

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA

SIMONE GOMES

POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES DO
MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA, PR, BRASIL

PONTA GROSSA

2014

SIMONE GOMES

**POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES DO
MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA, PR, BRASIL**

Dissertação apresentada para a obtenção do
título de mestre em Bioenergia na
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Área de concentração: Biocombustíveis.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Weirich
Neto

PONTA GROSSA

2014

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

G633 Gomes, Simone
 Potencial energético dos resíduos
 sólidos domiciliares do Município De Ponta
 Grossa, PR, Brasil/ Simone Gomes. Ponta
 Grossa, 2014.
 89f.

 Dissertação (Mestrado em Bioenergia -
 Área de Concentração: Biocombustíveis),
 Universidade Estadual de Ponta Grossa.
 Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique
 Weirich Neto.

 1.Poder calorífico. 2.Incineração.
 3.Recuperação energética. I.Weirich Neto,
 Pedro Henrique. II. Universidade Estadual
 de Ponta Grossa. Mestrado em Bioenergia.
 III. T.

CDD: 628.445.7

TERMO DE APROVAÇÃO

SIMONE GOMES

POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES DO MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA, PR, BRASIL

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em Bioenergia na
Universidade Estadual de Ponta Grossa, área de concentração: Biocombustíveis.

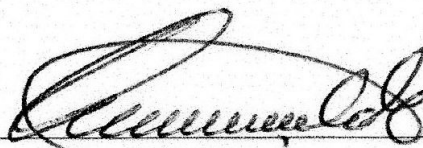
Ponta Grossa, 25 de fevereiro de 2014



Prof. Dr. Pedro Henrique Weirich Neto – Orientador

Doutor em Engenharia Agrícola

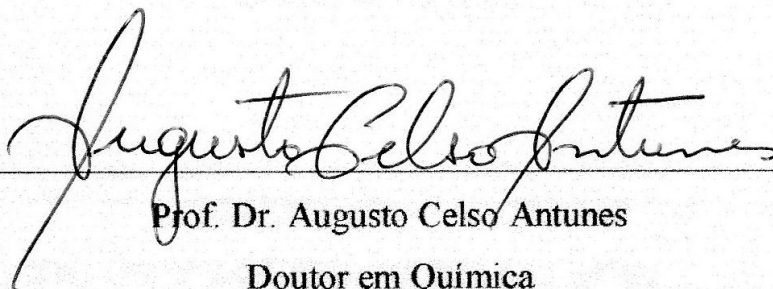
Universidade Estadual de Ponta Grossa



Prof. Dr. Valdir Schalch

Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento

Universidade de São Paulo



Prof. Dr. Augusto Celso Antunes

Doutor em Química

Universidade Estadual de Ponta Grossa

Dedico à minha família e namorado, pelo incentivo, ajuda e paciência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela sua presença constante em minha vida, pela oportunidade de estudar e pelo dom de aprender.

Aos meus queridos pais Geronimo e Clélia, meus irmãos Rosane e Odimar, meu namorado André, por todo amor, carinho e gratidão, por esforços sem medida para me ajudar a alcançar meus objetivos e pelo estímulo para buscar sempre mais e acreditar.

Ao meu orientador professor Pedro pela orientação, ajuda e confiança.

À professora Sandra por todo apoio e disponibilidade em todos os momentos.

Ao professor Dimas e toda sua equipe pela ajuda durante as análises.

À minha prima Silvana, pelo incentivo e ajuda.

A todos do Laboratório de Mecanização Agrícola (Lama) pela ajuda, esclarecimentos e sugestões. Em especial ao Professor Carlos Hugo pelas contribuições, a Raquel e a Eliane pela ajuda na parte prática e a Nátali pelas dicas e pelos momentos de descontração.

À Ponta Grossa Ambiental (PGA) pela autorização para a realização do estudo.

Ao Marcius Borsato, diretor da PGA, por toda colaboração e informações.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

“Tudo é considerado impossível, até acontecer.”

Nelson Mandela

GOMES, Simone. *Potencial energético dos resíduos sólidos domiciliares do município de Ponta Grossa, PR, Brasil*. 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia), Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2014.

RESUMO

Um grande desafio, presente na maior parte dos municípios brasileiros, é a gestão sustentável dos resíduos sólidos domiciliares (RSD). A disposição final destes resíduos da forma como se apresentam, ou seja, sem passar por nenhuma forma de tratamento, traz inúmeros problemas, não só ambientais, mas também sociais e principalmente econômicos, pois ocorre desperdício de matéria-prima e também da energia contida nestes resíduos. Uma forma de reaproveitamento desta energia e de redução dos impactos ambientais é o tratamento dos resíduos sólidos utilizando a tecnologia de incineração controlada com aproveitamento energético. Neste estudo foi avaliado o potencial energético dos RSD do município de Ponta Grossa/PR a partir da tecnologia de incineração, sendo realizado para isso, duas coletas, a primeira produzindo um resíduo padrão e a segunda realizada no aterro do município. As variáveis dependentes analisadas foram a composição gravimétrica, análise imediata e o poder calorífico. A caracterização gravimétrica dos resíduos da segunda coleta apresentaram valores próximos da média nacional para os resíduos recicláveis (30% e 31,9%, respectivamente), valores abaixo da média nacional para a matéria orgânica e acima para os rejeitos. Na análise imediata, os conteúdos de carbono fixo foram de 0,03 a 0,09 kg kg⁻¹, o de materiais voláteis das amostras da segunda coleta variaram de 0,75 a 0,81 kg kg⁻¹ e o de cinzas de 0,10 a 0,18 kg kg⁻¹. A partir do poder calorífico superior dos resíduos de ambas as coletas, 18.313 kJ kg⁻¹ e 19.807 kJ kg⁻¹, foi estimado a recuperação energética. A energia elétrica proveniente dos RSD, no estado atual, provenientes da primeira coleta abasteceria 51.134 residências do município e da segunda coleta, 55.500 residências. Considerando o cenário ideal, com 100% de reciclagem, a energia recuperada ainda seria significativa (18.199.095 MJ mês⁻¹), permitindo o abastecimento de 30.997 residências, 28% do total de residências do município de Ponta Grossa.

Palavras-chave: Poder calorífico. Incineração. Recuperação energética.

GOMES, Simone. *Energy potential of household solid waste of Ponta Grossa city, PR, Brazil*. 2014. 89 leaves. Dissertation (Master in Bioenergy), State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa - Brazil, 2014.

ABSTRACT

A major challenge, present in most Brazilian cities, it is the sustainable management of municipal solid waste (MSW). The final disposal of this waste, the way they are, i.e., without undergoing any form of treatment, brings a lot of problems, not just environmental but also social and mainly economic, because occurs loss of feedstock and also waste of the energy on this residues. One way to reuse this energy and reducing environmental impacts is the treatment of solid waste using the technology of controlled incineration with energy recovery. In this study was evaluated the energy potential of MSW of the Ponta Grossa/PR city from the incineration technology, being performed for that, two collections, the first producing a pattern residue and the second held at the municipal landfill. The dependent variables analyzed were the gravimetric characterization, proximate analysis and heating value. The gravimetric waste characterization of the second collection showed values close to the national average for recyclable waste (30% and 31.9%, respectively), values below the national average for organic matter and above for the tailings. In the immediate analysis, the content of fixed carbon was 0.03 to 0.09 kg kg⁻¹, the volatile material of the samples of second collection ranged from 0.75 to 0.81 kg kg⁻¹. And from the higher heating value of waste from both collections, 18,313 kJ kg⁻¹ and 19,807 kJ kg⁻¹, was estimated energy recovery. The electrical energy from MSW, in the current state, of the first collection would supply 51,534 homes in the city and the second collection, 55,500 residences. Considering the ideal scenario, with 100% of recycling, the energy recovered would still significant (18,199,095 MJ month⁻¹), allowing the supply of 30,997 homes, 28% of the total households of Ponta Grossa.

Keywords: Heating value. Incineration. Energy recovery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Componentes considerados na composição gravimétrica.....	20
Figura 2	- Rotas energéticas dos resíduos sólidos.....	35
Figura 3	- Mapa do Paraná indicando a localização do município de Ponta Grossa.....	36
Figura 4	- Aterro controlado do Botuquara no município de Ponta Grossa/Paraná (PR 513).....	37
Figura 5	- Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais de Ponta Grossa.....	38
Figura 6	- Coleta, homogeneização e quarteamento dos RSD da coleta 2.....	41
Figura 7	- Metodologia para o processo de quarteamento.....	42
Figura 8	- Componentes encontrados nos RSD da coleta 2 (a: matéria orgânica, b: papel, c: embalagem cartonada, d: plástico, e: metal, f: vidro, g: rejeitos)...	44
Figura 9	- Amostras das coletas 1 e 2 trituradas e pesadas.....	45
Figura 10	- Amostras na mufla após 900 °C.....	46
Figura 11	- Cinzas dos RSD.....	47
Figura 12	- Bomba calorimétrica utilizada (digital IKA WORKS, modelo C 5000).....	48
Figura 13	- Frequência dos materiais encontrados nos RSD provenientes da coleta 1...	50
Figura 14	- Conteúdo médio de água das amostras homogeneizadas das coletas 1 e 2..	54
Figura 15	- Comparação entre as médias de PCS obtidas nas amostras homogeneizadas e no PCS obtido por componente.....	63
Figura 16	- Médias de PCS das amostras RP e C2.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Composição gravimétrica dos resíduos sólidos de alguns países.....	21
Tabela 2	- Poder calorífico de materiais comumente encontrados em RSD.....	33
Tabela 3	- Bairros selecionados para a coleta 1 dos RSD.....	39
Tabela 4	- Identificação dos locais onde foram coletadas as amostras de RSD da coleta 2.....	49
Tabela 5	- Data de coleta, volume, quantidade coletada das amostras das coletas 1 (RP) e 2 e quantidade restante das amostras após o quarteamento.....	50
Tabela 6	- Composição gravimétrica dos RSD provenientes da Coleta 2.....	52
Tabela 7	- Conteúdo médio de água dos componentes encontrados nas amostras de RSD das coletas 1 e 2.....	55
Tabela 8	- Valores médios da análise imediata das amostras homogeneizadas das coletas 1 e 2.....	56
Tabela 9	- Conteúdo médio de materiais voláteis de cada componente das amostras de RSD das coletas 1 e 2.....	57
Tabela 10	- Conteúdo médio de cinzas de cada componente das amostras de RSD das coletas 1 e 2.....	58
Tabela 11	- PCS, PCS médio, desvio padrão e coeficiente de variação das amostras homogeneizadas das coletas 1 e 2.....	59
Tabela 12	- Cálculo do PCS médio por componente da amostra RP considerando a composição obtida pela PGA (2011).....	60
Tabela 13	- Cálculo do PCS médio por componente da amostra 01 considerando a composição gravimétrica desta amostra.....	61
Tabela 14	- Cálculo do PCS médio por componente da amostra 02 considerando a composição gravimétrica desta amostra.....	61
Tabela 15	- Cálculo do PCS médio por componente da amostra 03 considerando a composição gravimétrica desta amostra.....	62
Tabela 16	- Cálculo do PCS médio por componente da amostra 04 considerando a composição gravimétrica desta amostra.....	62
Tabela 17	- Comparação do PCS encontrado para os componentes matéria orgânica, papel e plástico com bibliografia correlata.....	63
Tabela 18	- Estimativas de recuperação de energia térmica e elétrica a partir dos	

	RSD de Ponta Grossa.....	65
Tabela 19	- Simulação da energia elétrica recuperada a partir dos RSD de Ponta Grossa e número de residências que poderiam ser atendidas.....	65
Tabela 20	- Estimativas de recuperação de energia térmica e elétrica com a implantação de níveis de reciclagem dos RSD de Ponta Grossa e número de residências que poderiam ser atendidas.....	67

LISTA DE SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
BEM	Biomassa-Energia-Materiais
BOPP	Polipropileno Biorientado
C2	Coleta 2
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
COPEL	Companhia Paranaense de Energia Elétrica
CRES	Coordenadoria de Resíduos Sólidos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
GDL	Gás do Lixo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NRE	Núcleo Regional de Educação
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Politereftalato de Etileno
PGA	Ponta Grossa Ambiental
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLASTIVIDA	Instituto Sócio-Ambiental dos Plásticos
PNRS	Política Nacional de Resíduos sólidos
PP	Polipropileno
OS	Poliestireno
RP	Resíduo Padrão
RSD	Resíduos Sólidos Domiciliares

RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SMCT	Secretaria Municipal de Cultura e Turismo
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
U. S. EPA	United State Environmental Protection Agency

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	LIXO E RESÍDUOS SÓLIDOS.....	18
3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	18
3.3	CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	19
3.4	O PROBLEMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	22
3.5	POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	24
3.6	FORMAS DE TRATAMENTO E DE DISPOSIÇÃO FINAL DOS RSU.....	25
3.6.1	Coleta seletiva e reciclagem.....	25
3.6.2	Compostagem.....	26
3.6.3	Vazadouro a céu aberto (lixões).....	27
3.6.4	Aterro controlado.....	28
3.6.5	Aterro sanitário.....	28
3.7	TECNOLOGIA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS – INCINERAÇÃO.....	29
3.7.1	Processo de Incineração.....	31
3.8	RECUPERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	33
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	36
4.1	MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA.....	36
4.2	RESÍDUOS SÓLIDOS DE PONTA GROSSA.....	37
4.3	AMOSTRAGENS.....	38
4.3.1	Primeira amostragem (Coleta 1) dos RSD de Ponta Grossa.....	38
4.3.2	Segunda amostragem (Coleta 2) dos RSD de Ponta Grossa.....	40
4.4	ANÁLISES.....	43
4.4.1	Caracterização gravimétrica.....	43
4.4.2	Preparo das amostras.....	44
4.4.3	Determinação do conteúdo de água.....	45
4.4.4	Análise imediata.....	46

4.4.5	Poder calorífico superior (PCS).....	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
5.1	IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	49
5.2	RESÍDUO PADRÃO (RP) (COLETA 1).....	50
5.3	CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA (COLETA 2).....	51
5.4	CONTEÚDO DE ÁGUA.....	53
5.5	ANÁLISE IMEDIATA.....	56
5.6	PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS).....	59
5.7	ESTIMATIVAS DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA.....	64
6	CONCLUSÕES.....	69
7	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
	APÊNDICE A – Resumo de métodos e resultados encontrados para as diferentes variáveis.....	82

1 INTRODUÇÃO

As fontes de energia podem ser classificadas em renováveis e não-renováveis, o que depende da escala temporal e da sua utilização. As renováveis, no sentido clássico, são aquelas que podem ser repostas pela natureza, apresentando constante disponibilidade, além de menores impactos ambientais se comparado as não-renováveis. Nesse contexto, os resíduos sólidos urbanos (RSU), que são transformações dos recursos naturais (solo, água, minerais, entre outros), também podem ser considerados fonte de energia renovável, pois são produzidos constantemente e em elevadas quantidades, ficando também disponíveis por longo tempo na natureza.

O Brasil registrou um aumento de 1,8% na geração de RSU do ano de 2010 para 2011 (ABRELPE, 2011). O crescimento populacional aliado a industrialização contribuíram para este aumento, uma vez que a geração dos resíduos é proporcional ao crescimento populacional e ao econômico, sendo agravado pelo consumo e desperdício exagerados.

Em geral, os resíduos sólidos domiciliares (RSD), que compõe os RSU, apresentam hoje, no Brasil, como disposição final os aterros sanitários, os aterros controlados, ou ainda os lixões, dependendo de aspectos econômicos que, muitas vezes, infelizmente acabam se sobrepondo aos ambientais, pois são necessários altos investimentos para a construção de novos aterros sanitários e também para o monitoramento dos que foram encerrados (RIBEIRO, 2010), uma vez que continuam produzindo gases e líquidos poluentes.

Outro ponto relevante é a falta de áreas para disposição final dos resíduos (SATO, 2009), tanto pela rejeição por parte da população, pois ninguém quer residir próximo a um aterro e também devido aos riscos, mesmo em aterros já encerrados (CORREA et al., 2011), quanto pelo esgotamento de algumas áreas devido ao volume ocupado pelos RSD dispostos. Mesmo com o aumento das taxas de reciclagem e compostagem, a quantidade encaminhada para os aterros ainda é elevada, cerca de 90% em massa (MMA, 2011), o que contribui para que os RSD se tornem um dos grandes problemas atuais.

Assim, além da elevada geração de RSD, percebe-se também o seu baixo reaproveitamento, uma vez que há grande quantidade de material reciclável e de matéria orgânica nos resíduos sólidos no Brasil, desperdiçando dessa forma, matéria-prima e energia. Muitas soluções científicas e tecnológicas estão disponíveis, algumas as peculiaridades regionais tornaram viáveis, outras as necessidades legais e outras ainda não são viáveis. Um exemplo seria a incineração com ou sem aproveitamento energético, utilizada em algumas regiões e países e de possível estudo em outras regiões do mundo.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) permite a utilização destas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental (BRASIL, 2010a).

Muitos países vêm adotando, além da reciclagem, a incineração (SOARES, 2011). A tecnologia de incineração controlada permite o tratamento dos resíduos, reduzindo seu volume, peso (CHENG; HU, 2010; RIBEIRO, 2010), periculosidade (FRANÇA; RUARO, 2009), as emissões de poluentes líquidos e de poluentes gasosos (CHENG; HU, 2010), que podem ser revertidos em créditos de carbono. A incineração pode ser vista também como um processo de reciclagem, pois apresenta a possibilidade de recuperar energia térmica e elétrica a partir dos RSD.

Assim, esta tendência de tratamento traz uma alternativa para a demanda de energia, que é cada vez maior, e principalmente para os RSD, além da combinação de benefícios econômicos e ambientais e a visão destes RSD como recurso e não como rejeito que requer eliminação (DENT; KROL, 1990).

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de recuperação de energia a partir da incineração dos RSD do município de Ponta Grossa, considerando e avaliando também sua principal função, que é a de tratar os resíduos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial energético dos resíduos sólidos domiciliares (RSD) gerados no município de Ponta Grossa – PR, de modo a estimar a geração de energia, térmica e elétrica, a partir do aproveitamento deste resíduo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os RSD através da sua composição gravimétrica;
- Determinar o conteúdo de água presente nos RSD;
- Determinar o conteúdo de carbono fixo, de materiais voláteis e de cinzas (análise imediata) dos RSD;
- Determinar o poder calorífico dos RSD;
- Estimar o potencial de recuperação energética dos RSD utilizando a tecnologia de incineração controlada;
- Estimar o potencial de geração de energia sob condições de percentuais crescentes de reciclagem dos RSD utilizando a tecnologia de incineração controlada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 LIXO E RESÍDUOS SÓLIDOS

A população está habituada a associar a palavra lixo à sujeira e restos, entretanto, lixo é uma palavra derivada do latim *lix*, que significa cinza e é tecnicamente conhecido como resíduo sólido (TEIXEIRA, 2004).

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004a) os resíduos sólidos se apresentam nos estados sólido, semissólido ou líquido. Os resíduos em estado líquido também são classificados como resíduos sólidos, quando algumas particularidades impedem seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Para Monteiro e Zveibil (2001), lixo e resíduo sólido apresentam o mesmo significado: materiais descartados por serem considerados inúteis por quem o gera. Já para Oliveira (2006), lixo é algo sem valor, que não presta mais. No entanto, como nem tudo que descartamos é sem valor, o mesmo autor considera que os materiais descartados que ainda possuem algum valor associado são resíduos sólidos.

Até o começo da Revolução Industrial os resíduos eram compostos basicamente de matéria orgânica - restos e sobras de alimentos. A partir desse período, os resíduos passaram a ser todo material descartado e rejeitado pela sociedade (TEIXEIRA, 2004), incluindo, portanto, os materiais inorgânicos, como vidros, metais e outros. Dessa forma, os resíduos sólidos são considerados produtos e consequências normais do desenvolvimento da sociedade humana (AMORIM, 1996).

Entretanto, os resíduos são também considerados um dos principais problemas atuais, por possuírem parte considerável de materiais de difícil degradação – os inorgânicos - e por serem produzidos em quantidades elevadas, comprometendo os locais de disposição, os quais possuem capacidades limitadas, e o ambiente, no que se refere à poluição do solo e da água e às questões estéticas.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Há diversas maneiras de se classificar os resíduos sólidos. As mais comuns estão vinculadas aos riscos potenciais de contaminação, aos seus constituintes e características e também à sua origem e natureza. A NBR 10004 (ABNT, 2004a) classifica os resíduos em:

a) resíduos classe I – Perigosos: constituem os resíduos que apresentam periculosidade ou uma das seguintes características, inflamabilidade, corrosividade,

reatividade, toxicidade, patogenicidade (ABNT, 2004a; BRASIL, 2010a) ou explosividade (BRASIL, 2010a);

b) resíduos classes II – Não perigosos.

- resíduos classe II A – não inertes: constituem os resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I (Perigosos) ou de resíduos classe II B (inertes). Esses resíduos podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT, 2004a).

- resíduos classe II B – inertes: constituem os resíduos que, quando amostrados e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados à concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004a).

Outra possível classificação dos resíduos sólidos é quanto à sua origem, podendo ser domiciliares (originários de atividades domésticas em residências urbanas); de limpeza urbana (originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas); de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços; dos serviços públicos de saneamento básico; industriais; de serviços de saúde; da construção civil; agrossilvopastoris; de serviços de transportes; e de mineração (BRASIL, 2010a). Esta classificação pode variar conforme o autor e o enfoque do estudo.

Dentro deste contexto é importante também a definição de resíduos sólidos urbanos (RSU) que são todos aqueles materiais enviados para os aterros municipais, ou seja, os resíduos domiciliares, os de vias públicas e os comerciais. Estes podem ainda ser agrupados nas seguintes categorias: bens duráveis, bens não-duráveis, recipientes e sobras de embalagens, alimentos e ainda diversos resíduos inorgânicos. Não se incluem aqui os detritos de construção e demolição, os lodos de esgoto, os resíduos de processos industriais (U.S.EPA, 2010) e os de origem hospitalar.

3.3 CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Os resíduos sólidos podem ser analisados de acordo com suas características biológicas, físicas e químicas (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001).

As características biológicas são representadas pela população microbiana e pelos agentes patogênicos presentes nos resíduos (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001) que realizam a sua decomposição, contribuindo no seu tratamento e disposição final.

Dentro das características físicas estão:

- geração per capita: relaciona a quantidade de resíduos gerados diariamente com o número de habitantes de uma região (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001). Este é um valor de difícil determinação, uma vez que, ocorrem inúmeras interferências, como por exemplo, a reutilização, a reciclagem e o descarte em diferentes locais. Sendo comum, portanto, determinar a quantidade de resíduos coletados. Além disso, há também a influência de fatores sazonais que alteram as características dos resíduos – tipo e quantidade (FEAM, 2012).
- massa específica aparente: é a massa do resíduo em função do volume ocupado, sem qualquer compactação (kg m^{-3}) (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001);
- compressividade: indica o grau de compactação ou a redução do volume que uma massa de resíduo pode sofrer quando compactada (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001);
- teor de umidade: representa a quantidade de água presente no resíduo (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001; FEAM, 2012) e pode ser expressa em base seca ($\text{kg água kg material seco}^{-1}$) ou em base úmida ($\text{kg água kg amostra úmida}^{-1}$), sendo a última a mais usada quando se trata de geração de energia (FEAM, 2012) e;
- composição gravimétrica: que demonstra a massa relativa de cada componente com relação à massa total da amostra analisada (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001; FEAM, 2012). A Figura 1 detalha quais podem ser estes componentes.

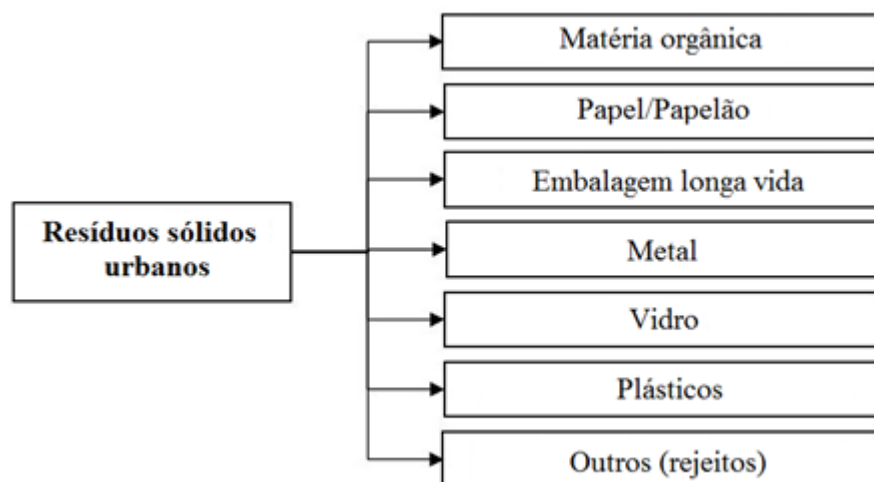


Figura 1 - Componentes considerados na composição gravimétrica
Fonte: adaptado de Matos (2006)

Essa composição dos resíduos sólidos geralmente possui correlação com aspectos sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001; U.S.EPA, 2010; FEAM, 2012). A Tabela 1 apresenta as variações destes constituintes em alguns países, ressaltando que a contribuição da matéria orgânica tende a se reduzir quanto mais desenvolvido e industrializado é o país.

Tabela 1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos de alguns países

COMPOSTO	Brasil	Alemanha	Holanda	EUA
Mat. Orgânica	0,65	0,61	0,50	0,36
Vidro	0,03	0,10	0,14	0,08
Metal	0,04	0,04	0,07	0,09
Plástico	0,03	0,06	0,06	0,06
Papel	0,25	0,19	0,22	0,41

Unidade: kg kg⁻¹

Fonte: adaptado de Monteiro e Zveibil (2001)

E como características químicas dos resíduos, pode-se listar:

- potencial hidrogeniônico (pH): indica o teor de acidez ou alcalinidade dos resíduos (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001);
- composição química: consiste na determinação dos teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo, resíduo mineral total, resíduo mineral solúvel e gorduras (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001), e ainda o conteúdo de materiais voláteis e de carbono fixo que junto com o conteúdo de cinzas, constituem a análise imediata;
- relação carbono/nitrogênio (C:N): indica o grau de decomposição da matéria orgânica do resíduo nos processos de tratamento/disposição final (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001) e;
- poder calorífico: definido como “a quantidade de calor desprendida pela combustão completa de uma unidade de volume ou massa de determinado combustível”, ou seja, demonstra a quantidade de energia que pode ser recuperada em um processo de combustão (BORGES, 2008).

Há dois valores de poder calorífico a serem considerados: o superior e o inferior. O poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de calor liberada com a combustão do

combustível, assumindo que tanto a água contida na amostra quanto a que é gerada permanecem no estado líquido (ABNT, 1984; NÚÑEZ-REGUEIRA; AÑÓN; CASTIÑEIRAS, 1996; BORGES, 2008; POLETTO FILHO, 2008). Já quando a água, produto da combustão, permanece na forma de vapor, o calor liberado é denominado de poder calorífico inferior (PCI) (NÚÑEZ-REGUEIRA; AÑÓN; CASTIÑEIRAS, 1996; MUNIZ, 2004; BORGES, 2008; POLETTO FILHO, 2008). A diferença entre o PCS e o PCI, constitui a entalpia de vaporização da água (BORGES, 2008; POLETTO FILHO, 2008).

A determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos é de extrema importância quando se trata de recuperação de energia. O PCS pode ser determinado experimentalmente, por medições diretas (LIU; PAODE; HOLSEN, 1996; FEAM, 2012), utilizando uma bomba calorimétrica (VLASSOV, 2008; FEAM 2012), ou por modelos empíricos, quando a primeira não é viável (LIU; PAODE; HOLSEN, 1996).

O poder calorífico médio do RSD é aproximadamente de $20.934 \text{ kJ kg}^{-1}$ (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001). Entretanto, os teores de umidade e de cinzas podem interferir nas propriedades da combustão, assim como no valor do poder calorífico (LIANG et al., 2008; FEAM, 2012).

Na China, esse valor é de 5.000 kJ kg^{-1} e mesmo nas suas grandes cidades, o poder calorífico dos resíduos atinge baixos valores entre 6.000 a 7.000 kJ kg^{-1} (NIE, 2008), além de conter alta umidade ($0,50 \text{ kg kg}^{-1}$), o que representa um desafio quando o objetivo é recuperar energia (CHENG et al., 2007). O mesmo acontece em Kharagpur, na Índia, onde o resíduo apresenta poder calorífico médio de $10.008,24 \text{ kJ kg}^{-1}$ e conteúdo de água variando entre $0,32$ a $0,52 \text{ kg kg}^{-1}$ (KUMAR; GOEL, 2009).

3.4 O PROBLEMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

As elevadas quantidades de resíduos sólidos gerados no Brasil são resultantes de desperdícios e excessos, devido à adoção de um desenvolvimento caracterizado por um alto padrão de consumo (ABREU, 2009), não sendo, portanto, compatíveis com as políticas e os investimentos públicos nesse setor. A partir disso, “observa-se que há um longo caminho para se trilhar, onde a capacitação técnica e a conscientização da sociedade são fatores determinantes” (JUCÁ, 2002).

A Associação Brasileira de Engenharia Sanitária –ABES, em 1982, elaborou o primeiro diagnóstico de gestão dos resíduos sólidos no país (BRASIL, 2003). E a partir do final da década de 80, o IBGE começou a realizar a coleta e registro de dados, incluindo o tema dos resíduos sólidos, entre as informações pesquisadas (MARANHÃO, 2008).

A produção de resíduos no Brasil, em 2000, era de aproximadamente 125.281 Mg dia⁻¹ e a maior parte dos municípios, 63,6%, encaminhavam seus resíduos sem qualquer cuidado para locais afastados dos centros urbanos, denominados de lixões (IBGE, 2002). Em 2008, segundo MMA (2011), a quantidade de resíduos produzidos diariamente aumentou para aproximadamente 183.481 Mg, e de acordo com o IBGE (2010b) 50,8% dos municípios brasileiros, ainda empregam os lixões como forma de disposição final dos resíduos sólidos. Dos municípios restantes, 22,5% destinam para aterros controlados e 27,7%, adotam os aterros sanitários. Com relação aos tratamentos dados aos resíduos, no ano de 2008, 64 Mg dia⁻¹ de resíduos foram incinerados, 1.519 Mg dia⁻¹ foram destinados a compostagem e 2.592 Mg dia⁻¹ foram reciclados (MMA, 2011).

De acordo com estes dados, mais de 90%, em massa, dos resíduos são enviados para destinação final - aterros sanitários, aterros controlados e lixões - sendo apenas os 10% restantes encaminhados para tratamento em unidades de compostagem, reciclagem, incineração, entre outros (MMA, 2011), o que caracteriza um desperdício de matéria-prima e energia.

Na China, a produção de resíduos tem crescimento anual de cerca de 9%, com mais de 150 milhões de Mg sendo produzidos a cada ano (CHENG et al., 2007; NIE, 2008), aproximadamente 411 mil Mg dia⁻¹. Até o ano de 2007 a forma de tratamento e disposição mais utilizada também eram os aterros sanitários com 366 instalações, correspondendo a 79,6% entre as formas de tratamento, a incineração com 14,3%, ou seja, 66 instalações (ZHANG; TAN; GERSBERG, 2010), a qual se tornou a segunda forma mais utilizada e que vêm apresentando crescimento constante (CHENG; HU, 2010) e as usinas de compostagem com 3,7% (ZHANG; TAN; GERSBERG, 2010). A produção dos resíduos na China é muito maior se comparado aos valores do Brasil, no entanto, apresenta um melhor aproveitamento dos mesmos, uma vez que, parte já é utilizada como combustível na geração de energia.

Já na Alemanha os valores são bem diferentes e, ao contrário do Brasil e da China, já foi constatado redução na produção de resíduos. Em 2001, eram gerados 52,1 milhões Mg e no ano de 2010 a geração reduziu para 47,7 milhões de Mg. A Alemanha foi um dos primeiros países europeus a introduzir políticas, como a coleta de embalagens, resíduos orgânicos e de papel separadamente, a fim de limitar a disposição de resíduos em aterros sanitários. Devido a essas ações ocorreu aumento de aproximadamente 30% no índice de reciclagem, passando de 48% em 2001, para 62% em 2010, adiantando assim, seu objetivo que era de 50% para 2020. Com esse alto índice de reciclagem, no ano de 2010, e com o

aumento da incineração para 37%, a disposição dos resíduos em aterros aproximou-se de 0% (FISCHER, 2013).

Dessa forma, percebe-se que a coleta, o tratamento e o destino final dos resíduos sólidos ainda são problemas no Brasil. Sendo preocupação constante a disposição dos resíduos em aterros não controlados, devido à poluição das águas subterrâneas e também por outros problemas de contaminação (POLETO; SILVA, 2007), os quais têm profunda repercussão na saúde pública (AMORIM, 1996). Além disso, essa questão do saneamento básico, onde estão inseridos os resíduos sólidos (BRASIL, 2007; SATO 2009), necessita de altos investimentos, uma vez que enfrenta problemas para a construção de novos aterros sanitários e também com a falta de áreas para disposição final dos resíduos (SATO, 2009).

3.5 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), criada pela Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010a) e regulamentada pelo Decreto nº 7.404 de 2010 (BRASIL, 2010b), estabelece o adequado gerenciamento dos resíduos sólidos a fim de reduzir o impacto ambiental e social causados pelos mesmos. Para alcançar tal objetivo, mantém o foco na redução da geração de resíduos, incentiva a reutilização, a reciclagem e o tratamento dos resíduos, estabelecendo somente como última opção, a disposição final adequada (BRASIL, 2010).

A lei que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, assim como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010). Apesar de ter tramitado por cerca de vinte anos e de conter detalhes que desagradaram alguns setores, a PNRS pode ser considerada uma lei moderna, que conta com instrumentos inovadores, como a responsabilidade compartilhada e a inclusão social dos catadores (ETHOS, 2012).

A PNRS traz a diferença entre resíduos e rejeitos, sendo resíduos os materiais que devem ser reaproveitados e reciclados e os rejeitos como sendo os únicos a ser enviados para a disposição final (ETHOS, 2012) e ainda incorpora conceitos modernos de gestão de resíduos sólidos, que permite a utilização de tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental, além de prever a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental (BRASIL, 2010).

3.6 FORMAS DE TRATAMENTO E DE DISPOSIÇÃO FINAL DOS RSU

3.6.1 Coleta seletiva e reciclagem

A coleta seletiva é a coleta de materiais recicláveis separados previamente do restante dos resíduos na própria fonte geradora (AMORIM, 1996; IBGE, 2010b). São considerados resíduos sólidos recicláveis: papéis, vidros, plásticos e metais.

A coleta destes resíduos pode ser realizada de duas maneiras: a primeira consiste no sistema porta a porta com a utilização de pequenos veículos de tração humana ou animal ou ainda veículos automotores convencionais; a segunda é feita através de pontos de entrega voluntária, em que os geradores acumulam os resíduos - misturados ou em recipientes separados - facilitando seu posterior recolhimento (AMORIM, 1996; ZANTA; FERREIRA, 2003; IBGE, 2010b).

De acordo com Amorim (1996), a coleta seletiva é a mais indicada em termos de aproveitamento dos resíduos, pois a separação é melhor e estes geralmente apresentam-se mais limpos. No entanto, para que aconteça e seja viável é necessário verificar a existência de mercados para absorção destes materiais (TEIXEIRA, 2004; POLETO; SILVA, 2007), o que depende do tipo e de sua qualidade (POLETO; SILVA, 2007), assim como, da participação da população, pois é ela quem deve proporcionar a segregação dos materiais recicláveis.

Além da segregação dos resíduos pela população, é necessário outro processo de seleção, o qual é realizado nas unidades de triagem e cujo objetivo é a separação criteriosa. Outra premissa é quantitativa, pois deve haver volume suficiente para viabilizar comercialização. Neste aspecto de separação nas unidades de triagem, a mão de obra passa a ser um importante componente no custo deste processo. Nas indústrias de reciclagem é efetuada a reintrodução destes materiais em outros processos produtivos (AMORIM, 1996; MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001), visando o seu aproveitamento.

A reciclagem é uma forma de tratamento que desperta maior interesse, devido principalmente as questões ambientais (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001). E traz como benefícios a economia de energia nos processos produtivos, o aumento da vida útil dos aterros sanitários, a criação de emprego e renda e o desenvolvimento da consciência ambiental e dos princípios de cidadania por parte da população (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001; SIMONETTO; BORENSTEIN, 2007).

No entanto as implantações desses programas também trazem grandes desafios, como por exemplo, a busca por um modelo que permita a sua viabilidade econômica, pois na maioria das vezes, os que já estão implantados são subsidiados pelo poder público

(MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001). Outro desafio é o sucesso do programa, o qual depende de toda a população, uma vez que é ela quem irá proporcionar a segregação dos materiais, sendo necessário um amplo trabalho de educação ambiental.

A partir da reciclagem, procura-se reduzir e reutilizar o máximo possível, diminuindo a pressão sobre os aterros sanitários ou outros tipos de disposição final. A partir disso, difundiu-se a ideia-chave dos três Rs: reduzir, reutilizar e reciclar (FRANÇA; RUARO, 2009), sendo acrescentado ainda o quarto R, que se refere à recuperação energética. Os quatro Rs estão definidos abaixo:

- Reduzir – significa diminuir a quantidade de resíduo produzido, buscando utilizar embalagens recicláveis ou retornáveis (TCHOBANOGLIOUS; KREITH; WILLIAMS, 2002);
- Reutilizar – envolve a reaplicação do resíduo de maneira que mantém a sua forma original (U.S.EPA, 2010), ou seja, é o uso direto dos resíduos como produtos, sendo necessário, em alguns casos, passarem por procedimentos de limpeza, como lavagem e/ou esterilização (ZANTA; FERREIRA, 2003) e;
- Reciclar – consiste em transformar os resíduos a fim de inseri-los novamente como matéria-prima na cadeia produtiva (OLIVEIRA; ROSA, 2003; ZANTA; FERREIRA, 2003; SIMONETTO; BORENSTEIN, 2007), a fim de gerar um novo produto (MARANHO, 2008), ou seja, é a transformação de um resíduo em um recurso (U.S.EPA, 2010).
- Recuperação energética (BRASIL, 2010a) – trata-se da utilização dos resíduos para recuperar energia, ou seja, o aproveitamento do seu potencial energético.

3.6.2 Compostagem

A compostagem é um processo natural, aeróbio ou anaeróbio, de decomposição biológica da matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, por meio da ação de micro-organismos em condições controladas (MONTEIRO; ZVEIBEL, 2001; BRASIL, 2010a). Quando a compostagem ocorre sem a presença de oxigênio - anaerobicamente - a decomposição é realizada em temperaturas baixas, com exalação de fortes odores e leva um maior tempo até que ocorra a estabilização da matéria orgânica. Já no processo aeróbio – com a presença de oxigênio – a temperatura pode alcançar até 70°C, os odores não são agressivos e a estabilização é mais rápida, sendo este último, o processo mais adequado ao tratamento dos resíduos orgânicos (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001).

Nesse processo ainda, o aeróbio, a matéria orgânica estabilizada é um produto final rico em húmus e nutrientes minerais, o qual pode ser utilizado como condicionador de solos, com elevado potencial fertilizante (MONTEIRO; ZVEIBIL, 2001; KUMAR; GOEL, 2009), prevenindo o solo contra erosões, aumentando sua umidade, controlando o pH (MARANHO, 2008). Além disso, com sua implantação, é possível ainda reduzir os custos da coleta, do transporte e da eliminação, já que a maior parte dos resíduos produzidos é de origem orgânica (KUMAR; GOEL, 2009). O tratamento dos RSD através de usinas de compostagem é viável quando se trata apenas da massa de matéria orgânica presente nos resíduos no Brasil.

3.6.3 Vazadouro a céu aberto (lixões)

Dos processos tradicionais de limpeza urbana das cidades, cerca de 80%, consistem em fazer a coleta e o transporte dos resíduos sólidos e depositar a céu aberto, constituindo os denominados lixões (AMORIM, 1996). Estes são locais afastados do centro das cidades (JUNKES, 2002) e são consideradas formas inadequadas de destinação final (JUNKES, 2002; GREGG, 2010), no entanto, ainda predominante em muitos países em desenvolvimento (JUNKES, 2002; POLETO FILHO, 2008). Mesmo nos locais em que a coleta é disponível para 98% dos moradores, como nos distritos palestinos, o tratamento adequado destes resíduos ainda não ocorre, sendo a queima destes em lixões abertos a prática mais comum (AL-KHATIB et al., 2007).

Os lixões cuja localização é próxima de rios, nascentes, mar ou áreas onde pode ocorrer a infiltração do chorume no lençol freático são considerados os mais nocivos (POLETO FILHO, 2008). Estes são sistemas mais simples e existem desde que a humanidade começou a ter o cuidado de levar para locais distantes de suas moradias os resíduos, os quais poderiam prejudicar a saúde das pessoas e das comunidades (AMORIM, 1996).

Os lixões se tornam pontos de atração para pessoas miseráveis e desempregadas, geralmente denominados de catadores de lixo, que procuram materiais com valor comercial (AMORIM, 1996). Um problema ainda maior disso, é que algumas vezes os resíduos de serviço de saúde são misturados e descartados juntos com o RSD, trazendo riscos a essas pessoas de serem infectadas com várias doenças (AL-KHATIB et al., 2007). Essas são situações que devem ser evitadas, por questões humanas, éticas e de saúde pública (AMORIM, 1996).

Além disso, os lixões também são responsáveis pela proliferação de vetores de enfermidades, como ratos, baratas, moscas, cães, gatos e outros, os quais são passíveis de

adquirir doenças contagiosas e transmiti-las aos humanos, além de ser uma forma de destinação final precária (AMORIM, 1996). Por todos esses problemas é necessário melhorar estes sistemas, a fim de transformá-los em aterros controlados (AMORIM, 1996), os quais são melhores se comparados aos lixões.

3.6.4 Aterro controlado

Os aterros controlados consistem em uma forma simples e barata de destinação, antes mesmo que seja possível a adoção da solução técnica e sanitária mais adequada (AMORIM, 1996). Os resíduos são despejados nestes locais e recebem uma cobertura diária, depois de cada jornada de trabalho, com camadas de solo (MARANHO, 2008; BRASIL, 2010a; IBGE, 2010b), a fim de evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e mitigar impactos ambientais (BRASIL, 2010a; IBGE, 2010b), entretanto, não atende totalmente este objetivo, pois não são utilizados todos os recursos de engenharia e saneamento necessários (OLIVEIRA, 2006).

Os aterros controlados constituem uma solução primária, a qual não deve ser priorizada (JUNKES, 2002), uma vez que não opera de forma eficiente (SISINNO, 2003), pois não apresenta sistemas de coleta e tratamento dos líquidos e gases gerados na decomposição dos resíduos (BRASIL, 2010a; GIRARDI, 2012).

3.6.5 Aterro sanitário

O aterro sanitário é uma forma de disposição final para os RSU com controles técnicos e operacionais, de maneira que os resíduos e seus efluentes líquidos e gasosos não causam danos ao meio ambiente e à saúde pública (BRASIL, 2010a; IBGE, 2010b). Mas para que isso ocorra, este deverá ser localizado, projetado, instalado, operado e monitorado conforme a legislação ambiental vigente e as normas técnicas oficiais (LOLLO; GEBARA, 2001; IBGE, 2010b).

Uma das maiores dificuldades de sua implantação está relacionada com os custos de operação, devido ao tratamento adequado dos líquidos e gases efluentes, além de todos os outros cuidados previstos nas normas (JUCÁ, 2002), como por exemplo, os cuidados com o recobrimento dos resíduos após seu aterramento, assim como com a impermeabilização durante sua instalação, evitando possíveis infiltrações (LOLLO; GEBARA, 2001).

Outras dificuldades estão relacionadas com a falta de manutenções nos aterros, os quais acabam então, se transformando em lixões e ainda, com a falta de áreas para sua

implantação, devido ao crescimento dos centros urbanos, tornando sua aplicação ainda mais onerosa.

Segundo Ribeiro (2010), essa solução é melhor que os lixões, mas ainda está longe de ser considerada ideal, tanto que países da Comunidade Europeia, já estão eliminando sua adoção. A ideia é que ocorra a proibição total até 2020, mas a Alemanha se adiantou e já o faz desde 2005.

Vale ressaltar que não há possibilidade de eliminar os aterros, uma vez que mesmo com o tratamento dos resíduos através da incineração seria necessário o envio das cinzas (rejeitos da combustão) para eles. No entanto, é possível eliminar o tratamento dos resíduos no aterro, ou seja, evitar que eles sejam enviados para os aterros da forma como são descartados, sem nenhum pré-tratamento.

Ainda de acordo com Ribeiro (2010), os aterros não são a melhor destinação, porque a cada 20 anos, aproximadamente, um novo aterro deve ser construído e os encerrados continuam sendo monitorados por mais 40 anos, além da menor disponibilidade de terras e das exigências ambientais cada vez mais rigorosas (LIANG et al., 2008). Dessa forma, a alternativa mais adequada de tratamento dos RSU, com pequeno impacto ambiental é o tratamento térmico (RIBEIRO, 2010; MONTEJO et al., 2011).

3.7 TECNOLOGIA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS - INCINERAÇÃO

A incineração é um método de tratamento que trata os resíduos sólidos através da combustão, ou seja, utiliza a decomposição térmica, oxidação em altas temperaturas, objetivando a redução do seu volume (ABNT, 1990; MARANHO, 2008), peso e características de periculosidade. Esta tecnologia também pode ser considerada um processo de reciclagem (MARANHO, 2008), pois há possibilidade de produzir vapor e energia elétrica por meio da energia liberada da queima dos RSU (TCHOBANOGLOUS; KREITH; WILLIAMS, 2002; CHENG et al., 2007; MARANHO, 2008; CHENG; HU, 2010; SINGH et al., 2011). Estes resíduos podem ser então, considerados fonte de energia viável (KAPLAN; DECAROLIS; THORNELOE, 2009) e renovável (CHENG et al., 2007; NIE, 2008; PSOMOPOULOS; BOURKA; THEMELIS, 2009; CHENG; HU, 2010).

Esse processo de combustão dos resíduos se constitui em uma prática milenar, pois sabe-se até hoje que muitos povos tinham ou ainda mantêm esse costume. Hoje, a incineração é frequentemente utilizada nos procedimentos industriais, a fim de destruir substâncias indesejáveis ou convertê-las em outras mais simples, como fumaça, vapor e cinzas

(AMORIM, 1996) ou ainda é utilizada com resíduos hospitalares ou contaminados (ALVIM FERRAZ; AFONSO, 2003; OLIVEIRA, 2006; FRANÇA; RUARO, 2009).

A incineração já é conhecida e empregada em muitas cidades e países, apesar de ser uma alternativa cara e complexa (AMORIM, 1996). Países, como o Japão, a adotam como solução predominante, pois possuem uma grande concentração demográfica e industrial e pouca terra disponível (AMORIM, 1996; OLIVEIRA, 2006), já a China, adota este destino para 13% dos seus resíduos gerados (CHENG; HU, 2010).

No Brasil, até 1969, os edifícios no Rio de Janeiro incineravam seus resíduos, mas devido aos grandes problemas de poluição do ar causados, essa experiência foi abandonada (AMORIM, 1996; MENEZES; GERLACH; MENEZES, 2000; HENRIQUES, 2004). Entretanto, existem hoje unidades de incineração para resíduos industriais e de serviços de saúde, principalmente nos estados da Bahia, São Paulo e Rio de Janeiro (FEAM, 2012), além de uma planta experimental, a qual incinera RSU com o objetivo de produzir energia elétrica, denominada USINAVERDE e construída no campus da UFRJ da Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro. Apresenta capacidade de 30 Mg dia⁻¹ e termelétrica com potência de 750 kW (FEAM, 2010).

A utilização da incineração ainda é limitada, devido ao seu elevado custo de operação (TCHOBANOGLIOUS; KREITH; WILLIAMS, 2002; FRANÇA; RUARO, 2009; CHENG; HU, 2010) e por contribuir para a poluição do ar atmosférico das cidades (AMORIM, 1996; ALVIM FERRAZ; AFONSO, 2003) quando os gases provenientes do incinerador não são tratados adequadamente. Entretanto, com a instalação de um sistema de limpeza de gases bem projetado, construído e operado, a saúde e o meio ambiente estão protegidos (TCHOBANOGLIOUS; KREITH; WILLIAMS, 2002), e as normas ambientais mais exigentes são atendidas (VALBERG et al., 1996; RIBEIRO, 2010).

Os benefícios do seu uso são a redução da dependência de combustíveis fósseis, da emissão de gases de efeito estufa (CHENG et al., 2007; CHENG; HU, 2010; RIBEIRO, 2010; ABRELPE; PLASTIVIDA, 2012), do volume de resíduos dispostos em aterros, em até 90% e do seu peso em até 75% (CHENG et al., 2007; CHENG; HU, 2010; RIBEIRO, 2010; SINGH et al., 2011; ABRELPE; PLASTIVIDA, 2012), dos espaços ocupados pelos aterros sanitários e a minimização das possibilidades de contaminações (OLIVEIRA, 2006). É um processo relativamente sem ruídos, que permite o uso direto da energia térmica para a geração de vapor e ocupa pequena área para instalação (HINRICHS; KLEINBACH, 2003). Por estas vantagens, Ribeiro (2010), afirma que a incineração é a melhor opção ao tratamento apenas

nos aterros sanitários enquanto Menezes; Gerlach e Menezes (2000) consideram este o processo o mais adequado e ambientalmente seguro para o tratamento dos resíduos.

Para a incineração de RSU, é necessário conhecer o seu conteúdo energético (LIU; PAODE; HOLSEN, 1996). Portanto, quando o objetivo é a geração de energia, é interessante a utilização de materiais com maior poder calorífico, como plásticos, papéis (HINRICHS; KLEINBACH, 2003; OLIVEIRA; ROSA, 2003; FEAM, 2012), borracha, couro, folhas, entre outros (FEAM, 2012).

Além disso, é importante também que esses resíduos contenham baixos níveis de alguns elementos como nitrogênio, enxofre ou cloro, uma vez que esses são precursores de poluentes indesejáveis e de alguns ácidos que podem causar corrosão, e ausência de elementos minerais, os quais podem formar cinzas e partículas inorgânicas (KLASS, 1998) que não participam das reações de combustão (FEAM, 2012).

Segundo Menezes; Gerlach e Menezes (2000), 1 Mg de RSU equivale a aproximadamente 200 kg de carvão ou 250 kg de combustível, 30 Mg de água quente ou ainda 1.800 MJ de energia elétrica (RIBEIRO, 2010)

3.7.1 Processo de Incineração

O incinerador é um equipamento destinado à combustão controlada de resíduos sólidos a temperaturas elevadas (IBGE, 2010b), que usualmente varia de 1200 a 1400°C, com tempo de detenção de 0,2 a 0,5 segundos, podendo chegar a 2 segundos (MUNIZ, 2004) e possui basicamente uma câmara de combustão, uma câmara de pós-combustão (FEAM, 2012) e sistemas de tratamento térmico de gases poluentes e de retenção de materiais particulados (IBGE, 2010b).

Os fornos de incineração podem apresentar diversas configurações, sendo que a mais empregada para o RSU no estado bruto é a combustão em grelha, a qual é dotada de uma grelha móvel inclinada (FEAM, 2012) que conduz os resíduos através da câmara de combustão (LIMA, 1994). Esta é uma das primeiras concepções de incinerador e por isso apresenta uma excelente confiabilidade (LIMA, 1994).

Nesse processo, a oxidação dos resíduos ocorre em três etapas, que são: a secagem do combustível, a degradação térmica e a oxidação do resíduo sólido e dos gases de exaustão (VIRMOND, 2007; LIANG et al., 2008). A partir disso, são gerados dois fluxos de resíduos, os gasosos, que contêm os gases da combustão e mais algumas partículas sólidas em suspensão, e os sólidos, ou seja, as cinzas, que contêm a parcela não combustível do resíduo (LIMA, 1994). As cinzas são, em grande parte, inertes (OLIVEIRA, 2006; SINGH et al.,

2011) e apresentam uma aparência vítrea, sendo muito utilizadas em alguns países, como base de pavimentação (LIMA, 1994; OFORI-BOATENG; LEE; MENSAH, 2013) e em outras aplicações na construção civil (HENRIQUES, 2004) ou apenas destinadas a aterros sanitários.

Os resíduos gasosos são compostos por grande quantidade de poluentes (NIE, 2008; CHENG; HU, 2010). Esses poluentes podem ser originados a partir dos componentes dos resíduos (ALVIM FERRAZ; AFONSO, 2003; NIE, 2008; KAPLAN; DECAROLIS; THORNELOE, 2009), como os metais pesados, durante o processo de combustão (particulados e gases ácidos) ou ainda, podem ser resultantes da combustão incompleta - monóxido de carbono (NIE, 2008), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs¹) (SCHUHMACHER et al., 2002; PAVESI, 2006). Outros poluentes são os poluentes orgânicos persistentes (POPs) (furanos e dioxinas²) (STANMORE, 2002), os óxidos de enxofre, os óxidos de nitrogênio (BRASIL, 2002; ZHANG; HE; SHAO, 2009), os compostos inorgânicos clorados, os compostos inorgânicos fluorados e os materiais particulados (BRASIL, 2002).

A emissão dos poluentes depende então, do tipo e da segregação dos resíduos e do processo de incineração (ALVIM FERRAZ; AFONSO, 2003), sendo que melhorias da combustão no processo podem ajudar a reduzir a emissão (FREY et al., 2003), assim como, as operações de triagem, que contribuem evitando a combustão de resíduos que possuem elementos tóxicos e perigosos na sua composição (GREGG, 2010).

Os gases poluentes podem passar por um sistema de recuperação de calor, que é usualmente composto por trocadores de calor, os quais retiram energia térmica para geração de vapor. Esse vapor pode ser comercializado diretamente na forma em que se encontra ou na forma de água quente a alta pressão ou ainda na forma de eletricidade após expansão em um conjunto turbina-gerador. Depois da recuperação, os gases seguem para o tratamento, onde os poluentes são reduzidos a níveis pré-estabelecidos pelas legislações (LIMA, 1994).

Há uma grande variedade de opção de conformação e equipamentos para o tratamento destes gases, os quais envolvem processos físicos e químicos. A primeira etapa do tratamento consiste em resfriá-los, sendo gerado, a partir disso, o vapor d'água. Na etapa seguinte, ocorre a neutralização destes gases através da injeção de hidróxido de cálcio

¹São resultantes da combustão incompleta de compostos orgânicos (SCHUHMACHER et al., 2002; PAVESI, 2006) e perigosos devido ao seu potencial carcinogênico (PAVESI, 2006).

² A formação de dioxinas ocorre por reações elementares, envolvendo carbono, hidrogênio, oxigênio e cloro e temperaturas entre 200 e 650°C (MMA, 2013), são extremamente persistentes e bioacumulativas (SCHECTER et al., 2006). Há 210 compostos de dioxinas e furanos, sendo que 17 destes requerem especial atenção por sua toxicidade (FEAM, 2012).

(HENRIQUES, 2004), passando em seguida, por um sistema de filtros (filtros-manga) que retiram o material particulado (DENT; KROL, 1990; HENRIQUES, 2004). Em alguns casos utilizam-se outros sistemas, como precipitadores eletrostáticos, lavadores venturi, ciclones e outros (HENRIQUES, 2004; RIGATO, 2008; GREGG, 2010). Na última etapa os gases passam por um leito adsorvente, à base de carvão ativado (HENRIQUES, 2004; NIE, 2008).

Os filtros mangas e os leitos de carvão funcionam com temperaturas entre 150 a 200° C. Ao longo do próprio sistema de purificação de gases ocorre a perda de calor, fazendo com que a temperatura na saída da chaminé seja inferior a 120°C (HENRIQUES, 2004).

3.8 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A reciclagem energética consiste na recuperação da energia contida nos resíduos através de processos térmicos (MUNIZ, 2004). As tecnologias de recuperação de energia que utilizam os RSU como combustíveis estão cada vez mais estabelecidas. Esta tendência traz a combinação de benefícios econômicos e ambientais e a visão destes resíduos, cada vez mais, como recurso e não como simples resíduo que requer eliminação (DENT; KROL, 1990).

No Brasil, estima-se que com esse aproveitamento, 44 milhões de Mg anuais de resíduos sólidos poderiam produzir pelo menos 30% de toda energia gerada na Hidrelétrica Binacional de Itaipu. Por outro lado, a reciclagem desses resíduos geraria um incremento de R\$10 bilhões na economia, além de gerar um milhão de empregos, proporcionando o reaproveitamento de produtos para a fabricação de novos utensílios, gerando economia de matéria-prima (TEIXEIRA, 2004).

A avaliação do potencial energético dos resíduos sólidos está diretamente ligada com o poder calorífico de cada material, sendo de fundamental importância conhecê-lo (EPE, 2008; KOMILIS et al., 2012). A tabela 2 apresenta o poder calorífico para cada tipo de material comumente presente nos RSD.

Tabela 2 - Poder calorífico de materiais comumente encontrados em RSD

(continua)	
Componente	kJ kg^{-1}
Matéria orgânica	5.485
Papel	16.873
Têxtil	14.570
Couro	15.198

Tabela 2 - Poder calorífico de materiais comumente encontrados em RSD

(conclusão)	
Componente	kJ kg^{-1}
Borracha	28.387
Plástico	26.377

Fonte: adaptado de EPE (2008)

Com a implementação da reciclagem ocorre uma redução substancial do potencial energético (MARANHO, 2008), ou seja, uma variação no poder calorífico. Assim, esse procedimento de segregação, para a reciclagem, pode influenciar o rendimento de uma usina de recuperação de energia. Por exemplo, com a redução na quantidade de plásticos, o poder calorífico diminui, elevando-se então, o custo da produção de energia (POLETTTO; SILVA, 2007). Dessa forma, Maranho (2008) afirma que a maior vantagem na análise energética é a combustão dos RSU sem a reciclagem dos materiais combustíveis.

Porém, deve-se levar em consideração que quando o reaproveitamento não ocorre, a demanda por matéria-prima para fabricação de novos produtos aumenta, retomando os problemas referentes às questões de esgotamento. Outro fator importante, é que o RSU, segundo Liang et al. (2008), é um combustível de baixa qualidade, pois representa uma fonte de poluição bastante significativa e contém grande quantidade de água, o que reduz a eficiência na recuperação de sua energia (KUMAR; GOEL, 2009; ZHANG; HE; SHAO, 2009).

Em contrapartida, utilizando os resíduos para a geração de energia, reduz-se a demanda pelos outros recursos utilizados para a produção de energia, expandindo a vida útil dessas reservas (HENRIQUES; OLIVEIRA; COSTA, 2003). Além disso, essa é uma opção técnica, econômica e viável (OLIVEIRA; ROSA, 2003), pois é um combustível de baixo custo (DEMIRBAS, 2005) e está disponível em elevadas quantidades. O fornecimento competitivo de energia e incentivo à utilização de fontes alternativas são outros dois elementos decisivos que garantem o sucesso de fontes não fósseis de energia (OLIVEIRA; ROSA, 2003).

A Figura 2 apresenta inúmeras rotas tecnológicas seguidas para a produção de energia a partir dos resíduos sólidos, dependendo do tratamento escolhido (SABIÁ et al. 2005). Esses processos de conversão térmica diferenciam-se pela faixa de temperatura e pela relação ar/combustível (VIRMOND, 2007).

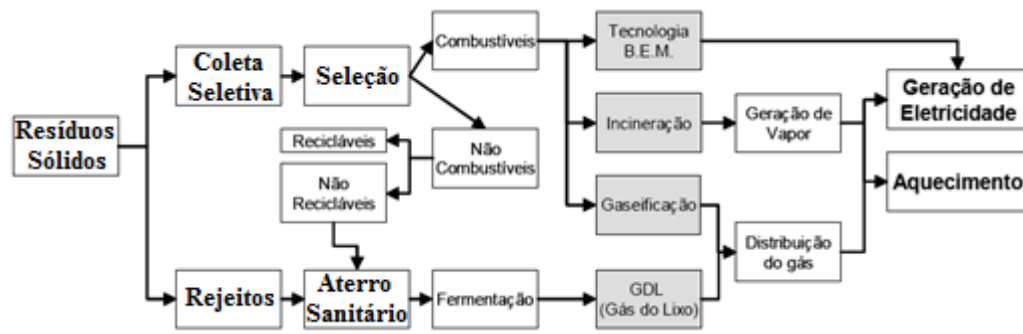


Figura 2 - Rotas energéticas dos resíduos sólidos
 Fonte: Sabiá et al. (2005)

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA

O município de Ponta Grossa está localizado no Segundo Planalto Paranaense, na região dos Campos Gerais (SMCT, 2012). Apresenta uma superfície de 2.112,6 km², da qual, 47,4% (917,2 km²) corresponde à área urbana e 52,6% (1.195,4 km²) à área rural, representando 1% do território paranaense (PONTA GROSSA, 2006) (Figura 3).

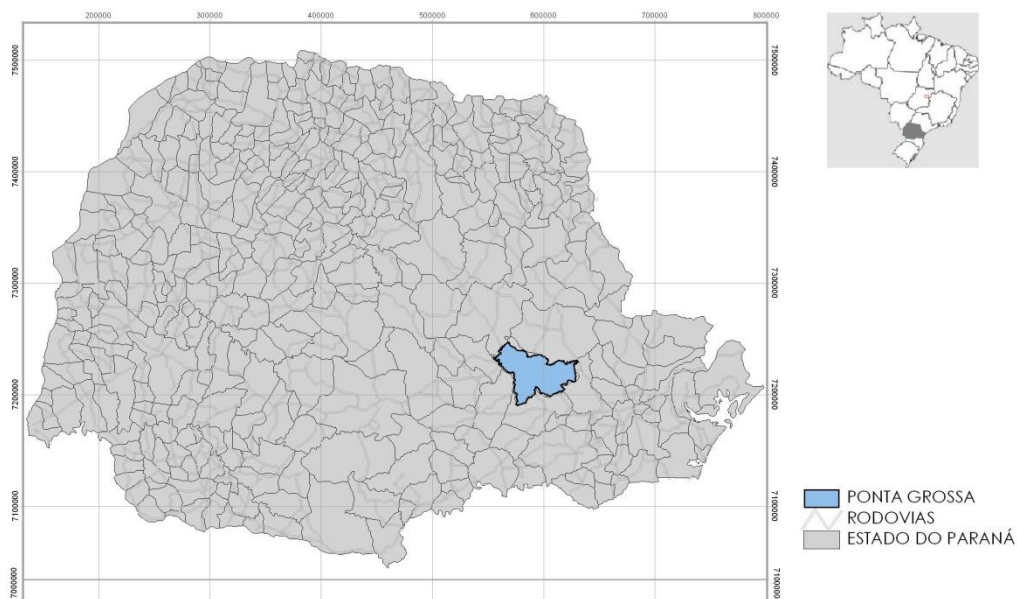


Figura 3 - Mapa do Paraná indicando a localização do município de Ponta Grossa
Fonte: adaptado de Ponta Grossa, 2006

Ponta Grossa possui, além da sede municipal, quatro distritos administrativos: Uvaia, Itaiacoca, Guaragi e Piriquitos (PONTA GROSSA, 2006). E possui uma população de 311.611 habitantes (IBGE, 2010a) sendo a quarta cidade mais populosa do estado do Paraná (NRE, 2012) e a 76^a do Brasil (GOMES, 2013).

Seu clima é definido, segundo a classificação climática de Köppen, sub-tropical úmido mesotérmico, tipo Cfb, sendo a média de temperatura nos meses mais quentes, inferior a 22° C e a dos meses mais frios, inferior a 18° C (NRE, 2012). Sua área é bem irrigada por uma ampla rede hidrográfica, onde se destacam os rios Tibagi, Verde e Pitanguí, também o Arroio da Chapada, assim como as bacias hidrográficas do Botuquara, Cará-Cará, Olarias, Rio da Morte, Arroio Terra Vermelha, Ribeirão Quebra-Perna, entre outros (SMCT, 2012).

4.2 RESÍDUOS SÓLIDOS DE PONTA GROSSA

A coleta de resíduos em Ponta Grossa iniciou no ano de 1969 e esses resíduos tinham como destino final um lixão. Em 2001, esse lixão foi transformado em aterro controlado (MATIAS; COSTA, 2012), o qual, ainda é utilizado. Hoje, a coleta domiciliar e comercial é realizada em dois turnos, diurno e noturno, atendendo aproximadamente 50 setores do município (PGA, 2011).

Os resíduos sólidos domiciliares e comerciais são coletados em caminhões apropriados e levados até o aterro do Botuquara (Figura 4) onde são depositados em células, não havendo nenhuma forma de tratamento ou separação do material. Estes são espalhados, compactados por um trator de esteiras e cobertos com solo. O aterro possui dutos, que eliminam para a atmosfera os gases gerados, rede para drenagem do lixiviado até lagoas de estabilização e poços de monitoramento, entretanto o aterro não possui impermeabilização (MATIAS; COSTA, 2012), estando assim, o resíduo em contato direto com o solo.



Figura 4 - Aterro controlado do Botuquara no município de Ponta Grossa/Paraná (PR 513)

Atualmente, são enviados para o aterro aproximadamente $6.500 \text{ Mg mês}^{-1}$ de resíduos (PGA, 2013). A figura 4 seguinte, mostra a composição típica dos resíduos no aterro de Ponta Grossa (PGA, 2011).

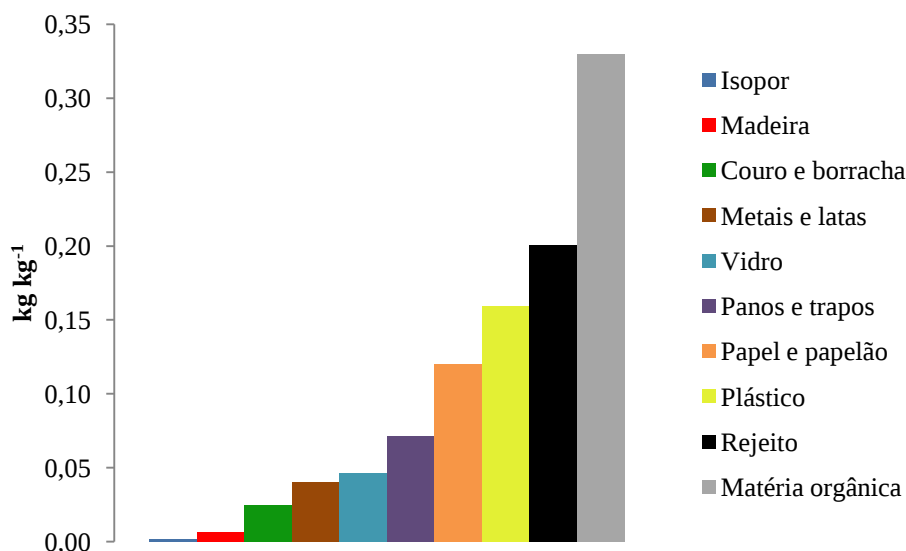


Figura 5 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais de Ponta Grossa
Fonte: PGA, 2011

Em Ponta Grossa não é realizada a compostagem de resíduos orgânicos. Por outro lado, é o município que mais coleta resíduos recicláveis (300 Mg mês^{-1}) de todo o Paraná. Parte dessa quantidade coletada vem do programa Feira Verde, o qual se baseia na troca de resíduos recicláveis por alimento, sendo o restante proveniente do trabalho individual de coletores (ALMEIDA, 2011). Entretanto, ainda assim, 32% são resíduos recicláveis (papel e papelão, metais e latas e plásticos) (Figura 5) (PGA, 2011).

4.3 AMOSTRAGENS

Neste trabalho foi considerado resíduos sólidos domiciliares os provenientes de atividades domésticas em residências urbanas e ainda os provenientes de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços.

4.3.1 Primeira amostragem (Coleta1) dos RSD de Ponta Grossa

O objetivo dessa coleta foi a produção de um resíduo padrão (RP) e, para isso, foram selecionados 25 bairros. Os bairros Uvaranas, Oficinas e Centro foram divididos ainda em: parte residencial e comercial, totalizando 28 coletas, alcançando-se aproximadamente 50% do

total de setores da atual divisão de coleta do município de Ponta Grossa (Tabela 3). Estes bairros foram escolhidos conforme número de habitantes, situação social e ainda com relação a sua localização no município, buscando-se espacializar homogeneamente as amostragens.

Para avaliar a situação social dos bairros do município de Ponta Grossa, utilizou-se a classificação elaborada por Nascimento (2008), que determina níveis de exclusão/inclusão a partir dos seguintes critérios: autonomia de renda, desenvolvimento humano, qualidade domiciliar e equidade. Os níveis são: alta exclusão, média-alta exclusão, média-baixa exclusão, baixa exclusão, baixa inclusão, média-baixa inclusão, média-alta inclusão e alta inclusão.

Tabela 3 - Bairros selecionados para a coleta 1 dos RSD

(continua)

Setores	Habitantes *	Situação social predominante **	Localização
Distrito Industrial	-	-	Leste
Borato	5.417	Média-baixa exclusão	Oeste
Jardim América	7.548	Média-alta inclusão	Sul
Olarias	8.545	Média-baixa exclusão	Leste
Ronda	9.229	Média-baixa exclusão	Sul
Centro	12.325	Alta inclusão	Centro
Órfãs	13.107	Média-alta inclusão	Norte
Colônia Dona Luiza	16.639	Baixa exclusão	Sul
Nova Rússia e Palmeirinha	19.656	Baixa exclusão	Oeste
Oficinas e Maria Otília	20.414	Média-baixa exclusão	Sul
Neves	22.211	Baixa inclusão	Leste
Jardim Carvalho e Santa Mônica	22.393	Média-alta inclusão	Norte
Chapada	23.166	Média-baixa exclusão	Oeste
Boa Vista	24.968	Média-baixa exclusão	Norte

Tabela 3 - Bairros selecionados para a coleta 1 dos RSD

(conclusão)

Setores	Habitantes*	Situação social predominante**	Localização
Cará-Cará	27.779	Média-baixa exclusão	Sul
Santa Terezinha, Santo Antônio e Santa Paula	28.386	Média-baixa exclusão	Sul
Uvaranas, 31 de março, Borsato e Paraíso	44.450	Baixa exclusão	Leste

* IBGE (2010a)

** Nascimento (2008)

Em cada um dos bairros coletou-se aproximadamente 0,03 m³ de RSD. Depois de coletados, estes resíduos foram encaminhados para o Laboratório de Biocombustíveis na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), onde foi identificada sua composição, apenas com relação aos tipos de materiais encontrados, sem analisá-los quantitativamente. Após isso, os resíduos foram descartados e a produção do RP foi realizada somente antes da execução das análises, utilizando resíduos iguais aos encontrados, no entanto, limpos.

4.3.2 Segunda amostragem (Coleta2) dos RSD de Ponta Grossa

A coleta 2, composta de quatro amostras, foi realizada diretamente no aterro do Botuquara. Para esta foram selecionados quatro caminhões de setores diferentes, estes caminhões descarregaram os resíduos, formando pilhas, destas foram coletadas quatro amostras de cada pilha, sendo cada amostra de aproximadamente 0,1 m³ (IPT/CEMPRE, 2000). Os resíduos coletados foram encaminhados para a Fazenda Escola da UEPG, para a pesagem e depois, depositados sobre lona plástica no interior de um quadrado formado por réguas de madeira com as dimensões de 2,00 m x 2,00 m, a fim de executar o processo de homogeneização e quarteamento (SOARES, 2011), conforme mostra a Figura 6.



Figura 6 - Coleta, homogeneização e quarteamento dos RSD da coleta 2

Para o início do processo de quarteamento, conforme o setor de origem, os resíduos foram retirados dos sacos plásticos e misturados para se obter amostra homogênea, conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004b). Após, realizou-se o quarteamento, que consiste na divisão de quatro partes iguais dessa amostra já homogeneizada, sendo escolhidas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra, e as outras duas são descartadas. As partes não descartadas foram misturadas e o processo de quarteamento foi repetido até que se obteve a quantidade desejada (ABNT, 2004b), aproximadamente 10 kg, e suficiente para a realização das análises. O resíduo excedente foi descartado. O processo descrito é esquematizado na Figura 7.

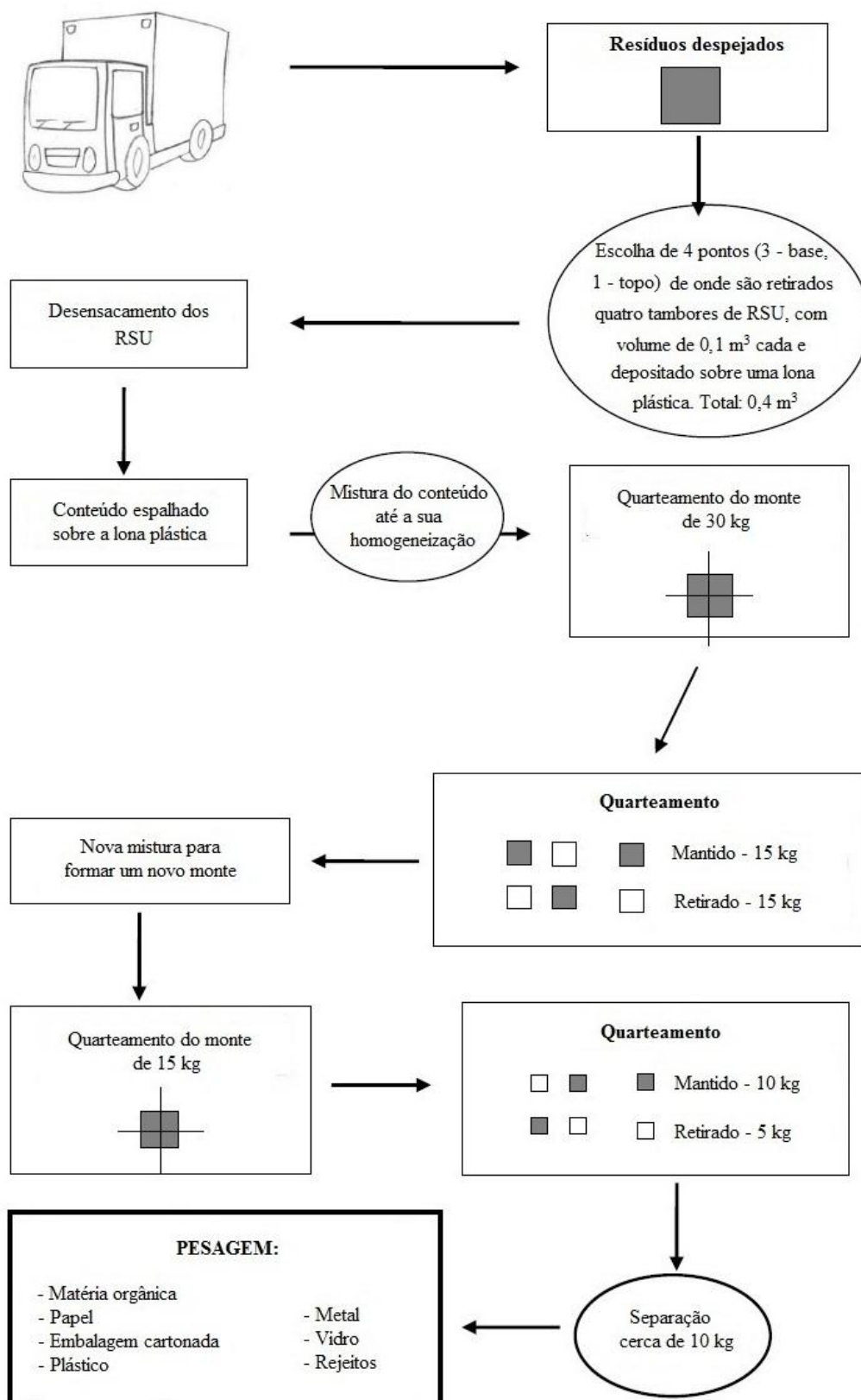


Figura 7 - Metodologia para o processo de quarteamento
 Fonte: adaptado de Soares (2011)

4.4 ANÁLISES

4.4.1 Composição gravimétrica

A caracterização da composição gravimétrica foi realizada para cada uma das quatro amostras da coleta 2, separando os resíduos nos seguintes componentes:

- Matéria orgânica;
- Papel;
- Embalagem cartonada;
- Plásticos;
- Metal;
- Vidro;
- Rejeitos.

A fração matéria orgânica é composta por restos de verduras, legumes, frutas, folhas e galhos. Na fração reciclável estão inclusos alguns materiais como papel, papelão e plásticos, de interesse nas tecnologias de aproveitamento energético, pois, apesar de terem potencialidade para a reciclagem, algumas vezes, não possuem mercado, por razões como sujidade ou tecnologia economicamente viável. Na fração rejeitos estão inclusos também alguns materiais de interesse, como couro, restos de tecido, madeira (FEAM, 2012), os quais não possuem mercado para reciclagem, e outros que depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final (BRASIL, 2010a; FEAM, 2012). Depois de separados, os resíduos foram colocados em sacos plásticos para a pesagem, conforme a Figura 8.



Figura 8 - Componentes encontrados nos RSD da coleta 2 (a: matéria orgânica, b: papel, c: embalagem cartonada, d: plástico, e: metal, f: vidro, g: rejeitos)

4.4.2 Preparo das amostras

Para melhor homogeneização e para a realização das análises de conteúdo de água, análise imediata e de poder calorífico superior (PCS), as amostras das coletas 1 e 2 foram trituradas manualmente no menor tamanho possível. Adotou-se apenas uma amostra da coleta

2 das frações de papel, embalagem cartonada, plástico, vidro, metal e rejeitos para as análises seguintes, uma vez que os materiais encontrados nestas frações eram semelhantes.

Além das frações separadas, descritas no item 4.4.1, foram preparadas ainda mais uma amostra de cada setor, denominadas amostras homogeneizadas, as quais são compostas pelas misturas das frações nas proporções encontradas para cada uma, conforme a composição gravimétrica. No caso da amostra homogeneizada da coleta 1, as frações foram misturadas em iguais proporções (mesmo volume) para a realização da análise.

Em seguida, as amostras das duas coletas foram encaminhadas para o Laboratório de Energia de Biomassa Florestal da Universidade Federal do Paraná (UFPR) para as análises.

4.4.3 Determinação do conteúdo de água

A determinação do conteúdo de água foi realizada seguindo a norma NBR 8112 (ABNT, 1986). Para isso, as amostras de RSD foram pesadas (Balança Shimadzu – Modelo BL 3200H), cerca de 70 g para as amostras de matéria orgânica e 3 g para as demais (Figura 9), e foram mantidas na estufa a uma temperatura de 105° C até que a massa permanecesse constante. Após isso, elas foram retiradas e pesadas. O tempo médio de secagem das amostras foi de 48 horas.



Figura 9 - Amostras das coletas 1 e 2 trituradas e pesadas

Para as amostras de matéria orgânica e para as homogeneizadas, a determinação foi realizada em duplicata enquanto que para as demais foi em triplicata, devido a menor quantidade de água presente nestas amostras, buscando assim, melhor acurácia nos resultados.

4.4.4 Análise imediata

Nesta análise foi determinado o conteúdo de materiais voláteis, de carbono fixo e de cinzas dos RSD, conforme a norma NBR 8112 (ABNT, 1986), em duplicata. Para isso, as amostras, previamente secas na estufa, foram pesadas aproximadamente 3 g em balança analítica Acculab, acurácia de 10^{-4} g.

Na determinação de materiais voláteis, as amostras em cadinhos cerâmicos foram colocadas em uma mufla Fornitec - Modelo F2 DM Monofásico, previamente aquecida a 900° C (Figura 10) e retiradas depois de 7 minutos (ABNT, 1986). Após isso, foram esfriadas em dessecador e pesadas para a determinação da massa final.



Figura 10 - Amostras na mufla após 900°C

Em seguida, foi realizada a determinação do conteúdo de cinzas. Estas mesmas amostras foram colocadas em outra mufla (Mufla EDG – Série FC-2) previamente aquecida a 700° C e mantidas por 7 horas (ABNT, 1986). Após isso, as amostras foram retiradas (Figura 11), resfriadas em dessecador e pesadas novamente.



Figura 11 - Cinzas dos RSD

O conteúdo de carbono fixo é uma medida indireta e foi calculado com base no conteúdo de cinzas e de materiais voláteis, de acordo com a ABNT (1986) e conforme a equação 1 (ABNT, 1986).

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (1)$$

Onde:

CF = conteúdo de carbono fixo (kg kg^{-1})

CZ = conteúdo de cinza (kg kg^{-1})

MV = conteúdo de materiais voláteis (kg kg^{-1})

4.4.5 Poder calorífico superior (PCS)

O PCS dos RSD foi determinado utilizando bomba calorimétrica digital IKA WORKS, modelo C 5000 (Figura 12), que consiste em cilindro metálico hermeticamente fechado, onde se introduz amostra, cuja massa é conhecida, misturada com oxigênio a alta pressão (ATWATER; SNELL, 1903; SEMIAUTOMATED, 1994; ALKAN; DUMANLI; ARAS, 2006; SILVA, 2011). Um circuito elétrico proporciona faísca elétrica para o início da combustão (RODRIGUES, 2010).

A bomba é mergulhada em $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ de água destilada e tem princípio de funcionamento adiabático, isoperibólico ou dinâmico, a combustão da amostra provoca a elevação da temperatura dessa água. Medindo-se a elevação da temperatura da água e

conhecendo-se o equivalente hidrotérmico da bomba, determina-se a energia bruta da amostra (RODRIGUES, 2010).



Figura 12 - Bomba calorimétrica utilizada (digital IKA WORKS, modelo C 5000)

Para esta análise foi pesada 0,4 g de cada amostra de RSD em balança analítica Bioprecisa, acurácia de 10^{-4} g e colocada no reator do calorímetro, que funcionou no modo dinâmico. O sistema foi pressurizado com oxigênio (99,95%) a 34,32 Bar. As medições foram realizadas em triplicatas e de acordo com a norma NBR 8633 (ABNT, 1984).

A leitura do resultado do PCS no equipamento é em cal g^{-1} . No intuito de estimar a recuperação de energia térmica e elétrica são necessárias algumas conversões de unidades e também é necessário considerar o rendimento de 88% para energia térmica (MCKENDRY, 2002) e de 30% para a energia elétrica (OLIVEIRA; ROSA, 2003; DORNBURG; FAAIJ; MEULEMAN, 2006; LINO; ISMAIL, 2013).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

A coleta 2 foi realizada diretamente no aterro e os RSD desta coleta são provenientes dos bairros descritos na Tabela 4. Para a classificação social do conjunto de bairros mostrados na Tabela 4, adotou-se a classificação de Nascimento (2008). A coleta dos quatro setores foi realizada no mesmo dia, no período da manhã, sendo, portanto, coletado os resíduos de bairros com a mesma classificação social predominante.

Tabela 4 - Identificação dos locais onde foram coletadas as amostras de RSD da coleta 2

Amostra	Bairros	Situação social predominante *	Quantidade de resíduo em cada caminhão (kg)
01	Santa Paula (velha), Vila Cristina, Barcelona e Ressoalex.	Média-baixa exclusão	5.180
02	Conjuntos Gralha Azul, Roma, Athenas, Santa Terezinha, Jardim Canaã, Centro de Eventos e Centro Agropecuário e 3º RCC.	Média-baixa exclusão	6.300
03	Vila Peixoto, Vila Nova I e II, Vila Leomar, Vila XV e Núcleo Luis Gonzaga.	Média-baixa exclusão	6.610
04	Shangrila, San Marino, Panorama, Campos Elísios, Dom Bosco e Santa Paula III.	Média-baixa exclusão	7.720

* Nascimento (2008)

O volume, massa e massa final após o quarteamento das amostras das coletas 1 e 2 são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Data de coleta, volume, quantidade coletada das amostras das coletas 1 (RP) e 2 e quantidade restante das amostras após o quarteamento

Amostra	Data da coleta	Volume coletado (m ³)	Quantidade de amostra coletada (kg)	Quantidade de amostra após o quarteamento (kg)
RP	01/2013	0,75	---	---
01	09/07/2013	0,40	28,80	10,18
02	09/07/2013	0,40	28,90	8,09
03	09/07/2013	0,40	29,80	7,76
04	09/07/2013	0,40	31,90	10,82
Total			119,40	36,85

5.2 RESÍDUO PADRÃO (RP) (COLETA 1)

O RP foi produzido com a mistura de materiais encontrados com maior frequência nos resíduos conforme coleta 1, estes materiais estão descritos na Figura 13.

Os resíduos plásticos encontrados foram classificados conforme sua composição, em politereftalato de etileno (PET), polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno (PE), polipropileno biorientado (BOPP), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD) e outros (CRES, 2006).

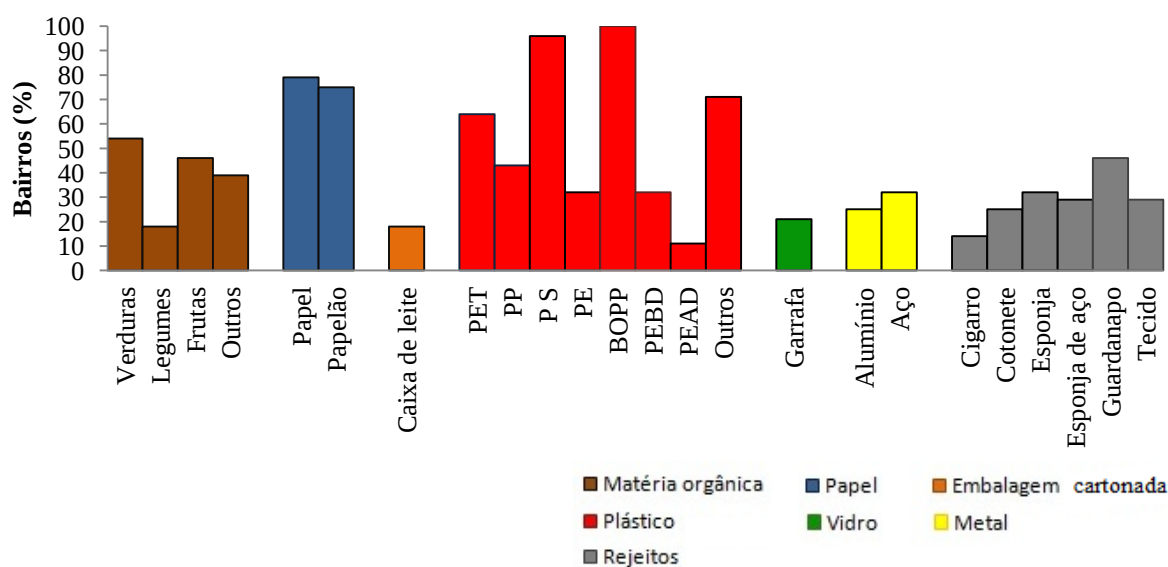


Figura 13 - Frequência dos materiais encontrados nos RSD provenientes da coleta 1

Para a preparação da amostra de plástico foi utilizado o resíduo mais encontrado dentro de cada classificação. PET foi encontrado em 64% dos bairros e, destes, a garrafa de

refrigerante apareceu em 56% dos casos; sendo assim, utilizou-se este material para a preparação da amostra. Da mesma maneira, o PP foi encontrado em 43% dos bairros e foi representado pelas tampas de plástico de garrafas, presentes em 25% dos bairros em que foi encontrado. Como PS, encontrado em 96% dos bairros, foi utilizado o copo descartável (37% de frequência). Para o PE, presente em 32% dos bairros, foram selecionados os canudinhos (44% dos casos). No caso do BOPP, presente em todos os bairros, utilizou-se as sacolas plásticas, encontradas em todos os casos. Como PEBD (presente em 32% dos bairros), utilizou-se o plástico filme (67%). Como PEAD (presente em 11% dos bairros), utilizou-se embalagem de amaciante (100%) e para a classificação Outros, plásticos misturados com outros materiais, foram utilizados plásticos com alumínio (pacotes de bolacha), encontrados em 71% dos bairros (presente em 95% dos casos).

Para a preparação do componente matéria orgânica utilizou-se restos de verduras (alface, folhas e cebola), de legumes (tomate), de frutas (banana, laranja e limão) e outros (por exemplo, casca de ovos).

Para o componente metal, além dos resíduos apresentados na Figura 13, as latas de alumínio para bebidas foram encontradas em 32% dos bairros. Entretanto não foram utilizadas, pois apresentam mercado consolidado, devido sua rentabilidade, sendo as mais coletadas para reciclagem. O Brasil reciclou, em 2012, 97,9% do total de latas consumidas (ABAL, 2014).

Outros materiais foram encontrados dentro de cada divisão dos componentes, entretanto com menor frequência e por isso não foram considerados na preparação do RP. Todos os materiais encontrados estão relacionados na caracterização feita pela PGA (2011), na Figura 5.

Durante a coleta dos RSD diretamente nos bairros (coleta 1) para a análise qualitativa, pôde ser observado que a população não contribui com a segregação dos resíduos. A grande maioria descarta os resíduos misturados e alguns, que separavam os resíduos recicláveis, acabavam, no entanto, colocando-os para a coleta no mesmo dia da coleta convencional.

5.3 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA (COLETA 2)

A Tabela 6 apresenta a composição gravimétrica das quatro amostras analisadas na coleta 2. A caracterização gravimétrica é importante e necessária para avaliar e implementar estratégias eficazes para o tratamento dos resíduos (CASTRILLÓN et al., 2013).

Tabela 6 - Composição gravimétrica dos RSD provenientes da coleta 2

Componentes	Amostra 01 (kg kg ⁻¹)	Amostra 02 (kg kg ⁻¹)	Amostra 03 (kg kg ⁻¹)	Amostra 04 (kg kg ⁻¹)
Matéria orgânica	0,41	0,49	0,48	0,31
Recicláveis				
Papel	0,07	0,02	0,09	0,02
Emb. cartonada	0,02	0,02	0,02	0,02
Plásticos	0,14	0,17	0,20	0,18
Vidro	0,04	0,00	0,04	0,05
Metal	0,06	0,02	0,03	0,01
Rejeito	0,26	0,28	0,14	0,41
Total	1,00	1,00	1,00	1,00

A maior parte dos RSD enviados para o aterro do município de Ponta Grossa é composta por matéria orgânica, aproximadamente 0,40 kg kg⁻¹. Embora essa quantidade seja menor que a média nacional, 51,4% (MMA, 2011) e também que a disposta em Curitiba, 47,9% (MELO; SAUTTER; JANISSEK, 2009), este valor ainda indica um desperdício de matéria-prima, pois esta poderia ser reaproveitada em sistemas de compostagem.

Com relação aos materiais passíveis de reciclagem, cerca de 0,30 kg kg⁻¹ não são aproveitados, sendo simplesmente destinados para o aterro controlado do município. Dos recicláveis, o plástico é o componente mais expressivo mesmo com a existência de mercado para este tipo de resíduo (GONÇALVES, 2012). Assim como os plásticos, os metais também possuem mercado que estimula sua reciclagem, no entanto, também estão presentes no RSU.

Estes materiais recicláveis que chegam até os aterros advêm de problemas relacionados com a falta de políticas públicas quanto à educação ambiental visando à segregação destes materiais. O próprio presidente do Conselho Municipal de Meio Ambiente reconhece o problema e reforça: “o município precisa fomentar e auxiliar a separação nas residências, pois muita gente se sente desestimulada a separar, pois o lixo acaba sendo levado no mesmo caminhão” (ALMEIDA, 2011).

Além do desperdício de matéria prima e de energia pelo não aproveitamento destes resíduos recicláveis, estes interferem no processo de decomposição dos resíduos e reduzem a área disponível no aterro, pois alguns componentes, como papel, plástico e embalagem cartonada, apresentam baixa densidade. O valor de recicláveis encontrado é próximo da média nacional (31,9%) (MMA, 2011).

Os outros 0,30 kg kg⁻¹ dos resíduos constituem rejeitos, que são os únicos materiais que deveriam ser enviados ao aterro, pois não apresentam alternativa conhecida e/ou viável que não a disposição final (MMA, 2011). A quantidade de rejeitos produzida no município de Ponta Grossa é elevada se comparada com a média nacional, que segundo o MMA (2011) é de 16,7%.

Com exceção dos rejeitos, cuja diferença entre a amostra 3 e 4 pode ser considerada, os setores analisados não apresentaram diferenças significativas em suas composições. Outra questão que pode influenciar no resultado pode ser a época do ano. Lembrando que a referida coleta foi realizada no mês de julho (inverno) e que o município apresenta clima Cfb, com estações bem definidas, poderia haver sazonalidade dos resíduos, no entanto, esta não foi contemplada neste trabalho. Contudo estes resultados estão próximos dos apresentados pela PGA (2011), empresa responsável pela coleta dos resíduos no município de Ponta Grossa, onde a porcentagem média de todos os setores do município para o componente plástico é de 15,91% e para os metais é de 4,01%.

No entanto para os rejeitos, os valores encontrados diferem da média obtida pela empresa que é de 20,08% (PGA, 2011), apresentando, em geral, valores mais altos, o que se deve a diferente consideração do que são rejeitos. Neste trabalho, definiu-se como rejeito como tudo o que não apresenta outra possibilidade além da disposição final e ainda todos os resíduos que não apresentam mercado para a reciclagem, enquanto que a empresa faz separações dos materiais que não possuem mercado, como por exemplo, isopor, tecido, couro e borracha.

5.4 CONTEÚDO DE ÁGUA

A Figura 14 apresenta os valores médios de duas repetições do conteúdo de água das amostras homogeneizadas.

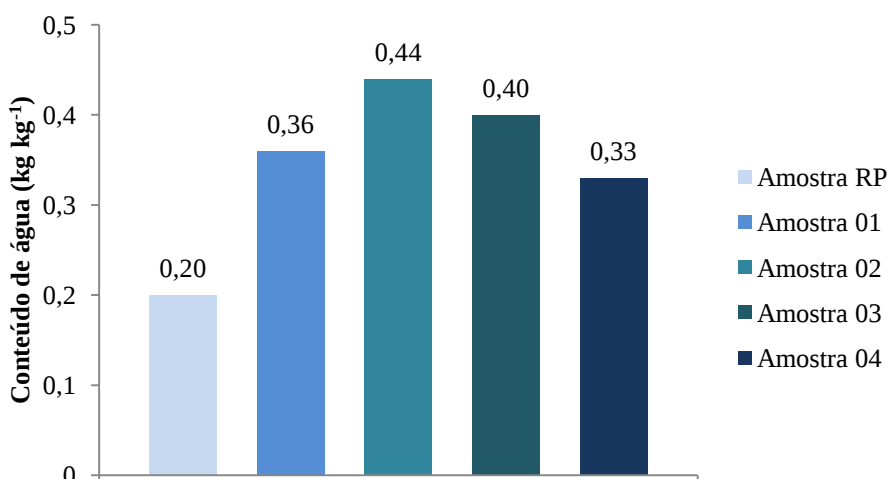


Figura 14 - Conteúdo médio de água das amostras homogeneizadas das coletas 1 e 2

A amostra 02 apresentou maior conteúdo de água, seguida pelas amostras, 03, 01 e 04. Este resultado pode ser explicado através da quantidade de matéria orgânica presente em cada uma das amostras, sendo essa quantidade diretamente proporcional ao conteúdo de água.

As amostras da coleta 2 apresentaram maiores conteúdo de água quando comparadas com a amostra RP (coleta 1), isto se deve ao fato de que a amostra RP foi preparada, não ficando portanto, exposta no ambiente, em condições de precipitação. A condição climática local é uma das variáveis que determina o conteúdo de água presente nos RSU (SOARES, 2011; ABEDINI; ATWATER; FU, 2012; FEAM, 2012; CASTRILLÓN et al., 2013), outras são a composição do material (SOARES, 2011; ABEDINI; ATWATER; FU, 2012) e a maneira como são armazenados e dispostos até a sua coleta (ABEDINI; ATWATER; FU, 2012).

O conteúdo de água obtido por Soares (2011) para amostra de RSU do Rio de Janeiro foi de $0,57 \text{ kg kg}^{-1}$, próximo do encontrado por Kathirvale et al. (2003), para os da Kuala Lumpur, na Malásia, de $0,55 \text{ kg kg}^{-1}$. Assim, as amostras da coleta 2, apresentaram, em geral, baixos conteúdos de água, se comparadas com o das outras cidades referidas.

O conteúdo de água tem grande interferência no processo de combustão (DEMIRBAS, 2005; YANG et al., 2005; LIANG et al., 2008), uma vez que dissipa o calor (DEMIRBAS, 2005), podendo a combustão ocorrer mais rápido em amostras com menor conteúdo de água (YANG et al., 2005). Além disso, a umidade dos resíduos contribui para reduções na energia que pode ser recuperada (MCKENDRY, 2002; MENIKPURA; BASNAYAKE, 2009; VALE et al., 2011; GARCÍA et al., 2013). Dessa forma, a prévia

secagem dos resíduos é um fator importante para melhorar a operação de incineração, e principalmente, para o aumento na recuperação de energia a partir dos RSD.

Na Tabela 7, estão apresentados os conteúdos de água dos componentes presentes nas amostras de RSD.

Tabela 7 - Conteúdo médio de água dos componentes encontrados nas amostras de RSD das coletas 1 e 2

Componentes	RP (kg kg ⁻¹)	Amostra 01 (kg kg ⁻¹)	Amostra 02 (kg kg ⁻¹)	Amostra 03 (kg kg ⁻¹)	Amostra 04 (kg kg ⁻¹)
Matéria Orgânica	0,67	0,74	0,79	0,76	0,70
Papel	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
Emb.cartonada	0,07	0,09	0,09	0,09	0,09
Plástico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Vidro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Metal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rejeito	0,16	0,24	0,24	0,24	0,24

A matéria orgânica apresentou maior conteúdo de água em todas as amostras, da mesma forma que os resultados obtidos por Komilis et al. (2012) (0,87 kg kg⁻¹). Este componente apresentou valores semelhantes em todas as amostras, com média de 0,73 kg kg⁻¹, sendo, portanto, responsável pela maior parte do conteúdo de água presente nas amostras homogeneizadas. O alto conteúdo de água presente na matéria orgânica, juntamente com a quantidade encontrada nos RSD do município, 0,42 kg kg⁻¹ em média, proporciona uma condição favorável para a compostagem. No entanto, há várias condicionantes para que o tratamento através da compostagem seja eficiente, como a separação criteriosa destes resíduos pela população, a operação do processo para controle de vários parâmetros, entre outros, o que pode tornar difícil este tipo de tratamento.

Os rejeitos também apresentaram quantidade considerável de água, em torno de 0,22 kg kg⁻¹, enquanto os outros materiais apresentaram valores baixos.

Os resultados apresentados na Tabela 7 estão de acordo com os obtidos por Komilis et al. (2012), que obteve para papel e embalagem cartonada, 0,06 e 0,08 kg kg⁻¹ em média, respectivamente. Enquanto que para o plástico o conteúdo de água médio foi de 0,04 kg kg⁻¹. E também com o de Soares (2011), que o componente metal apresentou 0% de umidade.

5.5 ANÁLISE IMEDIATA

A análise imediata está relacionada com o conteúdo de materiais voláteis, de carbono fixo e de cinzas presentes nas amostras. Os resultados obtidos das amostras homogeneizadas estão apresentados na Tabela 8 e os conteúdos de materiais voláteis e de cinzas dos componentes de cada amostra analisada são apresentados nas Tabelas 9 e 10, respectivamente.

Tabela 8 - Valores médios da análise imediata das amostras homogeneizadas das coletas 1 e 2

Amostra	Materiais voláteis (kg kg ⁻¹)	Carbono fixo (kg kg ⁻¹)	Cinzas (kg kg ⁻¹)
RP	0,25	0,03	0,71
01	0,76	0,07	0,17
02	0,81	0,09	0,10
03	0,76	0,06	0,17
04	0,75	0,08	0,18

O carbono fixo representa a fração de carvão que permanece na amostra logo após o aquecimento (FEAM, 2012), ou seja, logo após a liberação dos compostos voláteis (MCKENDRY, 2002). As amostras analisadas apresentaram baixos conteúdos de carbono fixo (0,07 kg kg⁻¹) se comparados com o conteúdo presente em madeiras por exemplo, o qual chega a 0,20 kg kg⁻¹ (BARROS; NASCIMENTO; AZEVEDO, 2012). Este baixo valor é uma vantagem, uma vez que o carbono fixo queima de forma mais lenta (BARROS; NASCIMENTO; AZEVEDO, 2012), sendo necessário maior tempo de residência na câmara de combustão.

O conteúdo de materiais voláteis expressa a facilidade de combustão de uma amostra (FEAM, 2012) e está relacionado com a velocidade da combustão, que será mais rápida quanto mais material volátil estiver presente (FLORIANI, 2007). As amostras da coleta 2 apresentaram valores maiores de conteúdo de voláteis que a amostra RP da coleta 1, isso se deve a composição da amostra RP, que foi simulada contendo proporções iguais (volume) dos componentes, contendo assim quantidades significativas de materiais que não são voláteis nas condições aplicadas, como vidro e metal, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Conteúdo médio de materiais voláteis de cada componente das amostras de RSD das coletas 1 e 2

Componentes	RP (kg kg ⁻¹)	Amostra 01 (kg kg ⁻¹)	Amostra 02 (kg kg ⁻¹)	Amostra 03 (kg kg ⁻¹)	Amostra 04 (kg kg ⁻¹)
Matéria Orgânica	0,55	0,56	0,70	0,53	0,53
Papel	0,76	0,77	0,77	0,77	0,77
Emb. Cartonada	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
Plástico	0,98	0,91	0,91	0,91	0,91
Vidro	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Metal	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Rejeito	0,77	0,79	0,79	0,79	0,79

Uma substância é volátil quando apresenta tendência a vaporizar em certas condições de aquecimento (MCKENDRY, 2002). Nas condições avaliadas o componente vidro não é volátil, pois na amostra RP apresentou 0% de conteúdo de materiais voláteis. As outras amostras de vidro apresentaram 0,01 kg kg⁻¹ devido a sua coleta ter sido feita no aterro, onde os componentes estavam misturados, ocorrendo contaminações do vidro por matéria orgânica ou por outros materiais. E como a amostra RP foi preparada, o vidro estava limpo.

Com relação ao conteúdo de materiais voláteis das amostras da coleta 2, presentes na Tabela 8, a amostra 02 apresentou maior valor (0,81 kg kg⁻¹). O fator determinante neste resultado foi o valor de materiais voláteis da matéria orgânica presente nesta amostra, que foi de 0,70 kg kg⁻¹ (Tabela 9), valor elevado se comparado com a matéria orgânica das outras amostras, que apresentaram em média 0,54 kg kg⁻¹ de materiais voláteis, isto pode ser explicado pelas diferenças que os materiais orgânicos apresentam na sua composição, uma vez que alguns elementos, como o nitrogênio (N) e o enxofre (S), são mais susceptíveis a volatilização do que o cálcio (Ca), por exemplo (FREITAS; SANT'ANNA, 2004).

A partir do discutido, há possibilidade de obter RSD qualitativamente diferentes conforme a região de uma cidade. O que, por um lado, pode ser benéfico se os resíduos fossem selecionados, tornando o processo com menores custos, ou então, sem seleção, podendo trazer problemas nos processos de transformação energética, uma vez que seriam necessárias regulagens constantes, devido tais diferenças. Embora sejam comuns instrumentações automatizadas para tais regulagens, isso implicaria em maiores custos.

Além da matéria orgânica com $0,70 \text{ kg kg}^{-1}$ de voláteis, há outros materiais que apresentaram altos conteúdos de materiais voláteis e que contribuíram para o maior valor da amostra 02, no entanto, estes outros também são encontrados nas outras amostras. Portanto, vale ressaltar que mesmo que as amostras da coleta 2 (Tabela 8) apresentem diferenças, estas são pequenas (desvio padrão de $0,03 \text{ kg kg}^{-1}$).

Os resultados de cinzas das amostras homogeneizadas foram apresentados na Tabela 8 e a Tabela 10 traz o conteúdo médio de cinzas de cada componente das amostras de RSD.

Tabela 10 - Conteúdo médio de cinzas de cada componente das amostras de RSD das coletas 1 e 2

Componentes	RP (kg kg^{-1})	Amostra 01 (kg kg^{-1})	Amostra 02 (kg kg^{-1})	Amostra 03 (kg kg^{-1})	Amostra 04 (kg kg^{-1})
Matéria Orgânica	0,45	0,33	0,19	0,37	0,39
Papel	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13
Emb. cartonada	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Plástico	0,01	0,05	0,05	0,05	0,05
Vidro	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99
Metal	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Rejeito	0,20	0,11	0,11	0,11	0,11

As cinzas constituem a parcela não combustível dos RSU (LIMA, 1994; CASTRILLÓN et al., 2013), ou seja, o rejeito do processo de combustão (RENDEIRO et al., 2008; FEAM, 2012; CASTRILLÓN et al., 2013) composto pela fração inorgânica dos resíduos, como vidro e metal. Dessa forma, a amostra RP apresentou maior conteúdo de cinzas ($0,71 \text{ kg kg}^{-1}$), devido às maiores quantidades de frações inorgânicas presentes.

A amostra 04, assim como a 01 e a 03, da coleta 2, apresentaram maiores conteúdos de cinzas, pois possuem quantidades maiores de material inorgânico ($0,08 \text{ kg kg}^{-1}$ em média) se comparado com a amostra 02, que possui $0,02 \text{ kg kg}^{-1}$.

As cinzas influenciam no custo do processo de combustão dos RSU e no de transporte, além de contribuir para a corrosão do equipamento (GARCÍA et al., 2013). Embora, conforme a análise deste resíduo (cinzas), este pode apresentar potencial para uso como fertilizante ou ainda pode ser empregado como componente em estruturas civis.

5.6 PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)

O PCS foi realizado, em triplicata, tanto para as amostras homogeneizadas quanto para cada componente encontrado em cada amostra (Tabela 11).

Tabela 11- PCS, PCS médio, desvio padrão e coeficiente de variação das amostras homogeneizadas das coletas 1 e 2

Amostra	PCS (kJ kg ⁻¹)	PCS médio (kJ kg ⁻¹)	Desvio padrão (kJ kg ⁻¹)	Coeficiente de variação (%)
RP	14.645	18.062	2.975	16,47
	20.076			
	19.464			
01	22.320	20.317	1.776	8,74
	18.933			
	19.699			
02	20.076	21.590	3.129	14,49
	25.188			
	19.506			
03	21.223	21.224	2.502	11,79
	18.723			
	23.727			
04	19.217	19.735	489	2,48
	19.799			
	20.189			

A partir da Tabela 11, pode-se observar que as amostras das duas coletas apresentaram resultados próximos, pois possuem materiais semelhantes em sua composição.

Os valores de PCS obtidos para a amostra 02 podem ser explicado através do alto conteúdo de materiais voláteis (0,81 kg kg⁻¹) (Tabela 8), o que expressa a facilidade de combustão, e também pelo seu baixo conteúdo de cinzas, uma vez que o conteúdo de cinzas interfere no poder calorífico (LIANG et al., 2008; FEAM, 2012), pois as cinzas não contribuem no processo de combustão (FEAM, 2012). Segundo FEAM (2012), os combustíveis com maior conteúdo de voláteis e menor conteúdo de cinzas apresentam, normalmente, maior poder calorífico. Esta amostra também possui quantidade considerável de

plástico, o qual também apresenta alto PCS (LIU; PAODE; HOLSEN, 1996; OLIVEIRA; ROSA, 2003; CUCCHIELLA; D'ADAMO; GASTALDI, 2012).

A amostra 03 apresentou valor médio de PCS próximo do valor da amostra 02, pois possui grande quantidade de plástico e papel na sua composição, no entanto, essa amostra (03), assim como a 01, a 04 e a RP apresentaram maiores conteúdos de cinzas, devido à maior quantidade de material inorgânico presente, o que contribuiu para a redução de seus PCS.

Os PCS de todas as amostras analisadas estão próximos dos encontrados por Soares (2011) para o município de Nova Iguaçu/RJ, que obteve em média o valor de $18.134 \text{ kJ kg}^{-1}$. Já em países, como a Malásia, os RSU da cidade de Kuala Lumpur apresentam valor bem abaixo dos encontrados, 9.127 kJ kg^{-1} , o que se deve ao alto conteúdo de água presente ($0,55 \text{ kg kg}^{-1}$) e ao baixo conteúdo de materiais voláteis ($0,31 \text{ kg kg}^{-1}$) (KATHIRVALE et al., 2003), bem como, provavelmente devido as diferenças nas composições, nos tipos de materiais presentes nos resíduos de outros países.

As Tabelas 12, 13, 14, 15 e 16 mostram os resultados de PCS obtidos para cada componente das amostras. A Tabela 12 apresenta o PCS da amostra RP, como não foi realizada a composição gravimétrica desta amostra, foi adotada a composição gravimétrica dos resíduos domiciliares e comerciais de Ponta Grossa realizada pela PGA (2011) e demonstrada na Figura 5 do item 4.2. Os componentes: isopor, madeira, couro e borracha e panos e trapos foram considerados rejeitos para essa composição.

Tabela 12 - Cálculo do PCS médio por componente da amostra RP considerando a composição obtida pela PGA (2011)

Componente	PCS (kJ kg^{-1})	Composição (%) *	PCS do componente (kJ kg^{-1})
Matéria Orgânica	12.675	32,98	4.180
Papel	14.601	12,02	1.755
Emb. cartonada	22.157	0,00	0,00
Plástico	41.343	16,06	6.640
Vidro	0,00	4,62	0,00
Metal	0,00	4,01	0,00
Rejeito	19.764	30,31	5.990
Total		100,00	18.565

*PGA (2011)

Não foi possível realizar a análise de PCS do componente embalagem cartonada, pois poderia ocasionar danos no equipamento utilizado, portanto foi também adotado o valor teórico de $22.157 \text{ kJ kg}^{-1}$ (CEMPRE, 2000), o qual se aproxima do valor analisado por Montejo et al. (2011) que foi de $23.557 \text{ kJ kg}^{-1}$. Este valor foi utilizado no cálculo das tabelas 12, 13, 14, 15 e 16.

Tabela 13 - Cálculo do PCS médio por componente da amostra 01 considerando a composição gravimétrica desta amostra

Componente	PCS (kJ kg^{-1})	Quantidade de RSU (kg)	Composição (%)	PCS do componente (kJ kg^{-1})
Matéria Orgânica	15.995	4,20	41,00	6.558
Papel	15.740	0,73	7,00	1.102
Emb.Cartonada	22.157	0,16	2,00	443
Plástico	35.937	1,43	14,00	5.031
Vidro	0,00	0,44	4,00	0,00
Metal	0,00	0,56	6,00	0,00
Rejeito	18.461	2,66	26,00	4.800
Total		10,18	100,00	17.934

Tabela 14 - Cálculo do PCS médio por componente da amostra 02 considerando a composição gravimétrica desta amostra

Componente	PCS (kJ kg^{-1})	Quantidade de RSU (kg)	Composição (%)	PCS do componente (kJ kg^{-1})
Matéria Orgânica	17.331	3,99	49,00	8.492
Papel	15.740	0,17	2,00	315
Emb. Cartonada	22.157	0,12	2,00	443
Plástico	35.937	1,34	17,00	6.109
Vidro	0,00	0,03	0,00	0,00
Metal	0,00	0,15	2,00	0,00
Rejeito	18.461	2,29	28,00	5.169
Total		8,09	100,00	20.528

Tabela 15 - Cálculo do PCS médio por componente da amostra 03 considerando a composição gravimétrica desta amostra

Componente	PCS (kJ kg ⁻¹)	Quantidade de RSU (kg)	Composição (%)	PCS do componente (kJ kg ⁻¹)
Matéria Orgânica	14.026	3,71	48,00	6.732
Papel	15.740	0,69	9,00	1.417
Emb. Cartonada	22.157	0,16	2,00	443
Plástico	35.937	1,55	20,00	7.187
Vidro	0,00	0,34	4,00	0,00
Metal	0,00	0,22	3,00	0,00
Rejeito	18.461	1,09	14,00	2.585
Total		7,76	100,00	18.364

Tabela 16 - Cálculo do PCS médio por componente da amostra 04 considerando a composição gravimétrica desta amostra

Componente	PCS (kJ kg ⁻¹)	Quantidade de RSU (kg)	Composição (%)	PCS do componente (kJ kg ⁻¹)
Matéria Orgânica	12.806	3,37	31,00	3.970
Papel	15.740	0,25	2,00	315
Emb. Cartonada	22.157	0,22	2,00	443
Plástico	35.937	1,94	18,00	6.469
Vidro	0,00	0,53	5,00	0,00
Metal	0,00	0,07	1,00	0,00
Rejeito	18.461	4,44	41,00	7.569
Total		10,82	100,00	18.766

As diferenças entre os PCS da matéria orgânica de cada amostra (Tabelas 12, 13, 14, 15 e 16) podem ser explicadas pela sua composição variada, por exemplo, materiais orgânicos com maior proporção de ligações carbono-oxigênio e carbono-hidrogênio, em comparação com as ligações carbono-carbono, apresentam maiores valores energéticos, pois a energia contida nas primeiras (356 kJ mol⁻¹ e 415 kJ mol⁻¹, respectivamente) são maiores que a das

ligações carbono-carbono (348 kJ mol^{-1}) (BRADY; HUMISTON, 1986), no entanto, como a proporção da ligação carbono-carbono presente na matéria orgânica é maior, a contribuição total deste tipo de ligação é mais significativa.

A matéria orgânica apresentou um dos menores valores, em média $14.567 \text{ kJ kg}^{-1}$, semelhante ao componente papel, $15.512 \text{ kJ kg}^{-1}$. Enquanto que o maior valor de PCS foi obtido pelo componente plástico, em média, $37.018 \text{ kJ kg}^{-1}$. Os valores encontrados estão próximos aos referenciados (Tabela 17).

Tabela 17 - Comparação do PCS encontrado para os componentes matéria orgânica, papel e plástico com bibliografia correlata

Componentes	Autor	Komilis et al. (2012)	Montejo et al. (2011)	Menikpura; Basnayake (2009)
Matéria orgânica*	14.567	16.316	14.905	---
Papel*	15.512	14.268	14.740	15.680
Plástico*	37.018	39.350	37.785	39.150

* kJ kg^{-1}

Na Figura 15 estão apresentadas as médias entre o PCS das amostras homogeneizadas e os calculados por componentes.

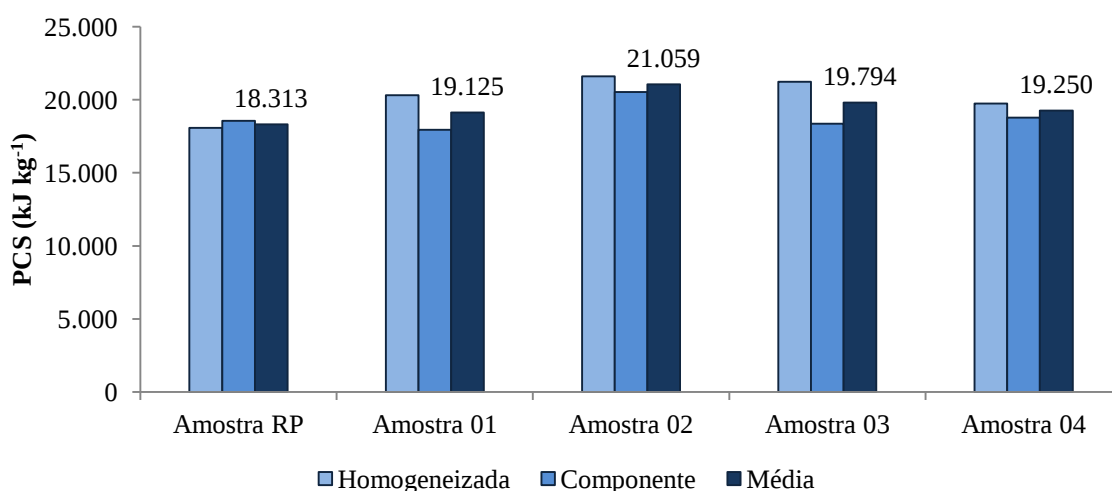


Figura 15 - Comparação entre as médias de PCS obtidas nas amostras homogeneizadas e no PCS obtido por componente

Fonte: adaptado de Soares (2011)

Os PCS das amostras da coleta 1 e 2 variaram de 18.313 a $21.059 \text{ kJ kg}^{-1}$. Como ambos os resultados foram obtidos para as amostras de RSD nas análises, é necessário

considerar que há possibilidade de encontrar RSD tanto com valores de PCS baixos quanto altos. Dessa forma, para a análise dos próximos resultados, foi utilizado o PCS da amostra RP (coleta 1), pois esta amostra apresentou menor valor se comparado com as demais amostras. E além desta, utilizou-se ainda a média das quatro amostras da coleta 2, a qual foi denominada de C2, pois correspondem a setores do município de Ponta Grossa e também por apresentarem valores mais elevados de PCS. As médias das amostras RP e das amostras da coleta 2 (C2) está apresentada na Figura 16.

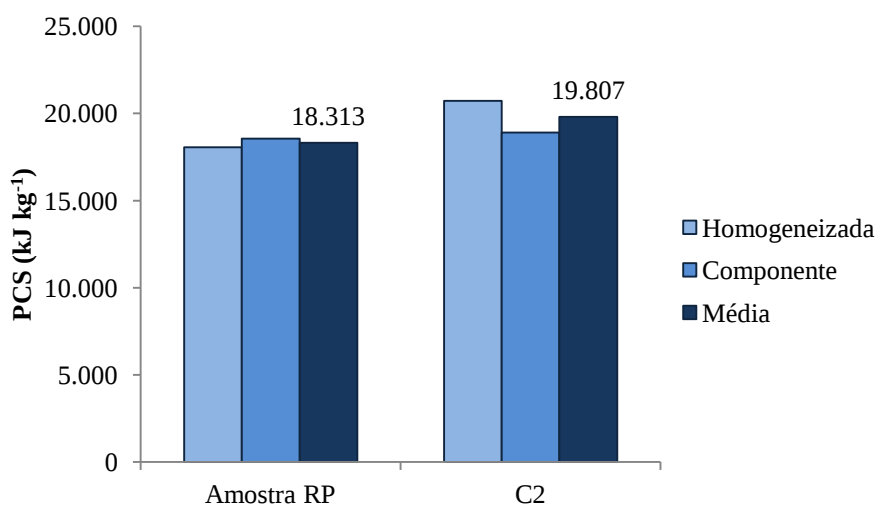


Figura 16 - Médias de PCS das amostras RP e C2

Os RSD de Ponta Grossa apresentam um alto valor de PCS quando comparado com os de outros países, como por exemplo, os da Malásia, que se situa entre 6.280 e 10.886 kJ kg⁻¹ (KATHIRVALE et al., 2003), o da Índia que é de 10.008 kJ kg⁻¹ (KUMAR; GOEL, 2009), o da China, 5.000 kJ kg⁻¹ (CHENG; HU, 2010) e o dos resíduos da região norte da Espanha que é 11.113 kJ kg⁻¹ (CASTRILLÓN et al., 2013). Vale ressaltar que alguns destes países (China e Espanha) já utilizam a energia proveniente dos RSD, dessa forma, poderia ser interessante a recuperação desta energia no município de Ponta Grossa, principalmente porque a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010a) considera a utilização destas tecnologias na gestão dos resíduos sólidos.

5.7 ESTIMATIVAS DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

Para determinar as estimativas de geração de energia foi utilizado o valor médio de PCS das amostras RP e C2, conforme mostra a Tabela 18, e ainda, foi considerada a

quantidade total de RSD coletados no município de Ponta Grossa, que segundo PGA (2013) é de 6.500.000 kg mês⁻¹.

Tabela 18 - Estimativas de recuperação de energia térmica e elétrica a partir dos RSD de Ponta Grossa

Amostras	PCS médio (kJ kg ⁻¹)	Energia total (MJ mês ⁻¹)	Energia térmica (MJ mês ⁻¹)*	Energia elétrica (MJ mês ⁻¹)**
RP	18.313	119.034.500	104.750.360	31.425.108
C2	19.807	128.745.500	113.296.040	33.988.812

*Conversão média de 88% (MCKENDRY, 2002)

**Conversão média de 30% (OLIVEIRA; ROSA, 2003; DORNBURG; FAALJ; MEULEMAN, 2006; LINO; ISMAIL, 2013)

A partir da incineração controlada dos RSD pode ser recuperada a energia térmica. Esta recuperação é bem eficiente, rendimento em torno de 88% (MCKENDRY, 2002), apresentando, assim, altos valores de energia térmica, em média 109.023.200 MJ mês⁻¹. Esta energia poderia ser aproveitada para a prévia secagem dos RSD antes da incineração ou ser utilizada pelas indústrias, próximas da região da usina, que dependem de energia térmica no seu processo. Outra possibilidade ainda seria o fornecimento de água aquecida (LIMA; GOMES; RANGEL, 2005).

A forma de energia mais interessante para transporte e culturalmente utilizada é a energia elétrica. A conversão da energia térmica em elétrica apresenta uma eficiência em torno de 30% (OLIVEIRA; ROSA, 2003; DORNBURG; FAALJ; MEULEMAN, 2006; LINO; ISMAIL, 2013). A Tabela 19 apresenta uma simulação da energia disponível para o abastecimento de residências no município de Ponta Grossa (já considerando o consumo da própria usina) e o número de residências atendidas com esta energia.

Tabela 19 – Simulação da energia elétrica recuperada a partir dos RSD de Ponta Grossa e número de residências que poderiam ser atendidas

Coletas	Energia elétrica (MJ mês ⁻¹)	Energia elétrica restante (MJ mês ⁻¹)*	Residências atendidas**	Residências atendidas (%)
RP	31.425.108	30.021.108	51.132	47
C2	33.988.812	32.584.812	55.499	51

*Considerando consumo médio da usina de incineração 1.404.000 MJ mês⁻¹ (LEMOS, 1997)

**Consumo médio por residência 587,12 MJ mês⁻¹ (COPEL, 2013)

A energia elétrica recuperada foi, em média, 32.706.960 MJ mês⁻¹. A recuperação foi baixa se comparada à energia proveniente da Hidrelétrica de Itaipu, que em 2012, produziu

um total de 353.833.660.800 MJ ano⁻¹ (ITAIPU BINACIONAL, 2012). Entretanto, se o objetivo for transformação em energia térmica e/ou elétrica, há possibilidade do estabelecimento de consórcios públicos com os municípios vizinhos a fim de aumentar a quantidade de RSD a serem incinerados. Vale ainda considerar, que a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010a) prevê o apoio e a prioridade à obtenção de recursos aos municípios que adotarem soluções consorciadas. Outra possibilidade ainda para o aumento da energia recuperada seria a utilização de combustíveis complementares, como carvão, óleo, biomassa, entre outros (CHENG et al., 2007).

Uma usina de incineração pode consumir durante o processo entre 180 a 252 MJ de energia elétrica por Mg de RSU (LEMONS, 1997). Foi adotado para este estudo o valor médio de 216 MJ Mg⁻¹. Como são coletados 6.500 Mg de RSD no município de Ponta Grossa (PGA, 2013), a usina teria um consumo de 1.404.000 MJ mês⁻¹. Dessa forma, a energia que seria disponível para abastecer as residências seria em média de 31.302.960 MJ mês⁻¹.

Segundo a COPEL (2013), são atendidas, na área urbana do município, 106.995 residências com energia elétrica e o consumo médio, entre os meses de janeiro a agosto de 2013, foi de 587,12 MJ mês⁻¹. Com esta energia recuperada, apresentada na Tabela 19, seriam atendidas 47% destas residências, a partir do PCS da amostra RP e 51%, a partir do PCS médio da coleta 2 (C2). Valores interessantes, no entanto é importante considerar que a função principal de uma usina de incineração a partir de RSU, que incluem os domiciliares e comerciais, é a do saneamento básico, tendo como sub produto a recuperação de energia (ABRELPE; PLASTIVIDA, 2012). Considerando então, a questão do saneamento básico, este processo se torna ainda mais atrativo, pois traz como outros benefícios a redução do volume dos resíduos em até 90% e do seu peso em 75% (CHENG et al., 2007; CHENG; HU, 2010; SINGH et al., 2011; ABRELPE; PLASTIVIDA, 2012), contribuindo assim para a recuperação e o aumento de vida útil do aterro controlado do Botuquara.

Além disso, quando os RSD são enviados para a usina de incineração ao invés de serem aterrados, a produção de chorume pela decomposição dos RSD é reduzida (CHENG; HU, 2010; FEAM, 2012), implicando em menor probabilidade de contaminação de solo e água (FEAM, 2012) e ainda, ocorrem reduções de emissões de poluentes (RUTH, 1998; MCCARTHY, 2004; DEMIRBAS, 2005; EPE, 2008; PSOMOPOULOS; BOURKA; THEMELIS, 2009; CHENG; HU, 2010; GREGG, 2010; ABRELPE; PLASTIVIDA, 2012; CUCCHIELLA; D'ADAMO; GASTALDI, 2012; FEAM, 2012), devido ao sistema de tratamento de gases presente nos incineradores. No entanto, vale ressaltar que este sistema é o componente com maior custo de uma usina. A redução destes poluentes traz a possibilidade

de obtenção de créditos de carbono pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), o qual objetiva auxiliar os países desenvolvidos a atingirem suas metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (EPE, 2008; FEAM, 2012).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos objetiva a gestão dos resíduos sólidos na seguinte hierarquia: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010a). Como a incineração é uma forma de tratamento e está como penúltima opção, a reciclagem deve ser considerada. Dessa forma, a recuperação de energia foi estimada sem a incineração dos materiais recicláveis, da mesma forma que Soares (2011).

A Tabela 20 demonstra a estimativa de recuperação de energia térmica e elétrica com relação aos percentuais de reciclagem. Para esta estimativa foi utilizado somente o resultado C2.

Foram selecionadas ainda as porcentagens de 0, 25, 50, 75 e 100% que se referem às eficiências da coleta seletiva e reciclagem. O valor de 0% refere-se ao cenário atual, considerando a quantidade de material reciclável encontrado na coleta 2. Considera-se 100% a máxima eficiência na reciclagem, quando não há mais material reciclável sendo enviado para o aterro e, ainda situações intermediárias de 25, 50 e 75%. Os materiais presentes nas amostras passíveis de reciclagem foram papel, embalagem cartonada, plástico, vidro e metal.

Tabela 20 - Estimativas de recuperação de energia térmica e elétrica com a implantação de níveis de reciclagem dos RSD de Ponta Grossa e número de residências que poderiam ser atendidas

Reciclagem	Energia térmica (MJ mês ⁻¹)	Energia elétrica (MJ mês ⁻¹)*	Residências atendidas**
0%	113.296.040	32.584.812	55.499
25%	97.296.814	27.785.044	47.324
50%	86.647.790	24.590.337	41.882
75%	76.002.183	21.396.655	36.443
100%	65.343.650	18.199.095	30.997

* Considerando consumo médio da usina de incineração 1.404.000 MJ mês⁻¹ (LEMOS, 1997)

** Consumo médio por residência 587,12 MJ mês⁻¹ (COPEL, 2013)

Com a implantação da reciclagem, os materiais com altos PCS (papel e plástico) são reduzidos e, portanto, a energia recuperada foi diminuindo, como mostra a Tabela 20. Resultados de redução de recuperação de energia com a implantação de reciclagem também foram obtidos por Soares (2011) e Abedini; Atwater e Fu (2012) e demonstrado por EPE

(2008). Essa redução de energia pode ocorrer de forma não proporcional, uma vez que vai depender também dos materiais restantes (os não recicláveis), os quais possuem PCS variáveis.

Se o objetivo é a recuperação de energia, a condição ideal seria a situação atual, com 0% de eficiência de reciclagem, onde os materiais com maior PCS estão presentes. É preciso considerar que nem sempre o ideal é a eficiência de reciclagem de 100%, já que muitas variáveis definem o cenário para cada região, pois em cenários de escassez de energia e com aspectos que dificultam a logística das rotas de coleta, a reciclagem pode não ser a melhor forma de tratamento para os resíduos (SOARES, 2011). Interessante ressaltar que pode haver cenários que cheguem a conclusões contrárias do comentado.

No caso brasileiro pode-se considerar que há energia disponível a partir de hidrelétricas, bem como sendo obrigatório a aplicação dos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos é necessário considerar a implantação de reciclagem com eficiência de 100%. Com esta eficiência, seriam recuperados $18.199.095 \text{ MJ kg}^{-1}$ de energia elétrica e seriam atendidas ainda 30.997 residências, 28% do total de residências do município de Ponta Grossa, havendo, portanto, a possibilidade de recuperação.

Esta possibilidade de recuperação, mesmo com 100% de reciclagem, está de acordo com Psomopoulos; Bourka e Themelis (2009) e Perkoulidis et al. (2010), que também constataram que mesmo com aumento da quantidade de materiais enviados para reciclagem, a incineração com recuperação de energia ainda seria possível.

Outro ponto relevante observado por Psomopoulos; Bourka e Themelis (2009) nos Estados Unidos, é que os lugares que utilizam a tecnologia de incineração dos RSU apresentaram aumento de 18% nas taxas de reciclagem, contrariando assim, os argumentos de que a implantação das usinas resultam em diminuição da reciclagem.

Assim, o tratamento por incineração se torna um aliado da reciclagem em um programa integrado (MENEZES; GERLACH; MENEZES, 2000; OLIVEIRA; ROSA, 2003; ABRELPE; PLASTIVIDA, 2012), sendo que, ambos, reduzem a quantidade de resíduos enviados para o aterro, estendendo assim sua vida útil (OLIVEIRA; ROSA, 2003).

Portanto, a recuperação energética após a aplicação do princípio da hierarquia na gestão dos RSU é uma importante alternativa que deve ser considerada, pois faz com que os RSU deixem de ser vistos como um problema ambiental e passem a ser considerados uma possibilidade para a geração de energia (ABRELPE; PLASTIVIDA, 2012).

6 CONCLUSÕES

A maior parte dos resíduos sólidos domiciliares (RSD) do município de Ponta Grossa é composta por matéria orgânica, aproximadamente 40%, cerca de 30% são materiais passíveis de reciclagem e os outros 30% constituem os rejeitos.

Com relação ao conteúdo de água presentes nos RSD, a amostra resíduo padrão apresentou $0,20 \text{ kg kg}^{-1}$, enquanto que para as amostras da coleta 2 este conteúdo variou de $0,33$ a $0,44 \text{ kg kg}^{-1}$. Dentre os componentes, a matéria orgânica de ambas as coletas continha o maior conteúdo de água, $0,73 \text{ kg kg}^{-1}$ em média.

As amostras de RSD apresentaram baixos valores de carbono fixo – $0,03$ a $0,09 \text{ kg kg}^{-1}$. O conteúdo de materiais voláteis das amostras da coleta 2 variou de $0,75$ a $0,81 \text{ kg kg}^{-1}$ e o de cinzas de $0,10$ a $0,18 \text{ kg kg}^{-1}$.

O PCS médio encontrado para os RSD foi de $18.313 \text{ kJ kg}^{-1}$ para a amostra resíduo padrão e variou de 19.125 a $21.059 \text{ kJ kg}^{-1}$ nas amostras da coleta 2, apresentando PCS médio de $19.807 \text{ kJ kg}^{-1}$. Assim, a partir destes PCS médios e da quantidade de RSD produzida, a energia disponível para recuperação permitiria o abastecimento de energia elétrica para 47% e 51%, respectivamente, das residências do município de Ponta Grossa.

Com a implantação de reciclagem, considerando a reciclagem com eficiência de 100%, a energia disponível seria de $18.199.095 \text{ MJ mês}^{-1}$ e ainda possibilitaria abastecer 28% das residências do município.

7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Determinar a economia de energia a partir da reciclagem dos resíduos sólidos.
- Realizar a caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares do município de Ponta Grossa considerando as possíveis variações que ocorrem no tipo de resíduo produzido conforme a estação do ano, férias e feriados festivos (páscoa, natal, entre outros).
- Avaliar o potencial energético dos resíduos sólidos domiciliares considerando estas variações, analisando também o poder calorífico inferior dos resíduos.
- Avaliar os impactos positivos e negativos da implantação do processo de incineração controlada.
- Determinar os custos do processo de incineração com recuperação de energia.
- Comparar os impactos da disposição dos resíduos sólidos domiciliares em aterros sanitários com o tratamento destes empregando a incineração controlada antes da sua disposição nos aterros.
- Avaliar a aplicação da tecnologia de incineração para os rejeitos da coleta seletiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. *Reciclagem no Brasil*. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/sustentabilidade/reciclagem/reciclagem-no-brasil/>>. Acesso em 15 jan. 2014.

ABEDINI, A. R.; ATWATER, J. W.; FU, G. Y. Effect of recycling activities on the heating value of solid waste: case study of the Greater Vancouver Regional District (Metro Vancouver). *Waste Management & Research*, v. 30, n. 8, p. 839-848, 2012.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 8633: Carvão Vegetal, determinação do poder calorífico – método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 8112: Carvão Vegetal – análise imediata*. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 11175: Incineração de resíduos sólidos perigosos – Padrões de desempenho*. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, 2004a.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10007: Amostragem de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro, 2004b.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama de resíduos sólidos no Brasil*. São Paulo, 2011. 184 p.

ABRELPE; PLASTIVIDA. *Resíduos sólidos urbanos, recuperação energética*. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza pública e Resíduos Especiais; Instituto Sócio-Ambiental dos Plásticos. Caderno Informativo, Comitê de Valorização energética, 2012.

ABREU, F. V. de. *Análise de viabilidade técnica e econômica da geração de energia através do biogás de lixo em aterros sanitários*. 2009. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ALKAN, C.; DUMANLI, A. G.; ARAS, L. Sulfonation degree determination of polystyrene ionomers by using adiabatic bomb calorimeter. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 100, p. 4684–4688, 2006.

AL-KHATIB, I. A.; ARAFAT, H. A.; BASHEER, T.; SHAWAHNEH, H.; SALAHAT, A.; EID, J.; ALI, W. Trends and problems of solid waste management in developing countries: A case study in seven Palestinian districts. *Waste Management*, v. 27, p. 1910–1919, 2007.

ALVIM FERRAZ, M. C. M.; AFONSO, S. A. V. Dioxin emission factors for the incineration of different medical waste types. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 44, p. 460–466, 2003.

ALMEIDA, L. *Ponta Grossa está no topo da reciclagem no Paraná*. Diário dos Campos, novembro de 2011. Disponível em: <<http://www.diariodosc Campos.com.br/cidades/ponta-grossa-esta-no-topo-da-reciclagem-no-parana-50866/>>. Acesso em 26 fev. 2013.

AMORIM, V. P. *Resíduos sólidos urbanos – O problema e a solução*. Roteiro Editorial, Brasília – DF, 1996.

ATWATER, W. O.; SNELL, J. F. Description of a bomb-calorimeter and method of its use. *American Chemical Society*, v. 25, n. 7, julho, 1903.

BARROS, S. V. dos S.; NASCIMENTO, C. C. do; AZEVEDO, C. P. de. Caracterização tecnológica da madeira de três espécies florestais cultivadas no amazonas: alternativa para produção de lenha. *Floresta*, v. 42, n. 4, p. 725 - 732, 2012.

BORGES, F. *Caracterização e estudo da potencialidade de lodos de efluentes doméstico e industrial como combustível na geração de energia*. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos), Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2008.

BRADY, J. E.; HUMISTON, G. E. *Química geral*. 2. ed. v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 1986. 300 p.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. *Resolução nº 316/02*. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. 29 out. 2002.

BRASIL. Ministério das cidades. *Informe analítico da situação da gestão municipal de resíduos sólidos no Brasil – 2002*. Setembro, 2003.

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. *Lei nº 11.445*, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências.

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. *Lei nº 12.305*, de 02 de agosto de 2010a. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. *Decreto nº 7.404*, de 23 de dezembro de 2010b. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o

Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.

CASTRILLÓN, L.; FERNÁNDEZ-NAVA, Y.; GONZÁLEZ, A.; MARAÑÓN, E. A case study of the characteristics of municipal solid waste in Asturias (Spain): influence of season and source. *Waste Management & Research*, v. 31, n. 4, p. 428–431, 2013.

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem. *Embalagem Cartonada - Longa Vida - O mercado para reciclagem*. 2000. Disponível em: <<http://www.ecologia.dbi.ufla.br/site%20ecoaplicada/reciclagem/Embalagem%20Cartonada.doc>>. Acesso em 17 dez. 2013.

CHENG, H.; HU, Y. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. *Bioresource Technology*, v. 101, p. 3816–3824, 2010.

CHENG, H.; ZHANG, Y.; MENG, A.; LI, Q. Municipal solid waste fueled power generation in China: a case study of waste-to-energy in Changchun city. *Environmental Science & Technology*, v., 41, n., 21, 2007.

COPEL - Companhia Paranaense de Energia Elétrica. *Dados de mercado, regulação e comercialização de energia do município de Ponta Grossa*. Departamento de Mercado, Regulação e Comercialização de Energia, Curitiba-PR, 2013.

CORREA, C. R. S.; ABRAHÃO, C. E. C.; CARPINTERO, M. do C. C.; ANARUMA FILHO, F. O aterro sanitário como fator de risco para doenças respiratórias em crianças. *Jornal de Pediatria*, v. 87, n. 4, p. 319-324, 2011.

CRES - Coordenadoria de Resíduos Sólidos. *Kit resíduos*. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA), Curitiba, 2006.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M. Municipal waste management and energy recovery in an Italian region. *Waste Management & Research*, v. 30, n. 12, p. 1290-1298, 2012.

DEMIRBAS, A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 31, p. 171–192, 2005.

DENT, C. G.; KROL, A. A. Municipal solid waste conversion to energy. *Biomass*, v. 22, p. 307-327, 1990.

DORNBURG, V.; FAAIJ, A. P. C.; MEULEMAN, B. Optimising waste treatment systems Part A: Methodology and technological data for optimising energy production and economic performance. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 49, p. 68–88, 2006.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Avaliação preliminar do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande, MS*. Nota técnica DEN 06/08, Rio de Janeiro, 2008.

ETHOS – INSTITUTO ETHOS DE EMPRESAS E RESPONSABILIDADE SOCIAL. *Política Nacional de Resíduos Sólidos: desafios e oportunidades para as empresas*. São Paulo: ETHOS, 2012.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica*. 2. ed. Belo Horizonte: FEAM, 2010. 294 p.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais / Fundação Estadual do Meio Ambiente*. Belo Horizonte: FEAM, 2012, 163 p.

FISCHER, C. *Municipal waste management in Germany*. European Environment Agency, Germany, 2013.

FLORIANI, S. L. *Potencial de resíduos sólidos industriais como fonte de energia e avaliação das emissões gasosas em combustor em escala piloto*. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

FRANÇA, R. G.; RUARO, E. C. R. Diagnóstico da disposição final dos resíduos sólidos urbanos na região da Associação dos Municípios do Alto Irani (AMAI), Santa Catarina. *Ciência e saúde coletiva*, v. 14, n. 6, 2009.

FREITAS, L. C. de; SANT'ANNA, G. L. Efeitos do fogo nos ecossistemas florestais. *Revista da Madeira*, n. 79, 2004.

FREY, H-H.; PETERS, B.; HUNSINGER, H.; VEHLLOW, J. Characterization of municipal solid waste combustion in a grate furnace. *Waste Management*, v. 23, p. 689–701, 2003.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. Biomass proximate analysis using thermogravimetry. *Bioresource Technology*, v. 139, p. 1-4, 2013.

GIRARDI, G. *Geração de lixo cresce apesar de nova lei*. 2012. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/vidae,geracao-de-lixo-cresce-apesar-de-nova-lei,869913,0.htm>>. Acesso em 02 out. 2013

GOMES, J. M. *O cortejo aos 190 anos*. 2013. Disponível em: <<http://jmnews.com.br/noticias/espaco%20publico/42,38574,19,09,o-cortejo-aos-190-anos.shtml>>. Acesso em 30 jan. 2014.

GONÇALVES, A. *Para cada lixo, um destino*. 2012. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/vidaecidadania/meio-ambiente/conteudo.phtml?id=1260943&tit=Para-cada-lixo-um-destino>>. Acesso em 23 jan. 2014.

GREGG, J. S. National and regional generation of municipal residue biomass and the future potential for waste-to-energy implementation. *Biomass and bioenergy*, v. 34, p. 379 – 388, 2010.

HENRIQUES, R. M. *Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica*. 2004. 190 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

HENRIQUES, R. M.; OLIVEIRA, L. B.; COSTA, A. O. Geração de energia com resíduos sólidos urbanos: análise custo benefício. In: ENCONTRO NACIONAL DA ECOECO, 5., 2003, Caxias do Sul/Rio Grande do Sul. *Anais...* Caxias do Sul, 2003.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. *Energia e meio ambiente*. 3 ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa nacional de saneamento básico 2000*. Rio de Janeiro, 2002.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo demográfico 2010*. Rio de Janeiro, 2010a.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa nacional de saneamento básico 2008*. Rio de Janeiro, 2010b.

IPT/CEMPRE – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo /Compromisso Empresarial para Reciclagem, 2000. *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. 2 ed. São Paulo. 2000.

ITAIPU BINACIONAL. *Geração*. 2012. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>>. Acesso em 26 dez. 2013.

JUCÁ, J. F. T. Destinação final dos resíduos sólidos no Brasil: situação atual e perspectivas. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 10., 2002, Braga/Portugal. *Anais...* Braga, 2002.

JUNKES, M. B. *Procedimentos para aproveitamento de resíduos sólidos urbanos em municípios de pequeno porte*. 2002. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

KAPLAN, P. O.; DECAROLIS, J.; THORNELOE, S. Is it better to burn or bury waste for clean electricity generation? *Environmental Science & Technology*, v. 43, n. 6, 2009.

KATHIRVALE, S.; YUNUS, M. N. M.; SOPIAN, K.; SAMSUDDIN, A. H. Energy potential from municipal solid waste in Malaysia. *Renewable Energy*, v. 29, p. 559–567, 2003.

KLASS, D. L. *Biomass for renewable energy, fuels and chemicals*. San Diego, CA: Academic Press, 1998.

KOMILIS, D.; EVANGELOU, A.; GIANNAKIS, G.; LYMPERIS, C. Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. *Waste Management*, v. 32, p. 372–381, 2012.

KUMAR, K. N.; GOEL, S. Characterization of Municipal Solid Waste (MSW) and a proposed management plan for Kharagpur, West Bengal, India. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 53, p. 166–174, 2009.

LEMOS, L. T. de. Incineração de resíduos sólidos urbanos: qual a melhor opção de aproveitamento energético? *Millenium*, n. 7. 1997. Disponível em: <http://www.ipv.pt/millenium/ect7_ltl1.htm>. Acesso em 08 jan. 2014.

LIANG, L.; SUN, R.; FEI, J.; WU, S.; LIU, X.; DAI, K.; YAO, N. Experimental study on effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 7238–7246, 2008.

LIMA, A. X. *Estudo de viabilidade técnico-econômica de uma usina de incineração de resíduos sólidos urbanos no ABCD*. 1994. 150 f. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

LIMA, R.; GOMES, H.; RANGEL, N. O tratamento dos resíduos sólidos urbanos no Japão. *Indústria e ambiente*, n. 37, 2005.

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Alternative treatments for the municipal solid waste and domestic sewage in Campinas, Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 81, p. 24–30, 2013.

LIU, J-I.; PAODE, R. D.; HOLSEN, T. M. Modeling the energy content of municipal solid waste using multiple regression analysis. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 46, n. 7, 650–656, 1996.

LOLLO, J. A. de; GEBARA, D. Tecnologia de baixo custo para caracterização de áreas destinadas à disposição de resíduo sólido urbano em pequenos municípios. *Holos Environment*, v. 1, n.2, p. 127–140, 2001.

MARANHO, A. da S. *Potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos para Bauru e região*. 2008. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2008.

MATIAS, D. N.; COSTA, W. Estudo químico de alguns pontos do solo superficial do aterro controlado do Botuquara. *Ambiência*, v. 8, n. 1, p. 85 – 99, 2012.

MATOS, T. F. L. *Diagnóstico dos resíduos poliméricos presentes nos resíduos sólidos domiciliares gerados em São Carlos/SP*. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MCCARTHY, T. Waste incineration and the community - the Amsterdam experience. *Waste Management World*, 2004. Disponível em: <<http://www.waste-management-world.com/articles/2004/09/waste-incineration-and-the-community.html>>. Acesso em 09 jan. 2014.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, v. 83, p. 37-46, 2002.

MELO, L. A. de; SAUTTER, K. D.; JANISSEK, P. R. Estudo de cenários para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos de Curitiba. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, n. 4, 2009.

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A. Estágio Atual da Incineração no Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA, 7., 2000, Curitiba. *Anais...*Curitiba, 2000.

MENIKPURA, S. N. M.; BASNAYAKE, B. F. A. New applications of ‘Hess Law’ and comparisons with models for determining calorific values of municipal solid wastes in the Sri Lankan context. *Renewable Energy*, v. 34, p. 1587-1594, 2009.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. *Plano nacional de resíduos sólidos*. Versão preliminar para consulta pública. Brasília, setembro de 2011. 102 p.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. *Inventário Nacional de fontes e estimativa de emissões de dioxinas e furanos: Brasil POPs: Plano Nacional de Implementação Convenção de Estocolmo*. Brasília, 2013. 188 p.

MONTEIRO, J. H. P.; ZVEIBIL, V. Z. *Gestão integrada de resíduos sólidos - manual de gerenciamento de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM), 2001.

MONTEJO, C.; COSTA, C.; RAMOS, P.; MÁRQUEZ, M. C. Analysis and comparison of municipal solid waste and reject fraction as fuels for incineration plants. *Applied Thermal Engineering*, v. 31, p. 2135-2140, 2011.

MUNIZ, A. R. C. *Otimização da operação de um reator de pirólise de resíduos sólidos industriais*. 2004. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, março de 2004.

NASCIMENTO, E. *Espaço e desigualdades: mapeamento e análise da dinâmica de exclusão/inclusão social na cidade de Ponta Grossa (PR)*. 2008. 173 f. Dissertação (Mestrado em Gestão do Território), Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2008.

NIE, Y. Development and prospects of municipal solid waste (MSW) incineration in China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, v. 2, n. 1, p. 1-7, 2008.

NRE – Núcleo Regional de Educação. *Municípios de abrangência*. Disponível em: <[http://www.nre.seed.pr.gov.br/pontagrossa/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=38#Ponta Grossa](http://www.nre.seed.pr.gov.br/pontagrossa/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=38#Ponta%20Grossa)>. Acesso em 27 nov. 2012.

NÚÑEZ-REGUEIRA, L.; AÑÓN, J. A. R.; CASTIÑEIRAS, J. P. *Calorific values and flammability of forest species in Galicia coastal and hillside zones*. *Bioresource Technology*, v. 57, p. 283-289, 1996.

OFORI-BOATENG, C.; LEE, K. T.; MENSAH, M. The prospects of electricity generation from municipal solid waste (MSW) in Ghana: A better waste management option. *Fuel Processing Technology*, v. 110, p. 94–102, 2013.

OLIVEIRA, N. A. da S. *A percepção dos resíduos sólidos (lixo) de origem domiciliar, no bairro Cajuru-Curitiba-PR: um olhar reflexivo a partir da educação ambiental*. 2006. 160 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

OLIVEIRA, L. B.; ROSA, L. P. Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits. *Energy Policy*, v. 31, p.1481–1491, 2003.

PAVESI, T. *Avaliação de indicadores biológicos de exposição para As, Be, Cd, Hg, Ni e Pb em trabalhadores de incineradores de resíduos de serviços de saúde*. 2006. 208 f. Dissertação (Mestrado em Química Analítica), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PERKOULIDIS, G.; PAPAGEORGIOU, A.; KARAGIANNIDIS, A.; KALOGIROU, S. Integrated assessment of a new waste-to-energy facility in Central Greece in the context of regional perspectives. *Waste Management*, v. 30, p. 1395-1406, 2010.

PGA – Ponta Grossa Ambiental. *Informações sobre a composição gravimétrica dos resíduos*. Ponta Grossa, agosto de 2011.

PGA – Ponta Grossa Ambiental. *Informações sobre a quantidade de resíduos coletados*. Ponta Grossa, 2013.

POLETTTO FILHO, J. A. *Viabilidade energética e econômica da incineração de resíduo sólido urbano considerando a segregação para reciclagem*. 2008. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2008.

POLETTTO, J. A.; SILVA, C. L. Influência da separação de resíduos sólidos urbanos para fins de reciclagem no processo de incineração com geração de energia. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA, 8., 2007, Cusco. *Anais...* Cusco, 2007.

PONTA GROSSA – Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. *Plano diretor participativo Município de Ponta Grossa*. 2006. Disponível em: <http://geo.pontagrossa.pr.gov.br/portal/plano_diretor>. Acesso em 22 nov. 2012.

PSOMOPOULOS, C. S.; BOURKA, A.; THEMELIS, N. J. Waste-to-energy: a review of the status and benefits in USA. *Waste Management*, v. 29, p. 1718-1724, 2009.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; BRASIL, A. C. de M.; et al. *Combustão e gasificação de biomassa sólida. Soluções energéticas para a Amazônia*. 1 ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 192p.

RIBEIRO, S. G. *Geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos - usinas “waste-to-energy” (WTE)*. Waste-to-Energy Research and Technology Council (WTER), Brasil, 2010.

RIGATO, P. C. *Estudo da composição da alimentação de um incinerador rotativo de resíduos visando aumento da capacidade operacional*. 2008. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos), Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, 2008.

RODRIGUES, R. C. *Métodos de análises bromatológicas de alimentos: métodos físicos, químicos e bromatológicos*. Documento 306, 177p. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010.

RUTH, L. A. Energy from municipal solid waste: a comparison with coal combustion technology. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 24, p. 545-564, 1998.

SABIÁ, R. J.; DUARTE, P. H. G.; MARTINS, M. da C. B.; JÚNIOR, F. T. A. Estudo da geração de energia a partir dos resíduos sólidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande/Mato Grosso do Sul. *Anais...* Campo Grande, 2005.

SATO, C. E. *Viabilidade de projetos de MDL para geração de energia em aterros sanitários – Estudo de caso no município de Itajubá – MG*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Energia), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

SCHECTER, A.; BIRNBAUM, L.; RYAN, J. J.; CONSTABLE, J. D. Dioxins: An overview. *Environmental Research*, v. 101, p. 419–428, 2006.

SCHUHMACHER, M.; DOMINGO, J. L.; AGRAMUNT, M. C.; BOCIO, A.; MÜLLER, L. Biological monitoring of metals and organic substances in hazardous-waste incineration workers. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, v. 75, p. 500-506, 2002.

SEMIAUTOMATED bomb calorimeter. *Analytical Chemistry*, v. 66, n. 17, 1994.

SILVA, J. de O. *Caracterização do potencial energético e estudo físico-químico do lodo da estação de tratamento de esgoto do DMAE-Uberlândia-MG*. 66 f. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SIMONETTO, E. de O.; BORENSTEIN, D. A decision support system for the operational planning of solid waste collection. *Waste Management*, v. 27, p. 1286–1297, 2007.

SINGH, R. P.; TYAGI, V. V.; ALLEN, T.; IBRAHIM, M. H.; KOTHARI, R. An overview for exploring the possibilities of energy generation from municipal solid waste (MSW) in Indian scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 4797-4808, 2011.

SISINNO, C. L. S. Disposição em aterros controlados de resíduos sólidos industriais não-inertes: avaliação dos componentes tóxicos e implicações para o ambiente e para a saúde humana. *Caderno de Saúde Pública*, v. 19, n. 2, 2003.

SMCT - Secretaria Municipal de Cultura e Turismo. *A cidade*. Disponível em: <<http://www.pontagrossa.pr.gov.br/acidade>>. Acesso em 22 nov. 2012.

SOARES, E. L. de S. F. *Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos*. 133 f. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

STANMORE, B. R. Modeling the formation of PCDD/F in solid waste incinerators. *Chemosphere*, v. 47, p. 565–573, 2002.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F.; WILLIAMS, M. E. Introduction. In: TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. *Handbook of solid waste management*. 2. ed. New York: Mcgraw-hill, Cap. 1, p. 1.1-1.27, 2002.

TEIXEIRA, A. C. Lixo ou rejeitos reaproveitáveis? *Eco 21*, ano XIV, ed. 87, fevereiro 2004.

U.S.EPA - United State Environmental Protection Agency. *Municipal solid waste in the United States: 2009 facts and figures*. December, 2010.

VALBERG, P. A.; DRIVAS, P. J.; MCCARTHY, S.; WATSON, A. Y. Evaluating the health impacts of incinerator emissions. *Journal of Hazardous Materials*, v. 47, p. 205-227, 1996.

VALE, A. T. do; MENDES, R. M.; AMORIM, M. R. S.; DANTAS, V. F. de S. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). *Cerne*, v. 17, n. 2, p. 267-273, 2011.

VIRMOND, V. *Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia*. 2007. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

VLASSOV, D. *Fundamentos da combustão*. 2008. Disponível em: <<http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/motores/downloads/FUNDAMENTOS%20DA%20COMBUSTÃO.pdf>>. Acesso em 06 fev. 2013.

YANG, Y. B.; RYU, C.; KHOR, A.; YATES, N. E.; SHARIFI, V. N.; SWITENBANK, J. Effect of fuel properties on biomass combustion. Part II. Modelling approach—identification of the controlling factors. *Fuel*, v. 84, p. 2116 – 2130, 2005.

ZANTA, V. M.; FERREIRA, C. F. A. Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos. In: CASTILHOS JÚNIOR, A. B. (Coord.). *Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades*. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

ZHANG, D-Q.; HE, P-J.; SHAO, L-M. Potential gases emissions from the combustion of municipal solid waste by bio-drying. *Journal of Hazardous Materials*, v. 168, p. 1497–1503, 2009.

ZHANG, D. Q.; TAN, S. K.; GERSBERG, R. M. Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges. *Journal of Environmental Management*, v. 91, p. 1623-1633, 2010.

APÊNDICE A – Resumo de métodos e resultados encontrados para as diferentes variáveis

Tabela 1 - Amostragem e resultados, tipos de materiais encontrados e a frequência, da Coleta 1 (Resíduo Padrão - RP)

MÉTODO	RESULTADOS		
	Componentes	Materiais encontrados	Frequência
- Coleta de resíduos domiciliares diretamente nos setores do município de Ponta Grossa; - 50% do total de setores - 0,03 m ³ de cada bairro; - análise qualitativa.	Matéria orgânica	Verduras	54
		Legumes	18
		Frutas	46
		Outros	39
	Papel	Papel	79
		Papelão	75
	Emb. Cartonada	Caixa de leite	18
	Plástico	PET	64
		PP	43
		OS	96
		PP	32
		BOPP	100
		PEBD	32
		PEAD	11
		Outros	71
	Vidro	Garrafa	21
	Metal	Alumínio	25
		Aço	32
	Rejeitos	Cigarro	14
		Cotonete	25
		Esponja	32
		Esponja de aço	29
		Guardanapo	46
		Tecido	29

Tabela 2 - Amostragem e resultados da Coleta 2

ANÁLISE	NORMA	MÉTODO	RESULTADOS				
			Quantidade	Amostra 01 (kg)	Amostra 02 (kg)	Amostra 03 (kg)	Amostra 04 (kg)
Quarteamento	NBR 10007 (ABNT, 2004b)	- Selecionados quatro caminhões de quatro setores diferentes; - descarregaram os resíduos formando pilhas; - coletou-se quatro amostras (0,1 m ³ cada) de cada pilha; - resíduos foram pesados; - homogeneizados; - quarteamento.	Coletada	28,80	28,90	29,80	31,90
			Após quarteamento	10,18	8,09	7,76	10,82
			Componentes	Amostra 01 (kg kg ⁻¹)	Amostra 02 (kg kg ⁻¹)	Amostra 03 (kg kg ⁻¹)	Amostra 04 (kg kg ⁻¹)
Composição gravimétrica	---	- Separação dos resíduos em frações; - pesados.	Matéria orgânica	0,41	0,49	0,48	0,31
			Recicláveis				
			Papel	0,07	0,02	0,09	0,02
			Emb. Cartonada	0,02	0,02	0,02	0,02
			Plástico	0,14	0,17	0,20	0,18
			Vidro	0,04	0,00	0,04	0,05
			Metal	0,06	0,02	0,03	0,01
			Rejeitos	0,26	0,28	0,14	0,41

Tabela 3 - Análise do conteúdo de água das amostras homogeneizadas e por componentes da coleta 1 e 2

NORMA	MÉTODO	RESULTADOS					
NBR 8112 (ABNT, 1986)	- Amostras foram pesadas (70g - matéria orgânica e 3g – demais); - mantidas na estufa a 105° C, por 48h; - retiradas e pesadas novamente.	Amostras homogeneizadas	Amostra 01 (kg kg ⁻¹)	Amostra 02 (kg kg ⁻¹)	Amostra 03 (kg kg ⁻¹)	Amostra 04 (kg kg ⁻¹)	Amostra RP (kg kg ⁻¹)
			0,36	0,44	0,40	0,33	0,20
		Componentes	Amostra 01 (kg kg ⁻¹)	Amostra 02 (kg kg ⁻¹)	Amostra 03 (kg kg ⁻¹)	Amostra 04 (kg kg ⁻¹)	Amostra RP (kg kg ⁻¹)
		Matéria orgânica	0,74	0,79	0,76	0,70	0,67
		Papel	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09
		Emb. Cartonada	0,09	0,09	0,09	0,09	0,07
		Plástico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		Vidro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Metal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Rejeitos	0,24	0,24	0,24	0,24	0,16

Tabela 4 - Análise do conteúdo de materiais voláteis das amostras homogeneizadas e por componentes da coleta 1 e 2

NORMA	MÉTODO	RESULTADOS					
NBR 8112 (ABNT, 1986)	- 3 g de amostra; - foram colocadas em uma mufla previamente aquecida a 900° C; - retiradas depois de 7 minutos; - pesadas.	Amostras homogeneizadas	Amostra 01 (kg kg ⁻¹)	Amostra 02 (kg kg ⁻¹)	Amostra 03 (kg kg ⁻¹)	Amostra 04 (kg kg ⁻¹)	Amostra RP (kg kg ⁻¹)
			0,76	0,81	0,76	0,75	0,25
		Componentes	Amostra 01 (kg kg ⁻¹)	Amostra 02 (kg kg ⁻¹)	Amostra 03 (kg kg ⁻¹)	Amostra 04 (kg kg ⁻¹)	Amostra RP (kg kg ⁻¹)
		Matéria orgânica	0,56	0,70	0,53	0,53	0,55
		Papel	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76
		Emb. Cartonada	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
		Plástico	0,91	0,91	0,91	0,91	0,98
		Vidro	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
		Metal	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		Rejeitos	0,79	0,79	0,79	0,79	0,77

Tabela 5 – Análise do conteúdo de cinzas das amostras homogeneizadas e por componentes da coleta 1 e 2

NORMA	MÉTODO	RESULTADOS					
NBR 8112 (ABNT, 1986)	- mesmas amostras foram colocadas em outra mufla previamente aquecida (700° C); - mantidas por 7h; - pesadas novamente.	Amostras homogeneizadas	Amostra 01 (kg kg ⁻¹)	Amostra 02 (kg kg ⁻¹)	Amostra 03 (kg kg ⁻¹)	Amostra 04 (kg kg ⁻¹)	Amostra RP (kg kg ⁻¹)
			0,17	0,10	0,17	0,18	0,71
		Componentes	Amostra 01 (kg kg ⁻¹)	Amostra 02 (kg kg ⁻¹)	Amostra 03 (kg kg ⁻¹)	Amostra 04 (kg kg ⁻¹)	Amostra RP (kg kg ⁻¹)
		Matéria orgânica	0,33	0,19	0,37	0,39	0,45
		Papel	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12
		Emb. Cartonada	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
		Plástico	0,05	0,05	0,05	0,05	0,01
		Vidro	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00
		Metal	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
		Rejeitos	0,11	0,11	0,11	0,11	0,20

Tabela 6 - Análise do conteúdo de carbono fixo das amostras homogeneizadas e por componentes da coleta 1 e 2

NORMA	MÉTODO	RESULTADOS					
NBR 8112 (ABNT, 1986)	- medida indireta; - calculado com base no conteúdo de cinzas e de materiais voláteis.	Amostra homogeneizada	Amostra 01 (kg kg ⁻¹)	Amostra 02 (kg kg ⁻¹)	Amostra 03 (kg kg ⁻¹)	Amostra 04 (kg kg ⁻¹)	Amostra RP (kg kg ⁻¹)
			0,07	0,09	0,06	0,08	0,03
		Componentes	Amostra 01 (kg kg ⁻¹)	Amostra 02 (kg kg ⁻¹)	Amostra 03 (kg kg ⁻¹)	Amostra 04 (kg kg ⁻¹)	Amostra RP (kg kg ⁻¹)
		Matéria orgânica	0,10	0,11	0,10	0,09	0,00
		Papel	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11
		Emb. Cartonada	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11
		Plástico	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02
		Vidro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Metal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Rejeitos	0,10	0,10	0,10	0,10	0,03

Tabela 7 - Análise do poder calorífico superior (PCS) das amostras homogeneizadas e por componentes da coleta 1 e 2

NORMA	MÉTODO	RESULTADOS					
NBR 8633 (ABNT, 1984)	- 0,4 g de cada amostra; - colocada no reator do calorímetro.	Amostras homogeneizadas	Amostra 01 (kJ kg ⁻¹)	Amostra 02 (kJ kg ⁻¹)	Amostra 03 (kJ kg ⁻¹)	Amostra 04 (kJ kg ⁻¹)	Amostra RP (kJ kg ⁻¹)
			20.317	21.590	21.224	19.735	18.062
		Componentes	Amostra 01 (kJ kg ⁻¹)	Amostra 02 (kJ kg ⁻¹)	Amostra 03 (kJ kg ⁻¹)	Amostra 04 (kJ kg ⁻¹)	Amostra RP (kJ kg ⁻¹)
		Matéria orgânica	15.995	17.331	14.026	12.806	12.675
		Papel	15.740	15.740	15.740	15.740	14.601
		Emb. Cartonada	--	--	--	--	--
		Plástico	35.937	35.937	35.937	35.937	41.343
		Vidro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Metal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Rejeitos	18.461	18.461	18.461	18.461	19.764