

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

DANIEL MOLINA RECCO

ESTUDO DA VIABILIDADE DE ALTERNATIVAS AO
ATERRO SANITÁRIO E APROVEITAMENTO DA MATÉRIA
ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES

São Carlos/SP
2014

DANIEL MOLINA RECCO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE ALTERNATIVAS AO
ATERRO SANITÁRIO E APROVEITAMENTO DA MATÉRIA
ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES**

Trabalho de Graduação apresentado a
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Engenheiro
Ambiental

Orientador:
Prof. Dr. Valdir Schalch

São Carlos/SP
2014

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial
deste trabalho, por qualquer meio convencional ou
eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que
citada a fonte

R295e

Recco, Daniel Molina

Estudo da viabilidade de alternativas ao aterro
sanitário e aproveitamento da matéria orgânica dos
resíduos sólidos domiciliares / Daniel Molina Recco;
orientador Valdir Schalch. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2014.

1. Resíduos Sólidos Domiciliares. 2. Fração
Orgânica. 3. Tratamento. 4. Reaproveitamento
Energético. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Daniel Molina Recco**

Data da Defesa: 22/08/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Valdir Schalch (Orientador(a))

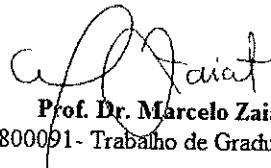
Aprovado

Nivaldo Aparecido Correia

Aprovado

Rodrigo Eduardo Córdoba

APROVADO



Prof. Dr. Marcelo Zaiat
Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, como sempre, gostaria de agradecer à minha família, por ter me dado sempre todo o apoio em todos os momentos e em todas minhas decisões. Além de todo o auxílio prestado, sempre cheio de carinho, e todo o conforto proporcionado em minha vida.

É importante também sempre agradecer aos amigos que fiz no curso de Engenharia Ambiental e em São Carlos como um todo, já que longe da família biológica foram eles que construíram o dia-a-dia cheio de alegrias e companheirismo.

A todo o pessoal que conheci e trabalhei junto no Grupo de Som e no CAASO, que tornaram todo o processo universitário mais divertido e completo, sendo importante para o meu crescimento e maturidade pessoal. Além de me mostrar que trabalhar a noite inteira pode ser a melhor coisa que te acontece em algumas semanas.

Queria também agradecer à Presidenta por ter criado o programa de intercâmbio Ciência sem Fronteiras, onde pude conhecer pessoas e lugares maravilhosos, além de ter toda a experiência acadêmica e pessoal de se exterior. Esse agradecimento se estende à todos os amigos que conheci lá, especialmente ao pessoal da Boeimeersingel, que encararam comigo o gélido inverno e o chuvoso verão, dia-a-dia.

Ao pessoal que me adotaram e me fizeram ter um segundo lar, primeiramente à Repeize, pelas linguiçadas, CQCs e videogames e também, especialmente, ao pessoal da República 33, que me proveram de uma convivência sensacional, um jardim maravilhoso e só comidas gostosas.

Esse agradecimento também vai ao pessoal da Vetiver Consultoria, que me mostraram que o ambiente de trabalho pode ser sério e divertido ao mesmo tempo, além de prover todo o conhecimento e experiência necessário. Também à ERM, com uma parceria que com certeza será de sucesso e duradoura.

À Universidade de São Paulo, à Escola de Engenharia de São Carlos e a todos os professores que tive contato, especialmente ao Valdir Schalch, já que pude aprender muito durante todo o período universitário e também me apaixonar e odiar tanto a escolha dessa formação.

E, obviamente, um agradecimento especial à Ju, que esteve do meu lado durante todo o meu processo de amadurecimento, que me apoiou em todos os movimentos e decisões, viveu comigo os melhores momentos e me ajudou sempre que precisei.

Obrigado!

*Vou mostrando como sou, e vou sendo como posso
Jogando meu corpo no mundo
Andando por todos os cantos e pela lei natural dos encontros
Eu deixo e recebo um tanto e passo aos olhos nus
Ou vestidos de luneta.
Passado
Presente
Participo sendo o mistério do planeta*

Novos Baianos, 1972

RESUMO

RECCO, D.M. Estudo da viabilidade de alternativas ao aterro sanitário e aproveitamento da matéria orgânica dos resíduos sólidos domiciliares. 2014. 88p. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

Visto a grande quantidade de resíduos sólidos gerados nos municípios, um tratamento da matéria orgânica se faz necessário, já que o material inerte geralmente é reciclado. A proibição da disposição final em aterros sanitários e uma legislação, como a Política Nacional do Meio Ambiente, que cria diversos incentivos políticos ao uso de tecnologias de recuperação energética e compostagem dos resíduos orgânicos. A partir de uma caracterização dos resíduos sólidos domiciliares, pode-se afirmar que o Brasil tem uma produção muito alta de restos orgânicos, e muita energia e produtos de valor comercial são desperdiçados com a disposição final em aterros sanitários. Para isso, foram estudadas sete alternativas diferentes para o tratamento da matéria orgânica, sendo elas a compostagem aeróbia; a biometanização; a incineração; a fermentação; a extração de óleo; a pirólise; e a gaseificação. Para cada técnica, foram avaliados os produtos gerados, os aspectos econômicos, os impactos no meio ambiente, as tecnologias disponíveis e o panorama mundial de uso delas. A partir disso, chegou-se na conclusão de que o Brasil deveria investir mais nas tecnologias de compostagem e biometanização, enquanto as alternativas que envolvem calor e queima ainda não são comercialmente viáveis ou necessárias, já que a matriz energética brasileira é basicamente hídrica e a curto prazo não há planejamento para mudança. Também se faz necessário mais estudos com algumas técnicas, que carecem de exemplos em operação e pesquisas mais voltadas para a área de resíduos sólidos no geral.

Palavras-chave: resíduos sólidos domiciliares, tratamento, reaproveitamento energético, fração orgânica.

ABSTRACT

RECCO, D.M. Study of the feasibility of alternatives to landfill and recovery of organic matter in solid waste. 2014. 88p. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

Since the large amount of solid waste generated in the municipalities, a treatment of organic matter is necessary, since the inert material is usually recycled. The prohibition of disposal in landfills and legislation such as the Nacional de Resíduos Sólidos, which creates various political incentives to use technologies of energy recovery and composting of organic waste. From a characterization of solid waste, it can be stated that Brazil has a very high production of organic residues, and a lot of energy and products of commercial value are wasted with the final disposal in landfills. For this, seven different alternatives have been investigated for the treatment of organic matter, namely aerobic composting; biomethanation; incineration; fermentation; oil extraction; pyrolysis; and gasification. For each technique, were evaluated the products generated, the economic aspects, the impacts on the environment, the available technologies and the world scenario of using them. From there, the conclusion reached is that Brazil should invest more in composting and biomethanization technologies because alternatives involving heat and burning are still not commercially viable or necessary, as the Brazilian energy matrix is basically hydropower, and in the short term there is no planning for change.. Also, further studies with some techniques that lack examples in operation and more geared towards the general area of solid waste research is needed.

Keywords: Household Solid Waste, Organic Fraction, Treatment, Energy Recovery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura hierárquica dos diferentes processos para produção de energia a partir de biomassa	19
Figura 2 - Esquema Simplificado do Processo de Compostagem (FERNANDES e SILVA, 1999)	22
Figura 3 - Evolução da temperatura no processo de compostagem.....	23
Figura 4 - Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos no processo de digestão anaeróbia com redução de sulfato (GOMES, 2010)	27
Figura 5 - Processo genérico da Transesterificação.....	35
Figura 6 - Desenho Simplificado do Processo de gaseificação.....	38
Figura 7 - Fluxograma resumo – baseado em (BECIDAN, 2007)	40
Figura 8 - Participação de diferentes origens na receita total (REICHERT e SILVEIRA, 2005)	48
Figura 9 - Mapa contendo as usinas de gaseificação pelo mundo (TASK 33, 2014)....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008	15
Tabela 2 - Destino final dos resíduos sólidos, por unidades de destino dos resíduos	16
Tabela 3 - Aspectos Positivos e Negativos das diferentes técnicas de compostagem aeróbia (MASSUKADO, 2008)	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ATP	Trifosfato de Adenosina
BTA	Business Technology Association
C	Carbono
CEASA	Centrais Estaduais de Abastecimento
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH4	Metano
CO2	Gás Carbônico
DRANCO	Dry Anaerobic Composting
EUA	Estados Unidos da América
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
GEE	Gases com Efeito Estufa
H2	Hidrogênio
H2O	Água
H2S	Sulfeto de Hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPEV	Instituto Nacional de Processamento de Embalagens Vazias
IPEA	Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MG	Minas Gerais
N	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira Registrada
O2	Gás Oxigênio
ONG	Organização Não Governamental
PERS	Política Estadual de Resíduos Sólidos
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
Sinir	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos
Sinisa	Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico
SP	São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Histórico dos Resíduos Sólidos.....	1
1.2	Desafios atuais	2
2	OBJETIVOS	4
2.1	Objetivos Secundários.....	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1	Conceitos e Legislação.....	5
3.1.1	Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305/2010	6
3.1.2	Decreto nº 7404/2010	8
3.1.3	Política Estadual de Resíduos Sólidos – Lei nº 12.300/2006	8
3.1.4	Decreto Estadual nº. 54.645	9
3.1.5	Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos.....	10
3.1.6	Manuais para Elaboração dos Planos	11
3.2	Caracterização dos Resíduos Domiciliares	15
3.3	Matéria Orgânica e Biomassa	17
3.4	Biodegradação.....	20
3.4.1	Compostagem Aeróbia	21
3.4.2	Digestão Anaeróbia (Biometanização).....	26
3.5	Métodos Físico-Químicos para Tratamento de Biomassa.....	29
3.5.1	Incineração	30
3.5.2	Fermentação	32
3.5.3	Extração de Óleo	34
3.5.4	Pirólise.....	35
3.5.5	Gaseificação	36
3.6	Fluxograma	40
4	METODOLOGIA	41
4.1	Método de Pesquisa.....	41
4.2	Materiais.....	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1	Compostagem.....	43
5.1.1	Produto gerado;	43
5.1.2	Aspectos Econômicos;.....	44
5.1.3	Impactos no Meio Ambiente;.....	44
5.1.4	Tecnologias Disponíveis;	45
5.1.5	Panorama Mundial;	46
5.2	Biometanização	47
5.2.1	Produto gerado;	47

5.2.2	Aspectos Econômicos;.....	47
5.2.3	Impactos no Meio Ambiente;.....	48
5.2.4	Tecnologias Disponíveis;	49
5.2.5	Panorama Mundial;	49
5.3	Incineração	49
5.3.1	Produto gerado;	50
5.3.2	Aspectos Econômicos;.....	50
5.3.3	Impactos no Meio Ambiente;.....	51
5.3.4	Tecnologias Disponíveis;	51
5.3.5	Panorama Mundial;	52
5.4	Fermentação	53
5.4.1	Produto gerado;	53
5.4.2	Aspectos Econômicos;.....	53
5.4.3	Impactos no Meio Ambiente;.....	54
5.4.4	Tecnologias Disponíveis;	54
5.4.5	Panorama Mundial;	55
5.5	Extração de óleo.....	55
5.5.1	Produto gerado;	55
5.5.2	Aspectos Econômicos;.....	56
5.5.3	Impactos no Meio Ambiente;.....	57
5.5.4	Tecnologias Disponíveis;	57
5.5.5	Panorama Mundial;	58
5.6	Pirólise	59
5.6.1	Produto gerado;	59
5.6.2	Aspectos Econômicos;.....	59
5.6.3	Impactos no Meio Ambiente;.....	60
5.6.4	Tecnologias Disponíveis;	60
5.6.5	Panorama Mundial;	61
5.7	Gaseificação	61
5.7.1	Produto gerado;	61
5.7.2	Aspectos Econômicos;.....	62
5.7.3	Impactos no Meio Ambiente;.....	62
5.7.4	Tecnologias Disponíveis;	63
5.7.5	Panorama Mundial;	64
6	CONCLUSÕES	65
7	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a questão ambiental está em voga em todos os meios de comunicação. Palavras de ordem como sustentabilidade, eco e verde são bombardeadas o tempo todo por produtos e corporações que se utilizam desses termos para ajudar a alavancar as vendas e se projetar no mercado como uma empresa ambientalmente correta, mas nem sempre é o que ocorre.

As soluções reais para o mundo se tornar realmente sustentável, eco ou verde estão ainda caminhando a pequenos passos e necessitam de maior incentivo e pesquisa para que a maneira como lidamos com a natureza seja alterada. Atitudes individuais podem funcionar a longo prazo, porém necessitamos de grandes mudanças estruturais no nosso sistema para que o meio ambiente não colapse como o previsto.

Com os resíduos sólidos não é diferente. Aterros sanitários aparecem ser a melhor forma de disposição final daquilo que não é mais utilizado e foi descartado para que não atrapalhe mais o meio ambiente. Porém há uma parte dos resíduos pode em quase sua totalidade ser reciclado e tomar novas formas ou reutilizados, para não serem rejeitados. Já o resíduo conhecido como resíduo orgânico, também pode ter seus nutrientes e energia intrínseca recuperados, com formas que serão estudadas nesse projeto.

1.1 Histórico dos Resíduos Sólidos

Historicamente, os resíduos sólidos sempre foram indesejados para a humanidade. Antes mesmo dos indígenas encontrados pelos portugueses quando atracaram na costa brasileira, a população que vivia no litoral, que era basicamente coletora e pesqueira, descartava os restos e sobras de seus alimentos em grandes montes de rejeitos, conhecidos atualmente como sambaquis, que chegavam a ter mais de 30 metros de altura.

Essas pilhas de basicamente ossos e conchas são, desde o final do século XIX fonte de extensa pesquisa, por sua relevância arqueológica. Com os sambaquis foi possível identificar o que comiam, como viviam e o que faziam os povos pré-indígenas, ao redor de 7000 anos atrás e tornou o entendimento da história do nosso continente mais completo (GASPAR, 2000).

Mais recentemente, devido principalmente à falta de legislação indicativa ou até pela facilidade e baixos custos, a maior parte dos resíduos domiciliares eram destinados a aterros a céu aberto, também conhecidos como lixões, sendo esse uma espécie de

sambaqui moderno que não leva em consideração os fatores ambientais e operacionais corretos, se destinando todos os tipos de resíduos, recicláveis ou orgânicos, pro mesmo lugar.

Como os lixões não têm tratamento ambiental, a decomposição dos resíduos sólidos contamina o solo e, consequentemente, lençóis subterrâneos de água. Além do vazamento do chorume, o resíduo produz gases poluentes e facilita a reprodução de insetos transmissores de doenças. Outro problema grave é a presença de catadores e coletores das camadas mais pobres da população, que se submetem a situações assépticas e a riscos para encontrar objetos e comidas nos lixões (EDINGTON, 2014).

Mas esse panorama está mudando. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2012), cerca de 60% dos municípios já apresentam alguma forma de coleta seletiva e a legislação de 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, obriga aos municípios que se encerre as atividades dos aterros a céu aberto até 3 de agosto de 2014, o que não vai acontecer até o prazo (EDINGTON, 2014).

1.2 Desafios atuais

No âmbito dos desafios modernos que acercam o tema de resíduos sólidos, alguns podem ser citados como mais importantes:

- *Aumento na geração de resíduos*: diretamente relacionado ao crescimento populacional, também está ligado ao crescimento da economia, que com o maior poder aquisitivo da população, gera maior volume de materiais descartáveis e bens de consumo de baixa durabilidade (ABRELPE, 2012);
- *Manejo indiferenciado dos diversos tipos e classes de resíduos*: a sociedade, no geral, ainda não tem a característica importante de separação dos resíduos domiciliares. Isso acaba tornando o gerenciamento mais difícil, causando danos a longo prazo (ABRELPE, 2012);
- *Destinação final de resíduos*: De acordo com a ABRELPE (2012), 42% dos resíduos sólidos brasileiros ainda recebem disposição final inadequada, tornando-se um dos maiores desafios a ser superado no setor de resíduos sólidos. Outro ponto que é importante ser citado, há cada vez menos áreas disponíveis para a implantação de aterros sanitários, acarretando uma maior distância entre os

centros geradores e receptores, causando um enorme impacto ambiental e econômico;

- *Reciclagem:* Por sofrer concorrência direta com destinações mais fáceis e mais baratas, a reciclagem necessita ser tratada com mais seriedade e em primeiro plano. Essas cadeias informais impedem que o assunto avance, ainda mais faltando o amparo econômico e tributário para isso (ABRELPE, 2012).

Porém o correto de se pensar nos desafios dos resíduo sólidos hoje seria, ao invés de reciclagem, a não geração e a reutilização, com base na Política Nacional de Resíduos Sólidos e sua hierarquia.

Na esfera da Matéria Orgânica dos resíduos domiciliares, como ainda não há uma coleta seletiva para esse tipo de resíduos, o destino final desse material continua sendo o mesmo de rejeitos, dispondo de uma rica fonte de nutrientes e energia que poderia ser bem utilizada pra outros meios.

O presente trabalho, portanto, pretende apresentar maneiras de como a matéria orgânica dos resíduos domiciliares podem ser reaproveitadas, gerando composto fértil ou gases pra produção de energia, contribuindo para a diminuição do volume de aterros sanitários e impedindo que uma enorme gama de nutrientes e energia seja desperdiçada.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo do presente trabalho é, a partir de revisão bibliográfica, fazer um levantamento acerca dos diferentes tipos possíveis de tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares, buscando uma comparação de viabilidade do uso e implantação das diferentes técnicas.

2.1 Objetivos Secundários

- Estudar o apoio jurídico na legislação específica aos resíduos sólidos para a implantação de técnicas de reaproveitamento energético no Brasil;
- Promover uma caracterização dos Resíduos Sólidos Domiciliares no Brasil, especialmente da fração orgânica;
- Promover um levantamento teórico dos tipos de tratamento biológicos envolvidos com resíduos sólidos domiciliares;
- Promover um levantamento teórico dos tipos de tratamento físico-químicos envolvidos com resíduos sólidos domiciliares.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo de revisão bibliográfica procura criar o contexto necessário à proposta do trabalho, reunindo definições, conceitos e estudos acerca do tema. Foi dividido em seis principais partes, sendo elas Conceitos e Legislação, Caracterização dos Resíduos Domiciliares, Matéria Orgânica e Biomassa, Biodegradação e Outras tecnologias de geração de energia, além de um fluxograma resumo ao final.

3.1 Conceitos e Legislação

Resíduos Sólidos pode ter uma definição trivial de restos e sobras como encontrada nos dicionários mais comuns, porém seu significado vai muito além dependendo da fonte utilizada, no caso a ABNT e a PNRS, além de um dicionário especializado em termos de cunho ambiental.

Segundo a Lei nº 12.305, que constitui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) indica, em seu inciso XVI do artigo 3º, que resíduos sólidos são:

“Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.” (BRASIL, 2010)

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR 10.004, resíduos sólidos são:

“Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.” (ABNT, 2004)

O Dicionário Brasileiro de Ciências Ambientais (2002) apresenta o seguinte verbete, que indica uma ligação com a NBR 10.004 da ABNT:

Todo e qualquer refugo, sobra ou detrito resultante da atividade humana, excetuando dejetos e outros materiais sólidos; pode estar em estado sólido ou semissólido. Os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com sua natureza física (seco ou molhado), sua composição química (orgânico e

inorgânico) e sua fonte geradora (domiciliar, industrial, hospitalar, etc.). Uma classificação que se sobrepõe a todas as demais é aquela que considera os riscos potenciais dos resíduos ao ambiente, dividindo-os em perigosos, inertes e não inertes, conforme a NBR10.004. (SILVA, GUERRA e CUNHA, 2002)

Outro conceito importante de ser diferenciado, é o de gestão e gerenciamento. O termo gestão geralmente vem procedido da palavra integrada, o que quer dizer que são os conjuntos de ações a serem tomadas, levando em consideração várias dimensões. Já o termo gerenciamento é utilizado para a definição somente da parte de resíduos sólidos que compete à ele. No Capítulo 2 da Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei nº12.305/2010, que remete às definições dos termos importantes encontrados posteriormente na lei, tem-se que (BRASIL, 2010):

X - gerenciamento de resíduos sólidos: conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma desta Lei;

XI - gestão integrada de resíduos sólidos: conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável; (BRASIL, 2010)

Isso acaba por se tornar mais claro quando se lê o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, que foca basicamente na gestão, ficando o gerenciamento para uma etapa posterior à essa.

3.1.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305/2010

A Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305, foi promulgada em 02 de Agosto de 2010 após passar duas décadas em tramitação no Congresso Nacional. Essa legislação, considerada moderna e específica, é focada na não geração e no máximo aproveitamento de resíduos, dividindo as responsabilidades do ciclo de vida dos produtos (SILVA, 2013). É importante começar ressaltando que a Lei estabelece uma diferenciação entre resíduo e rejeito num claro estímulo ao reaproveitamento e reciclagem dos materiais, admitindo a disposição final apenas dos rejeitos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011).

Esta lei apresenta, no artigo 6º, os princípios que regem a Política. Podem ser realçados a prevenção e precaução; a eco eficiência; a responsabilidade compartilhada

pelo ciclo de vida dos produtos; o reconhecimento do resíduo reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social (BRASIL, 2010).

Os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, presentes no artigo 7º, se baseiam nas premissas de proteção da saúde pública e da qualidade ambiental; não geração e redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos; aprimoramento de tecnologias limpas para minimizar os impactos ambientais; avaliação do ciclo de vida do produto; reaproveitamento de resíduos sólidos, incluindo a *recuperação e aproveitamento energético* (BRASIL, 2010).

Os instrumentos criados na lei 12.305/2010, descritos no artigo 8º, são baseados basicamente nos planos de resíduos sólidos (mais detalhadamente explicados no art. 14º), além de incluir a coleta seletiva, os sistemas de logística reversa e ferramentas de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto. Esse mesmo artigo também indica os agentes responsáveis, como o Fundo Nacional do Meio Ambiente e o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (Sinir); o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (Sinisa) (BRASIL, 2010).

O artigo 9º contém a ordem de prioridade para gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, que é: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. No inciso primeiro, há a indicação de que “Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, 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.” Esse inciso é importante e abre margem para o reaproveitamento energético para a biometanização, juntamente com os artigos referentes aos planos nacional e estadual de resíduos sólidos, também há citação referente ao aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

Outro ponto importante pra se notar é que o termo *compostagem* é usado apenas duas vezes. A primeira, como destinação final ambientalmente adequada, junto da reutilização, reciclagem e recuperação e aproveitamento energético (art. 3º); a segunda, com a proposição de se implantar um sistema de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articulações para se usar o composto resultante (art. 36º) (BRASIL, 2010).

Nota-se, portanto, que a legislação vigente com base na Lei nº 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos cria todos os mecanismos e aberturas necessários

para a implantação em maior escala de sistemas de compostagem aeróbia e de biometanização visando o reaproveitamento energético.

3.1.2 Decreto nº 7404/2010

O Decreto nº 7404, promulgado em 23 de Dezembro de 2010, regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e estabelece normas para sua execução, como a criação do Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e do Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa (BRASIL, 2010).

O Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos foi criado nesse decreto para viabilizar o cumprimento das determinações e metas previstas na Lei nº 12.305/2010. É coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente e envolve diretamente outros 11 diferentes ministérios, como da Casa Civil, das Cidades e do Desenvolvimento Social e Combate à Fome (BRASIL, 2010).

Ao Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos será competido as funções de instituir os procedimentos para elaboração do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, além de incentivar e promover estudos e medidas para a difusão de tecnologias limpas e atividades de reciclagem, reaproveitamento e tratamento dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

No Título IV do Decreto nº 7404/2010 está bem claro, no Artigo 36º, que a utilização de resíduos sólidos nos processos de recuperação energética está permitido desde que obedeça às normas estabelecidas. No Artigo seguinte, Art.37º, é indicado que essa recuperação energética deve ser realizada e definida de forma específica em conjunto com os Ministérios do Meio Ambiente, de Minas e Energia e das Cidades. Mas, no Parágrafo Único, diz que o que está disposto no Art. 37º não se aplica ao aproveitamento energético dos gases gerados na biodigestão e na decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários (BRASIL, 2010).

No fim, o Decreto nº 7404/2010 acaba não definindo sobre o uso dos gases da biodigestão para aproveitamento energético, deixando um vazio legal acerca do que está regulamentado a se fazer com esse tipo de produto.

3.1.3 Política Estadual de Resíduos Sólidos – Lei nº 12.300/2006

A Política Estadual de Resíduos Sólidos, do Estado de São Paulo, foi promulgada em 16 de março de 2006 e possui diversos princípios que foram depois utilizados para a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Define princípios e diretrizes, objetivos, instrumentos para a gestão integrada e compartilhada de resíduos sólidos (BRASIL, 2006).

Os Princípios que regem a Política Estadual de Resíduos Sólidos podem ser encontrados no Art. 2º. Entre os mais relevantes pode ser citado o item VI que indica a minimização dos resíduos a partir da reutilização, reciclagem, redução e recuperação e também o reconhecimento de resíduo sólido com um bem econômico, gerador de trabalho e renda (BRASIL, 2006).

Os Instrumentos da Política Estadual de Resíduos Sólidos de São Paulo estão presentes no Art. 4º, que indicam a criação dos Planos Estadual e Regionais de Gerenciamento de Resíduos Sólidos; monitoramento ambiental; incentivos à gestão regionalizada dos resíduos sólidos; informações para prevenção, minimização, tratamento e destinação final de resíduos (BRASIL, 2006).

O Capítulo II do Título II diz respeitos aos Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos e serão discutidos mais aprofundados no item 3.1.5. Como a legislação paulistana não diz respeito ao reaproveitamento energético da matéria orgânica e apenas cita a compostagem entre as medidas e soluções direcionadas, essa área fica um pouco carente de apoio governamental (BRASIL, 2006).

3.1.4 Decreto Estadual nº. 54.645

O Decreto Estadual nº 54.645, promulgado em 5 de agosto de 2009 em São Paulo, institui a Lei nº 12.300, da Política Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo. Indica, no Art. 3º, que os instrumentos de planejamento e gestão de resíduos sólidos são os Planos de Resíduos Sólidos, o Sistema Declaratório Anual de Resíduos Sólidos, o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos e o monitoramento dos indicadores de qualidade ambiental (BRASIL, 2009).

Os Planos de Resíduos Sólidos são abordados na Seção II, porém serão discutidos no item 3.1.5. A Seção IV indica que será criado o Sistema Declaratório Anual de Resíduos Sólidos, cujo formulário deverá ser respondido por geradores, transportadores e unidades receptoras de resíduos sólidos (BRASIL, 2009).

O Inventário Estadual de Resíduos Sólidos, descrito na Seção V, conterá a compilação das informações do Sistema Declaratório Anual de Resíduos Sólidos; o cadastro de fontes prioritárias, efetivas, potencialmente poluidoras ou relevantes para o meio ambiente; a situação de conformidade das instalações geradoras e receptoras de resíduos sólidos; e o balanço de massa geral entre geração e tratamento de resíduos sólidos no Estado de São Paulo (BRASIL, 2009).

A Seção VI, que diz respeito ao Monitoramento dos Indicadores da Qualidade Ambiental, diz que deverá ser realizado pela Secretaria do Meio Ambiente por meio de indicadores que provêm das informações do Inventário Estadual de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2009).

O Capítulo III, dividido em 2 Seções, indica as responsabilidades: a responsabilidade de pós-consumo e a responsabilidade sobre áreas contaminadas e áreas degradadas. A de pós-consumo indica que os fabricantes são responsáveis pelo destino final de produtos que possam gerar significativo impacto ambiental. A sobre áreas contaminadas e degradadas adverte que o responsável pela contaminação deverá promover sua recuperação ou remediação (BRASIL, 2009).

Pode-se notar, assim como a Política Estadual de Resíduos Sólidos, que o Decreto Estadual nº 54.645 que a regulamenta também não menciona a compostagem e o reaproveitamento energético como formas de disposição final que possam ser utilizadas posteriormente e cria valor financeiro a resíduos domiciliares.

3.1.5 Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos

O capítulo 2 da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305, apresenta, em seu segundo capítulo, os Planos de Resíduos Sólidos. Os planos são separados em diversos tipos, de acordo com a abrangência, portanto são separados em planos federais, estaduais, municipais, sendo que esse último pode ser do tipo metropolitano e intermunicipais. Também é indicado que os planos devem ter caráter público, e terem controle social na sua formulação, implementação e operacionalização (BRASIL, 2010).

A segunda seção deste capítulo destinado aos Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, discorre sobre o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Esse plano federal deverá ser realizado com horizonte de vinte anos e deve ser atualizado a cada quatro anos. Inclui as metas a serem alcançadas, diagnósticos e prognósticos, com a

importante lembrança do reaproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

No Título IV do Decreto nº 7404/2010, são apresentados os mesmos planos citados na Política Nacional de Resíduos Sólidos e que os Planos elaborados pela União (esfera Federal) devem ser feitos de acordo com um procedimento que envolve: formulação e divulgação da proposta; submissão da proposta e realização de consulta pública; apresentação da proposta com as contribuições de audiência pública e; encaminhamento à Presidência para sanção (BRASIL, 2010).

Sobre os Planos privados, a serem elaborados por indústrias e empreendimentos com geração de resíduos, chamados de Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, devem ser apresentados aos órgãos licenciadores com periodicidade anual. Além disso, é importante salientar que será ainda assegurado o aproveitamento de biomassa na produção de energia e o rerefino de óleos lubrificantes usados, nos termos da legislação vigente (BRASIL, 2010).

Os Planos Estaduais de Gerenciamento de Resíduos Sólidos para o Estado de São Paulo podem ser encontrados no Capítulo II da Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS), a Lei 12.300 de 2006. Esse capítulo indica os instrumentos da PERS, em que o Plano Estadual é uma das ferramentas (BRASIL, 2006).

Os Planos de Resíduos Sólidos são abordados na Seção II do Decreto Estadual nº 54.645 e indica, em seu Artigo 6º, que o Plano será elaborado pela Secretaria do Meio Ambiente e outros órgão e entidades. Também apresenta o conteúdo mínimo que o Plano deve conter, que é: critérios para a regionalização, diagnóstico, estratégia para integração, metas e prazos para gestão, estratégia geral para diversos setores de resíduos e o programa de monitoramento das metas (BRASIL, 2009).

Há um ponto interessante a ser mencionado deste decreto que indica que deve haver uma redução de 6% do volume para disposição final de rejeitos a cada 5 anos, atingido por meios de tecnologias mais eficientes de tratamento dos resíduos sólidos gerados.

3.1.6 Manuais para Elaboração dos Planos

Diversas entidades e organizações produziram manuais para facilitar a elaboração dos planos de resíduos sólidos. Entre os selecionados para estudo estão o da CETESB, da IPEA, do Ministério do Meio Ambiente e da ANVISA.

- **Ministério do Meio Ambiente**

O denominado Guia para Elaboração dos Planos de Gestão de Resíduos Sólidos, escrito pelo Ministério do Meio Ambiente apresenta um plano de abordagem baseado em quatro principais partes: Estruturação e participação social; Diagnóstico; Plano de Ação e Agendas de Implementação (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011).

A parte de estruturação e participação social possui cinco principais passos que devem ser seguidos, que inclui a reunião dos agentes públicos envolvidos; a identificação das possibilidades e alternativas; a estruturação da agenda de elaboração e a identificação e constituição do grupo das partes envolvidas, entre os agentes sociais econômicos e políticos; e o estabelecimento das estratégias de mobilização dos agentes (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011).

A segunda parte, diagnóstico, possui apenas quatro passos, mas extremamente importantes para o andamento do projeto. Eles incluem a elaboração do diagnóstico expedito, com a devida identificação das peculiaridades locais; a apresentação pública dos resultados e validação desse diagnóstico; o envolvimento dos conselhos municipais na validação e; a incorporação das contribuições e preparo de diagnóstico consolidado (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011).

A terceira parte, plano de ação, é a mais complexa de todas, possuindo um total de oito passos. Citando os mais importantes, tem-se a definição das perspectivas iniciais do plano; identificação das ações necessárias para a superação dos problemas; definição dos programas prioritários; definição das metas a serem perseguidas em um cenário de 20 anos; elaboração da primeira versão do plano; estabelecimento do plano de divulgação e; a apresentação pública (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011).

A última parte, agendas de implementação, possui cinco passos, sendo o primeiro o mais importante: incorporação das contribuições e preparo do plano consolidado. Os outros incluem a decisão da conversão do plano em lei municipal; a divulgação do plano consolidado; a definição da agenda para continuidade, já que o plano deve ser revisado a cada quatro anos; e o monitoramento do plano e a avaliação de resultados (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011).

É importante ressaltar que o Guia sempre cita a compostagem como uma forma de destino final para resíduos orgânicos e que deve ser focado pelos efeitos benéficos. Há também um capítulo envolvendo o reaproveitamento energético dos resíduos sólidos, tanto pela recuperação e destruição do metano quanto por métodos baseados no calor. Também diz que o Plano Nacional de Mudanças Climáticas indicou metas para a

recuperação do metano em instalações de resíduos sólidos urbanos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011).

Todos as partes e os passos possuem um grau de detalhamento muito profundo, sanando todas as dúvidas e discutindo potenciais problemas e entraves que podem ser encontrados durante a criação de um Plano de Resíduos Sólidos. Além disso, discutem toda a legislação envolvida e também há uma tabela que resume todo o processo para facilitar a relação entre as propostas.

- **CETESB: GIREM**

A CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – ligada à Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, é o órgão licenciador e fiscalizador do meio ambiente no Estado. Dada sua importância, a companhia também tem um manual para elaboração dos Planos de Resíduos Sólidos, pelo GIREM – Gestão Integrada de Resíduos Municipais.

O Plano que a CETESB auxilia a criação é o Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos, normalmente utilizado para áreas metropolitanas ou para o gerenciamento de resíduos sólidos envolvendo dois ou mais municípios. É interessante ressaltar que o Manual indica que há normalmente dois tipos de ações propostas: um com ações relacionadas à infraestrutura e novos sistemas e o outro, subestimado, que propõe a melhoria dos sistemas já existentes (CETESB, 2012).

Como o Manual do Ministério do Meio Ambiente, o manual da CETESB também apresenta um passo-a-passo explicativo para facilitar a criação dos planos. Neste manual consiste de: Definir a linha de base; Identificar os papéis e responsabilidade de interessados importantes (stakeholders); Identificar os pontos fortes e fracos do sistema atual de Gerenciamento; Preparar planos de ação de gerenciamento integrados apropriados; Fornecer diretrizes de como passar da fase de planejamento para a fase de implantação; Controle de medidas tecnológicas; Descrição de necessidade de governança, indicando os pedidos financeiros, institucionais e sociais (CETESB, 2012).

Além disso, a CETESB reforça que o Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos deve ser integrado a outros planos, como o Plano de Saneamento, Plano de Energia e Planos Ambientais. Outra parte interessante é que diz que não deve ser ignorado o papel do setor informal, com catadores de latas de alumínio e papelão, que respondem a uma parte da sociedade hoje quase totalmente segregada, podendo ser utilizado para o melhor o sistema de reciclagem e reutilização (CETESB, 2012).

- **IPEA**

O IPEA – Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas – também criou um manual acerca de um tipo muito específico de Resíduos Sólidos: agrossilvopastoris. Em parceria com o inPEV – Instituto Nacional de Processamento de Embalagens Vazias – o foco maior desse manual é sobre as embalagens vazias de agrotóxicos.

As diretrizes redigidas para tentar aniquilar o problema de descarte com as embalagens vazias de agrotóxico são (INPEV, 2012):

1. Diretriz 01: Inventariar, a partir do próximo Censo Agropecuário (2015), os resíduos agrossilvopastoris.
2. Diretriz 02: Pesquisa, desenvolvimento e inovação de tecnologias para o aproveitamento e destinação de resíduos agrossilvopastoris, considerando o caráter estratégico da busca de manter o carbono na forma orgânica.
3. Diretriz 03: Destinar adequadamente os resíduos agrossilvopastoris por compostagem, biodigestão ou outras tecnologias.
4. Diretriz 04: Desenvolvimento e inovação de tecnologias para o aproveitamento de resíduos sólidos de mineração na produção agrossilvopastoril.
5. Diretriz 05: Segregar os resíduos recicláveis secos no meio rural e destiná-los adequadamente, em concordância com a destinação dos Resíduos Urbanos.

- **ANVISA**

A ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária – também possui um Manual para elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos. Denominado Gerenciamento de Resíduos de Serviço de Saúde, esse manual tem o foco sobre esse tipo de resíduo (ANVISA, 2006).

Assim como outros, também apresenta um passo-a-passo para elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Saúde no capítulo 4, que consiste em oito principais passos para sua criação, baseando-se nos processos de minimização e segregação, além dos procedimentos recomendados para o acondicionamento e tipos de tratamento para os resíduos sólidos de saúde.

Os passos destacados são: Identificação do Problema; Definição da equipe de trabalho; Mobilização da Instituição; Diagnóstico da situação dos Resíduos Sólidos de Saúde; Definição de metas e objetivos; Elaboração do Plano de Gerenciamento de

Resíduos Sólidos, com os dados obtidos e as rotinas operacionais relacionadas à esses resíduos; Implementação do Plano, executando diversos treinamentos e as adequações de infraestrutura necessária; e Avaliação do Plano, baseado em diversos indicadores (ANVISA, 2006):

Com esse Manual, a ANVISA acredita que o problema inerente desse tipo de Resíduo Sólido seja solucionado de maneira eficaz e de acordo com as legislações vigentes, para a redução dos riscos e danos potenciais.

3.2 Caracterização dos Resíduos Domiciliares

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos apresenta, logo no primeiro capítulo, um diagnóstico da situação dos resíduos sólidos no Brasil, buscando gerar subsídios para a implantação do Plano nas diversas esferas de tomada de decisão. Essa descrição da situação atual foi baseado no ciclo de resíduos, incluindo a geração, coleta, tratamento e disposição final (BRASIL, 2011):

Os dados apresentados pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos são todos de 2008, para se manter a consistência entre as fontes de informação, incluindo nessas a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, o Sistema Nacional de Informação em Saneamento e o Banco Multidimensional Estatístico (BRASIL, 2011).

A tabela a seguir apresenta uma estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil, e são provenientes da média de 93 estudos de caracterização física realizados por todo o território nacional (BRASIL, 2011):

Tabela 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008

Resíduos	Participação (%)	Quantidade (t/dia)
Material Reciclável	31,9	58527,40
Metais	2,9	5293,50
Aço	2,3	4213,70
Alumínio	0,6	1079,90
Papel, papelão e tetrapak	13,1	23997,40
Plástico Total	13,5	24847,90
Plástico Filme	8,9	16399,60
Plástico Rígido	4,6	8448,30
Vidro	2,4	4388,60
Matéria Orgânica	51,4	94335,10
Outros	16,7	30618,90
Total	100	183481,50

Outro dado importante de ser estudado para o presente trabalho é o de destinação final dos resíduos domiciliares urbanos. De acordo com pesquisa realizada pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – em sua Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, em 2008 os vazadouros a céu aberto (lixões) receberam mais da metade (50,8%) de todos os resíduos sólidos, conforme a tabela a seguir explicita (IBGE, 2010).

Tabela 2 - Destino final dos resíduos sólidos, por unidades de destino dos resíduos

Destino final dos resíduos sólidos, por unidades de destino de resíduos (%)			
Ano	Vazadouro a céu aberto	Aterro controlado	Aterro Sanitário
1989	88,2	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7

Tal tabela explicita diversos fatores importantes. Em primeiro lugar pode-se citar que claramente os vazadouros a céu aberto foram perdendo espaço como destino final dos resíduos sólidos no Brasil, inicialmente impulsionado pela criação de aterros controlados. Porém, na segunda década em análise, nota-se que o crescimento de destino final em aterro controlado foi praticamente mantido no mesmo nível, porém os aterros sanitários tiveram uma evolução considerável no período. Isso é um fator muito bom, já que somente esse último tipo de disposição final é o ideal para o destino de produtos inertes.

Explicando melhor os diferentes tipos de destino final de resíduos, tem-se que os vazadouros a céu aberto, popularmente conhecido como lixões, apresentam como base a disposição final sem qualquer tipo de tratamento do rejeito ou preparo do solo, tornando-se uma fonte de contaminação do solo e dos lençóis freáticos, além da contaminação do ar com gases potencialmente perigosos (PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS, 2013). O aterro controlado é aquele intermediário entre o vazadouro e o aterro sanitário, já que normalmente consiste em uma célula de lixão que foi remediado, recebendo uma cobertura de grama e argila, mas sem impermeabilização da base. Portanto ele ajuda a minimizar o mau cheiro e o impacto visual, porém o material continua contaminando o solo e o lençol d'água (INSTITUTO BROOKFIELD, 2012). Já o aterro sanitário, por ser a forma de disposição adequada dos resíduos sólidos urbanos, possui uma impermeabilização do terreno e coleta do chorume, além de captação para o biogás gerado na decomposição da matéria orgânica. Os aterros sanitários, portanto evitam a

proliferação de vetores, mau cheiro e poluição visual, além de impedir que o chorume contamine os solos e lençóis freáticos e que o biogás se espalhe para a atmosfera (INSTITUTO BROOKFIELD, 2012).

A coleta seletiva, definida segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) como “coleta de resíduos sólidos previamente segregados conforme sua constituição ou composição” e de acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2010) é o “recolhimento diferenciado e específico de materiais reaproveitáveis, tais como papéis, vidros, plásticos, metais, ou resíduos orgânicos compostáveis, previamente separados do restante do lixo nas suas próprias fontes geradoras”.

Para a redução efetiva da disposição final de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários ou até nas outras duas opções piores, a coleta seletiva é extremamente necessária, junto de outros instrumentos importantes, porém somente atinge a parte dos resíduos recicláveis e reaproveitados, deixando de lado a matéria orgânica.

Como dito anteriormente, mais da metade (51,4%) dos resíduos sólidos urbanos coletados é de matéria orgânica e grande parte desse resíduo vai parar em vazadouros a céu aberto, aterros controlados ou aterros sanitários, sendo perdido seu potencial energético ou de geração de composto.

3.3 Matéria Orgânica e Biomassa

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2011), deixa claro que as experiências com o tratamento de matéria orgânica no Brasil ainda são incipientes, apesar do alto percentual desse tipo de resíduo em relação ao total. Do total estimado de resíduos orgânicos que são coletados (94.335,1 ton/dia) somente 1,6% (1.509 ton/dia) é encaminhado para tratamento via compostagem. O restante desse valor, por não ser coletado separadamente, é encaminhado para a disposição final juntamente com os outros resíduos domiciliares.

Esse mesmo Plano Nacional de Resíduos Sólidos apresenta uma diretriz visando a redução dos resíduos sólidos urbanos orgânicos dispostos em aterros sanitários induzindo a compostagem dessa parcela orgânica e a geração de energia por meio do aproveitamento dos gases da biodigestão. Entre as estratégias adotadas por essa diretriz, tem-se: melhorar a segregação dos RSU domiciliares , para se obter um composto de qualidade e otimizar seu aproveitamento; implementar medidas concentradas em feiras e CEASAS, ou demais locais com alta concentração de resíduos orgânicos, visando a melhoria do atual

gerenciamento; utilizar melhor o potencial dos materiais de poda e capina de árvores; facilitar e disponibilizar recursos para implantação de novas unidades de biodigestão; estudar a viabilidade técnica e econômica de sistema de captação de gases em aterros sanitários; disponibilizar recursos para implantação de sistemas de captação e geração de energia em aterros sanitários a partir do biogás; elaborar manuais e atividades de capacitação sobre a importância da segregação na fonte para o aproveitamento dos materiais; realizar atividades de difusão tecnológica e de conhecimentos no tema de biodigestão e biogás; desenvolver tecnologicamente os processos de compostagem a aproveitamento energético dos resíduos orgânicos; articular junto aos órgãos estaduais a uniformização dos procedimentos de licenciamento; e fomentar o uso de compostos orgânicos como nutrientes para agricultura (BRASIL, 2011).

A melhor forma de tratamento de Resíduos Sólidos orgânicos é através de um aproveitamento do processo de decomposição que toda matéria orgânica sofre normalmente. Esse processo de decomposição é realizado por bactérias e há diversas variáveis que influenciam na decomposição podemos citar, entre outros, a temperatura, a acidez (pH), umidade, nutrientes, e a presença ou não de oxigênio (PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS, 2013).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013), a biomassa é:

“todo recurso renovável que provém de matéria orgânica - de origem vegetal ou animal - tendo por objetivo principal a produção de energia. A biomassa é uma forma indireta de aproveitamento da luz solar: ocorre a conversão da radiação solar em energia química por meio da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos.”

As principais vantagens relacionadas ao uso da biomassa é que o aproveitamento é direto, isto é, pode ocorrer diretamente da combustão em fornos, caldeiras, etc., porém outras tecnologias estão sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas para reduzir os impactos socioambientais, como a pirólise e gaseificação (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013).

No Brasil, essa fonte deveria ser mais amplamente utilizada, já que as condições naturais e geográficas do país permitem uma alta incidência de luz solar durante o ano todo, facilitando o crescimento de árvores e alimentos que poderiam ser transformados em energia. Além disso, a extensão de áreas agriculturáveis que é utilizada hoje em dia gera muitos resíduos não aproveitados que poderiam gerar energia em áreas mais

afastadas ao invés de serem dispostos em aterros (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013).

A Lei 12.305 de 2010 em seu Art. 9º determina que somente poderão ser destinados à disposição final (aos aterros sanitários), os rejeitos, ou seja somente os resíduos que não podem qualquer tipo de aproveitamento. Portanto, temos no Brasil mais de 50% de resíduos gerados que não podem ser destinados aos aterros sanitários. As centrais tecnológicas para o tratamento e reutilização de resíduos orgânicos precisam ser construídas em todo território brasileiro (PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS, 2013).

O Brasil é considerado um país ideal para o uso do processo de compostagem pela quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos, por eventuais problemas que possam ocorrer quando da sua disposição inadequada pela formação de chorume e gases tóxicos e pela necessidade frequente de matéria orgânica nos solos, já que os solos tropicais são geralmente pobres em nutrientes (NETO, 1996).

Para a conversão de biomassa em energia, há diversas rotas a serem seguidas, com uma grande variedade de fontes, como os resíduos agrícolas, industriais e urbanos. As alternativas para os processos de conversão são bem diversas e incluem desde a simples combustão ou queima para a obtenção da energia térmica até processos físico-químicos e bioquímicos complexos para a obtenção de combustíveis líquidos e gasosos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013). Esses processos serão mais amplamente

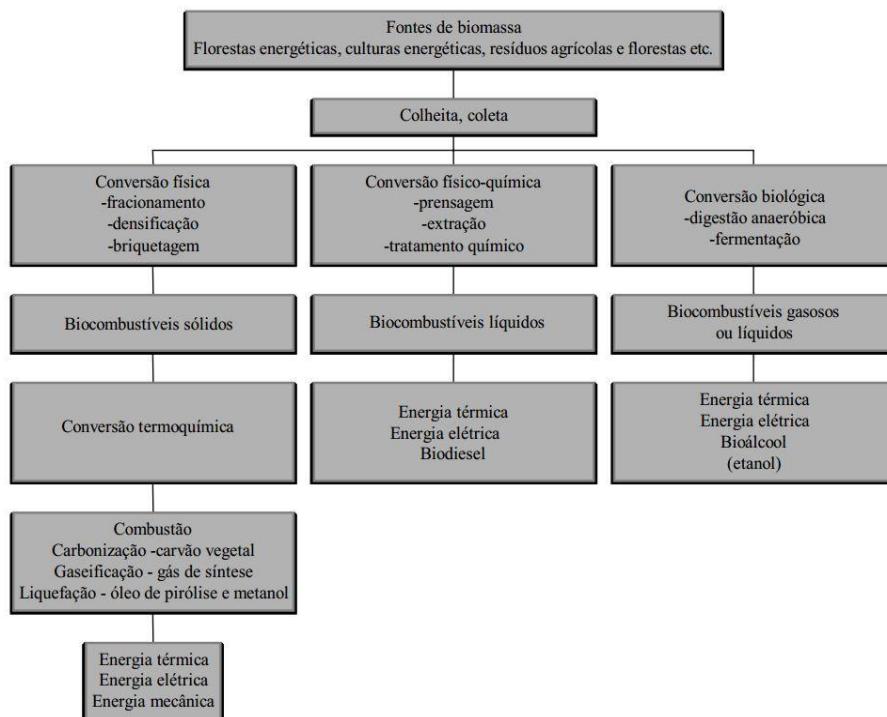


Figura 1 - Estrutura hierárquica dos diferentes processos para produção de energia a partir de biomassa (MASSUKADO, 2008)

estudados nos itens a seguir: Biodegradação e Métodos Físico-Químicos para Tratamento de Biomassa.

3.4 Biodegradação

A biodegradação é praticada desde a História antiga, porém até recentemente, de forma empírica. Gregos, romanos, e povos orientais já sabiam que resíduos orgânicos podiam ser retornados ao solo, contribuindo para a fertilidade. No entanto, só no século XX é que o processo passou a ser pesquisado cientificamente. Nas décadas seguintes, muitos trabalhos científicos lançaram as bases para o desenvolvimento desta técnica, que hoje pode ser utilizada em escala industrial (FERNANDES e SILVA, 1999).

De acordo com o manual do PROSAB - programa de Pesquisa em saneamento Básico – denominado Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos a compostagem pode ser definida como: “uma bioxidação aeróbia exotérmica de um substrato orgânico heterogêneo, no estado sólido, caracterizado pela produção de CO₂, água, liberação de substâncias minerais e formação de matéria orgânica estável”. Na prática, isto significa que o composto é criado a partir de resíduos orgânicos, sendo esse composto um insumo agrícola, fácil de manipular e livre de microrganismos patogênicos (FERNANDES e SILVA, 1999).

Várias etapas de transformação acontecem com os componentes orgânicos biodegradáveis, com vários microorganismos envolvidos que acabam resultando em um processo bioquímico complexo.

Por ser um processo praticamente biológico, há diversos fatores importantes que influenciam na degradação da matéria orgânica. Entre eles pode-se citar a aeração (indicando se será aeróbia ou anaeróbia), os nutrientes e a umidade, além da temperatura, sendo essa última um indicador de velocidade do processo e acaba sendo um resultado da atividade biológica. A relação entre os nutrientes carbono e nitrogênio são fundamentais para o crescimento bacteriano, sendo o carbono uma fonte de energia e o nitrogênio importante para a síntese celular. Fósforo e enxofre também são importantes porém seu papel no processo é menos conhecido. Os microrganismos têm necessidade dos mesmos micro nutrientes requeridos pelas plantas: Cu, Ni, Mo, Fe, Mg, Zn e Na são utilizados nas reações enzimáticas, porém os detalhes deste processo são pouco conhecidos (FERNANDES e SILVA, 1999).

Segundo IPT (IPT, 2000), o processo de compostagem apresenta as seguintes vantagens:

- Eliminação de possíveis patógenos;
- Economia na aquisição de fertilizantes minerais e sem seus impactos ambientais;
- Melhoria das propriedades físico-químicas do solo;
- Economia na coleta e transporte dos resíduos sólidos.
- Reciclagem de nutrientes para o solo de forma descentralizada;
- Economia de espaço e volume no aterro;
- Diminuição de até 50% em peso dos resíduos destinados à aterros;
- Redução dos impactos ambientais associados a degradação dos resíduos orgânicos em locais inadequados;
- Aproveitamento da matéria orgânica na área agrícola;
- Economia de tratamento de efluentes, pela não produção de chorume;
- Processo ambientalmente seguro;

Nos dois tópicos a seguir serão discutidos os dois principais métodos bioquímicos de redução de matéria orgânica: a compostagem aeróbia e a digestão anaeróbia, mais conhecida como biometanização.

3.4.1 Compostagem Aeróbia

De acordo com Massukado (2008), a definição de compostagem aeróbia é:

“um processo controlado de decomposição aeróbia e exotérmica da substância orgânica biodegradável, por meio da ação de microorganismos autóctones, com liberação de gás carbônico e vapor de água, produzindo, ao final, um produto estável e rico em matéria orgânica”

Com as vantagens ambientais acertadas em aumento da vida útil do aterro sanitário; a redução na emissão do gás metano e na do lixiviado; redução nos custos de implantação e operação de sistemas para tratamento de chorume; geração de um fertilizante rico em matéria orgânica. Porém, essas vantagens só podem ser obtidas a partir de um controle adequado do processo, conforme explicado no item seguinte (MASSUKADO, 2008).

Como desvantagem ambiental, pode-se citar a possível produção de maus odores e chorume, porém somente se as proporções de C/N e a quantidade de oxigênio necessária não for atendida (MASSUKADO, 2008).

O esquema simplificado a seguir equaciona o balanço da compostagem aeróbia:



Figura 2 - Esquema Simplificado do Processo de Compostagem (FERNANDES e SILVA, 1999)

Iniciado o processo de compostagem aeróbio, diversos grupos de microorganismos começam a se proliferar, entre eles os fungos e bactérias, que vão se alterando de acordo com as características do meio compostável. Baseado nas temperaturas ótimas de crescimento, os microorganismos podem ser classificados como psicrófilos (0 – 20°C), mesófilos (15 - 43°C) e termófilos (40 - 85°C), sendo esses valores os intervalos que as populações crescem de melhor maneira, não uma divisão exata entre os tipos (FERNANDES e SILVA, 1999).

Logo no início da compostagem há a proliferação em abundância dos microorganismos mesófilos. Porém, como a biodegradação gera um aumento da temperatura, a população de mesófilos diminui e os microorganismos termófilos passam a oferecer um forte crescimento. Como essa população é extremamente ativa, a temperatura continua a se elevar, eliminando os microorganismos patogênicos e provocando uma intensa e rápida degradação da matéria orgânica (FERNANDES e SILVA, 1999).

Depois da parte orgânica do substrato for em sua maior parte transformado, a temperatura começa a cair e a população termófila recua novamente. A partir daí, a atividade geral da compostagem diminui e os microorganismos mesófilos se instalam de volta. Como a maior parte das moléculas facilmente biodegradáveis já foram transformadas, o processo de humificação se inicia, começando a segunda etapa do processo, chamada de maturação (FERNANDES e SILVA, 1999).

Na figura a seguir, pode-se analisar as fases e temperaturas claramente um relação ao tempo.

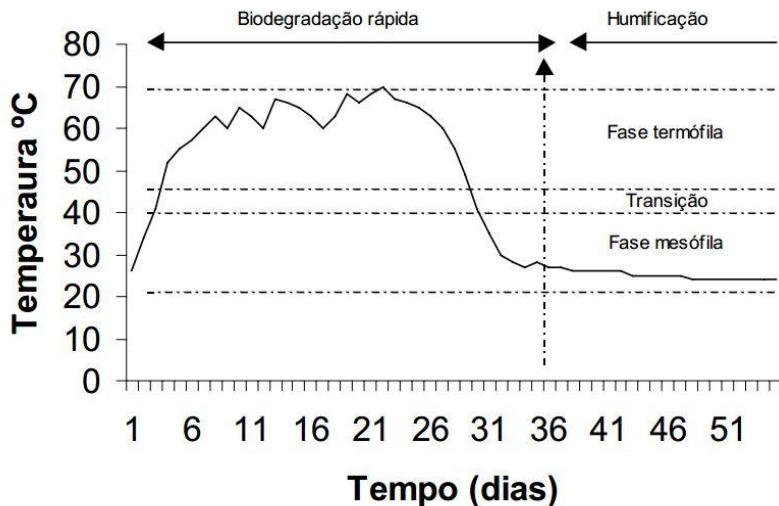


Figura 3 - Evolução da temperatura no processo de compostagem (FERNANDES e SILVA, 1999)

Estas duas fases do processo são bastante distintas entre si. A primeira fase, também conhecida como bioestabilização, há uma intensa atividade dos microorganismos e uma rápida transformação da matéria orgânica. Nessa fase há também um grande consumo de O₂, elevação da temperatura e mudanças visíveis no composto, tornando-se escura e sem um odor incômodo. Ainda assim, o composto não está pronto para ser utilizado na agricultura para fertilização, isso só ocorre após a etapa seguinte: maturação (FERNANDES e SILVA, 1999).

Na fase de maturação, a atividade biológica é visivelmente diminuída com relação à anterior, diminuindo-se assim a necessidade de aeração. O processo passa a ocorrer à temperatura ambiente e as transformações são predominantemente químicas, com o chamado polimerização de moléculas orgânicas estáveis no processo chamado de humificação (FERNANDES e SILVA, 1999).

De acordo com o manual da PROSAB – Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos – (1999) esses conceitos são importantes para a criação de usinas de compostagem, já que a redução de volume se dá basicamente na primeira fase a segunda acaba não necessitando tanto de área útil. Além disso, depois da maturação o composto pode ser peneirado e acondicionado para ser transportado e vendido.

Para que o processo de compostagem seja desenvolvido de maneira adequada, alguns parâmetros físico-químicos precisam ser respeitados para que os microorganismos tenham condições favoráveis de crescimento e de quebra de matéria orgânica. Esses parâmetros são:

- **Composição e Quantidade**

A composição diz respeito à origem do resíduo orgânico, podendo ser de tipo vegetal ou animal. Já a quantidade é indicada por quanto maior a quantidade de resíduos orgânicos incorporados ao solo, maior será a atividade biológica (SILVA, 2010).

- **Relação Carbono/Nitrogênio**

Se a relação C/N for entre 25:1 e 50:1, é o padrão ótimo para o início do processo de compostagem. (SILVA, 2010) Tanto a falta de nitrogênio quanto a falta de carbono limitam a atividade microbiológica. Se a relação for muito baixa, ocorrerá formação de amônia e perda de nitrogênio. Se a relação for elevada, ocorrerá uma falta de nitrogênio para a síntese de proteína, limitando seu desenvolvimento. No final do processo, a relação final deve estar entre 10:1 e 20:1, indicando um produto de boa qualidade (FERNANDES e SILVA, 1999).

- **Temperatura**

A temperatura inicial para a compostagem pode ser ambiente, especialmente em áreas tropicais, já que os microorganismos mesófilos crescem facilmente nessa faixa. Após isso, a temperatura é um fator indicativo do equilíbrio biológico, refletindo a eficiência do processo, conforme indicado na Figura 3. Lembrando que a temperatura é importante para a eliminação dos patógenos, já que eles não costumam sobreviver a altas temperaturas, porém essas acabam gerando uma decomposição mais demorada (KIEHL, 1985).

- **Aeração**

Por ser um processo aeróbio, a decomposição requer O₂ para o metabolismo microbiano. A demanda por Oxigênio pode ser bastante alta durante a compostagem, sendo esse um fator limitante para a atividade microbiana. Esse fator é bastante dependente da tecnologia de compostagem utilizada, além da estrutura e da umidade da massa a ser decomposta. Um sistema com falta de O₂ pode se tornar anaeróbio, gerando gases indesejados e odores sulfônicos. A aeração é mais necessária para a fase inicial, de degradação rápida, sendo na fase seguinte menos importante (FERNANDES e SILVA, 1999).

- **Umidade**

Para o processo de compostagem ocorrer de forma satisfatória, o teor ótimo de umidade no composto deve ser entre 50 e 60%. Essa quantidade pode ser atingida por uma mistura de componentes ou simplesmente pela adição de água. Uma alta quantidade

de umidade, porém, pode fazer com que a água impeça a passagem livre de oxigênio para as bactérias, gerando áreas de anaerobiose. Também, se for muito baixa, a atividade biológica pode ser inibida, assim como a velocidade de degradação. Portanto, o teor de umidade deve ser criteriosamente medido durante o processo por garantia de qualidade de composto (FERNANDES e SILVA, 1999).

• pH

É sabido que índices muito altos ou muito baixos de pH reduzem ou inibem a atividade microbiana. Se no início o pH da mistura a ser decomposta é neutro, há uma queda pela produção de ácidos orgânicos. Já a fase termófila é acompanhada de uma rápida elevação de pH, chegando à alcalinidade pela hidrólise das proteínas e liberação de amônia. Porém, se a relação C/N da mistura for conveniente, o pH geralmente não é um fator crítico para o processo (FERNANDES e SILVA, 1999).

• Estrutura (Granulometria)

Quanto mais fina for a granulometria, maior é a área disponível para a atividade microbiana, com o aumento da área em contato com o oxigênio. A porosidade ideal, segundo o Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos da PROSAB (1999), é de 30 a 36% e o tamanho ótimo das partículas entre 25 e 75mm. Já granulometria muito fina pode trazer problemas para a compostagem, como a compactação que causaria uma anaerobiose indesejada.

O uso intensivo do solo pode acarretar sérios problemas de fertilidade, especialmente com as monoculturas. A aplicação contínua de fertilizantes químicos traz diversos efeitos indesejáveis no solo, que, junto com o uso de agrotóxicos, podem trazer vários efeitos negativos nos recursos hídricos e no ser humano (MASSUKADO, 2008).

Com isso, o composto de resíduos sólidos urbanos, se torna interessante, já que é acessível localmente, com o valor mais baixo que produtos químicos e não são agressivos ao meio ambiente, por se tratar de um processo natural. O único problema, porém, é que a compostagem ainda não foi desenvolvida o suficiente, apesar dos avanços recentes (MASSUKADO, 2008).

Apesar de o fertilizante químico possuir uma quantidade muito maior de nutrientes que o composto de resíduos sólidos, o natural é uma fonte de nutrientes a longo prazo, já que melhora a estrutura do solo com o alto teor de matéria orgânica e ao aumento da resistência das plantas a doenças, além de prevenir a acidez do solo (MASSUKADO, 2008).

Além disso, Massukado (2008) afirma que o composto de resíduos sólidos possui como vantagem a propriedade de adsorção de alguns elementos químicos que poderiam auxiliar na redução da passagem de contaminantes para o meio ambiente, além de aumentar a permeabilidade e evitar a erosão do solo.

3.4.2 Digestão Anaeróbia (Biometanização)

Como dito anteriormente, a decomposição dos resíduos orgânicos também pode ser feita por meio anaeróbio, conhecido como biometanização. Os principais produtos finais desse metabolismo são o metano CH₄ e o dióxido de carbono CO₂, constituintes do biogás, que pode ser utilizado para a geração de energia.

A digestão anaeróbia pode ser resumida em cinco etapas (GOMES, 2010):

- **Hidrólise**

A hidrólise é a etapa inicial do processo. Como os materiais ainda estão muito complexos, eles começam a ser reduzidos em compostos mais simples e mais solúveis, diminuindo sua massa molar, facilitando com que as bactérias fermentativas os absorvam. As enzimas para isso são expelidas para fora de suas células para ocorrer essa dissolução. Esse processo, chamado de hidrólise, converte as proteínas em aminoácidos, os lipídios solúveis em ácidos graxos e os carboidratos complexos em açúcares simples.

- **Acidogênese**

Os produtos reduzidos na hidrólise podem agora ser absorvidos por bactérias fermentativas e metabolizados, volatilizando os ácidos graxos (transformação em Ácidos Graxos Voláteis - AGV). Além disso, só que em menor quantidade, são gerados álcoois, ácido lático, gás carbônico, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio e novas células bacterianas.

- **Acetogênese**

A acetogênese utiliza os compostos formados na etapa anterior e, a partir da oxidação, são convertidos em hidrogênio, dióxido de carbono e acetato, formando a base necessária para o crescimento das bactérias metanogênicas.

- **Metanogênese**

Nessa fase, os compostos orgânicos são convertidos em biogás por bactérias metanogênicas. Há dois tipos principais de bactérias envolvidas nesse processo: as

hidrogentotróficas, que digerem o hidrogênio e o dióxido de carbono, formando gás metano; e as acetoclásticas, que produzem o metano a partir de ácido cético junto de outros compostos.

- **Sulfetogênese**

Fase em que as bactérias sulforedutoras metabolizam os sulfatos e outros compostos com enxofre em sulfetos. Se alimentando de vários substratos diferentes, essas bactérias acabam por competir com as outras presentes. Essa fase não é compulsória na digestão anaeróbia, só ocorre se houver bastante sulfato presente no meio, diminuindo a produção de metano para o aumento de gás sulfídrico, sendo indesejável para o aproveitamento do biogás.

O esquema a seguir apresenta as diversas etapas de forma resumida.

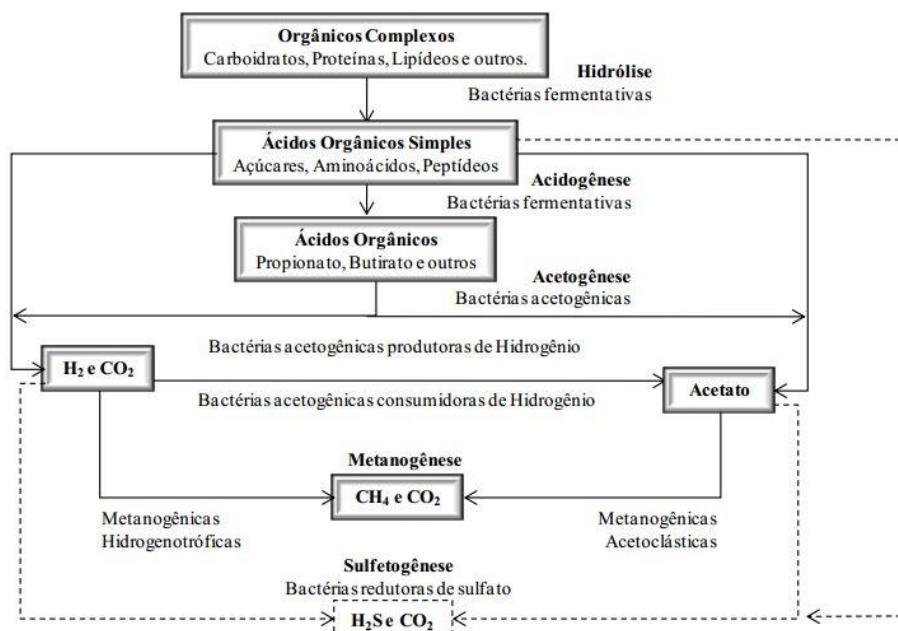


Figura 4 - Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos no processo de digestão anaeróbia com redução de sulfato (GOMES, 2010)

A degradação de matéria orgânica tem diversos parâmetros ambientais como condição. Por serem muito interdependentes, os efeitos são dificeis de se quantificar, porém são bem conhecidos. Entre os fatores, pode-se citar:

- **Umidade**

A umidade é importante para determinar as cinéticas de degradação e portanto a produção de gases. De acordo com Russo (2005), com um valor abaixo de 25 a 30% não há metabolismo, sendo essa a quantidade de água vital inerente aos microorganismos que irão fazer a digestão anaeróbia. Com uma umidade próxima a de saturação, as bactérias

ficam diluídas no meio aquoso, tornando-as menos eficazes na produção de gás. O interessante a se citar, é que não há uma correlação exata entre a quantidade de umidade e a produção de gás entre os valores mínimos e máximos, aparentando ser independentes disso.

- **Temperatura**

A produção de biogás está diretamente associada à temperatura do meio que as bactérias estão degradando. Assim como na digestão aeróbia, a compostagem, as bactérias têm uma temperatura ideal de crescimento e isso acaba controlando a velocidade das cinéticas bioquímicas. Em aterros sanitários sob condições normais, há o predomínio das bactérias mesófilicas (15 – 45°C) e termofílicas (40 – 60°C) (RUSSO, 2005).

- **pH**

O pH ótimo é geralmente bem definido para cada espécie de bactéria. Porém como no processo de digestão anaeróbia há a variação dos valores de pH do meio, as células microbianas têm a capacidade de liberar ou absorver íons de hidrogênio com o meio externo, regulando assim seu pH ideal. Segundo Russo (2005), o pH ideal para a fermentação metanogênica está entre os valores de 6.8 e 7.2. Já os pHs muito ácidos podem se tornar inibidores de metanogênese.

- **Nutrientes**

As bactérias necessitam de diversos tipos de nutrientes para a sobrevivência no meio. Elementos como Carbono, Nitrogênio, Fósforo e Enxofre são fundamentais para as fases de fermentação que precedem a de metanização. Já outros elementos como o Cálcio, Magnésio, Potássio, Sódio e Ferro podem ser inibidores de crescimento se estiverem presentes no substrato em grande quantidade (RUSSO, 2005).

- **Oxigênio**

Por ser um processo totalmente anaeróbico, é ideal para a geração do metano que não haja a presença de oxigênio em nenhuma das fases da digestão.

- **Sulfato**

Conforme citado na fase de sulfetogênese, as bactérias que realizam essa fase só podem conseguir produzir os sulfetos na presença de sulfatos e outros compostos com enxofre, o que é uma desvantagem do ponto de vista da produção de metano. Assim, para evitar a competição pelos substratos, deve-se reduzir ao máximo a presença de compostos sulfurosos, para facilitar o crescimento das bactérias metanogênicas.

Os resíduos sólidos urbanos e orgânicos, junto com os resíduos agrícolas e pecuárias são importantes fontes de produção de biogás pela degradação anaeróbia da matéria orgânica. Os principais gases que compõem o biogás é o metano CH₄ e o dióxido de carbono CO₂, e sua qualidade está atrelada à quantidade de cada um presente (FIGUEIREDO, 2011).

Como discutido na etapa de metanogênese, dois grupos diferentes de bactérias realizam a digestão anaeróbia, as acetotróficas que utilizam ácido acético para a produção de biogás; e as hidrogenotróficas, que reduzem o dióxido de carbono a metano e vapor d'água (FIGUEIREDO, 2011).

O poder calorífico do biogás está atrelado diretamente ao grau de pureza do gás: quanto maior o volume de metano em relação aos outros, maior seu poder de queima. Outras impurezas, como vapor d'água, acabam por atrapalhar a queima do gás e até gerar prejuízos como a corrosão de equipamentos. Além disso, outros fatores como temperatura e pressão também são importantes para o aproveitamento energético do biogás (FIGUEIREDO, 2011).

3.5 Métodos Físico-Químicos para Tratamento de Biomassa

O aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos é uma alternativa correta do ponto de vista ambiental no âmbito de seu tratamento, além de ser uma oportunidade de negócios. No entanto, a viabilidade econômica depende do balanço entre as receitas e as despesas que esse modelo de tratamento pode gerar.

Diversas tecnologias estão disponíveis no mercado e muitas delas de forma comercial, com empresas atuando diretamente em conjunto com a esfera pública para atingir uma solução ideal para os Resíduos Sólidos Urbanos.

A produção de energia a partir de resíduos é conhecido no meio acadêmico como Waste-to-Energy (WtE), ou Resíduo-para-Energia, em tradução livre. A maioria dos processos WtE produzem eletricidade ou calor diretamente a partir da combustão, ou produzem combustíveis mercantilizáveis, como metano, metanol, etanol ou outros combustíveis sintéticos.

A produção de energia elétrica a partir de Resíduos Sólidos Urbanos tem duas principais características (FEAM - MG, 2012):

- Exige a coleta e transporte dos resíduos, envolvendo todo o acondicionamento adequado, já que o conteúdo energético por unidade de volume é baixo;
- As tecnologias existentes possuem uma forte economia de escala, isto é, os gastos decaem consideravelmente com o aumento da capacidade de produção.

Os valores praticados para a disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos em aterros sanitários são de R\$20/t, naqueles administrados pela esfera pública e R\$40/t para os aterros privados. Esses valores são geralmente bem inferiores à tratamentos, inviabilizando o uso de tecnologias diferentes e dificultando a cobertura dos custos de operação e manutenção das instalações. Nesse processo, entretanto, as externalidades negativas não são levadas em consideração, tornando-se difícil sua comparação (FEAM - MG, 2012).

Nos itens a seguir serão estudados alguns tipos de tecnologias que permitem o reaproveitamento energético da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. Se encontram a incineração, fermentação, extração de óleo, pirólise e gaseificação.

3.5.1 Incineração

A combustão direta de resíduos sólidos domésticos, também conhecidos como incineração, queimam biomassa em aquecedores para produzir vapor d'água de alta pressão. Esse vapor roda uma turbina que é conectada com um gerador. Em alguns casos, o calor da usina também é capturado para aquecer água e construções, especialmente na Europa e Estados Unidos, por um processo conhecido como cogeração de energia, que tem o melhor tipo de aproveitamento energético. (LEMOS, 1997) Enquanto a eficiência elétrica dos incineradores fica entre 14-28%, com o uso da cogeração esse valor sobe para acima dos 80%, baseado no poder calorífico do resíduo a ser incinerado (RAMBOLL, 2006).

Um problema associado com a incineração de resíduos sólidos urbanos para a produção de energia eléctrica, é o potencial de poluentes entrarem na atmosfera com os gases de combustão a partir da caldeira. Estes poluentes podem ser ácidos e na década de 1980 foram relatados como causadores de danos ao meio ambiente, transformando a chuva em chuva ácida. Desde então, a indústria eliminou este problema com o uso de purificadores de cal e precipitadores eletro-estática em chaminés. Ao passar a fumaça

através de dispositivos lavadores de base de cal, quaisquer ácidos que podem estar no ar são neutralizados, o que impede que o ácido chegue à atmosfera e prejudique o meio ambiente. Muitos outros dispositivos, como filtros de tecido, reatores e catalisadores destroem ou capturam outros poluentes regulamentados. (AUSTRIA, 2010) Porém, apesar de ainda ser motivo de debate e controvérsia, o Ministério do Meio Ambiente Alemão confirma que as usinas modernas de incineração não são mais emissores significantes em termos de dioxinas, poeira e metais pesados, devido à legislações mais pesadas e melhores tecnologias (GERMANY, 2005).

Os resíduos de incineração de biomassa são essencialmente cinzas, que podem ser utilizados como condicionadores do solo para fechar os ciclos de nutrientes. As cinzas podem, também, serem levadas à aterros sanitários, reduzindo drasticamente seu volume se não tivessem sido incineradas, e até serem utilizadas na pavimentação de estradas e fabricação de tijolos (GOMES, SILVA e BUDKE, 2013).

Os principais argumentos a favor do uso de incineração para resíduos sólidos são que as emissões nocivas foram显著mente reduzidas com os avanços tecnológicos; que as usinas de incineração que geram energia e calor podem substituir usinas termoelétricas tradicionais, usando ainda energias renováveis ou fontes indesejáveis como resíduos sólidos; as cinzas resultantes da combustão são comprovadamente não-tóxicas e podem ser dispostas em aterros ou usados na construção; para áreas densamente povoadas, o espaço utilizado por aterros é difícil de se encontrar; a incineração de resíduos sólidos domiciliares evita a liberação de metano na atmosfera, que causa muito mais dano que o dióxido de carbono para o efeito estufa; além de que, na Europa e nos Estados Unidos, a maior parte dos locais que usam a incineração para resíduos sólidos já possuem uma alta taxa de reciclagem, não enviando resíduos recicláveis para a queima (GERMANY, 2005).

Os principais argumentos contrários ao uso da incineração são que os gases de combustão muito finamente particulados acabam por se esvair à atmosfera, causando problemas de saúde nos residentes próximos ao local da usina; as usinas mais antigas em uso ainda podem ter problema de emissão de dioxinas e outros gases maléficos à saúde humana; a emissão de metais pesados ainda não foram completamente estudados, e alguns casos apontam como tóxico à saúde humana; alguns tipos de cinzas provenientes do incinerador possuem metais pesados, e seu reuso ainda não foi estudado com devida profundidade, sendo banido até seu uso no Reino Unido (UK WIN, 2014); outras tecnologias já existem e são comprovadamente mais limpas, que acabam competindo

entre si com os incineradores, geralmente mais baratos; as comunidades geralmente não são receptivas com a ideia de um incinerador próximo de sua residência, baixando os preços das propriedades ao redor; a prevenção, minimização, reutilização e reciclagem devem ser levadas em conta com maior prioridade que a incineração; o incinerador pode gerar mais gás carbônico e outros gases do efeito estufa que as demais tecnologias para tratamento dos resíduos sólidos (GAIA, 2014).

A combustão direta de materiais lenhosos para a produção de energia elétrica é atualmente o maior mercado de biomassa ao redor do mundo. Apesar da tecnologia ser usada e comprovadamente funcional, a eficiência ainda é limitada (JENKINS, 1998).

Os incineradores reduzem os resíduos em massa ao redor de 80-85% e em volume ao redor de 95%, dependendo da composição desse resíduo. Isso quer dizer que mesmo que a incineração não substitua completamente a disposição em aterros sanitários, diminui significantemente o volume necessário. Em 2005, na Dinamarca, a incineração de resíduos produziu um total de 4,8% do consumo total de eletricidade do país e 13,7% do total de calor consumido no país. (RAMBOLL, 2006) As usinas de combustão direta e incineração possuem geralmente uma eficiência térmica de apenas 20%, porém podem ser ampliados por um processo chamado co-incineração ou queima conjunta.

A co-incineração envolve a queima da biomassa misturada com carvão. Esse processo pode ser realizado nas usinas de incineração tradicionais, por isso o processo de queima conjunta é um dos tipos mais econômicos de se produzir energia a partir de biomassa, já que pode-se utilizar os equipamentos existentes sem grandes modificações estruturais. Algumas usinas termoelétricas baseadas em carvão já fazem o processo contrário, utilizando resíduos sólidos e biomassa juntos para reduzir o uso do carvão, um combustível não renovável, além de reduzir as emissões de dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio (JENKINS, 1998).

3.5.2 Fermentação

O processo de fermentação ocorre quando as bactérias usam os açúcares presentes no meio para metabolizar energia de seu crescimento, produzindo álcool no processo. Para ter esse açúcar disponível para as bactérias, geralmente a biomassa sofre um pré-tratamento com ácidos e enzimas com o objetivo de quebrar a matéria prima em moléculas metabolizáveis, além de ajudar a reduzir o volume da matéria-prima. As

moléculas de celulose e outras partes derivadas são quebradas por enzimas e ácidos em sacarose, que é então fermentada em etanol (LIN e TANAKA, 2006).

O etanol é geralmente misturado com combustíveis derivados do petróleo ou diesel para aumentar seu rendimento. Essa mistura requer etanol anídrico, já que outros hidrocarbonetos não se misturam com a água. A desidratação de etanol e o plantio de culturas agrícolas especial são necessários para o uso eficaz como combustível, as vezes utilizando grandes áreas e demandando muita energia no processo, porém o álcool é a fonte de energia líquida renovável mais utilizada comercialmente (LIN e TANAKA, 2006).

A produção dos chamados biocombustíveis pode incluir a fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares, especialmente os restos de alimentos e frutas. Um estudo de 2008 que indica o uso de polpa e cascas de banana para a produção de etanol diz que a hidrólise ácida como pré-tratamento não é recomendado, já que o ganho em açúcares totais é muito baixo, barateando os custos e facilitando o processo. Também afirma que a banana madura é recomendada como substrato para fermentação, já que tem um alto teor potencial na produção de bioetanol, com a produtividade próxima à de cana-de-açúcar. Isso é ótimo do ponto de vista ambiental, uma vez que o poder calorífico dos resíduos sólidos pode ser equiparado aos métodos tradicionais de geração (SOUZA, SCHULZ, *et al.*, 2008).

É claro que o uso principal dessa técnica de tratamento de resíduos sólidos é para resíduos agrossilvopastoris, com sua alta incidência de materiais celulosos, lenhosos, resto de vegetais e esterco. A fermentação de esterco fica comprovada como um eficaz método de estabilização para posterior uso como adubo, já que o uso direto do esterco no solo pode transmitir organismos patogênicos e toxicidade, além de contaminar o operador, o solo e os vegetais. Já o uso de esterco maduro pode ter efeito estimulador no crescimento de plantas em função da presença de nutrientes minerais, microrganismos benéficos, substâncias húmicas e as características físicas de um adubo orgânico estabilizado. A estabilidade ou maturidade é característica importante de qualidade para um adubo orgânico (SEDIYAMA, VIDIGAL, *et al.*, 2008).

O processo de fermentação, de forma genérica, funciona da seguinte maneira: A fermentação alcoólica converte um mol de sacarose em quatro mols de etanol e quatro mols de dióxido de carbono, com a produção de dois mols de ATP no processo. A fórmula química geral para a fermentação alcoólica é:



Essa sacarose, conforme já citado, pode ser obtida a partir da adição de enzimas e ácidos que quebrariam os restos de alimentos e outros resíduos orgânicos em partes menores, tornando possível aos microorganismos e bactérias de digerir os açúcares presentes nesse substrato, gerando álcool e gás carbônico no processo. O processo normal de fermentação alcoólica é necessário para a produção de bebidas alcoólicas, etanol combustível e o crescimento da massa de pão (devido à liberação de CO₂) (JACOBS, 2008).

3.5.3 Extração de Óleo

Os óleos animais e vegetais são especialmente adequados como matéria-prima de combustível líquido pois, ao contrário dos carboidratos, eles são em grande parte desoxigenados e semelhantes em estrutura aos hidrocarbonetos de cadeia longa de diesel. O óleo pode ser extraído diretamente a partir da biomassa por separação mecânica ou extração de solvente.

A separação mecânica pode extrair até 90 por cento do óleo disponível. Esta é a tecnologia preferida para a extração de óleos de alto valor de alimentos e processamento de matéria-prima com alto teor de óleo (TYSON, BOZELL, *et al.*, 2004).

A extração por solvente é usada principalmente com biomassas com rendimento mais baixos do óleo ou após a separação mecânica. O óleo é recuperado por evaporação do solvente, o qual, em seguida, é re-condensado e reutilizado. As perdas de solvente são geralmente pequenas e formar um custo insignificante quando comparado com o custo da matéria-prima de biomassa (TYSON, BOZELL, *et al.*, 2004).

Os óleos vegetais e gorduras animais também estão disponíveis na forma concentrada como óleos de cozinha reciclados. As propriedades físicas e químicas do biodiesel resultante dependem das qualidades da matéria prima do óleo e a tecnologia de processamento.

O processo genérico de produção de biodiesel, válido para a produção a partir de óleo vegetal ou gordura animal como matéria-prima, é a transesterificação. O processo inicia-se juntando o óleo vegetal com um álcool (metanol, etanol, propanol, butanol) e catalisadores (que podem ser ácidos, básicos ou enzimáticos). Nesse processo, obtém-se um éster metílico de ácido graxo (Biodiesel) e glicerina como subproduto, que é removida por decantação. A glicerina formada é usada por indústrias farmacêuticas, de cosméticos e de explosivos. O preço da glicerina era alto quando começou-se a produzir biodiesel em

grande quantidade (por volta de 2002), mas caiu bastante em regiões (como a Europa) onde havia mais produção que consumo (FURFARI, 2008).

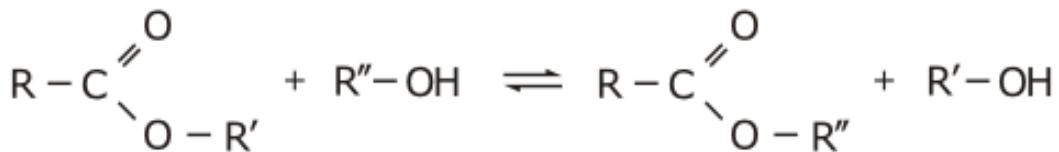


Figura 5 - Processo genérico da Transesterificação

As principais vantagens da utilização do biodiesel são que, principalmente, é um combustível de origem renovável, contrapondo com o diesel comum proveniente de petróleo; contém alto teor de lubricidade, maior até que o do diesel comum; contribui para a geração de empregos no setor primário (agricultura); não se faz necessária nenhuma mudança nos motores automotivos para misturas de biodiesel com diesel de até 20% (ONG REPÓRTER BRASIL, 2009).

Como desvantagens, pode ser citado, entre outros, a alta geração de glicerina, que não há grande assimilação no mercado e sua queima gera um produto cancerígeno; no Brasil, as plantações de oleaginosas estão invadindo as florestas tropicais e destruindo a biodiversidade; a produção intensiva de matéria-prima vegetal leva a um esgotamento das capacidades do solo, gerando desertificação no local; pode haver um aumento nos preços dos alimentos pela competição de espaço de plantio com a matéria-prima para a produção de biodiesel (ONG REPÓRTER BRASIL, 2009).

3.5.4 Pirólise

Pirólise é um processo em que os compostos orgânicos são aquecidos na ausência de oxigênio e quebrados em componentes mais básicos. No caso da pirólise de resíduos sólidos, os compostos orgânicos são a fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares e os produtos gerados são óleo, gás e carvão (COMPTON, 2012).

A pirólise é a etapa inicial na gaseificação, e pode trazer informações úteis sobre os produtos gerados por esse processo. A pirólise sozinha gera três produtos, em três diferentes fases: uma mistura de gases; um líquido (óleo); e um resíduo sólido (carvão). A proporção e a composição entre as fases depende de uma variedade de parâmetros, sendo que cada parte tem um potencial comercial, além de limitações. A pirólise é particularmente interessante para a fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares.

Duas tecnologias são existentes e diferem entre si com o método de transferência de calor: pirólise rápida para a produção de bio-óleo e pirólise lenta para a produção de carvão (BECIDAN, 2007).

A pirólise rápida (flash pyrolysis) acontece em menos de 2 segundos, com as temperaturas entre 400 e 550°C, dependendo do que se deseja obter. O bio-óleo é responsável por 60% do produto, sendo os restantes 40% divididos igualmente entre o carvão e o gás. É importante que a matéria-prima seja mais seca e que o gás sofra um choque térmico a baixas temperaturas após formado. Já a pirólise lenta, ou pirólise convencional, visando a produção de carvão, pode durar minutos ou até horas para terminar. Nesse processo, a biomassa é esquentada até 500°C, e como os gases não escapam tão rápido como na outra pirólise, eles continuam reagindo entre si, enquanto o óleo e o carvão são formados (MOHAN, PITTMAN e STEELE, 2006).

O bio-óleo tem mais de 200 compostos e é um portador de energia muito flexível. Pode ser usado como gerador de calor em aquecedores, como um substituto de óleo combustível. Também pode ser usado como diesel nos transportes, mas antes necessita ser padronizado, já que tem um alto teor de umidade, baixo pH, alto teor de corrosão e é ruim para ignição. O carvão, que também é um produto da pirólise de biomassa, é um resíduo sólido rico em carbono, podendo ser melhorado para carvão ativado, a ser usado na purificação de água, extração de metais, remédios, e indústria alimentícia. A mistura gasosa de pirólise é seca (sem umidade) e contém como componentes principais CO₂, CO, CH₄, H₂ e hidrocarbonetos com C₂. Pode ser usado para a produção de calor e geração de energia, mas é geralmente utilizado para sustentar a pirólise nas usinas, ou para secar a matéria-prima (BECIDAN, 2007).

As vantagens da utilização da pirólise para os resíduos sólidos domiciliares são: é mais seguro e mais ambientalmente correto que a incineração e aterros; permite a recuperação de metais e vidro antes ou depois do processo; é adequado para um fluxo de resíduos heterogêneo; complementa a reciclagem tradicional; reutiliza produtos descartados; diminui as distâncias que os resíduos percorrem, além de requerer menos área e maquinaria que os métodos tradicionais utilizam (COMPTON, 2012).

3.5.5 Gaseificação

A tecnologia de gaseificação é conhecida desde 1839, quando o químico alemão Karl Gustav Bischof construiu o primeiro gaseificador. No entanto, o grande problema

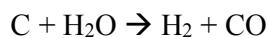
para ele foi conseguir produzir um gás de alto poder calórico e de composição química constante independente da matéria prima fornecida, que pudesse ocorrer uma variação de umidade na composição do material de entrada, além de baixa emissão de poluentes atmosféricos e que ainda fosse capaz de eliminar o alcatrão (óleos de composição complexa) no seu gás resultante. Entretanto, atualmente já existe tecnologia suficiente capaz de solucionar esses problemas (CIMM, 2010).

Entre as vantagens da gaseificação estão o baixo custo do serviço, capacidade de processamento do resíduo urbano, economia de combustível fóssil aplicado à geração de eletricidade, geração de energia alternativa e redução de poluentes e doenças, além do produto do processo poder gerar outros combustíveis sintéticos (CIMM, 2010).

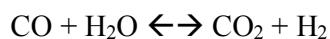
Como desvantagens, pode-se citar que ainda é um desafio gerar energia de forma economicamente viável, já que o pré-processamento dos resíduos sólidos podem ser custosos; alguns chamam a gaseificação de incineração disfarçada, já que a tecnologia ainda gera uma fumaça de origem duvidosa e que pode causar problemas para a qualidade do ar e saúde pública (GAIA, 2006); somente algumas usinas de gaseificação de resíduos sólidos foram construídas e testadas, não havendo resultados concretos da eficácia desse meio (THE BLUE RIDGE ENVIRONMENTAL DEFENSE LEAGUE, 2009).

O processo de gaseificação ocorre em 5 diferentes etapas (GODINHO, 2006):

1. O processo de desidratação ou secagem ocorre em cerca de 100°C. Normalmente, o vapor resultante é misturada no fluxo de gás e pode estar envolvido com reações químicas subsequentes, especialmente a reação água-gás, se a temperatura for suficientemente elevada (ver o passo 5);
2. O processo de pirólise (ou desvolatilização) ocorre em cerca de 200-300°C. As substâncias voláteis são liberados e carvão é produzido, resultando em até 70% a diminuição de peso. O processo é dependente das propriedades do material carbonoso e determina a estrutura e composição do carvão, o qual irá, em seguida, sofrer reações de gaseificação;
3. O processo de combustão ocorre enquanto os produtos voláteis e alguns do carvão reagem com o oxigênio para formar principalmente dióxido de carbono e pequenas quantidades de monóxido de carbono, que fornecem calor para as reações de gaseificação subsequentes.
$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$
4. O processo de gaseificação ocorre enquanto o carvão reage com o carbono e vapor para produzir monóxido de carbono e hidrogênio, através da reação:



5. Além disso, na fase de gás reversível, a água-gás sofre uma reação de deslocamento e atinge o equilíbrio muito rápido nas temperaturas de um gaseificador. Isso equilibra as concentrações de monóxido de carbono, vapor de água, dióxido de carbono e hidrogênio.



A imagem a seguir demonstra resumidamente o processo usual de gaseificação, sendo a entrada no Input, a saída de gás de síntese no Raw Gas, a saída de sólidos no Metal Slag e a entrada de ar necessária nas chamadas Own Gas e O₂:

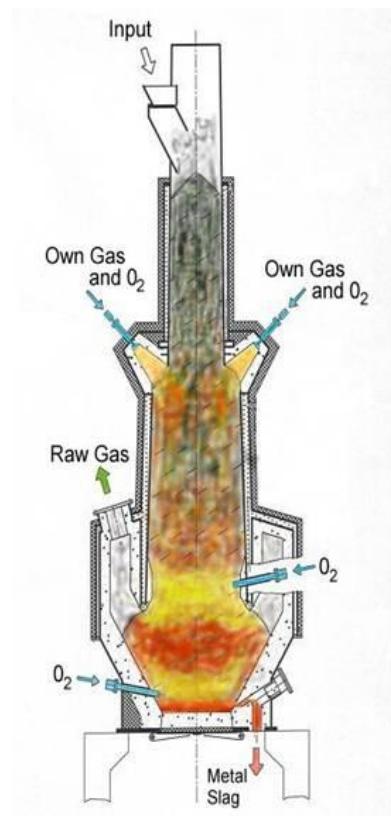


Figura 6 - Desenho Simplificado do Processo de gaseificação

O produto imediato da gaseificação é o syngas, ou gás de síntese, que consiste em uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio, com pequenas partes de dióxido de carbono e metano. O syngas puro não é um produto final e, mesmo que seja queimado para a geração de calor, vapor ou eletricidade, ele requer um processamento posterior para ser usado como gás natural. O gás de síntese pode ser convertido também para metanol, etanol ou outros combustíveis químicos, inclusive esse metanol ser utilizado para a produção de biodiesel conforme descrito no item 3.5.3 (FAAIJ, REE, *et al.*, 1996).

A gaseificação não é limitado a biomassa. Carvão e outros combustíveis de hidrocarbonetos podem ser gaseificados, assim como pneus e outros tipos de combustíveis. Quase todo o material pode ser gaseificado, nas condições corretas. No setor de energia fóssil, a gaseificação permite a geração elétrica a partir de combustíveis como o carvão para alcançar os níveis de emissões semelhantes aos das usinas a gás natural. Na indústria, a gaseificação permite a produção de produtos de maior valor, como o metanol e etanol (FAAIJ, REE, *et al.*, 1996).

3.6 Fluxograma

A imagem a seguir sumariza as atuais tecnologias do tratamento de resíduos sólidos domiciliares.

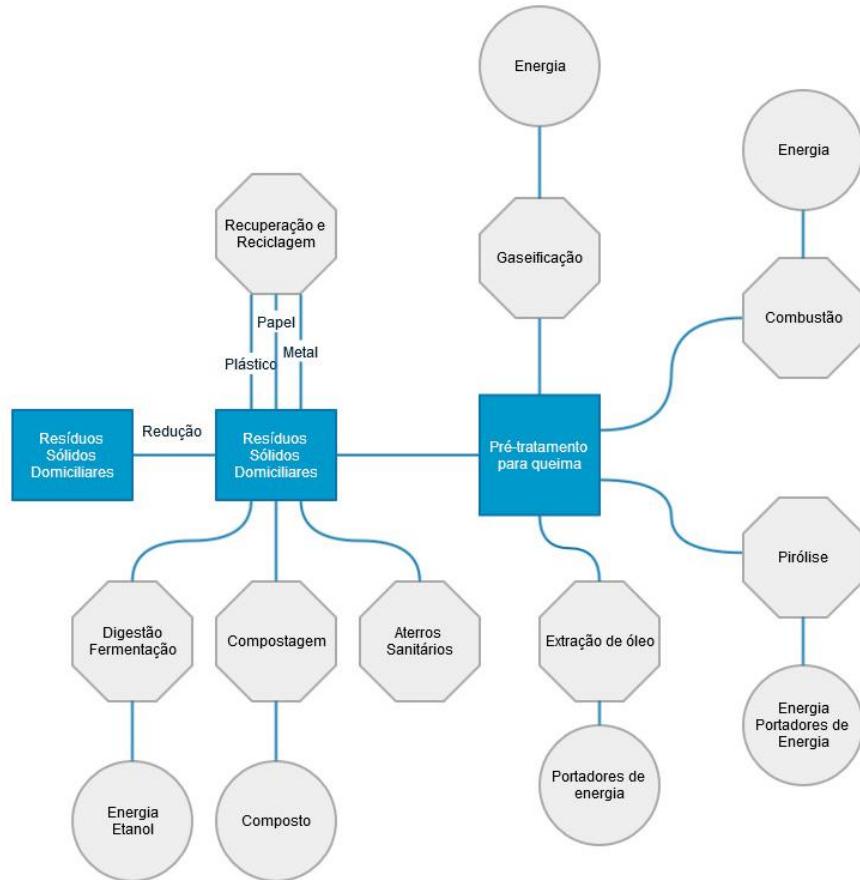


Figura 7 - Fluxograma resumo – baseado em (BECIDAN, 2007)

4 METODOLOGIA

4.1 Método de Pesquisa

Começando com a extensa revisão bibliográfica realizada acerca dos diferentes tipos possíveis de tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares, foi feito uma análise pormenorizada acerca da viabilidade do uso desses tratamentos e sua implantação.

A metodologia de pesquisa usada nesse trabalho foi a revisão bibliográfica sistemática. Esse tipo de pesquisa é uma revisão em que é avaliado e interpretado diversas pesquisas relevantes disponíveis para a questão proposta. Além disso, enfatiza a descoberta de novos princípios, e o diagnóstico e análise de outros estudos individuais e seus resultados diferentes.

Segunda a definição de Levy e Ellis, (LEVY e ELLIS, 2006):

Revisão bibliográfica sistemática é o processo de coletar, conhecer, compreender, analisar, sintetizar e avaliar um conjunto de artigos científicos com o propósito de criar um embasamento teórico-científico (estado da arte) sobre um determinado tópico ou assunto pesquisado.

Há vantagens e desvantagens desse tipo de linha pesquisa, como pontos positivos, pode-se citar o maior poder de síntese, objetividade mais aparente, é um estudo perfeitamente replicável e verificável, além de ser dinâmico e balanceado. A principal vantagem, porém, é a identificação de áreas ou problemas que necessitam de futuras pesquisas. Para os pontos negativos, fica claro que além de demandar maiores esforços de pesquisa, as avaliações de qualidade são atividades difíceis que podem ser fonte de viés, já que cada problema demanda formas específicas de avaliar a qualidade dos artigos (LOUREIRO, 2012).

Ainda segundo Levy e Ellis (2006), o modelo de revisão sistemática pode ser dividido em três principais partes:

- Entrada:**

Que inclui artigos clássico, livros-textos, artigos de referência e protocolo da revisão;

- **Processamento:**

Que envolve conhecer e compreender a literatura, aplicar a revisão, analisar, sintetizar e interpretar os resultados;

- **Saída:**

Que tem como produto os relatórios e apresentações dos resultados.

4.2 Materiais

Para o presente trabalho, cuja linha de pesquisa principal é a determinação da viabilidade das alternativas de tratamento da fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares à disposição final em aterros sanitários, vários fatores devem ser levados em conta. Os principais, usados nessa análise, serão:

- Produto gerado;
- Aspectos Econômicos;
- Impactos no Meio Ambiente;
- Tecnologias Disponíveis;
- Panorama Mundial;

A partir desses fatores, as tecnologias serão analisadas caso-a-caso, buscando uma conclusão sobre as mais viáveis de implantação para o panorama brasileiro. Serão utilizadas diversas fontes e pesquisas previamente realizadas e confrontadas entre si para a obtenção de um resultado fiável e transparente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No tópico de resultados e discussões, serão analisadas as viabilidades de todas as alternativas estudadas previamente, verificando seu produto gerado; os aspectos econômicos envolvidos; os impactos que passam ocorrer no meio ambiente; as tecnologias disponíveis na atualidade; e o panorama de utilização dessas tecnologias no mundo.

5.1 Compostagem

A compostagem é o processo de decomposição de matéria orgânica na presença de oxigênio, reciclando os nutrientes e transformando-os em um composto, a ser usado como fertilizante.

5.1.1 Produto gerado

O resultado da compostagem aeróbia é um material húmico com grande importância na agregação do solo, sendo uma fonte de nutrientes para a vegetação, além de favorecer a estrutura, retenção de água e a estabilização de nutrientes com o tempo.

De acordo com Eggerth (1996), o composto gerado tem seis principais segmento de mercado: Agricultura, para a produção de alimentos e pastagens; Paisagismo, para propriedades industriais e comerciais, além da manutenção do solo; Viveiro de plantas, com vasos de plantas, plantios de raízes aéreas e produção de sementes; Agências públicas, com a manutenção do paisagismo em parques, áreas de recreação, estradas e outras propriedades públicas; Residenciais, com paisagismo de casas e jardinagens; e Outros, com projetos de reflorestamento e cobertura de solo.

Certos fatores, entretanto, prejudicam a demanda e o mercado do composto. Entre eles, pode-se citar: Qualidade do produto: que inclui a maturação, tamanho das partículas, odor agradável, ausência de contaminantes, entre outros; Política/Regulamentação: a falta de políticas de padrão de qualidade e requisitos de processo acabam afetando o mercado do composto; Competição de produtos complementares: os fertilizantes químicos e outros produtos como silte, esterco e turfa, estão já bem inseridos na realidade de mercado, gerando competição aos compostos; Transporte: para longas distâncias, o custo do

transporte é caro, portanto políticas que aproximem as usinas que fabricam o composto do mercado consumidor é importante; Falta de popularidade do produto: devido à dificuldade de se ter um resultado palpável em relação ao uso dos compostos, a sua adesão e utilização ainda é baixa (EGGERTH, 1996).

5.1.2 Aspectos Econômicos

Atualmente, a equação dos aspectos econômicos só leva em consideração os ganhos monetários e financeiros, de acordo com a lógica capitalista. Os ganhos ambientais e ecológicos do processo de compostagem ficam em segundo plano, mesmo com a geração de resíduos sólidos sendo uma atividade indesejada, assim como os vazadouros e aterros, porém a disposição final acaba sendo mais barata do que o tratamento por compostagem.

O gasto inicial de construção de uma usina de compostagem depende muito da técnica escolhida (ver 5.1.4), porém o gasto com manutenção e operação é baixo. Além disso, a compostagem pode ser feita de forma descentralizada em pequenos postos, ou até em domicílios, evitando assim gastos com transporte e armazenamento, além da triagem de pequenas quantidades ser muito mais fácil.

Por fim, o composto gerado nas grandes usinas e centrais de compostagem pode ser vendido a paisagistas e agricultores, especialmente aqueles interessados em agricultura orgânica, isto é, sem fertilizantes químicos e agrotóxicos. Como a demanda por esse tipo de alimentação mais saudável vem subindo nos últimos anos, pode ser a época ideal para a implantação de novas usinas e de venda de composto à esses interessados.

5.1.3 Impactos no Meio Ambiente

Obviamente, a compostagem é um meio de tratamento melhor do que os vazadouros a céu aberto. Por conter toda uma técnica de separação de resíduos e de cuidados na construção da usina, a compostagem também já se torna mais eficaz e ambientalmente correta que os aterros sanitários e controlados.

É importante citar que o chorume, dos maiores problemas das destinações finais, também é criado na compostagem, já que é um produto da decomposição natural. Porém esse pode retornar à circulação na composteira, além de conter muito menos contaminantes que o chorume dos aterros e vazadouros. Massukado (2008) indica que as

principais fontes de contaminação são as baterias, tintas, papéis e cosméticos, que são separados e não entram no processo de compostagem.

Uma coleta seletiva eficiente pode fornecer somente matéria-prima de alta qualidade para a compostagem e para reciclagem de inertes. Isso eliminaria o risco de contaminação do composto por metais pesados, porém um composto com pequena contaminação poderia ser utilizado para fins paisagísticos e florestas, somente sendo contraindicado para plantas com fins comestíveis (EGGERTH, 1996).

5.1.4 Tecnologias Disponíveis

Segundo Massukado (2008), a compostagem é bastante flexível, podendo ser realizada em grandes escalas, como fazendas e municípios e em pequenas escalas, como casas e escolas. Desse modo, o procedimento pode incluir desde soluções mais simples, até alternativas mais tecnológicas.

Ainda de acordo com Massukado (2008), a compostagem pode ser feita por três principais técnicas: Leiras revolvidas (windrow), Leiras estáticas aeradas (static piles) e Sistema fechado ou acelerado. Os pontos positivos e Negativos de cada um estão resumidos na Tabela 3.

Para a escolha da técnica na aplicação a grande escala, os aspectos positivos e negativos devem ser sumariamente pesados, levando em consideração a área necessária, clima, material de entrada, investimento inicial e de manutenção, odores e tempo necessário de compostagem.

Tabela 3 - Aspectos Positivos e Negativos das diferentes técnicas de compostagem aeróbia (MASSUKADO, 2008)

Método	Aspectos positivos	Aspectos negativos
Leiras revolvidas ou sistema <i>windrow</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo investimento inicial; • Flexibilidade na quantidade de resíduos processada; • Simplicidade de operação; • Uso de equipamentos mais simples; • Emprego de mão de obra. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requer mais área; • Odor mais difícil de ser controlado, principalmente no momento do revolvimento; • Depende do clima. Em períodos de chuva o revolvimento fica prejudicado.
Leiras estáticas aeradas ou <i>static piles</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo investimento inicial; • Melhor controle de odores; • Etapa de estabilização mais rápida que o método de leiras revolvidas; • Melhor aproveitamento da área disponível; • Mais eficaz na eliminação de organismos patogênicos; 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessita de bom dimensionamento do sistema de aeração e controle dos aeradores durante a compostagem; • Operação também influenciada pelo clima; • Requer que o material de entrada seja o mais homogêneo possível.
Sistema fechado ou acelerado	<ul style="list-style-type: none"> • Menor demanda de área; • Menor dependência dos fatores climáticos; • Facilidade para controlar odores; • Reduz tempo de compostagem 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior investimento inicial; • Dependência de sistemas mecânicos; • Menor flexibilidade operacional para tratar volumes variáveis de resíduos; • Risco de erro difícil de ser reparado se o sistema for mal dimensionado.

5.1.5 Panorama Mundial

Conforme esperado, a situação atual do processo de compostagem se concentra mais especificamente na Europa e nos Estados Unidos. Segundo De Bertoldi (1998), os países que mais contém usinas de compostagem é a Alemanha (mais de 400 unidades) seguida da França (ao redor de 200 unidades). O problema, porém, é que a coleta seletiva mesmo nos países mais desenvolvidos ainda é insipiente, na França, por exemplo, apenas 5% da coleta é separada. Isso é falta de uma legislação específica que atente a esses problemas.

Nos anos 70, várias usinas foram construídas, porém fecharam na década seguinte, devido principalmente à péssima qualidade dos compostos, dificultando o mercado para esses produtos. Esse problema ocorria por causa dos altos índices de metais pesados, presença de materiais inertes nos compostos e problemas na produção (BERTOLDI, 1998). Hoje em dia, porém, novas técnicas estão sendo empregadas para mitigar esse problema, gerando um novo entusiasmo em torno dessa alternativa.

5.2 Biometanização

A biometanização é a formação de metano a partir de microorganismos, sendo a fase final na decomposição de biomassa.

5.2.1 Produto gerado

O produto gerado pela biometanização da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares é predominantemente o biogás. O biogás é um gás composto, majoritariamente, de metano e dióxido de carbono (CH_4 e CO_2). Esse biogás pode ser usado na própria usina para geração de energia, sendo o excedente da eletricidade colocado na rede elétrica para ser vendido. Ou o biogás pode ser vendido diretamente para o uso em outros lugares.

Além do biogás, a biometanização gera como resíduo um composto orgânico, que pode posteriormente ser maturado e vendido como o composto da compostagem aeróbica.

5.2.2 Aspectos Econômicos

Uma usina de biometanização pode gerar receita a partir de diversas fontes: venda da energia elétrica gerada nas turbinas, venda do composto resultante do processo, venda dos recicláveis que são triados para fora da fração orgânica, venda de créditos de carbono e, além disso, o valor pago pelos órgãos públicos para o tratamento, caso a usina seja da iniciativa privada (REICHERT e SILVEIRA, 2005).

Os créditos de carbono podem ser obtidos no mercado europeu devido à não geração de gases causadores do efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono e o metano, e sua liberação para a atmosfera. Estima-se que há um potencial de redução de 12,1 milhões de toneladas de CO_2 equivalentes por ano (REICHERT e SILVEIRA, 2005).

Seguindo a linha de raciocínio de Reichert e Silveira (2005), se não houver um pagamento por parte do gerador do resíduo, a biometanização não tem viabilidade financeira, portanto não é um empreendimento autossustentável. Além disso, o mercado de crédito de carbono é flutuante, podendo alterar a viabilidade do projeto para melhor ou para pior, dependendo dos valores.

A figura a seguir revela a participação em porcentagem de cada uma das origens da receita:

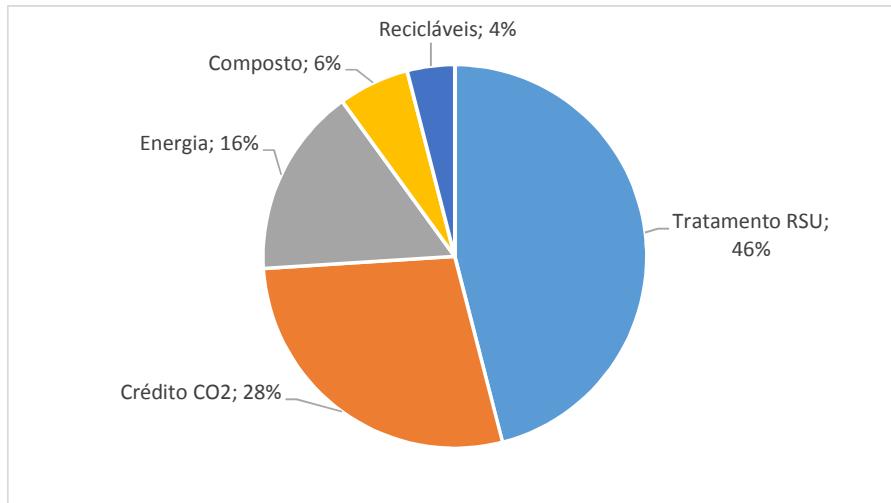


Figura 8 - Participação de diferentes origens na receita total (REICHERT e SILVEIRA, 2005)

Nota-se que o valor pago pela prefeitura corresponde à quase metade da receita total, tornando um empreendimento de biometanização totalmente dependente de recursos públicos. Porém, uma vez analisados esses dados, tem-se que o investimento privado é perfeitamente viável.

5.2.3 Impactos no Meio Ambiente

Os sistemas de biometanização removem a fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares e os transforma em biogás, um gás com um potencial comercial muito alto e que pode ser usado para a geração de calor e energia elétrica. Portanto, além desse gás ser vendido e ter outras utilizações, a parte orgânica (conforme demonstrado, mais da metade dos resíduos sólidos domiciliares totais) deixa de ir aos aterros sanitários, diminuindo sua ocupação de espaço em área.

Além disso, a diminuição da disposição de resíduos sólidos orgânicos em aterros sanitários, reduz os custos com manutenção, ampliação e implantação de novas unidades, além de aumentar sua vida útil. Os problemas com chorume, maus odores, e riscos de contaminação do solo e lençol freático também serão reduzidos drasticamente.

5.2.4 Tecnologias Disponíveis

Os projetos de implantação de biometanização com geração de energia são de muito difícil implantação no Brasil. Como não há o desenvolvimento de novas tecnologias nacionais, toda a maquinaria deve ser importada do exterior, acarretando altos custos, além de gastos com transporte, impostos e taxas alfandegárias (FIGUEIREDO, 2011).

As principais empresas que fornecem as tecnologias de biometanização são: Valorga (francesa e alemã), DRANCO (belga), WAASA (finlandesa), Kompogas (suíça) e as BTA e Linde-KCA (ambas alemãs). Como todas são europeias, e com a desvalorização do real frente ao euro, essas tecnologias se tornam caríssimas para a implantação no Brasil, dada a realidade local.

5.2.5 Panorama Mundial

O Panorama Mundial da utilização de biometanização para a fração orgânica de Resíduos Sólidos Domiciliares é bastante promissor. Com biodigestores operando nos EUA desde 1939, essa é uma tecnologia já bastante difundida e aceita. Na Espanha, atualmente, já existem 19 usinas de processamento, com capacidade de 1,1 milhões de toneladas de matéria orgânica por ano, tornando esse o país com maior potencial e capacidade de tratamento de resíduos sólidos domiciliares de toda a Europa (FORSTER-CARNEIRO, PÉREZ e ROMERO, 2007).

Há diversas outras usinas de processamento de biometanização com geração de energia atuando na Europa, especialmente por esse continente contar com uma matriz energética caríssima, alta disponibilidade de capital para investimento em outros setores e, principalmente, a falta de áreas disponíveis para aterros. Com isso, a biometanização se torna um meio muito eficaz para o manejo e tratamento de resíduos sólidos.

5.3 Incineração

A incineração é um processo que envolve a combustão de substâncias orgânicas das matérias-primas, convertendo o material em cinzas, gases e calor, este que pode ser posteriormente reaproveitado.

5.3.1 Produto gerado

Do processo de incineração de resíduos sólidos resultam como produtos finais a energia térmica (que pode ser transformada em energia elétrica), águas residuais, gases, cinzas e escórias. Os gases resultantes da incineração têm de sofrer um tratamento posterior, uma vez que são compostos por substâncias consideradas tóxicas, como metais pesados e dioxinas.

Um incinerador gera também emissões de gás carbônico, um gás causador do efeito estufa. Como parte do processo, fazem-se necessários equipamentos de limpeza de gases, tais como precipitadores ciclônicos de partículas, precipitadores eletrostáticos e lavadores de gases.

O efluente gerado pelo redução das escórias e pela lavagem dos gases, terá de sofrer um tratamento adequado já que é considerado um resíduo perigoso. Com a queima dos resíduos, é possível aproveitar energia térmica gerada transformando-a em energia eléctrica que pode ser utilizada no próprio local ou vendida à rede.

5.3.2 Aspectos Econômicos

Um estudo de Hauser e Lemme (2007) pesquisou os custos de implantação e manutenção de uma usina de incineração de resíduos domésticos no Rio de Janeiro visando o aproveitamento energético, baseado em um protótipo existente que consegue processar até 30 toneladas de resíduos sólidos domiciliares por dia. As conclusões encontradas pelo estudo indica que, do ponto de vista de um investidor privado, o projeto não é atraente, e só será economicamente viável se levar em consideração condições específicas que garantam preços diferenciados para o tratamento nessa tecnologia.

As receitas de um incinerador de resíduos sólidos urbanos é muito semelhante àquela de um biometanizador, conforme descrito no item 5.2.2. São provenientes, de forma mais proeminente, de um possível pagamento da esfera pública ao tratamento e da venda de energia e créditos de carbono. Além disso, a venda de reciclagem pode gerar uma receita extra.

O que Hauser e Lemme (2007) também indicam é que com as atuais mudanças na legislação corrente, diminuição da distância transporte para o tratamento, geração de emprego a operadores e catadores em centrais de triagem podem tornar os benefícios no

geral muito maiores, compensando os valores econômicos. Além disso, a tecnologia, por ser importada, encarece muito os custos de implantação e manutenção, tornando-se necessária a criação de uma tecnologia nacional.

5.3.3 Impactos no Meio Ambiente

Os impactos do meio ambiente do incinerador já foram amplamente discutidos no item 3.5.1, referente à incineração. Porém, é importante ainda frisar alguns fatores, como a produção de gases e materiais finamente particulados que podem gerar um alto índice de gases causadores do efeito estufa (GEE). Esses gases podem ser ácidos e tornar a chuva ácida, gerando problemas além da usina. Porém o uso de lavadores de cal e precipitadores eletrostáticos nas chaminés auxiliam na limpeza dos gases e reduzem drasticamente a emissão de poluentes.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente Alemão (2005), as legislações mais rigorosas tornaram a incineração mais seguras em termos de emissões de dioxinas, poeira e metais pesados, garantindo sua boa utilização. É interessante citar, que esse estudo do governo Alemão indica que as toxinas na atmosfera quintuplicam de quantidade no inverno, dizendo respeito que a produção de calor para as casas e comércio geram toda essa poluição, já que a incineração se mantém a mesma durante o ano todo.

Já em relação ao produto sólido da incineração, isto é, as cinzas, o impacto no meio ambiente é mais moderado, já que ela pode ser disposta em aterros sanitários normalmente, contendo um reduzido volume e massa em relação ao resíduo *in natura*. Além disso, toda a cinza está livre de patógenos e materiais tóxicos.

5.3.4 Tecnologias Disponíveis

Há diversos tipos diferentes de incineradores disponíveis no mercado. Os principais deles são: Incinerador com forno rotativo; Incinerador de câmaras fixas; Incinerador de leito fluidizado; Incinerador de Injeção Líquida.

Os incineradores de forno rotativo são mais utilizados para resíduos industriais sólidos e líquidos. Consiste de um sistema refratário rotatório que é alimentado por resíduos e, com a rotação, permite que o calor seja distribuído uniformemente. O tipo mais antigo e simples é o incinerador de câmaras fixas, em que consiste de uma caixa com um grelha de metal, para onde as cinzas caem. Podem ser diferentes câmaras fixas

com divisão em zonas, entre zona superior, de desidratação devido aos gases quentes, zona de combustão, onde tem alta temperatura, zona de oxidação de carbono, onde acontece a transformação de CO₂ e a zona inferior, onde se encontram as cinzas para saída. O incinerador de leito fluidizado opera com uma camada de areia fundida em altíssimas temperaturas, com os resíduos sendo despejados diretamente nela. Esse tipo de incinerador funciona diretamente em fluxo contínuo, sem recorrer a combustíveis auxiliares. O incinerador de injeção líquida é utilizado somente para resíduos líquidos que possam ser bombeáveis para dentro dele. Também opera em forma de fluxo contínuo (LEVY e CABEÇAS, 2006).

A escolha do tipo de incinerador deve levar em conta diversos fatores, como a composição do resíduo, o investimento inicial, o custo de manutenção, o tipo de resíduo e o produto procurado.

5.3.5 Panorama Mundial

Assim como a maioria das tecnologias descritas no presente trabalho, a utilização de incineração para os resíduos sólidos domiciliares tem se mostrado mais forte na Europa e na América do Norte. A partir da década de 70, a reciclagem e outras medidas de prevenção mudaram o panorama da incineração, já que novas tecnologias de tratamento começaram a ficar viáveis. Até então, a incineração era tratada mais como um destino final dos resíduos sólidos, sem se preocupar com os possíveis ganhos que essa tecnologia traria.

Atualmente, em alguns lugares, especialmente na Europa, a incineração com geração de energia entra no incentivo financeiro de fontes renováveis, se tornando uma importante fonte de eletricidade, além da diminuição do uso de aterros sanitários. Nos Estados Unidos, como até 2004 não havia esses incentivos fiscais, a incineração não conseguia competir com o aterro sanitário e com a produção de energia barata. (EPA, 2008)

Portanto, a produção de energia associada à incineração é um campo que vem sendo explorado mais recentemente, especialmente devido à incentivos fiscais e de pesquisas, já que pode ser considerada uma fonte renovável de energia elétrica. Porém, até hoje, esse tipo de tratamento é mais usado para Resíduos Sólidos de Saúde e para destruir patógenos e contaminantes tóxicos.

5.4 Fermentação

A fermentação é um processo metabólico de transformação de açúcares em gases ou álcool, a partir de bactérias e leveduras. Por não necessitar de oxigênio, esse processo é considerado anaeróbico.

5.4.1 Produto gerado

A fermentação alcoólica pode gerar não só etanol, mas também outros produtos menos desejados, como calor, dióxido de carbono, água e uma massa orgânica que pode ser recirculada para evitar a perda de nutrientes essenciais e bactérias, tornando o sistema muito mais eficiente.

O etanol gerado a partir da fermentação alcoólica dos resíduos sólidos domiciliares pode ser usado como combustível após passar por um refino para atingir os padrões de qualidade necessários ou podem ser usados para a queima na geração de energia em usinas termoelétricas.

Como já estudado no item 3.5.2, há algumas pesquisas indicando que o uso da fração orgânica dos resíduos sólidos pode ter uma produtividade próxima a dos meios tradicionais de produção, como a cana-de-açúcar e milho. Isso pode servir de incentivo à utilização desse meio com essa finalidade.

5.4.2 Aspectos Econômicos

Por ainda estar basicamente em fase de pesquisa e os estudos envolverem praticamente o uso de restos de frutas, como bagaços e cascas, os gastos econômicos ainda não foram amplamente avaliados. Porém, é possível se criar algumas expectativas e previsões quanto a isso.

Primeiramente, o uso da fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares na produção de etanol poderia facilmente ser aplicada, já que esse álcool é um combustível muito importante e com um valor de mercado extremamente valorizado. Portanto, o uso de restos de alimentos, além de impedir que eles sejam dispostos em aterros sanitários, reduzindo esses gastos com transporte e disposição, poderia gerar um bem econômico importante nos dias atuais.

Em segundo lugar, pode-se dizer que a produção de cana-de-açúcar no Brasil e de milho nos Estados Unidos consome muitos insumos agrícolas, como pesticidas e fertilizantes químicos, além de ocupar extensas áreas com a agricultura. Portanto, o uso de resíduos sólidos pode suplantar esses gastos, além de ser ambientalmente mais correto.

5.4.3 Impactos no Meio Ambiente

Os impactos no meio ambiente que o tratamento dos resíduos sólidos domiciliares por meio da tecnologia de fermentação alcoólica são basicamente negativos. Primeiramente, esse tipo de disposição acaba tomando lugar em relação aos aterros sanitários, diminuindo a área demandada para a destinação final e ainda gerando um produto com valor comercial.

Além disso, é importante frisar que a produção de etanol de fonte de biomassa é motivo de controvérsia, já que há uma necessidade de plantio de enormes áreas para suprir a demanda desse combustível, causando uma destruição das florestas e matas nativas e ainda gerando os problemas comuns de monoculturas latifundiárias, como o esgotamento do solo e a perda de nutrientes essenciais.

É importante referir também, que o uso do etanol gerado a partir de resíduos sólidos domiciliares também evita a utilização de combustíveis fósseis e evita o lançamento não previamente assimilado de gases do efeito estufa em altas quantidades. Portanto, a utilização desse tipo de tratamento é importante no conceito de sustentabilidade.

5.4.4 Tecnologias Disponíveis

Com a fermentação alcoólica sendo usada basicamente em larga escala para a produção de etanol a partir de fontes fixas de biomassa, como a cana-de-açúcar e o milho, com ganho garantido, as tecnologias disponíveis para a produção usando a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos ainda dá seus primeiros passos.

Ainda muito baseado em pesquisa, a fermentação alcoólica de resíduos orgânicos procura atingir um patamar de produção como o da cana-de-açúcar e milho (MATSAKAS, KEKOS, *et al.*, 2013). As etapas básicas de produção de etanol a partir de biomassa são: fermentação microbiana de açúcares, destilação e desidratação. Antes da fermentação, algumas matérias-primas necessitam de aplicação enzimática para quebrar as moléculas maiores em açúcar.

Os passos posteriores são simples e amplamente conhecidos. Por serem realizados a milhares de anos e muito utilizado na produção de bebidas alcoólicas e etanol combustível, a parte de fermentação é básica, enquanto a destilação e desidratação seguem pelo mesmo caminho.

5.4.5 Panorama Mundial

Nas regiões tropicais, a matéria-prima principal para a produção de etanol a partir de biomassa é a cana-de-açúcar. Esse é o caso do Brasil, que lidera com ampla folga a produção desse tipo de álcool. Nos países em regiões temperadas ou mais frios, a produção vem basicamente de milho ou beterraba-de-açúcar, sendo esse o caso dos Estados Unidos e da Europa. Outras matérias-primas também são utilizados, como uvas na França e Itália, Arroz no Japão, Mandioca na Tailândia e em alguns lugares da África, além de gramíneas nos Estados Unidos (JACOBS, 2008).

Já a aplicação dessa técnica de produção de etanol a partir da fração orgânica nos resíduos sólidos domésticos ainda está em fase de pesquisa em diversos lugares, com estudos avançando especialmente na área de utilização de restos de frutas e de materiais com teor de celulose (MATSAKAS, KEKOS, *et al.*, 2013).

Essa produção de etanol acaba por desafiar diversos cientistas, já que a maioria dos estudos que envolve a fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares se baseia na produção de biogás com outras técnicas, sendo esse um campo relativamente novo de pesquisa.

5.5 Extração de óleo

A extração de óleo pode ser do tipo mecânica ou química. A extração mecânica é uma simples prensa que gera um óleo com potencial comercial, enquanto a extração química se utiliza de solventes. Esse óleo pode ser transesterificado para a produção de biodiesel, de alto valor comercial.

5.5.1 Produto gerado;

O principal produto gerado a partir dessa técnica é, basicamente, óleo. Com a técnica de extração mecânica, o óleo extraído pode ser separado facilmente do bagaço e

ser utilizado na produção de biodiesel, a partir da reação chamada de esterificação, conforme mostrado no item 3.5.3. A extração por solvente, para matérias-primas com menor teor de óleo, pode ser utilizado, porém o óleo precisa de um posterior tratamento para a remoção de impurezas (TYSON, BOZELL, *et al.*, 2004).

Esse óleo extraído pode ser usado de diversas maneiras, sendo a principal delas a produção de biodiesel, que será o foco desse capítulo. Porém a utilização pode ser direta, como em aquecedores e produção de calor, ou até ser refinado para produzir alguns tipos de destilados e ser usado como combustível (TYSON, BOZELL, *et al.*, 2004).

A glicerina é um coproducto inevitável da produção de biodiesel com as atuais técnicas, e sendo um produto também com valor comercial, a produção associada dos dois pode ser economicamente viável.

5.5.2 Aspectos Econômicos

Assim como o uso de etanol proveniente da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares, o uso para a extração de óleo e posterior produção de biodiesel ainda carece de estudos em relação a aspectos econômicos, por ser uma tecnologia ainda em expansão e pesquisa.

Porém, pode-se fazer algumas suposições quanto à esse uso, já que a produção de biodiesel a partir da agricultura vem crescendo nos últimos anos. Além do fator econômico, que é um produto com alto valor de mercado, o biodiesel vindo de restos orgânicos pode ajudar a conter os problemas ambientais decorrentes da queima de combustíveis fósseis e da produção normal de biodiesel, com alto teor de desmatamento. A produção de biodiesel também envolve a coprodução de glicerina, o que pode ajudar na viabilidade econômica.

E, assim como a maioria das técnicas mostradas no presente trabalho, impediria que os resíduos sólidos orgânicos sejam dispostos em aterros e vazadouros, economizando com esse tipo de gasto, além da possibilidade de redução do transporte necessário à disposição final.

5.5.3 Impactos no Meio Ambiente

Os impactos no meio ambiente causados pelo uso de biomassa na extração de óleo e produção de biodiesel são, basicamente: Emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE); biodegradação em ambientes terrestres e aquáticos; desmatamento e erosão do solo.

Apesar do biodiesel emitir menos gases do efeito estufa que os combustíveis comuns derivados de petróleo, como gasolina e diesel, a produção nos atuais moldes dele pode gerar uma emissão mais alta que outros biocombustíveis, já que a produção de sua matéria-prima (plantações de soja, óleo de palma, mamona) é pior do que a da cana-de-açúcar e milho. A queima de biodiesel pode gerar degradação dos meios ambientais terrestres e aquáticos, devido à emissões, mas com certeza abaixo dos níveis de combustíveis fósseis. O desmatamento também é um problema que assola a produção comum de biodiesel, já que áreas de floresta são indiscriminadamente derrubadas para a plantação de matéria-prima, geralmente em monoculturas, causando esgotamento dos nutrientes do solo, erosão e lixiviamento, além de necessitar de insumos químicos e agrotóxicos.

Portanto, a produção de biodiesel comum está sujeito à diversos impactos ambientais, porém os impactos da produção de biodiesel a partir dos resíduos sólidos domiciliares ainda não possuem estudos de aplicação em grande porte para determinar corretamente as vantagens e desvantagens. Porém todos os problemas relacionados à produção de matéria-prima seria sanado.

5.5.4 Tecnologias Disponíveis

Há duas principais técnicas de extração de óleo usando biomassa como matéria-prima, conforme descrito no item 3.5.3. A mais utilizada delas é a separação mecânica, que consegue extrair até 90% do óleo disponível do substrato, sendo usado basicamente para matérias-primas com alto teor de óleos. A outra técnica é a extração por solvente, que é usada para biomassas com rendimento mais baixo de óleo ou após a separação mecânica, para aproveitar ao máximo os resultados (TYSON, BOZELL, *et al.*, 2004).

Os métodos de produção de biodiesel, porém, podem variar entre si. O processo conhecido como supercrítico é o mais indicado para o uso com a fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares, já que esse tipo tolera a presença de umidade e água na matéria-prima, porém requer altas temperaturas e pressões do metanol para deixa-lo em

condições supercríticas para a transesterificação (BUNYAKIAT, MAKMEE, *et al.*, 2006).

Outros métodos também são conhecidos, como o processo Ultra-cisalhamento em linha de reactores em batelada, que é dos métodos mais eficazes de produção, diminuindo o tempo e aumentando o volume do produto; também há o Reator Ultrasônico, que permite que o processo ocorra continuamente, barateando os custos; o método de Lipase-Catalizada, que corrige o problema de falta de óleos livres de ácidos-graxos, porém o uso de metanol não permite o uso dessas enzimas; e Ácidos graxos voláteis de Digestão Anaeróbia de resíduos, que utiliza-se de microorganismos que assimilam as fontes de carbono e convertem em lipídios, para ser posteriormente transesterificada (BUNYAKIAT, MAKMEE, *et al.*, 2006).

5.5.5 Panorama Mundial

Muitos países estão envolvidos com o uso de biocombustíveis, como o biodiesel, portanto a extração de óleo pode ser de alta ajuda para atingir os objetivos propostos. Para melhorar essa indústria, governos implementaram legislações que incentivam a redução da dependência de petróleo e aumentam o uso de energias renováveis como combustível.

O uso de biodiesel no Brasil vem basicamente de três matérias-primas: o óleo de girassol, o óleo de soja e o óleo de mamona. A legislação permite o uso de até 5% de biodiesel na mistura com o diesel de petróleo, sem alterações nas estruturas dos veículos movidos à diesel. O uso de mamona é mais indicado, já que é uma planta de crescimento fácil e os custos são mais baixos que as outras duas comumente usadas.

Na Europa, a Alemanha é campeã disparada no uso de biodiesel, seguida pela França e Itália. Políticas específicas da união europeia colocaram como alvo o uso de 5,75% de biocombustíveis no ano de 2010, subindo para 10% no ano de 2020, sempre baseando seus critérios em padrões de sustentabilidade na produção e alocação de recursos de forma correta (EUROPA, 2014).

O uso de biodiesel nos Estados Unidos da América ainda é muito baixo se comparado a frota total. Já que o custo de produção de biodiesel, especialmente nesse país, é bem mais caro que produtos de petróleo e o etanol, não há incentivos na produção. Nos últimos anos, porém, a produção vem aumentando devido a incentivos do governo.

5.6 Pirólise

A pirólise pode ser definida como uma degradação térmica de materiais orgânicos na ausência de oxigênio, gerando gases, líquidos e sólidos como produtos.

5.6.1 Produto gerado

No geral, a pirólise comum de substâncias orgânicas produz gases e líquidos, além de deixar um resíduo sólido rico em carbono, o carvão (BECIDAN, 2007).

Os produtos da fase gasosa são conhecidos como gás de síntese, e possui como componentes principais o gás carbônico CO₂, o monóxido de carbono CO, o metano CH₄, além de hidrocarbonetos com C₂. Pode ser usado diretamente na produção de calor e geração de energia, mas normalmente é usado diretamente na usina de pirólise, como secador de matéria-prima (BECIDAN, 2007).

Os líquidos produzidos na pirólise são conhecidos como bio-óleo. É uma mistura de componentes que contém mais de 200 compostos e alto poder calorífico. Pode ser convertido em biodiesel após passar por tratamento e padronização, e também pode ser usado como substituto do óleo combustível, para queima e geração de calor (BECIDAN, 2007).

O carvão, conhecido em inglês como char ou biochar, é rico em carbono e pode ser usado na queima e geração de calor, como os outros compostos. Também tem utilização como carvão ativado, depois de sofrer alguns processos, e ter utilização semelhante a esse tipo (BECIDAN, 2007).

5.6.2 Aspectos Econômicos

Por gerar três produtos principais, a pirólise tem um apelo econômico bastante favorável. Especialmente a geração de calor e energia elétrica na própria usina já é um fator positivo, já que mantém ela em funcionamento contínuo e sem precisar de eletricidade externa, reduzindo os gastos e barateando os custos.

Além disso, a energia elétrica excedente pode ser vendida à rede geral, gerando receita que pode ajudar a subsidiar os custos, tornando essa tecnologia mais atrativa a receber investimentos e possíveis usinas. Em países de clima mais frio, o calor gerado em

excesso pode ser utilizado para o aquecimento de domicílios e comércios, também gerando receita.

Os produtos que não forem usados dentro da própria usina podem ser vendidos, como por exemplo o bio-óleo que pode ser transesterificado e transformado em biodiesel para combustível de veículos automotores, e até o carvão, depois de ser ativado, pode ter um valor comercial atribuído.

5.6.3 Impactos no Meio Ambiente

Os impactos no meio ambiente da utilização da pirólise para o tratamento de resíduos sólidos domiciliares podem ser considerados negativos, já que tem maior propensão a trazer benefícios que poluição no meio ambiente, sendo adequado como forma de tratamento ambientalmente correto.

Por ter três diferentes produtos reaproveitáveis, a pirólise já fica à frente da disposição final em aterros sanitários, já que gera um potencial econômico a ser reaproveitado, além da possibilidade de energia elétrica e calor, facilitando os custos de manutenção e corriqueiros.

Um possível problema é que o carvão produzido não é livre de impurezas, com as cinzas e areia possíveis terem de ser dispostos em aterros, não sendo, portanto, uma fonte de energia e de tratamento de resíduos sólidos domiciliares totalmente limpa (RTI INTERNATIONAL, 2012).

Outros problemas podem ser citados, apesar de ocorrerem em menor quantidade, como a poluição da água, problemas de saúde, segurança e odor, falta de incentivos à redução na produção de resíduos e uma grande utilização de água para resfriamento.(THE BLUE RIDGE ENVIRONMENTAL DEFENSE LEAGUE, 2009).

5.6.4 Tecnologias Disponíveis

A pirólise tem duas principais técnicas: a pirólise rápida e a pirólise lenta, cada uma focando na geração de um produto: a primeira gera mais bio-óleo, enquanto a segunda gera mais carvão.

A pirólise rápida acontece em menos de 2 segundos, com a temperatura que varia entre 400 e 550°C, gerando 60% de bio-óleo, 20% de carvão e 20% de gás e tem mais

tecnologia envolvida, já que há uma gama de maquinaria que pode ser usada para a pirólise rápida (MOHAN, PITTMAN e STEELE, 2006).

Já a pirólise lenta é realizada desde a antiguidade para a produção de carvão a partir de troncos de árvore e madeira, gerando carvão vegetal. Com a biomassa sendo esquentada até aproximadamente 500°C é também conhecida como carbonização e tem dois tipos de processos envolvidos, pode ser processo em batelada ou contínuo, sendo os contínuos um tipo mais moderno de pirólise lenta (BECIDAN, 2007).

5.6.5 Panorama Mundial

O uso da pirólise vem sendo feito desde a antiguidade para a obtenção de carvão vegetal, a partir de madeira e troncos de árvore. O Brasil é líder na produção desse tipo de carvão, que é bastante utilizado na indústria como agente redutor e em menor proporção em domicílios e comércios (GÓMEZ, 2008).

Ao redor do mundo, essa tecnologia vem sendo utilizada de forma eficaz para resíduos de pneu e borrachas, anteriormente sem uso e contaminando o meio ambiente, com uma taxa de sucesso boa e gerando produtos com qualidade comercial e atrativos para sua utilização.

Porém, o uso para resíduos sólidos domiciliares ainda não é amplamente utilizado, ainda sendo preferida a incineração devido aos menores custos de implantação e de tratamento, inviabilizando a implantação de usinas de pirólise em países com menor potencial de investimento.

5.7 Gaseificação

Na gaseificação, a matéria-prima é convertida em gás de síntese e, por ser um processo endotérmico, requer uma fonte de calor.

5.7.1 Produto gerado

O produto da gaseificação é um gás conhecido com gás de síntese, rico em monóxido de carbono CO, hidrogênio H₂, metano CH₄ e outros em menores proporções. Com a utilização de catalizadores, a partir do gás de síntese pode ser obtido metano, metanol, hidrogênio e amônia.

O gás de síntese e o vapor produzido por esse processo pode ser usado diretamente para a produção de energia ou de calor para ser reaplicado ao sistema. Assim como outros combustíveis gasosos, o gás de síntese pode ser facilmente controlado do que combustíveis líquidos e sólidos, sendo esse um ponto positivo para a sua utilização.

Outro uso interessante é a utilização desse gás de síntese como substituto do gás natural em veículos automotores. A partir de uma modificação como encontrada nos moldes atuais, pode-se usar o gás de síntese normalmente, movendo automóveis e até caminhões com energia provinda dos resíduos sólidos (AHRENFELDT, 2007).

5.7.2 Aspectos Econômicos

Estudos realizados na Holanda demonstram que a gaseificação, se usada mais amplamente, pode ser a melhor escolha para o tratamento de resíduos sólidos, em comparação com aterros sanitários, incineração, biometanização e compostagem, e que o custo por tonelada de resíduo tratado são mais baixos e a eficiência é altamente favorável (FAAIJ, REE, *et al.*, 1996).

Como a energia e o calor excedentes pode ser vendido à rede gerando uma receita extra, e o gás de síntese usado além de aquecimento e geração de energia para combustíveis de veículos automotores, os ganhos com produtos são importantes na análise econômica e financeira.

Portanto, essa pesquisa indica que a gaseificação da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares é tecnicamente e economicamente viável e os impactos ambientais são limitados e passíveis de serem reduzidos ou mitigados. Além disso não há problemas técnicos que não possam ser resolvidos, porém mais estudos com a secagem de biomassa são necessários para avaliar as diferentes eficiências conseguidas (FAAIJ, REE, *et al.*, 1996).

5.7.3 Impactos no Meio Ambiente

Assim como na pirólise, resíduos como areia e cinzas serão produzidos no processo de gaseificação e precisam ser dispostos em aterros sanitários, não se tornando uma tecnologia totalmente limpa. Porém, é importante frisar que a gaseificação atende aos padrões de emissão de gases na atmosfera de diversos países (RTI INTERNATIONAL, 2012).

Os gases internos gerados, porém, são bastante tóxicos e poluidores, portanto deve-se haver bastante cuidado com a operação para se evitar possíveis vazamentos, além da necessidade de um tratamento adequado aos gases que são liberados ao meio ambiente, através de tecnologias específicas (THE BLUE RIDGE ENVIRONMENTAL DEFENSE LEAGUE, 2009).

Além disso, a gaseificação também possui os mesmos problemas ambientais que a pirólise, que inclui poluição do ar e da água, disposição final de cinzas e outros coprodutos; utilização de altas quantidades de água para resfriamento; problemas de saúde, segurança e odor na vizinhança; diminuição dos incentivos para a redução de produção de resíduos sólidos, compostagem e reciclagem (THE BLUE RIDGE ENVIRONMENTAL DEFENSE LEAGUE, 2009).

5.7.4 Tecnologias Disponíveis

Há três principais tipos de gaseificação que podem ser utilizados para o tratamento de resíduos sólidos domiciliares. O de alta temperatura, de baixa temperatura e a gaseificação de plasma.

A gaseificação de altas temperaturas é um processo similar à pirólise, porém com a adição de ar ou vapor para promover a gaseificação dos envolvidos, gerando monóxido de carbono, gás hidrogênio e metano. A temperatura pode atingir até 1200°C e gerar coprodutos de cinzas. Esse processo é indicado para resíduos com até 30% de umidade, evitando a necessidade de secagem prévia (RTI INTERNATIONAL, 2012).

A gaseificação de baixas temperaturas, cuja operação ocorre entre 600 e 875°C, só pode receber matéria-prima com até 5% de umidade, então geralmente uma pré-secagem é necessária. A geração do gás de síntese é associada com outros gases, sendo então resfriados a baixas temperaturas para se obter mais pureza (RTI INTERNATIONAL, 2012).

A gaseificação de plasma é o processo mais moderno e mais dispendioso dos três. Utilizando uma tocha de plasma, em que uma corrente de alta voltagem passa entre dois eletrodos para a obtenção de um arco de alta-intensidade, que então converte o ar em plasma, gerando um campo de energia que atinge milhares de graus Celsius. Esse calor então é usado para o tratamento da matéria-prima, que pode ter até 30% de umidade (RTI INTERNATIONAL, 2012).

5.7.5 Panorama Mundial

O uso da gaseificação pelo mundo não difere muitos das outras tecnologias mais avançadas. As usinas de gaseificação com geração de energia são encontradas basicamente na Europa e nos Estados Unidos, além de algumas no Japão e Nova Zelândia. O destaque europeu de uso fica para a Holanda, Itália e Dinamarca, que possuem muitas usinas em seu território (TASK 33, 2014).

O mapa a seguir apresenta esses dados de forma bastante visual.



Figura 9 - Mapa contendo as usinas de gaseificação pelo mundo (TASK 33, 2014)

Fica claro com esse mapa, portanto, que as grandes potências mundiais são as detentoras da utilização e tecnologia da gaseificação, buscando a geração de energia e calor além do tratamento dos resíduos sólidos previamente à disposição final em aterros sanitários.

6 CONCLUSÕES

Os estudos realizados acerca dos possíveis tratamentos dos resíduos sólidos domiciliares puderam gerar diversas conclusões a respeito da aplicação das tecnologias existentes no Brasil. Primeiramente, é importante citar que há vários incentivos políticos ao uso de tecnologias de recuperação energética na legislação específica aos resíduos sólidos no Brasil. Porém, enquanto esses incentivos não passarem a barreira do econômico é muito difícil acreditar na implantação de sistemas mais eficazes de manejo e recuperação energética.

Além disso, uma crítica recorrente especialmente no uso de tecnologias que envolvem a degradação térmica, como combustão, pirólise e gaseificação é que esses sistemas aceitam a maioria dos resíduos, não somente a fração orgânica, o que acaba sendo uma falta de incentivo à reciclagem, à compostagem e à digestão anaeróbia, tecnologias essas com maior teor de qualidade ambiental e menor taxa de poluição, sendo mais adequadas para o meio ambiente. A proibição da matéria orgânica ser disposta em aterros sanitários é o primeiro e importante passo para o uso dessas tecnologias no Brasil, já que deverão ser buscadas novas tecnologias e formas de tratamento e disposição final.

Para isso, faz-se necessária uma coleta seletiva mais eficiente, que realmente separe a fração orgânica, da fração reciclável e dos rejeitos. Que, aliado com uma gestão de resíduos sólidos mais transparente e programas de educação ambiental visando o ensino à população de como realizar a separação efetiva e a disposição correta na fonte, pode gerar bons resultados.

Outra ponto bom a ser comentado é que nem todas as alternativas estudadas já têm aplicação em larga escala e com o uso de resíduos sólidos e seus potenciais ainda devem ser minuciosamente pesquisados e protótipos ainda precisam ser feitos afim de analisar a verdadeira viabilidade e as condições de operação. Nesse caso, se enquadram mais especificamente a fermentação e a extração de óleo visando a produção de biodiesel a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos.

Portanto, é importante que o poder público, além da criação do apoio jurídico realizado com a criação das leis específicas aos resíduos sólidos, também invista nas áreas de coleta seletiva, tratamento e disposição final adequados, especialmente àqueles que são mais econômica e ambientalmente viáveis, com tecnologias já estabelecidas. O uso da biometanização e compostagem aliados à reciclagem pode acabar por tratar grande

fração dos resíduos sólidos domiciliares gerados. Já o uso das técnicas de reaproveitamento energético e de calor não se mostram muito relevantes para uso, já que a matriz energética do Brasil é baseada em hidrelétricas e não há previsão de alteração em médio e longo prazo. Outro problema é que a compra e venda de energia por terceiros ainda não é completamente estabelecido no nosso país. Porém, essas tecnologias não devem ser descartadas, já que podem gerar ganhos importantes para o país, especialmente se forem criados estudos e pesquisas nacionais com o sentido de se criar tecnologias brasileiras barateando seu custo de implantação e manutenção, além de atingir as verdadeiras demandas de nosso país.

7 REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 10004:2004.** ABNT. Rio de Janeiro, p. 71. 2004.
- ABRELPE. **Caderno Informativo:** Recuperação Energética. São Paulo: ABRELPE, 2012.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2012.** São Paulo: ABRELPE, 2012.
- AHRENFELDT, J. **Characterization of biomass producer gas as fuel for stationary gas engines in combined heat and power production.** Dinamarca: Technical University of Denmark, 2007.
- ANVISA. **Gerenciamento de Resíduos de Serviço de Saúde.** Brasília: Ministério da Saúde, 2006.
- AUSTRIA. **Waste – to – Energy in Austria.** Austria: Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management , 2010.
- BECIDAN, M. **Experimental Studies on Municipal Solid Waste and Biomass Pyrolysis.** Noruega: Norwegian University of Science and Technology, 2007.
- BERTOLDI, M. D. **Composting in the European Union.** Europa: BioCycle, 1998.
- BRASIL. **Política Estadual de Resíduos Sólidos - Lei 12.300.** São Paulo: Diário Oficial da União, 2006.
- _____. **Decreto nº 54.645.** São Paulo: Diário Oficial da União, 2009.
- _____. **Decreto nº 7404.** Brasília: Diário Oficial da União, 2010.
- _____. **Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305.** Brasília: Diário Oficial da União, 2010.
- _____. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília: Diário Oficial da União, 2011.
- BUNYAKIAT, K. et al. **Continuous Production of Biodiesel via Transesterification from Vegetable Oils in Supercritical Methanol.** Tailândia: Chulalongkorn University, 2006.
- CETESB. **Manual de Boas Práticas no Planejamento.** São Paulo: CETESB, 2012.
- CIMM. Gaseificação transforma lixo em energia. **CIMM - Centro de Informações Metal Mecânica,** 2010. Disponível em:
http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7126-gaseificacao-transforma-lixo-em-energia. Acesso em: 28 jul. 2014.
- COMPTON, B. Municipal Solid Waste Pyrolysis. **Compton Conversion Consortium,** 2012. Disponível em: <http://municipalsolidwastepyrolysis.com/>. Acesso em: 29 jul. 2014.
- EDINGTON, I. 3 de Agosto de 2014: O fim dos lixões a céu aberto no Brasil. **Exame.com,** 2014. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/rede-de-blogs/blog-do-management/2014/05/07/3-de-agosto-de-2014-o-fim-dos-lixoes-a-ceu-aberto-no-brasil/>. Acesso em: 10 maio 2014.
- EGGERTH, L. L. **Compost marketing trends in the United States.** Inglaterra: Chapman & Hall, 1996.
- EPA. Renewable Energy Production Incentives. **Environmental Protection Agency,** 2008. Disponível em:
<http://www.epa.gov/osw/hazard/wastemin/minimize/energyrec/rpsinc.htm>. Acesso em: 01 ago. 2014.
- EUROPA. Motor vehicles: use of biofuels. **Europa,** 2014. Disponível em:
http://europa.eu/legislation_summaries/energy/renewable_energy/l21061_en.htm. Acesso em: 03 ago. 2014.

- FAAIJ, A. et al. **Gasification of biomass wastes and residues for electricity production**. Holanda: Utrecht University, 1996.
- FEAM - MG. **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos**: Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais. Belo Horizonte: Governo do Estado de Minas Gerais, 2012.
- FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. D. **Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos**. Londrina: UEL - Universidade Estadual de Londrina, 1999.
- FIGUEIREDO, N. J. V. D. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás - Estudo de caso**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2011.
- FORSTER-CARNEIRO, T.; PÉREZ, M.; ROMERO, L. I. **Biometanización de residuo sólido urbano: escala de laboratorio y planta piloto**. Espanha: Universidad de Cádiz, 2007.
- FURFARI, A. **Biofuels: illusion or reality? : the European experience**. França: Technip, 2008.
- GAIA. **Incinerators in Disguise Case Studies of Gasification, Pyrolysis, and Plasma in Europe, Asia, and the United States**. E.U.A.: Global Alliance for Incinerator Alternatives , 2006.
- _____. Global Alliance for Incinerator Alternatives. **GAIA**, 2014. Disponível em: <<http://www.no-burn.org/index.php>>. Acesso em: 27 jul. 2014.
- GASPAR, M. **Sambaqui: arqueologia do litoral Brasileiro**. Rio de Janeiro: Zahar, 2000.
- GERMANY. **Waste Incineration — A Potential Danger?** Alemanha: Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2005.
- GODINHO, M. **Gaseificação e Combustão de Resíduos Sólidos da Indústria Calçadista**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- GOMES, A.; SILVA, Á. S. E.; BUDKE, W. R. **Gestão de Resíduos Sólidos e a Produção de Energia Biomassa na Região do Mato Grande**. João Câmara - RN: Ministério da Educação, 2013.
- GOMES, F. C. D. S. P. **Biometanização Seca de Resíduos Sólidos**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.
- GÓMEZ, E. O. A Tecnologia de Pirólise no Contexto da Produção Moderna de Biocombustíveis: Uma Visão Perspectiva. **Ambiente Brasil**, 2008. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/artigos_energia/a_tecnologia_d_e_pirolide_no_contexto_da_producao_moderna_de_biocombustivies%3A uma_visao_perspectiva.html>. Acesso em: 03 ago. 2014.
- HAUSER, P. D.; LEME, C. F. **Modelo financeiro para avaliação de projetos de incineração de resíduos sólidos municipais no âmbito do mecanismo de desenvolvimento limpo**. Rio de Janeiro: Revista de Gestão Social e Ambiental, 2007.
- IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2008**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2010.
- INPEV. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/camaras_tematicas/Insumos_agropecuarios/59RO/App_InpEV_Insumos.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2014.
- INSTITUTO BROOKFIELD. Entenda a diferença entre lixão, aterro controlado e aterro sanitário. **Instituto Brookfield**, 2012. Disponível em: <<http://blog.institutobrookfield.org.br/index.php/2012/08/entenda-a-diferenca-entre-lixao-aterro-controlado-e-aterro-sanitario/>>. Acesso em: 16 jul. 2014.
- IPT. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 2ª. ed. São Paulo: IPT, 2000.

- JACOBS, J. What are the prospects for U.S. sugar co-ops? **USDA Rural Development**, 2008. Disponível em: <<http://www.rurdev.usda.gov/rbs/pub/sep06/ethanol.htm>>. Acesso em: 28 jul. 2014.
- JENKINS, B. M. **Combustion Properties of Biomass**. E.U.A.: Elsevier, 1998.
- KIEHL, E. J. **Fertilizantes Orgânicos**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1985.
- LEMOS, L. T. D. **Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos**: Qual a melhor opção de aproveitamento energético? Viseu - Portugal: Escola Superior de Tecnologia de Viseu, 1997.
- LEVY, J. D. Q.; CABEÇAS, A. J. **Resíduos sólidos urbanos: princípios e processos**. Portugal: Associação das Empresas Portuguesas para o Sector do Ambiente, 2006.
- LEVY, Y.; ELLIS, T. J. **A systems approach to conduct an effective literature review in support of information systems research**. E.U.A.: Nova Southeastern University, 2006.
- LIN, Y.; TANAKA, S. **Ethanol fermentation from biomass resources: current state and projects**. Japão: Asian Center for Environment Research, 2006.
- LOUREIRO, S. A. **Revisão Sistemática da Literatura**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2012.
- MASSUKADO, L. M. **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal de resíduos sólidos domiciliares**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2008.
- MATSAKAS, L. et al. **Utilization of household food waste for the production of ethanol at high dry material content**. Grécia: National Technical University of Athens, 2013.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Guia para Elaboração dos Planos de Resíduos Sólidos**. Brasília: [s.n.], 2011.
- _____. **Biomassa**. Ministério do Meio Ambiente, 2013. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>>. Acesso em: 17 jul. 2014.
- MOHAN, D.; PITTMAN, C.; STEELE, P. **Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A critical Review**. E.U.A.: Mississippi State University, 2006.
- NETO, J. T. P. **Composting Experiences and Perspectives in Brazil**. London - England: Chapman & Hall, 1996.
- ONG REPÓRTER BRASIL. **O Brasil dos Agrocombustíveis**. Brasil: ONG Repórter Brasil, 2009.
- PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS. Portal Resíduos Sólidos. **Portal Resíduos Sólidos**, 2013. Disponível em: <<http://www.portalresiduossolidos.com/>>. Acesso em: 15 jul. 2014.
- RAMBOLL. **Waste-to-energy in Denmark**. Dinamarca: Ramboll, 2006.
- REICHERT, G. A.; SILVEIRA, D. A. D. **Estudo de viabilidade da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos com geração de energia**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- RTI INTERNATIONAL. **Environmental and Economic Analysis of Emerging Plastics Conversion Technologies**. E.U.A.: RTI International, 2012.
- RUSSO, M. A. T. **Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário**. Portugal: Universidade do Minho, 2005.
- SEDIYAMA, M. A. N. et al. **Fermentação de esterco de suínos para uso como adubo orgânico**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

- SILVA, J. R. **Matéria Orgânica**. Rio Branco: Universidade Federal do Acre, 2010.
- SILVA, P. P. D. L. E.; GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. D. **Dicionário Brasileiro de Ciências Ambientais**. Rio de Janeiro: Thex Editora, 2002.
- SILVA, T. B. A Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **SECOVI SP**, 2013.
Disponível em: <<http://www.secovi.com.br/noticias/a-lei-da-politica-nacional-de-residuos-solidos/6713/>>. Acesso em: 01 maio 2014.
- SOUZA, O. et al. **Bioetanol de Bananas, polpa e cascas**. Joinville: Univille, 2008.
- TASK 33. Thermal Gasification of Biomass. **The Task 33**, 2014. Disponível em: <http://www.ieatask33.org/content/thermal_gasification_facilities>. Acesso em: 03 ago. 2014.
- THE BLUE RIDGE ENVIRONMENTAL DEFENSE LEAGUE. **Waste gasification impacts on the environment and public health**. E.U.A.: The Blue Ridge Environmental Defense League, 2009.
- TYSON, K. S. et al. **Biomass Oil Analysis: Research Needs and Recomendations**. Golden, Colorado, EUA: National Renewable Energy Laboratory, 2004.
- UK WIN. United Kingdom Without Incineration. **United Kingdom Without Incineration Network**, 2014. Disponível em: <<http://ukwin.org.uk/>>. Acesso em: 07 27 2014.