima de combustíveis fósseis podem ser produzidos pela reação de bio-óleo com sais de cálcio.

Os produtos da queima dos compostos por pirólise de biomassa sempre serão: CO₂, H₂O e CO.

6.3.5. Amostras R5, R10, R15, R20 e R25

A adição de RRSU nos resíduos de madeira provoca aparição de compostos poluentes na fase gasosa produto da pirólise de plásticos, entre os quais podem-se mencionar os Estireno, compostos de alta massa molecular não identificado, C₁₁H₁₄O₄, etc. Esses elementos experimentaram menor teor na fase gasosa quando a porcentagem de RRSU estava na faixa de 5-10 %. Compostos de alta massa molecular não identificados constituíram entre o 23 e 25 % dos componentes da fase gasosa analisada para a amostra contendo 25% de RRSU.

Durante a caracterização dos vapores produtos da pirólise e combustão de PET, plástico que forma parte das amostras de RRSU coletada neste trabalho, mostra que durante a pirólise do PET a concentração de estireno na fase gasosa foi 4600 mg/g e na combustão de 3900 mg/g; e tiobenzeno de 20 mg/g na pirólise e 10 mg/g na combustão. Pode-se verificar que durante a combustão ou pirólise do PET aparecem compostos poluidores que não são eliminados durante o processo.

Essa situação obriga ao uso de sistemas de lavagem de gases, visando diminuir a emissão desses poluentes ao meio ambiente. Trabalhos de otimização dos parâmetros de operação do reator usado podem ajudar a diminuir o teor de compostos poluentes na fase gasosa. Pesquisas relacionadas com a gasificação de biomassa e matérias de origem fósseis foram publicados por Mastral, (2002).

Uma avaliação global sobre a busca de alternativas menos poluentes para resíduos urbanos e/ou formas de retenção de poluentes devem ser estudada mais profundamente, visando mensurar com maior clareza os problemas técnicos, econômicos e ambientais decorrentes das diferentes tecnologias.

7. CONCLUSÕES

A busca de novas soluções para o aproveitamento dos resíduos urbanos é necessária e deverá ser realizado 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, ácidos carboxílicos, estireno, entre outros.

Essa situação deve ser estudada de forma mais aprofundada, através de estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental de várias alternativas, como as formas de tratamento dos gases ou outras formas menos poluentes de reaproveitamento dos RRSU.

A briquetagem das misturas mostrou-se insatisfatórias para os briquetes com exceção do briquete produzido com 15% de RRSU e 85% de madeira, pois, entre todos os briquetes produzidos este apresentou melhor compactação na máquina briquetadeira, uma quantidade positiva de cinzas quando comparado com outros briquetes e um PCU na ordem de 16550 kJ/kg, porém ajustes nas condições de operação das briquetadeira podem solucionar os problemas relacionados com a baixa resistência dos briquetes com as outras %.

Os resultados deste trabalho mostram um caminho a seguir na procura de soluções técnicas ambientalmente correta para o aproveitamento dos resíduos urbanos e na preservação de meio ambiente.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIOLI, J.L. **Fontes de Energia**. Brasília; Editora Universidade de Brasília, 1994. 138p.

ASSUMPÇÃO, R. M. V., **Gaseificação de Madeira e Carvão Vegetal**. Princípios e Aplicações, In Gaseificação de Madeira e Carvão Vegetal, Fundação Centro Tecnológico de Minas gerais – CETEC, v.1, p. 53, 72, Belo Horizonte, 1981.

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

Balanço Energético Nacional do Ministério de Minas e Energias, 2003

BELLIBONI, C. **Combustão de Gases**, p. 12-14 São Paulo-SP, 1974

BEZZON, G. **Síntese de Novos Combustíveis Sólidos a Partir de Resíduos Agroflorestais e Possíveis Contribuições no Cenário Energético Brasileiro** – Faculdade de Engenharia / UNICAMP, 1994

BRITO, J. O., **Madeira para a Floresta: a Verdadeira Realidade do Uso de Recursos Florestais**. Silvicultura v.11, n.41, p.188-193, 1986.

BRITO, J. O. **Expressão da produção florestal em unidades energéticas.** In CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1, CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7, 1993, Curitiba, Anais...Curitiba, p.280-82, 1993.

BRIDGWATER, A.V. **Fast pyrolysis of biomass: a handbook.** [S.l.]: Aston University, Bio-energy research group, UK, 2001. v.2.

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo.** São Paulo, Humanitas, 197-343p.

CEMPRE, **Compromisso Empresarial para Reciclagem,** 2005

CHAVES H.J. **Introdução à Cromatografia Gás-Líquido de Alta Resolução,** 1996, Dias de Sousa, Ltda.

DOAT, J. **Le Puovoior Clorifique dès Bois Tropicaux.** Ver. Bois Forêts trop., n.172, p. 33-48, 1977.

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

GOMES, P. A., **Teoria da Carbonização da Madeira,** In:Uso da Madeira para fins Energéticos, Publicação Fundação centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, v.1., p. 27-42, Belo horizonte, 1980.

GRASSI, G. PALZ, W. **O Futuro da Biomassa na União Européia.** Álcool & Açúcar, 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.** Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 1998.

HOWARD, J. O. **Wood for Energy in the Pacific Northwest: an overview.** US Forest Service, General Technical Report 50-24, 1979. 59 p.

JARDIM, N. S. WELLS C. **Lixo Municipal - Manual de Gerenciamento Integrado.** IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas; CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem. São Paulo, 1a ed., 1995

JUVILLAR, J. B. **Tecnologia de Transformação de Madeira em Carvão,** In uso da Madeira para Fins Energéticos, publicação fundação centro Tecnológico de minas Gerais – CETEC, v.1, p. 67-82, belo Horizonte, 1980.

KANAYAMA, P. H. **Minimização de Resíduos sólidos urbanos e Conservação de Energia** - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, 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, 2003. V. 1, p.52-56.

LEPAGE, E. S. **Manual de Preservação de Madeiras.** IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), 1986.

MASTRAL, F. J., ESPERANZA, E., GARCÍA, P., JUSTE, M. **Pyrolysis of high-density polyethylene in a fluidised bed reactor. Influence of the temperature and residence time .** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2002

MARTINS, H., Madeira como fonte de energia, In: Uso da Madeira para fins energéticos, **Publicação Fundação Centro Tecnológico de minas Gerais.** CETEC. v.1,p. 9-26, Belo Horizonte,1990

MELLANBY, K. **Biologia da Poluição**. São Paulo-SP, EPU: Editora da Universidade de São Paulo, 1982

MELO, V. P. **Produção de briquetes de carvão vegetal com alcatrão de madeira**. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 2000

MINISTÉRIO DA INFRA ESTRUTURA, Balanço Energético Nacional, Brasília, 1992.

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

PAGLIUSO, J. D. **Combustíveis e Combustão**, Apostila EESC/USP, São Carlos, 1984

PEREIRA, V. B. **Alternativas para a Co-Geração de Energia de Uma Indústria de Chapas de Fibra de Madeira**, Botucatu-SP, 2001

PINHEIRO, A. C. F. B.; MONTEIRO, A. L. F.B. P. A. **Ciências do Ambiente Ecologia: Poluição e Impacto Ambiental**, 1992. v. 2, 257p.

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

QUIRINO, W. F. **Características e Índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Piracicaba: ESALQ, 1991, 64p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal).

RAVAGLIA, E., **Projeto de uma Caldeira**, Departamento de Publicações do Centro Acadêmico da Escola de Engenharia Mauá. 1967

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

SARTORI, M. M. **Otimização da Produção de Energia e Biomassa do Resíduo de Colheita em Variedades de Cana de Açúcar**, Instituto Agrônomo de Botucatu 2001.

SECRETARIA DO ESTADO DO MEIO AMBIENTE. CETESB. **A Cidade e o lixo**. São Paulo: SMA:CETESB; 1998.

SOARES, R.V. **Queimas Controladas: Prós e Contras**. *Anais/IPEF*: 6-10, abril, 1995.

HEATCHCOCK, C.H. **Introduction to Organic Chemistry**, de Pub. Co. Inc, (1986), p 36.

TILLMAN, D. A., **Wood as an Energy Resource**, Academic Press, p. 97-107
Ed. AP 1978.

TILLMAN, D. A., ROSSI, A., VICK, K. M., **Incineration of Municipal and Hazardous Solid Wastes** - New York - Academic Press, 1989.

VALE, A. T., BRASIL, M. A. M., CARVALHO, C. M., VEIGA, R. A. **Produção De Energia Do Fuste De Eucalyptus Grandis Hill Ex-Maiden E Acacia Mangium Willd Em Diferentes Níveis De Adubação**, v.6, n.1, p.83-88, 2000.

YOSHIOKA, T., GRAUSE, G., EGER, C., KAMINSKY, W., OKUWAKI, A., **Pyrolysis of poly(ethylene terephthalate) in a fluidised bed plant**. *Polymer Degradation and Stability*, 2004

Word Wide Web

RECICLÁVEIS. Classificação dos termoplásticos e termofixos. São Paulo, disponível em: www.reciclaveis.com.br. Acesso em 20 de agosto de 2005.

IBAMA. Instituto brasileiro do meio ambiente e dos recursos naturais renováveis. São Paulo, disponível em: www.ibama.gov.br. Acesso em 16 de setembro de 2005.

CEMPRE. Compromisso empresarial para reciclagem. São Paulo, disponível em: www.cempre.org.br. Acesso em 05 de setembro de 2005

EDUCAR . Programa educar, USP São Carlos. SP, disponível em: <http://educar.sc.usp.br>
Acesso em 10 de março de 2005.

www.novell.demec.ufmg.br Acesso em 16 de janeiro de 2005

GUIA DE PRÁTICA DE ANÁLISE IMEDIATA DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. SP, disponível em: www.ibge.gov.br.
Acesso em 18 de dezembro de 2004

GPCA. Gil Portugal Consultores Ambientais Associados Ltda. Portugal, disponível em:
www.gpca.com.br . Acesso em 04 de abril de 2005

MCT. Ministério da Ciência e Tecnologia. SP, disponível em: www.mct.gov.br MCT. Acesso
em 04 de abril de 2005.

SEBRAE. Serviço de Apoio às Pequenas Empresas de São Paulo. SP. Acesso em 20 de abril
de 2005, www.sebraesp.com.br .