

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

FAGNER MICHEL DE ANDRADE LIMA

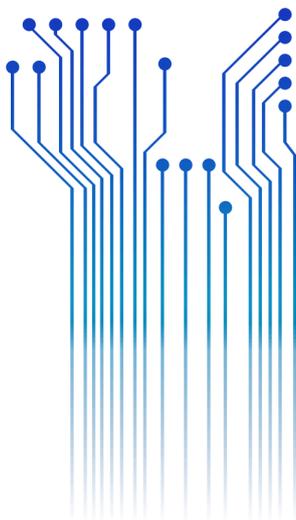
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
PANORAMA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE
RESÍDUO SÓLIDO URBANO



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2017

FAGNER MICHEL DE ANDRADE LIMA

PANORAMA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Professor Ubirajara Rocha Meira, M.Sc.
Orientador

Campina Grande
2017

FAGNER MICHEL DE ANDRADE LIMA

PANORAMA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em ____ / ____ / _____

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Ubirajara Rocha Meira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado força de vontade para concluir este curso.

Agradeço aos meus pais, Madalena e Melquisedec, pelo apoio em todos os momentos necessários nessa caminhada, me dando incentivo nas horas mais difíceis.

Agradeço aos amigos: Cícero, Aislan, Hamilton, Júlio, Lucas, e Edson que sempre ajudaram a estudar para as disciplinas do curso.

Agradeço ao professor Ubirajara Rocha por ter aceitado me orientar e pelo o aprendizado adquirido.

Agradeço ao professor Leimar de Oliveira que se dispôs a avaliar o referido relatório.

Agradeço a Karla por ter me proporcionado muitas alegrias em todos os momentos.

*“Uma coisa que aprendi nessa longa vida:
toda nossa ciência, comparada com a
realidade, é primitiva e infantil- ainda assim é
a coisa mais preciosa que nós temos.”*

Albert Einstein.

RESUMO

Este trabalho se propôs a apresentar um panorama do aproveitamento termelétrico a partir dos resíduos sólidos urbanos. Para tanto, foi realizada uma análise geral das tecnologias empregadas no aproveitamento energético dos resíduos sólidos, destacando-se as vantagens e desvantagens de cada uma, com foco no processo de incineração. O estudo também apresenta um panorama explicitando as termelétricas movidas a lixo no Brasil e no mundo. Para a realização deste estudo foi feita uma pesquisa bibliográfica, na modalidade revisão da literatura, no âmbito nacional e internacional, detalhando as dificuldades de implantação do sistema em questão no Brasil e mostrando o cenário da geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos no âmbito mundial utilizando a incineração e a produção de biogás.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Aproveitamento energético. Incineração. Termelétrica.

ABSTRACT

This paper proposes to present an overview of thermoelectric utilization from solid urban waste. In order to do so, a general analysis of the technologies used in the energetic use of solid waste was carried out, highlighting the advantages and disadvantages of each one, focusing on the incineration process. The study also presents a panorama explaining the waste-electric power plants in Brazil and in the world. For the accomplishment of this study a bibliographical research was carried out, in the review modality of the literature, in the national and international scope, detailing the difficulties of implantation of the system in question in Brazil and showing the scenario of the generation of electric energy moved to solid residues in the world scope using incineration and biogas production.

Keywords: Urban Solid Waste. Energy use. Incineration. Thermoelectric.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Geração de lixo no mundo.	22
Figura 2 – Geração de RSU no Brasil	23
Figura 3 – Ciclo do Projeto de MDL.....	25
Figura 4 – Rotas tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU.....	29
Figura 5 – Diagrama de fluxo do processo no reator pirolítico.....	32
Figura 6 – Desenhos esquematizados dos gaseificadores Contracorrente e de Leito Fluidizado	34
Figura 7 – Forno de Plasma.....	36
Figura 8 – Tocha de plasma e representações esquemáticas do dispositivo gerador e do forno de plasma	37
Figura 9 – Unidades de processo utilizadas com digestores anaeróbios	40
Figura 10 – Esquema de captação e tratamento do biogás	42
Figura 11 – Representação da grelha no forno - caldeira	48
Figura 12 – Planta de tratamento térmico.....	53
Figura 13 – Esquema das zonas em que ocorrem os processos de incineração	55
Figura 14 – Participação das regiões brasileiras no total de RSU coletados.....	58
Figura 15 – Planta da USINAVERDE	64
Figura 16 – Fluxograma do processo USINAVERDE.....	65
Figura 17 – Equipamnetos USINAVERDE	66

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Poder Calorífico de materiais encontrados em RSU (Kcal/Kg)	28
Tabela 2 – Características dos gaseificadores	33
Quadro 1 – Vantagens e desvantagens de tecnologias de aproveitamento energético ...	44
Quadro 2 – Principais configurações dos fornos de incineração	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AND	Autoridade Nacional Designada
CDF	Certificado de Destinação Final
CO2EQ	Equivalente de Dióxido de Carbono
CDR	Combustível Derivado de Resíduo
COV	Composto Orgânico Volátil
DCP	Documento de Concepção de Projeto
EE	Energia Elétrica
EOD	Entidade Operacional Designada
EPA	Environmental Protection Agency
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FORSU	Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos
GDL	Gás de Lixo
GEE	Emissão de Gases do Efeito Estufa
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NBR	Norma Técnica Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
OMS	Organização Mundial de Saúde
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PC	Poder Calorífico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
ph	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCEs	Reduções Certificadas de Emissões
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNFCCC9	United Nations Framework Convention on Climate Change
Cd	Cádmio
CH4	Metano
COV	Composto Orgânico Volátil
CO2	Dióxido de Carbono
HCl	Ácido Clorídrico
Hg	Mercúrio
KCAL/KG	Quilocaloria por Quilograma
KJ/KG	Quilojoule por Quilograma
KW	Quilowatt
MJ/KG	Megajoule por Quilograma
MW	Megawatt
SO2	Dióxido de Enxofre
T/ANO	Toneladas por Ano
T/DIA	Toneladas por Dia
T/H	Toneladas por Hora
Tl	Tálio

SUMÁRIO

1	Introdução.....	14
1.1	Objetivos.....	16
2	Resíduo Sólido Urbano.....	18
2.1	Definição.....	18
2.2	Contexto Histórico da Utilização dos Resíduos Sólidos como Fonte de Energia	19
2.3	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo-MDL	24
2.4	Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	27
3	Tecnologias Empregadas para o Aproveitamento Energético dos RSU.....	29
3.1	Tecnologias de Tratamento Térmico	30
3.1.1	Incineração	30
3.1.2	Pirólise.....	31
3.1.3	Gaseificação	33
3.1.4	Plasma	35
3.2	Tecnologias de Tratamento Biológico	37
3.2.1	Biometanização	38
3.2.2	Biogás de Aterro Sanitário.....	41
3.3	Vantagens e Desvantagens na Implantação de Tecnologias de Aproveitamento Energético....	43
4	Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos.....	46
4.1	Análise da Planta de uma Usina Termelétrica	52
5	Panorama do Aproveitamento de Energia Elétrica a partir dos Resíduos Sólidos Urbanos	56
5.1	Dificuldades de Implantação do Sistema de Geração de Energia a partir RSU no Brasil.....	56
5.2	Visão Geral das Usinas termelétricas Movidas a RSU no Mundo	59
5.2.1	A Experiência Brasileira: O Caso da USINAVERDE.....	63
6	Conclusão	68
	Referências.....	69

1 INTRODUÇÃO

Os problemas relacionados ao meio ambiente, causados pelos resíduos sólidos tem ocasionado uma aceleração no volume de resíduos instrumentalizado pelo constante crescimento das populações urbanas, a forte industrialização e a melhoria no poder aquisitivo dos povos de uma forma geral. Agravando ainda mais a situação, ocorre a falta de disposição e tratamento adequado proporcional ao volume de resíduos sólidos gerados. A maioria dos resíduos sólidos é lançada a céu aberto, no solo, nos rios, em canais, em terrenos baldios e nas próprias vias públicas. Esta disposição em lugares impróprios, agride o meio ambiental e compromete a qualidade de vida da coletividade. De modo, que há décadas se discute as questões relacionadas aos resíduos sólidos, em âmbito nacional e internacional, assim tais discussões levaram os governos, as organizações privadas e a sociedade civil a se posicionarem sobre o assunto.

No Brasil, o sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos não é feito de forma eficiente e a disposição final da maior parte do lixo coletado nem sempre é feita da forma mais adequada. Com o aumento das atividades humanas nas últimas décadas gerou-se um acelerado aumento na produção de resíduos, de modo que se tornou um grave problema para as administrações públicas. As grandes dificuldades para o manejo dos resíduos sólidos nos últimos anos foram o aumento desordenado da população e o crescimento sem planejamento de grandes núcleos urbanos, fazendo com que muitas vezes os resíduos sólidos sejam depositados em locais não apropriados para recebê-los, como lixões, podendo provocar graves problemas ambientais.

Nessa direção, a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, Lei nº 12.305/10, após vinte e um anos de discussões no Congresso Nacional, marcou o início de uma forte articulação institucional envolvendo os três entes federados – União, Estados e Municípios, o setor produtivo e a sociedade em geral - na busca de soluções para os problemas na gestão resíduos sólidos que comprometem a qualidade de vida dos brasileiros.

A aprovação da PNRS, qualificou e deu novos rumos à discussão sobre o tema, pois os resíduos sólidos urbanos contêm frações como vidro, plástico, papel, papelão e metais, as quais permitem ser reutilizados culminando na economia de recursos naturais, geração de energia e na diminuição da quantidade de resíduos lançados no

meio ambiente. Os resíduos sólidos também podem e devem ser concebidos como uma fonte energética inesgotável, portanto, uma solução alternativa para a crise energética com que se depara a humanidade.

Apesar de a Organização Mundial da Saúde-OMS, considerar lixo como sendo qualquer coisa que seu proprietário não quer mais, em um dado lugar e em certo momento, e que não possui valor comercial (PNUD, 1998), é importante ressaltar que, conforme a recente PNRS, existe uma distinção clara entre resíduos e rejeitos (lixo), sendo o primeiro todos os materiais que sobram após ações ou processos de produção ou consumo, enquanto que rejeitos (lixo) são materiais considerados inúteis, não passíveis de reaproveitamento ou reciclagem (BRASIL, 2010).

A partir dos discursos apresentados sobre a produção de resíduos sólidos urbanos e a necessidade de reaproveitamento destes, a fim de garantir uma melhor qualidade de vida à população, destaca-se o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos como uma alternativa econômica e ambiental. Assim sendo, a temática, aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, ratifica sua importância no aspecto ambiental e econômico, por possuir na literatura estudos que evidenciam a viabilidade técnica, ambiental e econômica da geração de energia a partir dos resíduos sólidos.

A partir deste discurso, a pesquisa centrar-se-á nas contribuições teóricas de vários autores por meio da revisão da literatura, analisando as contribuições dos estudos sobre a geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos. De acordo com Gil (2008), a pesquisa bibliográfica possibilita a leitura aprofundada das fontes.

A partir disso, levantou-se como problema de pesquisa: Quais as principais tecnologias para produção da energia elétrica e, quais os custos, os impactos ambientais, as vantagens e desvantagens de cada tecnologia?

Estudos mostram que utilizar os resíduos sólidos urbanos como matriz de geração de energia é sustentável e uma opção que trará muitos benefícios tanto à população como também ao meio ambiente. Por isso, países como Japão, China, Dinamarca e Estados Unidos têm se utilizado de tecnologias para a geração de energia elétrica, como o objetivo não só de diminuir a quantidade de descarte inadequado no meio ambiente, como também reaproveitar os resíduos sólidos urbanos.

Para tentar chegar a uma resposta, tem-se assim como objetivos desta pesquisa:

1.1 OBJETIVOS

✓ Geral:

- Apresentar um panorama do aproveitamento termelétrico a partir dos resíduos sólidos urbanos.

✓ Específicos:

- Descrever o contexto histórico da utilização dos resíduos sólidos como fonte de energia;
- Nomear as principais tecnologias empregadas para a geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos;
- Detalhar as dificuldades de implantação do sistema em questão no Brasil;
- Apresentar uma planta de uma Termelétrica movida a lixo;
- Mostrar o cenário das Usinas Termelétricas no mundo;

Para isto, este estudo se caracteriza como uma pesquisa qualitativa sobre a geração de energia utilizando os resíduos sólidos. Para tanto, o estudo parte de um breve histórico sobre as questões ambientais, delimitando-a para a utilização dos resíduos sólidos como fonte de energia e sobre o potencial econômico e ambiental da geração de energia utilizando-se os resíduos sólidos urbanos.

A fim de atender os objetivos propostos o trabalho foi estruturado em seis capítulos, a saber:

O Capítulo 1, Introdução, faz-se uma breve contextualização do assunto, os objetivos da pesquisa, metodologia utilizada e justificativa do trabalho.

O Capítulo 2 expõe as concepções de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU, bem como uma visão geral do contexto histórico da utilização dos resíduos sólidos como fonte de energia, apontando as normas regulatórias da destinação final dos RSU no

Brasil e no mundo, também aborda-se o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), e por fim é falado sobre o poder calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos.

O Capítulo 3 sintetiza as principais tecnologias empregadas para a geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos. Além disso, são discutidas as vantagens e desvantagens de cada tecnologia.

O Capítulo 4 é destacado a incineração como a mais utilizada em escala mundial, por ser uma das alternativas adotadas por muitos países. Além disso, apresenta-se uma planta termelétrica de incineração direta movida a RSU.

O Capítulo 5 expõe um panorama do aproveitamento energético a partir dos resíduos sólidos urbanos, ressaltando as dificuldades da implantação de termelétricas movida a RSU no Brasil e mostra uma visão geral da implantação e funcionamento das termelétricas no mundo, e é feita uma apresentação da USINAVERDE.

Por fim, o Capítulo 6, contém algumas conclusões obtidas a partir desta pesquisa.

2 RESÍDUO SÓLIDO URBANO

2.1 DEFINIÇÃO

Os resíduos sólidos são definidos segundo a norma técnica NBR 10.004 (ABNT, 2002), como resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Os resíduos sólidos são classificados quanto à sua periculosidade e quanto à sua origem, sendo os resíduos perigosos aqueles que geram risco significativo ao meio ambiente ou à saúde pública em razão de suas propriedades.

A Lei nº 12.305/10, que define a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, em seu artigo 3º, Inciso XVI, assim define os resíduos sólidos:

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, p.11).

Esses materiais que constituem os resíduos sólidos são uma combinação de materiais não combustíveis e carbono. Enquanto, os rejeitos (lixo), de acordo com a Lei nº 12.305/10, que define a Política Nacional de Resíduos Sólidos, em seu artigo 3º, Inciso XV, definem os rejeitos como aqueles materiais que depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010, p.11).

Nessa direção, os resíduos sólidos urbanos (RSU), são considerados aqueles provenientes dos resíduos domiciliares, ou seja, provenientes das atividades domésticas em residências urbanas e, aqueles oriundos de limpeza urbana, quer dizer, provindos da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (FEAM, 2012).

Por tudo isso, ao longo do tempo os resíduos sólidos tem sido objeto de pesquisas, o que tem possibilitado tanto um melhor conhecimento sobre o potencial destes recursos, como sua utilização na geração de energia elétrica. A propósito

tecnologias têm sido desenvolvidas e já adotadas em vários países, inclusive no Brasil, por meio de usinas termelétricas.

2.2 CONTEXTO HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS COMO FONTE DE ENERGIA

Estima-se que são produzidos anualmente 1,4 bilhão de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), em todo o mundo, neste ritmo segundo a Organização das Nações Unidas-ONU, prevê que até 2050, ter-se-á produzido 4 bilhões de toneladas de lixo urbano por ano, enquanto a população mundial chegara a 9 bilhões de habitantes.

Nesse cenário, muitos países têm buscado saídas para enfrentar as consequências da produção dos resíduos sólidos urbanos, como os danos ambientais e o alto custo financeiro na destinação destes resíduos, porque maior parte dos RSU produzidos no mundo, cerca de 800 milhões de toneladas/ano, é descartada em aterros. Por outro lado, alguns países há décadas vêm desenvolvendo tecnologias para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos.

No contexto mundial, segundo Itô (2014), alguns países já adotaram medidas para a redução dos impactos ambientais e, a partir disto surgiram soluções para o tratamento dos RSU, bem como projetos como a geração de energia elétrica a partir destes resíduos, a exemplos dos Estados Unidos, da Europa, do Japão, a partir dos anos 80. A utilização dos RSU, também vem ganhando força no Brasil e na China.

Desde os primórdios da civilização humana, Carneiro (2015), diz que a incineração de resíduos vem sendo praticada, tendo o primeiro incinerador sido construído na cidade de Nottingham, Inglaterra, em 1874. Enquanto no Brasil, a primeira unidade foi instalada na cidade de Manaus, em 1896.

De acordo com Juras (2012), a Alemanha é referência na gestão de resíduos, pelo pioneirismo na adoção de medidas destinadas a equacionar a questão dos resíduos sólidos, pois,

Os geradores e detentores de resíduos estão obrigados a recuperar os resíduos. A recuperação de resíduos tem prioridade em relação à disposição final e deve ser realizada de forma apropriada e segura. A obrigação de recuperar os resíduos existe quando tecnicamente possível e economicamente viável, especialmente quando exista um mercado, ou possa ser criado, para a extração de substância ou de energia. A recuperação é considerada tecnicamente possível ainda que requeira pré-tratamento e economicamente viável se os custos envolvidos não sejam desproporcionais em comparação com os custos da disposição dos resíduos (JURAS, 2012, p.17).

Em relação à geração de energia a partir dos resíduos, de acordo com a legislação alemã, deve-se priorizar a forma que seja ambientalmente adequada. Do mesmo modo, a França dispõe de uma legislação que regulamenta as responsabilidades pela destinação dos resíduos sólidos.

Na França, a legislação sobre resíduos prevê um plano nacional de prevenção de resíduos, além de planos regionais, interregionais, de departamento e interdepartamentos. O gerenciamento de resíduos está sob a responsabilidade das autoridades locais ou entidades por elas autorizadas. A eliminação dos resíduos domiciliares é de responsabilidade das autoridades locais, enquanto a eliminação dos resíduos industriais, de transporte e da construção civil é de responsabilidade do produtor dos resíduos (JURAS, 2012, p.20).

É importante salientar, que de todo os RSU gerados no mundo, o lixo domiciliar tem a maior parcela, sendo predominantes as embalagens plásticas, vidros e latas, ao contrário dos resíduos orgânicos que tem percentual menor. Para ter-se uma ideia, da preocupação com a produção mundial dos RSU, nos Estados Unidos, a preocupação com o destino dos resíduos é maior até que aquela que envolve as normas da União Europeia (ABRAMOVAY, SPERANZA, PETITGAND, 2013).

De acordo com Juras (2012, p. 28):

Em 1965, foi editada a Lei de Resíduos Sólidos (Federal Solid Waste Disposal Act), que, entre outros aspectos, respondeu pelo financiamento de inventários estaduais de aterros sanitários e “lixões”. Em 1976, essa lei foi complementada em pontos importantes por meio da Lei de Conservação e Recuperação (Resource Conservation and Recovery Act - RCRA).

Nesse cenário, segundo Marchi (2011), num ranking de 163 países, o Brasil ocupa o 62º lugar em desempenho ambiental e, portanto, o país necessitava de um marco regulatório para as questões referentes aos RSU, como os países desenvolvidos. Nos países das América do Norte, por exemplo, desde 1975, “menos de 10% dos resíduos eram destinados à reciclagem, e nada era acarretado para compostagem. Em

2005, mais de 25% dos resíduos coletados nestes países estavam voltados para a reciclagem, incluindo cerca de 5% para compostagem” (MARCHI, 2011, p.122).

No Canadá, a responsabilidade pelos resíduos sólidos municipais é compartilhada entre o governo federal e o das províncias, territórios e municípios. O termo resíduos sólidos municipais (MSW na sigla em inglês) refere-se aos materiais recicláveis e compostáveis, assim como ao lixo de domicílios, comércio, instituições e de construção e demolição. As operações de coleta, reciclagem, compostagem e disposição dos resíduos sólidos municipais são de responsabilidade dos governos municipais, enquanto as autoridades das províncias e territórios são responsáveis pela aprovação, licenciamento e monitoramento das operações de manejo de resíduos (JURAS, 2012, p.26).

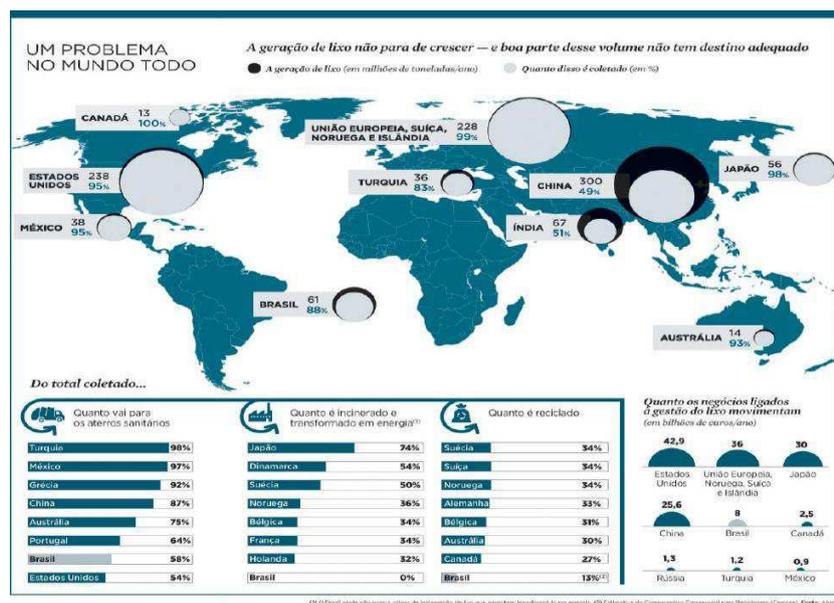
Num rápido retrospecto das notícias sobre a problemática dos RSU, verifica-se que em vários países a problemática dos RSU é preocupante, outros, porém tem buscado alternativas para o descarte adequado ou aproveitamento dos resíduos. Na África, há muitos lixões irregulares, mas o Banco Mundial¹ tem apoiado projetos na gestão de resíduos sólidos.

No Oriente Médio e Norte da África, as ações empreendidas englobam novas instalações de aterros sanitários, além de iniciativas de reciclagem. Em Marrocos, as iniciativas envolve a produção de energia com os resíduos.

Na Figura 1, pode-se observar a quantidade de lixo gerado em toneladas por ano e a quantidade que é coletada em alguns países. Com destaque para o Canadá que coleta todo o lixo gerado, em seguida vem os Estados Unidos. O Brasil apresenta uma quantidade significativa de lixo coletado, porém com destinação final inadequada.

¹ O Banco Mundial é uma organização internacional que surgiu da Conferência de Bretton Woods (1944), inicialmente para atender às necessidades de financiamento da reconstrução dos países devastados pela Segunda Guerra Mundial. Disponível em: <http://www.worldbank.org>.

Figura 1. Geração de lixo no mundo



Fonte: ABRELPE, 2015.

Na China, estima-se que até 2010, 585 milhões de toneladas sejam produzidas. Mas neste país, de acordo com Marchi (2011, p.124), “a reutilização e reciclagem são atividades organizadas a nível municipal, com suporte federal”. Na cidade de Ningbo, situada no Delta do Rio Yangtzé, uma estratégia foi o financiamento para a construção de uma estação de tratamento para processar resíduos de cozinha provenientes de habitações e mercados.

Na América Latina, o crescimento populacional e as baixas taxas de valorização de resíduos estão entre os fatores que aumentam produção de resíduos sólidos. Nesse cenário, o Chile lidera a geração de resíduos e em Brasília, no Distrito Federal, está localizado o maior lixão a céu aberto da América Latina. Isso indica que a população mundial está consumindo mais, entretanto esses dados são preocupantes, pois a maioria dos países não tem políticas públicas para a destinação final destes resíduos.

Brollo e Silva (2001, p.2), analisando a gestão ambiental em resíduos sólidos no Brasil, apontavam que uma legislação específica era um dos fatores que dificultava a gestão dos RSU no país.

A situação dos resíduos sólidos é preocupante, uma vez que tem havido um contínuo crescimento do volume destes resíduos, gerados, sobretudo, no ambiente urbano e agravada pela inexistência de uma política nacional de resíduos, limitações financeiras, deficiência de capacitação técnica, descontinuidade política e administrativa, etc.

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil elaborado pela ABRELPE no ano de 2015 revela, “um total anual de 79,9 milhões de toneladas no país, configurando um crescimento a um índice inferior ao registrado em anos anteriores”. Nisto reside à importância de se debater a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos, a partir de uma discussão multidisciplinar, abrangendo segmentos governamental, social e do mercado para tornar real a implementação de uma gestão sustentável de RSU.

Na Figura 2, observa-se que entre 2014 e 2015, a população brasileira apresentou um crescimento na geração total de RSU de 1,7%, atingindo o equivalente a 218.874 t/dia em relação ao ano anterior.

Figura 2- Geração de RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE, 2015.

Entretanto, em meio aos problemas com a destinação final dos RSU, atualmente alternativas tem sido empregada desde a década de 1970, garantindo assim a conversão de energia tendo resíduos como insumo. Processos como a incineração dos resíduos sólidos, por meio de tratamento térmico e, através de um tratamento biológico, como a produção do biogás, são processos capazes de transformar o RSU em energia.

No capítulo seguinte, apresentam-se as principais tecnologias para produção da energia elétrica, detalhando as vantagens e desvantagens de cada tecnologia.

2.3 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO-MDL

Com o objetivo de atingir a meta de diminuição na emissão de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, em 1997, foi criado o Protocolo de Quioto. Esse acordo internacional determinou a redução da emissão de gases, estipulando uma redução média de 5,2% entre 2008 até 2012, com base da emissão do ano de 1990.

O protocolo de Quioto, em seu artigo 12, definiu então Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, cujo objetivo é e auxiliar os países desenvolvidos, a atingirem suas metas de redução de emissões de GEE por meio de parcerias com países em desenvolvimento.

De acordo com a FEAM (2012, p.98), as emissões de gases de GEE resultantes de atividades antrópicas são reduzidas a níveis inferiores aos que teriam ocorrido na ausência do projeto de MDL, com a garantia da obtenção de resultado mensurável, real e de longo prazo. Sendo assim:

Através do MDL, projetos implantados em países em desenvolvimento que resultam em reduções adicionais de emissões de GEE e/ou aumento da remoção de CO₂ recebem certificados chamados de Reduções Certificadas de Emissões, também conhecidos como “créditos de carbono”. As reduções certificadas são vendidas para países desenvolvidos e utilizadas para cumprir parte de suas metas de redução.

Logo, para a implantação do MDL nas áreas de disposição final de resíduos sólidos prevê a realização de estudos de viabilidade técnica, social, institucional e econômica. Nesse aspecto, as tecnologias de geração de energia através de RSU que resultam em reduções adicionais de emissões de GEE são passíveis de gerar créditos de carbono, uma vez que aprovadas no âmbito do MDL. De acordo com guia de orientações elaborado pela FEAM (2012, p.99),

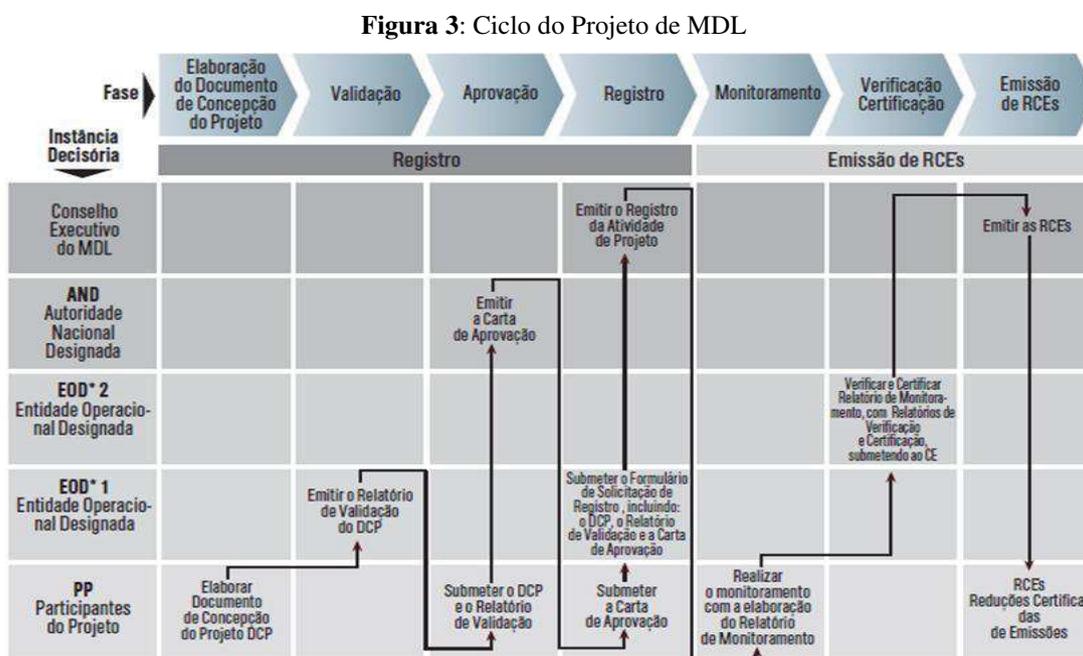
O processo de certificação de um projeto como MDL passa por uma série de etapas, que têm início na elaboração do Documento de Concepção de Projeto – DCP. Uma vez que o projeto é aprovado pela Autoridade Nacional Designada - AND, e formalmente aceito pelo Conselho Executivo do MDL, inicia-se o monitoramento das emissões do projeto e posteriormente é feita a verificação e a certificação pela Entidade Operacional Designada - EOD. Após o cumprimento de todas as etapas, o Conselho Executivo emite os créditos de carbono.

Nessa perspectiva, o Protocolo de Quioto determina que os países além de implantar projetos de redução da poluição dentro de seus territórios, deve também oferecer mecanismos de flexibilização com vistas à diminuição de custos.

No Brasil, segundo o Ministério do Meio Ambiente, a contribuição das atividades de projeto MDL para o desenvolvimento sustentável é avaliada por meio de critérios como: contribuição para a sustentabilidade ambiental local, contribuição para o desenvolvimento de condições de trabalho e criação de emprego, contribuição à distribuição de renda, contribuição para a capacitação e o desenvolvimento tecnológico, contribuição para a integração regional e para as relações setoriais (BRASIL, 2014).

De acordo com Filipetto (2007), o MDL é um mecanismo de grande importância, pois funciona como um canal através do qual os governos e as corporações privadas transferem tecnologias limpas e promovem o desenvolvimento sustentável.

Não obstante, um projeto de MDL deve passar por sete etapas em seu ciclo, para que resulte em Reduções Certificadas de Emissões – RCEs (uma RCE equivale a uma tonelada de dióxido de carbono equivalente -CO₂eq), conforme descreve o Comunicado Técnico da FEAM (2011), apresentado na Figura 3.



Fonte: Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – Comunicado Técnico – FEAM (2011).

As etapas que compõem o ciclo do projeto de MDL evidenciam, portanto:

- **Elaboração de Documento de Concepção de Projeto-DCP:** pelos participantes do projeto e contém, principalmente, descrições técnicas e organizacionais, a justificativa das linhas de base e do monitoramento e a demonstração da adicionalidade do projeto.
- **Validação:** nessa etapa uma Entidade Operacional Designada – EOD – audita o DCP e o encaminha para a Autoridade Nacional Designada – AND –, certificando que as reduções dos gases causadores do efeito estufa estão gerando créditos de carbono e potencialmente outros co-benefícios socioeconômicos e ambientais para o país.
- **Aprovação pela Autoridade Nacional Designada –AND:** processo no qual a AND das partes envolvidas confirma a participação voluntária e a AND do país anfitrião atesta que a atividade contribui para o desenvolvimento sustentável do país.
- **Registro:** é a aceitação formal, pelo Conselho Executivo do MDL, de um projeto validado como atividade de projeto de MDL.
- **Monitoramento da Atividade de Projeto:** é de responsabilidade dos participantes e inclui a coleta e o armazenamento de todos os dados necessários para calcular a redução das emissões ou evolução das remoções de GEE, de acordo com a metodologia de linha de base e monitoramento estabelecidos no DCP.
- **Verificação e a certificação:** são feitas pela EOD responsável e têm o objetivo de quantificar e garantir as reduções e remoções de emissões de GEE que ocorreram até a data da realização do relatório de verificação, de forma a comprovar o montante de reduções de emissões efetivamente realizadas por uma atividade de projeto.
- **Emissão das RCEs:** etapa final que ocorre quando o Conselho Executivo do MDL, certo de que foram cumpridas todas as etapas e de que as reduções de emissões de GEE decorrentes das atividades de projetos são reais, mensuráveis e de longo prazo, emite as RCEs (FEAM, 2012, p.100).

O aproveitamento energético de RSU é uma alternativa para obter créditos de carbono através da redução das emissões de GEE que seriam originadas na decomposição do lixo disposto em lixões ou aterros sem recuperação de metano e também por substituir a necessidade de geração de energia a partir de fontes fósseis.

De acordo com a FEAM (2012), os créditos de carbono originados no aproveitamento energético de RSU geram receitas que podem, muitas vezes, tornar o projeto de geração de energia economicamente viável. Nesse sentido, o Protocolo de Quioto, destaca dois tipos de mercados voltados à negociação de créditos de carbono:

[...] mercados em linha com o Protocolo de Quioto e mercados “voluntários” (ou “Não-Quioto”). No primeiro caso, os créditos são negociados com o objetivo principal de facilitar o alcance das metas de redução de emissões estabelecidas no âmbito do Protocolo de Quioto. Já no segundo tipo de mercado, a negociação relaciona-se fundamentalmente ao alcance de metas estabelecidas voluntariamente por empresas ou governos locais, fora do Protocolo (FEAM, 2011, p.10).

Nessa perspectiva, a receita gerada pela implementação do MDL é um incentivo para melhoria de tecnologias e para avançar na questão da gestão adequada de RSU em municípios brasileiros.

2.4 PODER CALORÍFICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O poder calorífico, isto é, uma propriedade definida como sendo a quantidade de calor desprendida pela combustão estequiométrica do combustível. De acordo com Itô (2014, p.19):

O poder calorífico (PC), que consiste na energia liberada pela combustão e varia de acordo com o teor de umidade do combustível. O PC é dividido em dois tipos, superior (PCS) e inferior (PCI).

O PCS considera que a água contida no combustível não evapora no processo, enquanto o PCI que a água seja vaporizada. Para vaporizar a água é necessário energia, o que justifica o valor do PCS sempre ser maior que o PCI, considerando o mesmo combustível.

O poder calorífico também revela o potencial de um material disponibilizar energia, portanto, quanto maior o percentual de resíduos com composição orgânica, como plástico, papel, papelão, borracha, couro, têxteis, folha, mato e galhada, maior a capacidade de geração de energia térmica, pois esses materiais possuem elevado poder calorífico. Da mesma forma, o poder calorífico influencia o dimensionamento das instalações de todos os processos de tratamento térmico (ITÔ, 2014; FEAM, 2012).

Alguns fatores são determinantes para liberação de energia por meio do poder calorífico do RSU, tais como a composição do resíduo entre locais, sua umidade e quantidade de cinzas.

O poder calorífico, pode ser expresso como PCS ou PCI, sendo a unidade de medida internacionalmente aceita para combustíveis sólidos o kJ/kg ou MJ/kg, nas bases seca, úmida ou úmida e sem cinzas. O valor expresso em kcal/kg é também muito usado (FEAM, 2012).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2014, p.25), o processo de geração de energia elétrica pela incineração dos RSU é semelhante ao de usinas térmicas convencionais, cuja capacidade de geração depende diretamente do poder calorífico do material incinerado.

O poder calorífico de materiais normalmente encontrados nos resíduos sólidos urbanos está representado na Tabela 1 e, permite inferir que resíduos sólidos nos quais predominam orgânicos tendem a ser mais pobres em poder calorífico (BRASIL, 2014, p.26).

Tabela 1: Poder Calorífico de materiais encontrados em RSU (Kcal/Kg)

Materiais	Kcal/Kg
Plásticos	6.301
Borracha	6.780
Couro	3.629
Têxteis	3.478
Madeira	2.520
Alimentos	1.311
Papel	4.033

Fonte: BRASIL (2014, p.25)

Todavia, o potencial de geração elétrica através da tecnologia de incineração, por requerer insumos com poder calorífico inferior (PCI) de, ao menos, 2.000 kcal/kg (MARTIN, 2008), consome parte dos recicláveis (aqueles com poder calorífico, como papel e plástico) juntamente à fração orgânica do lixo, para geração elétrica (BRASIL, 2014).

Dessa forma, é importante conhecer a capacidade calorífica para assim saber-se a quantidade de energia armazenada naquele RSU e, portanto, poder elaborar projetos para o beneficiamento energético desses materiais. Nessa direção, diferentes tecnologias de incineração têm sido desenvolvidas e, por isso os fornos podem ter variadas configurações.

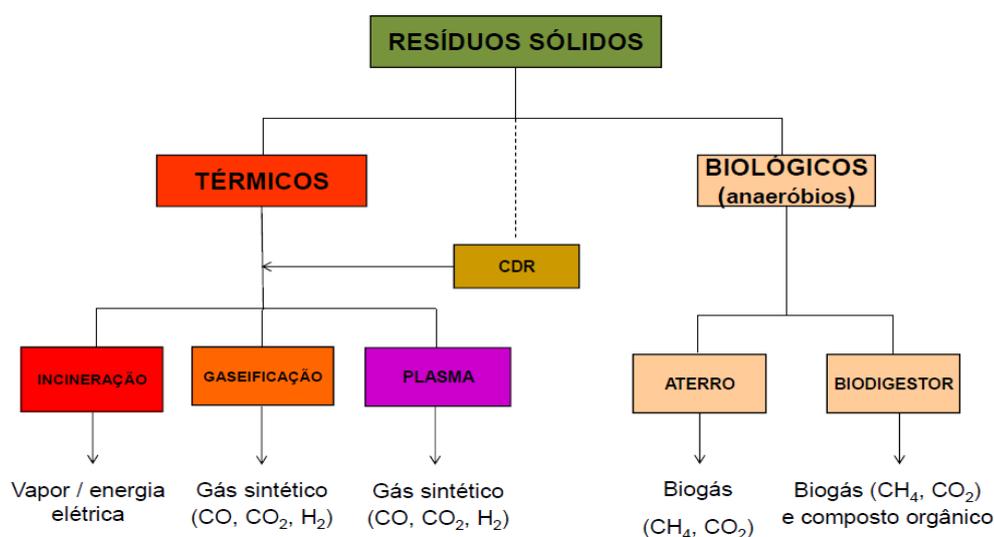
3 TECNOLOGIAS EMPREGADAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU

O aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia é uma estratégia que vem sendo utilizada em todo o mundo e, mais recentemente no Brasil. Estes recursos apresentam uma série de benefícios para os países, seja pela diminuição dos impactos causados ao meio ambiente, seja pelas questões sociais e econômicas.

Furtado e Serra (2009), avaliando as tecnologias que utilizam os RSU para geração de energia elétrica, mostram que há diversas opções de rotas tecnológicas, tais como o térmico e o biológico. No processo térmico, em que se utiliza a incineração para recuperação energética, o objetivo da tecnologia é reduzir significativamente o volume de resíduos e aproveitar, através da combustão, o calor dos gases para gerar energia elétrica. Enquanto o biogás pode conter entre 40 e 80% de metano, dependendo da eficiência do processo, influenciado por fatores como carga orgânica, pressão e temperatura durante a fermentação.

Na Figura 4, pode-se verificar as rotas tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU, a qual mostra o panorama acerca do aproveitamento energético dos RSU.

Figura 4: Rotas tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU



Fonte: Sérgio Frate Assessor Técnico da EMAE no 3º. Seminário de Bioenergia do Cenbio.

Nessa direção, a composição dos RSU constitui fator determinante na definição de qual tecnologia será de aplicada para o aproveitamento energético destes.

3.1 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico dos Resíduos Sólidos Urbanos é definido como os processos que utilizam o calor como forma de recuperar, separar ou neutralizar determinadas substâncias presentes nos resíduos, ou reduzir massa e volume, ou produzir energia térmica, elétrica ou mecânica (FEAM, 2012).

Atualmente, integram as tecnologias de tratamento térmico dos RSU, com aproveitamento energético a incineração, a pirólise, gaseificação, e o plasma.

3.1.1 INCINERAÇÃO

A incineração tem sido usada para tratar o RSU, sendo considerada uma solução para a destinação final do lixo e podendo ser utilizada como fonte de energia.

A incineração promove a geração de cinzas inertes, isentas de matéria orgânica e inorgânica combustível, como resíduo do processo e, para que isso acontece é necessária a manutenção de elevada temperatura em fornos, que na presença de oxigênio em excesso, é capaz de promover a queima de resíduos combustíveis (MACHADO, 2015, p.13).

As cinzas provenientes do processo de incineração possuem alta concentração de componentes metálicos, por isso não é conveniente seu descarte no solo. Nesse sentido, com as tecnologias atuais as cinzas já podem ser reincineradas com aplicações na fabricação de produtos cerâmicos.

A incineração é um processo de combustão controlada, que tem como princípio básico a reação do oxigênio com componentes combustíveis presentes no resíduo (como carbono, hidrogênio e enxofre), em temperatura superior a 800 °C, convertendo sua energia química em calor.

Abordaremos a incineração mais adiante, no capítulo 4 (Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos), tendo em vista ser a tecnologia térmica mais utilizada em todo o mundo.

3.1.2 PIRÓLISE

A tecnologia de pirólise promove a quebra das moléculas dos resíduos sólidos através do superaquecimento, porque a pirólise “é um processo de decomposição térmica, na ausência de oxigênio, por fonte externa de calor, que converte a matéria orgânica em diversos subprodutos” (FEAM, 2012, p.31).

Neste processo, o fracionamento das substâncias sólidas ocorre progressivamente à medida que estas passam pelas zonas de calor que integra o reator pirolítico. E na zona pirolítica o calor pode variar de 300 °C a 1.600 °C, porque ocorrem os processos de volatilização, oxidação e fusão, resultando em:

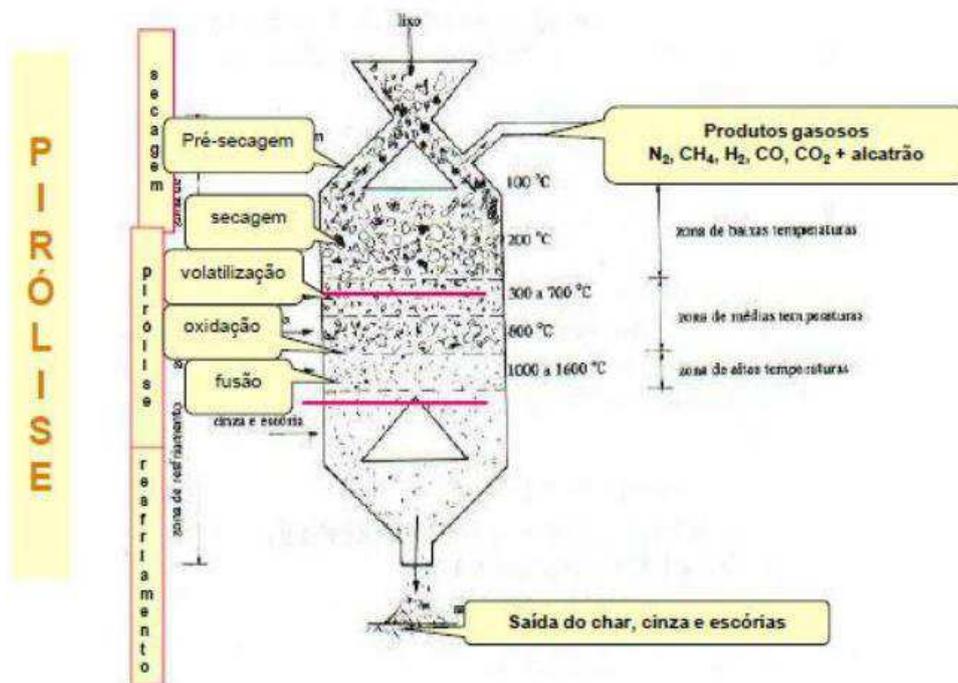
- Gases não condensáveis, compostos principalmente por nitrogênio e gás de síntese (syngas);
- Líquido pirolenhoso, obtido pela condensação de gases que se desprendem durante o processo, com baixo teor de enxofre, composto por ácido pirolenhoso (ácido acético, metanol, alcatrão solúvel e outros vários compostos em menor quantidade) e alcatrão insolúvel;
- Resíduo sólido, constituído por carbono quase puro (char) e ainda, por vidros, metais e outros materiais inertes (escória) caso presentes no RSU processado (FEAM, 2012, p.31).

A pirólise tem potencial de produzir até 75% da biomassa em uma mistura de líquidos (alcatrões, hidrocarbonetos oxigenados, ácidos orgânicos, etc.), sendo o processo realizado em três tipos, nomeadamente: pirólise convencional, rápida e ultrarrápida, conforme o tempo de residência da matéria-prima no forno e a temperatura do processo.

No processo de pirólise, o reator pirolítico é o equipamento principal, sendo disponibilizado no mercado vários modelos, destacando-se os de leito fluidizados (borbulhante e circulante), os de leito fixo, leito de jorro, cilindro rotativo, reator ciclônico, cone rotativo e dentre outros.

Na Figura 5, pode-se observar o fluxograma do processo de pirólise.

Figura 5 - Diagrama de fluxo do processo no reator pirolítico.



Fonte: FEAM (2012).

Neste processo, o líquido pirolenhoso pode ser gaseificado ou refinado para uso energético e, dependendo da concentração de alcatrão e outros compostos tóxicos, pode ser utilizado na agricultura, entretanto o líquido é corrosivo, nocivo e altamente poluente (FEAM, 2012).

Os gases não condensáveis, resultantes da pirólise podem ser utilizados para:

a produção de vapor através de trocadores de calor e caldeiras ou, após resfriamento e limpeza em sistema de controle de emissão, podem ser queimados em caldeiras, turbinas a gás ou motores de combustão interna, para geração de eletricidade ou destinados à fabricação de produtos químicos (FEAM, 2012, p.32).

A carbonização da madeira para a produção do carvão vegetal, requer, portanto, algumas exigências técnicas da pirólise, dentre as quais destaca-se:

- tipo, umidade, forma e dimensão da matéria-prima;
- temperatura final da reação;
- taxa de aquecimento e tempo de permanência na temperatura final;
- adição de catalisadores;
- atmosfera de reação (inerte ou parcialmente inerte);
- técnica utilizada (fonte de energia);
- qualificação do operador (processos artesanais);
- pressão (rendimento e cinética das reações) (FEAM, 2012, p.33).

3.1.3 GASEIFICAÇÃO

A tecnologia de gaseificação pode ser definida como o processo de conversão do resíduo sólido em uma mistura de gases combustíveis, denominada de gás de síntese. Neste processo, de acordo com a FEAM (2012, p.35),

O gás produzido a partir da gaseificação de biomassa tem muitas aplicações práticas, tais como a geração de energia mecânica e elétrica, a geração direta de calor, ou como matéria-prima na obtenção de combustíveis líquidos — como hidrocarbonetos combustíveis sintéticos (diesel e gasolina), metanol, etanol e outros produtos químicos, através de processos de síntese química catalítica (FEAM, 2012, p.35).

Durante a gaseificação ocorrem basicamente reações exotérmicas de oxidação (combustão) e reações endotérmicas de redução envolvendo fases sólida e gasosa, pois esse tratamento de resíduos sólidos compreende o aquecimento dos resíduos sólidos urbanos a temperaturas acima de 700°C, em um ambiente com quantidade reduzida de oxigênio, que permita a oxidação parcial do insumo, mas que impeça sua combustão.

Neste sentido, para que ocorra a composição dos gases e a produção simultaneamente de carvão e de líquidos condensáveis, alguns fatores são determinantes, tais como: tipo de forno de gaseificação, forma de fornecimento de energia ao processo, introdução ou não de vapor de água junto com o comburente (ar, O₂), tempo de retenção da carga, sistema de retirada de gases e outros produtos, da matéria orgânica utilizada. (FEAM, 2012, p.36).

Os gaseificadores são recipientes revestidos com material refratário, que para a produção de combustíveis sólidos ou líquidos, precisam apresentar as seguintes características, conforme ver-se na Tabela 2:

Tabela 2 - Características dos gaseificadores.

Características	Variações
Poder calorífico do gás produzido	Baixo: até 5 MJ/Nm ³ (997 kcal/kg) Médio: 5 a 10 MJ/Nm ³ (997 a 1.993 kcal/kg) Alto: 10 a 40 MJ/Nm ³ (1.993 a 7.972 kcal/kg)
Tipo de agente gaseificador	Ar, vapor d'água, oxigênio, hidrogênio (hidrogaseificação)
Tipo de leito	Fixo: corrente paralela ou contracorrente Fluidizado: borbulhante ou circulante
Pressão de trabalho	Baixa: pressão atmosférica Pressurizado: até 6 MPa (59,2 atm)
Natureza da biomassa	Resíduos agrícolas, industriais ou sólidos urbanos (lixo) Biomassa in natura, peletizada ou pulverizada

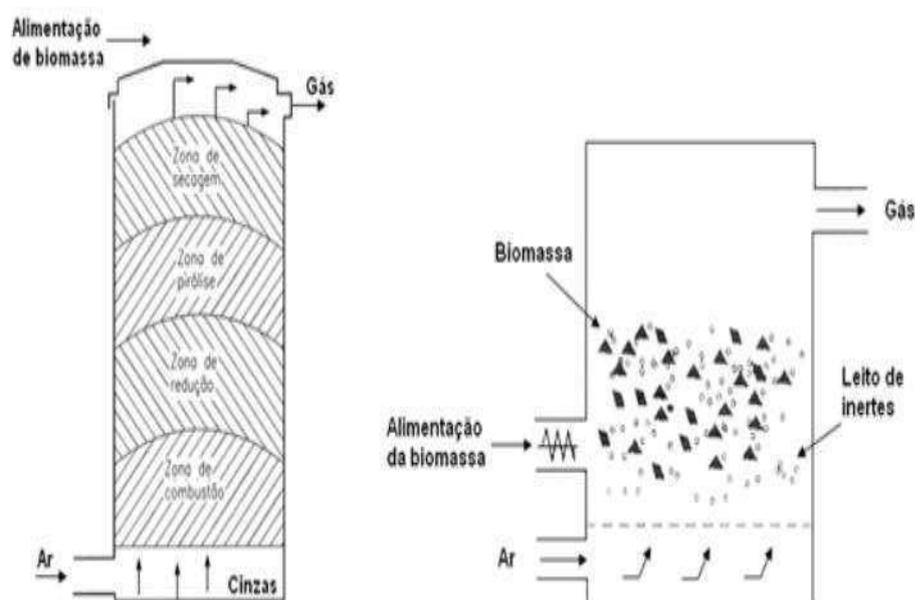
Fonte: FEAM (2012).

Os gaseificadores são assim, classificados segundo o tipo de leito utilizado, conforme aponta o Guia FEAM (2012, p.36):

- Leito fixo: podem ser de corrente paralela (onde o sólido e o gás se movem no mesmo sentido, normalmente descendente), ou contracorrente (se movem em sentido opostos). É a tecnologia mais difundida, conhecida e dominada operacionalmente, a qual vem sendo implementada principalmente em pequenas escalas.
- Leito fluidizado: podem ser do tipo borbulhante ou circulante, conforme a velocidade com que o material atravessa o leito. No tipo borbulhante, a velocidade é em torno de 1 m/s, e no circulante o material atravessa em velocidade mais alta (7 m/s a 10 m/s), permitindo melhor mistura do ar com o combustível a ser gaseificado, mas as bolhas se tornam maiores formando grandes lacunas no leito e arrastando uma quantidade substancial de sólidos que são coletados, separados do gás e levados de volta ao leito. São majoritariamente empregados em grandes instalações, por serem mais complicados de operar.

A classificação acima, baseia-se na direção relativa do fluxo de biomassa e do agente de gaseificação, e na forma de fornecimento de calor ao reator. De acordo com o Guia FEAM (2012), para formar a base de suporte de um leito fluidizado, normalmente se utiliza areia, que representa um grande reservatório térmico capaz de atenuar grandes variações de umidade por períodos relativamente longos, no combustível alimentado, ao contrário de caldeiras de grelha. Na Figura 6, pode-se observar os desenhos esquemáticos dos gaseificadores contracorrente e de leito fluidizado.

Figura 6: Desenhos esquematizados dos gaseificadores Contracorrente e de Leito Fluidizado.



Fonte: FEAM (2012).

Todavia, a obtenção econômica de gás de síntese de poder calorífico alto ou médio só é possível utilizando-se oxigênio puro. Por isso, os gaseificadores para a produção de syngas têm maior custo, pois o gás deve ser mais limpo, com baixos teores de alcatrão e pirolenhosos, exigindo unidades especiais de limpeza (FEAM, 2012).

Denota-se que a técnica de gaseificação é versátil, contudo, aponta-se que esse processo apresenta muitos problemas no processo básico de gaseificação, especificamente em relação à limpeza dos gases, dificuldade de escalonamento (LUZ, 2013). Por isso, talvez, os gaseificadores que se tornaram totalmente operacionais e comerciais foram aqueles projetados para fins de geração de calor; em relação àqueles para fins de geração de energia elétrica (FEAM, 2012).

3.1.4 PLASMA

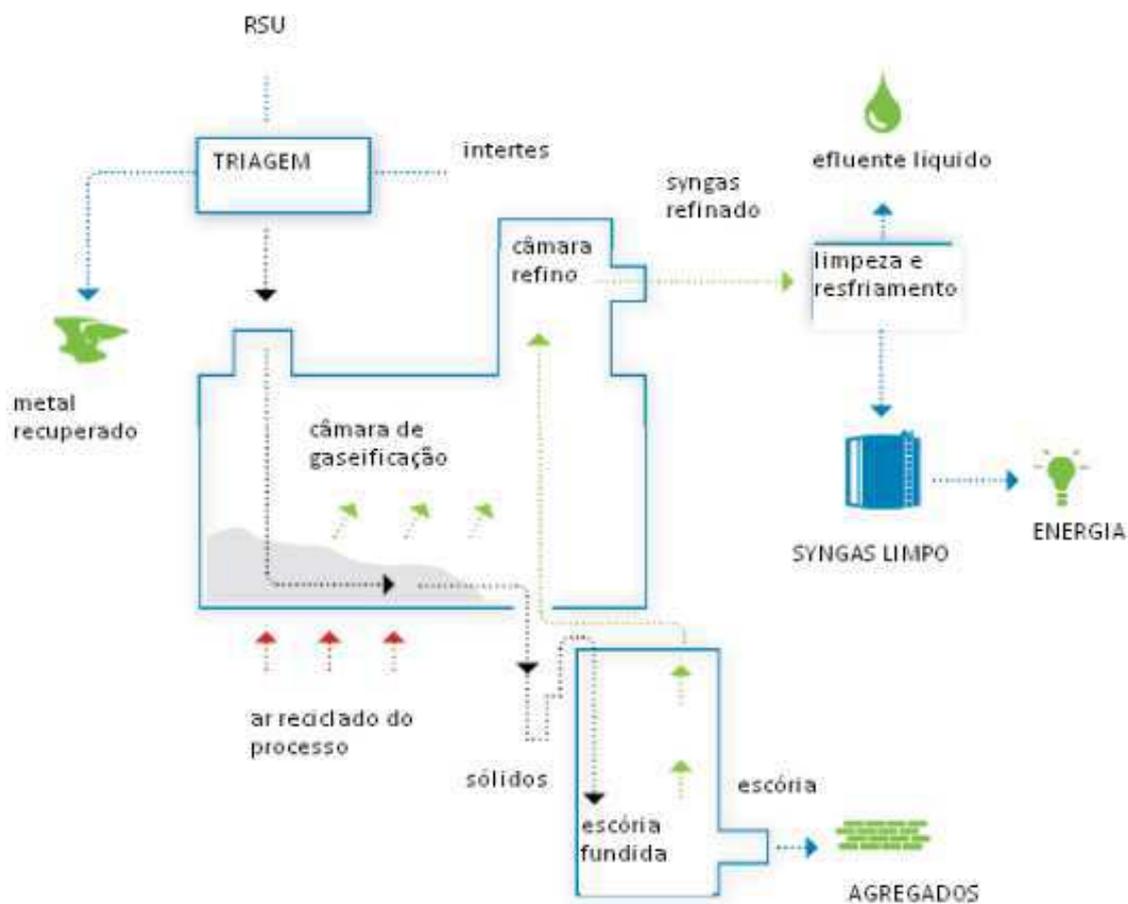
No tratamento de RSU utilizando a tecnologia de plasma há o aquecimento de gases no qual após serem triturados e superaquecidos, os resíduos já em forma gasosa passam por uma altíssima corrente elétrica, a qual transforma esse material em plasma (devido à alta temperatura).

O plasma, conhecido como “o quarto estado da matéria”, é um gás ionizado, com boa condutividade elétrica e alta viscosidade, gerado pela dissociação das moléculas de qualquer gás devido à perda de parte dos elétrons quando a temperatura de aquecimento atinge 3.000 °C. O jato de plasma é gerado e controlado em um dispositivo denominado “tocha de plasma”, no qual ocorre a formação de um arco elétrico, através da passagem de corrente entre o cátodo e ânodo, provocando a ionização do gás injetado pelo seu aquecimento a temperaturas extremamente elevadas, variando de 5.000 °C a 50.000 °C de acordo com as condições de geração, mas tipicamente da ordem de 15.000 °C (FEAM, 2012, p.39).

Existem essencialmente dois tipos de tratamento de resíduos por plasma: incidência da tocha de plasma diretamente sobre os resíduos produzindo a dissociação das ligações moleculares em compostos mais simples (syngas), com maior consumo de energia e; incidência da tocha de plasma sobre os gases de síntese procedentes do processo de gaseificação de resíduo, contribuindo para a produção de um gás mais limpo.

Na gaseificação com plasma a fonte de calor do reator é feita através de tochas de plasma que cria um arco elétrico e produz um gás a alta temperatura. Na Figura 7, pode-se verificar um esquema do forno de plasma.

Figura 7: Forno de Plasma



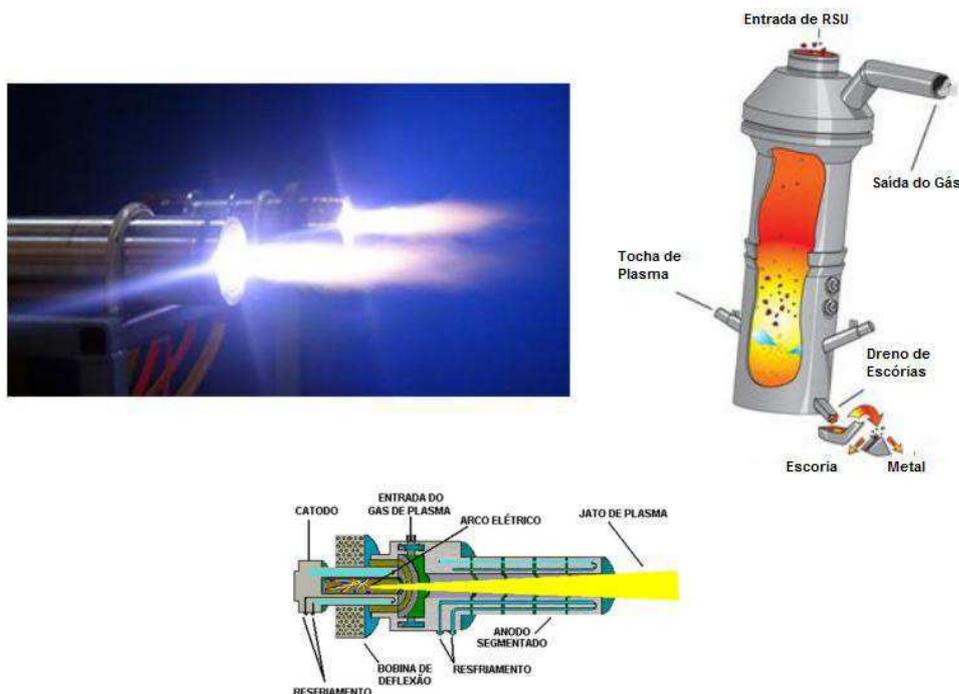
Fonte: FEAM (2012).

Embora a tecnologia de plasma para resíduos sólidos urbanos, ainda não tenha alcançado desenvolvimento industrial, há avanços tecnológicos nesse processo. Hoje, existem basicamente dois tipos de tratamento de resíduos por plasma:

- Incidência da tocha de plasma diretamente sobre os resíduos produzindo a dissociação das ligações moleculares em compostos mais simples (syngas), com maior consumo de energia;
- Incidência da tocha de plasma sobre os gases de síntese procedentes do processo de gaseificação de resíduo, contribuindo para a produção de um gás mais limpo. O resíduo é alimentado em uma câmara de gaseificação, por meio de um sistema de câmaras estanques. Ar pré-aquecido, enriquecido ou não com oxigênio, é injetado na base da fornalha para alimentar a combustão. O material não combustível é descarregado pela base, como escória líquida ou metal a cerca de 1.450 °C, enquanto o gás sai pelo topo do gaseificador entre 600 °C e 800 °C, sendo conduzido para a câmara de refino (reator de decomposição térmica a plasma), onde os hidrocarbonetos presentes no gás são decompostos e parcialmente oxidados para produzir um gás combustível limpo a cerca de 1.200 °C e 1.400 °C, tendo basicamente syngas. (FEAM, 2012, p.40).

A tocha de plasma é um dispositivo que transforma energia eléctrica em calor transportado por um gás, na Figura 8, observa-se a tocha de plasma e representações esquemáticas do dispositivo gerador e do forno de plasma.

Figura 8 - Tocha de plasma e representações esquemáticas do dispositivo gerador e do forno de plasma.



Fonte: FEAM (2012).

A tocha de plasma é responsável pela fonte de calor do reator, o qual cria um arco eléctrico e produz um gás a alta temperatura de cerca de 15.000°C.

Em síntese, Torres e Bajay (2015), cita como tecnologias de tratamento térmico de resíduos, com aproveitamento energético, a incineração, pirólise, gaseificação, plasma. Enquanto as tecnologias para tratamento biológico de resíduos com aproveitamento energético são decorrentes da utilização do biogás procedente de biometanização de resíduos em reatores anaeróbios, ou em aterros sanitários.

3.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO BIOLÓGICO

Outro tratamento para os resíduos sólidos urbanos, que resulta na geração de energia é o tratamento biológico, que consiste numa forma de tratamento da matéria

orgânica biodegradável na qual se intensifica a ação de microrganismos, visando à estabilização e oxidação dessa matéria. Havendo a presença de oxigênio livre, os processos são aeróbios. Na ausência do oxigênio livre, os processos são anaeróbios. Desse processo resulta o biogás.

O tratamento biológico pode ser aplicado aos resíduos orgânicos biodegradáveis, podendo ser originários de atividades industriais, domésticas, comerciais e rurais, como: restos de alimentos e poda, madeiras, papéis, papelão.

A tecnologia de geração de energia por meio do processamento biológico, de acordo com Costa (2010, p.41), pode ser feito de duas maneiras, pelo método anaeróbio (digestão anaeróbia) ou aeróbio (compostagem ou vermicompostagem). Na digestão anaeróbia dá-se a produção de biogás, fonte de calor e energia elétrica renovável, pois nesse processo a ação dos microrganismos tem como produto o biogás, composto em sua maior parte por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (REIS, 2012).

De acordo com a Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM, 2012), as tecnologias mais conhecidas de tratamento biológico de resíduos com aproveitamento energético são a biometanização e biogás de aterro sanitário.

3.2.1 BIOMETANIZAÇÃO

A tecnologia de biometanização com aproveitamento energético tem como base a geração de biogás a partir da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU) em reatores específicos. Esse processo ocorre em quatro estágios: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

O biogás é um combustível gasoso, com grande potencial energético, decorrente da fermentação anaeróbia de resíduos sólidos que vem sendo utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou mecânica (SOUZA, 2005).

Após a digestão anaeróbia da massa de resíduos, que irá gerar o biogás (cerca de 100 a 200 Nm^3 de biogás por tonelada de RSU, com concentração de metano em torno de 50%), gera-se também um lodo biológico, cujo tratamento e disposição final devem ser incluídos no projeto de uma planta desse tipo. (FEAM, 2012, p.53).

A principal aplicação do biogás é como combustível em motor de combustão interna a gás que movimenta um gerador de energia elétrica. Essa tecnologia tem sido

utilizada mundialmente na gestão dos RSU, e segundo a FEAM (2012, p.51), as plantas possuem as seguintes etapas:

- recepção (preferencialmente procedente de coleta seletiva);
- pré-tratamento (triagem, trituração da forsu e preparação da massa de alimentação do reator);
- digestão anaeróbia da forsu (gerando biogás e “digestato” — um lodo biológico);
- recuperação do biogás (para produção de energia elétrica, aquecimento, resfriamento, injeção em rede de gás natural, combustível de veículos ou iluminação);
- tratamento/controle de ar ambiente, efluentes atmosféricos e líquidos e resíduos sólidos.

Nos biodigestores a temperatura, o pH e a fermentação devem ser frequentemente averiguados, porque esses indicadores irão determinar a qualidade do biogás. Nas plantas industriais, os tipos de sistemas para a utilização da tecnologia de digestão anaeróbia têm sido de:

- um estágio (todas as fases em um único reator) – mais comum, embora menos eficiente;
- multi-estágios (em geral 2 reatores, no primeiro as fases até a acetogênese e no segundo a metanogênese) – maior flexibilidade operacional;
- em batelada (todas as fases em reator(es) preenchido(s) de uma única vez) – projeto e operação mais simples, menor custo de investimento e maior área (FEAM, 2012).

O sistema em batelada consiste num sistema simples e de pequena exigência operacional, mas que podem produzir biogás de 50 a 100 vezes mais do que a observada em um aterro sanitário, devido à recirculação do percolato gerado e da temperatura mais elevada (FEAM, 2012).

Os reatores anaeróbios se classificam quanto ao teor de sólidos totais (ST) na massa de alimentação do reator, em:

- baixo teor de sólidos (ou úmidos): $ST < 15\%$ – implica maior volume do reator, consumo de água e geração de efluentes;
- médio teor de sólidos: $15\% < ST < 20\%$;
- alto teor de sólidos (ou secos): $22\% < ST < 40\%$ – implica menor volume do reator, equipamentos mais caros (bombas e outros) (FEAM, 2012, p.52).

de resolver o problema das emissões de metano decorrentes da decomposição natural do lixo em GDL, pois,

A utilização do GDL ou do Biogás é o uso energético mais simples dos RSU. O GDL é um gás composto em percentual molar de: 40 – 55% de metano, 35 – 50% de dióxido de carbono, e de 0 – 20% de nitrogênio. O poder calorífico do GDL é de 14,9 a 20,5 MJ/m³, ou aproximadamente 5.800 kcal/m³. A geração de biogás se dá com a decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos dispostos em aterros sanitários. A tecnologia disponível para obtenção de energia com este gás já é conhecida e utilizada amplamente em todo mundo.

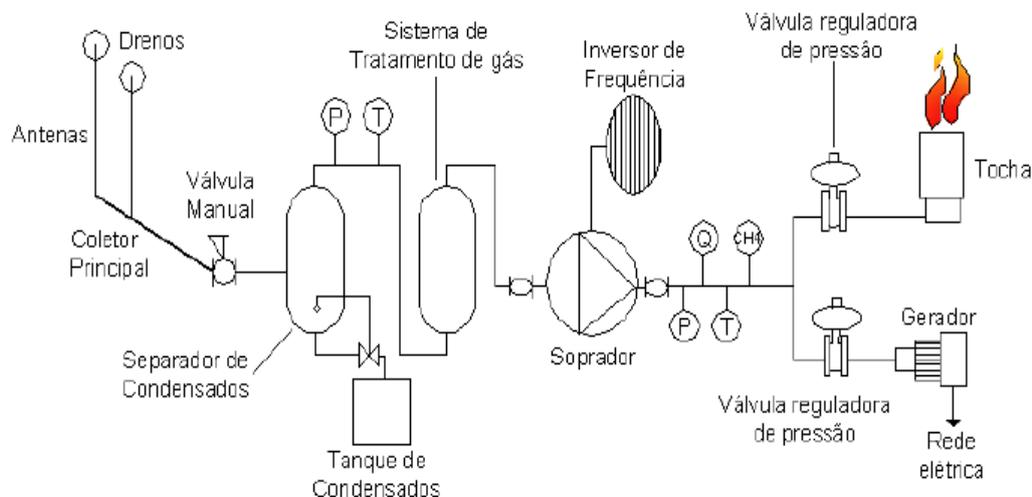
A produção de energia pelo processamento biológico é um processo com grande aceitação, sobretudo, em países desenvolvidos, em face do baixo custo, porque o processo, em síntese consiste na disposição e compactação dos RSU em camadas estratificadas a partir das quais ocorre a lenta produção de GDL mediante a decomposição anaeróbica resultante da atividade microbiana.

Atualmente, constata-se que o aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos através do processamento biológico com a produção do biogás, representa uma alternativa vantajosa, porque dentre as vantagens está à redução do efeito estufa, uma vez que ele emite o gás metano, o qual tem impacto negativo na natureza.

3.2.2 BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO

O biogás de aterro sanitário é uma técnica de aterramento dos resíduos sólidos urbanos que consiste na decomposição de material orgânico presente nos resíduos. De acordo com a FEAM (2012, p.58), a produção do biogás de aterro baseia-se na compactação dos resíduos no solo na forma de camadas, periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte, de modo a produzir uma degradação natural e lenta, por via biológica, até a mineralização da matéria biodegradável.

O biogás pode ser utilizado na geração de energia elétrica, através de geradores. Na Figura 10, tem-se um esquema simplificado do processo de captação e tratamento do biogás.

Figura 10: Esquema de captação e tratamento do biogás.

Fonte: FEAM (2012).

A geração de energia a partir do biogás de aterro sanitário difere de outros procedimentos termelétricos, pois é necessário seu processamento, que irá variar em função da utilização do gás. Neste processo,

O biogás pode ser queimado na atmosfera ou ter aproveitamento energético. A maioria dos aterros utiliza o sistema de drenos abertos, onde é mantida acesa uma chama para queima imediata do biogás que vai sendo naturalmente drenado. Esse sistema apresenta uma baixa eficiência e estima-se que apenas 20% do biogás sejam efetivamente destruídos pela queima. O restante é emitido para a atmosfera (FEAM, 2012, p.59).

Este processo carece cuidados especiais e técnicas específicas a serem seguidas, desde a seleção e preparo da área, até sua operação e monitoramento. Assim, a coleta do biogás em aterros sanitários requer o prévio planejamento da instalação dos equipamentos destinados a esse fim.

Sousa, Gaia, Rangel (2010, p.378), apresenta como vantagens nesse processo, o baixo custo de obtenção, a menor corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos) e, o menor risco ambiental. Porém, há desvantagens, tais como:

Baixa densidade energética;
 Necessita de equipamentos adequados para sua manipulação, a fim de evitar impactos ambientais ou a saúde das pessoas envolvidas nas operações;
 Sua composição química possibilita o aparecimento de corrosão, sendo necessário usar materiais resistentes à corrosão nas máquinas movidas a biogás.

Embora, o processo confira comprovados benefícios ambientais, “uma vez que possibilita a captura e uso do metano – principal gás causador do “efeito estufa” – que de outra forma seria lançado na atmosfera” (FURTADO, SERRA, 2009), no Brasil a produção desse tipo de energia representa apenas 2% da energia de nosso país.

Contudo, a produção de biogás constitui o grande grupo das tecnologias baseadas em tratamentos térmicos dos RSU, as quais podem ainda assumir combinações com vários tipos de pré-processamento do resíduo e mesmo uma composição entre elas (FURTADO, SERRA, 2009).

3.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS NA IMPLANTAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Assim como existem várias vantagens na implantação de tecnologias de aproveitamento energético, há também desvantagens, como o custo elevado de implantação e operação do processo de incineração, devido principalmente aos controles ambientais.

A redução do volume e quantidade de resíduos sólidos destinados a aterros sanitários é uma das vantagens principais na utilização de tecnologias de tratamento térmico. Entretanto, embora as principais tecnologias de aproveitamento energético se mostrem favoráveis do ponto de vista ambiental e econômico, os custos de investimento das plantas industriais ainda são o maior obstáculo à utilização das mesmas na destinação final dos RSU.

Ainda assim, é possível afirmar a viabilidade da utilização destas tecnologias, à luz do conceito de desenvolvimento sustentável e do aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.

No Quadro 1, verificam-se as vantagens e desvantagens das tecnologias apresentadas, a partir de uma compilação da FEAM (2012, p.80-1).

Quadro 1: Vantagens e desvantagens de tecnologias de aproveitamento energético

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Incineração	<ul style="list-style-type: none"> - redução do volume e massa dos resíduos; - destruição completa da maioria dos resíduos orgânicos perigosos; - recuperação de energia (elétrica e/ou vapor d'água), que pode permitir a redução de custos operacionais. 	<ul style="list-style-type: none"> - custo elevado de implantação e operação, devido principalmente aos controles ambientais; - necessidade de mão de obra qualificada; maiores receios da sociedade de riscos à saúde devido às emissões de dioxinas, em relação às outras tecnologias.
Pirólise	<ul style="list-style-type: none"> - possibilidade de modularidade das plantas industriais conforme demandas locais; - menor emissão de poluentes atmosféricos, em relação à incineração; redução do volume de resíduos a ser disposto (cerca de 95%); - possibilidade de utilização de combustível auxiliar de baixo custo (como biomassa ou biogás). 	<ul style="list-style-type: none"> - heterogeneidade dos RSU dificulta o controle de variáveis operacionais; - tecnologia não consolidada em escala comercial; - processo mais lento que a incineração e com maior consumo de combustível auxiliar; - elevado custo operacional e de manutenção.
Gaseificação	<ul style="list-style-type: none"> - as cinzas e o carbono residual permanecem no gaseificador, diminuindo assim a emissão de particulados; - alta eficiência térmica, variando de 60% a 90%, conforme o sistema implementado; - associada a catalisadores, como alumínio e zinco, a gaseificação aumenta a produção de H₂ e CO (gás combustível) e diminui a produção de CO₂. 	<ul style="list-style-type: none"> - o resíduo deve estar limpo, sem a presença, por exemplo, de terras; - potencial de fusão das cinzas a temperaturas acima de 900°C, que pode aumentar corrosão no equipamento; - o alcatrão formado durante o processo de gaseificação, se não completamente queimado, pode limitar as aplicações do syngas.
Plasma	<ul style="list-style-type: none"> - elevada temperatura do processo causa rápida e completa pirólise da substância orgânica, permitindo fundir e vitrificar certos resíduos inorgânicos, tornando-os similares a um mineral de alta dureza; - elevada redução de volume dos resíduos, podendo ser superior a 99%. 	<ul style="list-style-type: none"> - elevado custo de investimento; - elevado consumo energético; - como a incineração, exige sofisticados sistemas de controle das emissões atmosféricas.
Biogás de aterro	<ul style="list-style-type: none"> - utilização de recurso energético de geração natural; - custos de implantação reduzidos se comparados às tecnologias de tratamento térmico e de biometanização; - modularidade das plantas industriais conforme acréscimo ou decréscimo da geração do biogás; - menor emissão de poluentes atmosféricos, em relação à incineração; - tecnologia consolidada em escala comercial. 	<ul style="list-style-type: none"> - os aterros sanitários ocupam áreas significativas, requerendo controle ambiental e restrições de uso após o encerramento de suas atividades (passivo ambiental); - o biogás é gerado apenas pela matéria orgânica biodegradável presente nos RSU; - a produção de biogás é variável em função do volume e idade dos RSU depositados; - menor produção de energia, em relação às tecnologias de tratamento térmico e da biometanização, por tonelada de RSU.

Fonte: FEAM (2012)

Em relação à tecnologia de gaseificação, uma vantagem é a simplificação do processamento, por outro lado, o limite de dimensionamento da planta de 10–15 toneladas de biomassa, representa uma desvantagem.

As vantagens e desvantagens de algumas das tecnologias são apontadas por diversos estudos. Em relação à gaseificação, Luz (2013), aponta como desvantagem fato de os gases produzidos conter grande concentração de material particulado devido ao processo de fluidização que ocorre no interior do gaseificador.

Fricke et al., (2015, p.35), estabelecendo um comparativo entre a pirólise e os processos de gaseificação e incineração, aponta que “a pirólise é a que mais se identifica quanto as suas características de temperatura e de pressão”, pois neste método, “se trabalha através da utilização de catalisadores, a temperaturas mais baixas, até 500 °C e sob pressão normal, resultando em baixo consumo de energia e menor formação de dioxinas e furanos”.

Para Rocha (2016), uma das vantagens da implantação de plantas de biogás, por exemplo, é a diversificação da matriz energética, sendo assim considerada uma fonte renovável e economicamente atrativa.

Porém, os tratamentos de aproveitamento de energia, ainda tem como desafio a redução da emissão de gases do Efeito Estufa, os quais são gerados pelo tratamento de RSU. Diante disso, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), tem sido uma alternativa, pois se propõe a implantar projetos que assegurem o desenvolvimento sustentável a fim de reduzir a emissão de gases poluentes no meio ambiente.

4 INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acordo com o estudo prospectivo das alternativas governamentais, nacionais e internacionais, voltadas ao financiamento de plantas de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos, realizado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM, 2009), os projetos de financiamento de energia elétrica a partir da incineração de resíduos sólidos estão citados nas áreas de infraestrutura, desenvolvimento social e urbano e meio ambiente e desenvolvimento sustentável, como tecnologia de ponta na geração.

O primeiro processo de incineração ocorreu em Nottingham, Inglaterra, 1874. No Brasil, em 1896, na cidade de Manaus foi instalado o primeiro incinerador municipal. No Japão, o percentual de resíduos incinerados no Japão chega a 80% dos resíduos gerados. A estimativa é que nos Estados Unidos chega a 16%. No Brasil, hoje existe poucos incineradores municipais (cerca de uma dezena) e nenhuma Usina de Incineração Municipal atualmente funciona, (LIMA, 1999, p 118).

Embora, haja posicionamentos contrários, argumentando que devido à emissão de poluentes liberados com a combustão, a incineração de resíduos urbanos, não seja compatível com a política de desperdício zero e possa desestimular a reciclagem, uma vez que, para transformar lixo em energia, seria preciso que houvesse um excedente desse material para abastecer as usinas, o processo de incineração para geração de energia tem sido aplicado desde o início do século XVIII e tem sido amplamente utilizada em vários países por meio de tecnologia confiáveis com modernas facilidades.

Todavia, como destino final do lixo, a incineração é um processo bastante antigo, onde ocorrem as queimas de refugos empilhados de lixo, cuja cinza é utilizada como adubo para o solo. É um dos processos tecnológicos térmicos que ocorre com a queima de resíduos sólidos a temperatura próxima de 200° c a 1200°c associado a uma mistura de ar adequado durante determinado intervalo de tempo. No caso específico dos resíduos sólidos, os compostos orgânicos são reduzidos a seus constituintes minerais, especialmente, dióxido de carbono gasoso, vapor de água e cinzas. Este processo ocorre em usinas de incineração.

As cinzas provenientes do processo de incineração possuem alta concentração de componentes metálicos, por isso não é conveniente seu descarte no solo. Nesse sentido,

com as tecnologias atuais as cinzas já podem ser reincineradas com aplicações na fabricação de produtos cerâmicos.

De acordo com a Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM, 2012, p.25),

A incineração é um processo de combustão controlada, que tem como princípio básico a reação do oxigênio com componentes combustíveis presentes no resíduo (como carbono, hidrogênio e enxofre), em temperatura superior a 800 °C, convertendo sua energia química em calor.

Se por um lado, a incineração, restringe consideravelmente o volume dos RSU, por outro os elevados custos operacionais e de investimentos, dificulta a instalação de usinas de geração de energia utilizando as tecnologias térmicas.

Na definição de Itô (2014, p.20),

A incineração é um processo de decomposição térmica, que aproveita o poder calorífico presente nos resíduos através da queima para geração de energia ou aquecimento de água além de, reduzir peso, volume e características de periculosidade com a eliminação de matéria orgânica e patogenicidade.

Essa decomposição térmica dos gases dos aterros, comumente é realizada em uma instalação de combustão especialmente projetada, onde “é queimado o metano e qualquer outro oligogás (incluindo COV) na presença de oxigênio (contido no ar), produzindo-se dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio e outros gases relacionados” (BRITO FILHO, 2015, p.146).

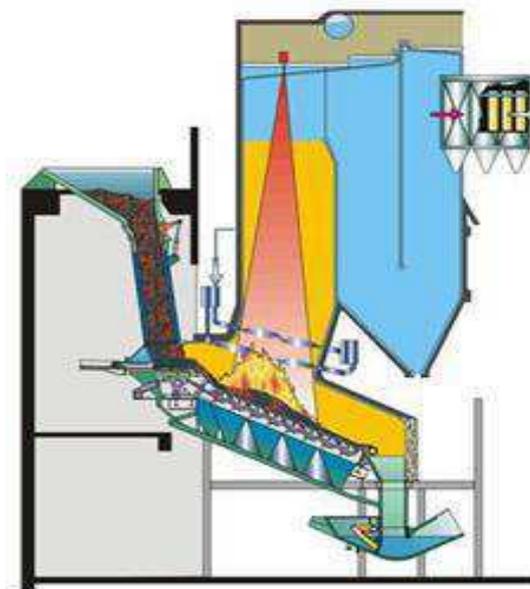
A decomposição térmica dos resíduos, através da incineração aproveita assim, o poder calorífico que já foi descrito no Capítulo 2, onde o potencial de geração elétrica através da tecnologia de incineração requer insumos com poder calorífico inferior (PCI) de, ao menos, 2.000 kcal/kg.

As plantas de incineração de RSU dispõem de várias configurações para as rotas tecnológicas, dentre elas: i) combustão em grelha; ii) combustão em leito fluidizado; e, iii) combustão em câmaras múltiplas.

A preparação para o tratamento térmico em combustão em grelha, é considerado a forma mais simples e comum de tratamento térmico, em que dois conceitos o diferenciam: a queima massiva e a queima de não recicláveis. De acordo com a FEAM (2012, p.26), a Combustão em grelha: é a mais empregada para RSU no estado bruto

(mass burn), adotando-se para isso uma grelha móvel inclinada de ação reversa, instalada em um forno-caldeira, conforme observa-se na Figura 11.

Figura 11: Representação da grelha no forno - caldeira



Fonte: FEAM (2012).

Neste processo, os resíduos durante o deslocamento dos resíduos na grelha, o material vai sendo aquecido e passa por uma secagem, ocorrendo a perda dos compostos orgânicos voláteis e a combustão do resíduo carbonoso; cerca de 60% do ar de combustão pré-aquecido é introduzido por baixo da grelha, sendo o restante do ar introduzido sobre a grelha a alta velocidade para criação de uma região de elevada turbulência e promoção de sua mistura com os gases e vapores gerados durante a combustão (FEAM, 2012).

Os fornos de incineração podem ter diversas configurações, mas o processo de combustão que realiza-se em forno de incineração, composto basicamente de câmara de combustão,

[...] onde os resíduos são inseridos a uma taxa de alimentação pré-definida e ocorre o processo de queima controlada – e câmara de pós-combustão – onde se completa a queima controlada de CO e substâncias orgânicas contidas nos gases procedentes da câmara de combustão (FEAM, 2012, p.26).

Os fornos de incineração têm, basicamente, quatro tipos de processos de incineração de RSU: combustão em grelha, combustão em leito fluidizado, combustão em câmaras múltiplas e combustão em corpo rotativo. No Quadro 1, apresenta-se as

principais configurações dos fornos de incineração compilados por Oliveira (2016, p.21):

Quadro 2: Principais configurações dos fornos de incineração

Forno de incineração	Utilização
Combustão em grelha	é a mais empregada para RSU no estado bruto (mass burn), adotando-se para isso uma grelha móvel inclinada de ação reversa, instalada em um forno-caldeira, permitindo operar com materiais com granulometrias bastante variadas. Conforme os resíduos movem-se na grelha, o material vai sendo aquecido e passa por uma secagem, ocorrendo a perda dos compostos orgânicos voláteis e a combustão do resíduo carbonoso; cerca de 60% do ar de combustão pré-aquecido é introduzido por baixo da grelha, sendo o restante do ar introduzido sobre a grelha a alta velocidade para criação de uma região de elevada turbulência e promoção de sua mistura com os gases e vapores gerados durante a combustão.
Leitos fluidizados tipos circulante ou borbulhante	são do tipo mais utilizado para lodo de esgoto. Aos resíduos, exigem-se a trituração em diâmetro igual ou inferior a 2,5 cm, e são incinerados em suspensão em leito de partículas inertes como areia e cinzas, insuflado com ar primário de combustão. Esta planta exige maior complexidade operativa e ainda não alcançou seu pleno desenvolvimento comercial.
Câmaras múltiplas	são adotadas geralmente para capacidades pequenas (0,2 a 200 t/dia), sendo aplicáveis, principalmente, a determinados grupos de resíduos de serviços de saúde. Enquanto os resíduos são incinerados na grelha fixa da câmara primária, a pós-queima dos gases ocorre na câmara secundária. É uma planta que gera baixas pressões de vapor, por isso não é recomendada para fins de geração de energia elétrica.
Forno rotativo	é mais utilizado para resíduos industriais e quantidade de resíduos superior a 24 t/dia, seu uso ocorre no Brasil em cimenteiras.

Fonte: Oliveira (2016)

Apesar de contestada pela emissão de gases poluentes, a incineração é uma prática bastante utilizada em escala mundial, onde os sistemas modernos utilizam altas temperaturas e inclusive, controlando a emissão de gases, podendo controlar a mistura dos resíduos e atender resíduos com características diversas, físicas, químicas ou biológicas (MAGRINI, et al., 2012).

A incineração de RSU, além de ser um meio vantajoso na destinação do lixo, também pode gerar energia elétrica. Dentre as vantagens da incineração dos RSU, De Oliveira (2012, p.25), destacam:

- Redução imediata do volume e massa do RSU (85-90% em volume);
- A planta de incineração pode ser construída nas proximidades das fontes geradoras do RSU, reduzindo custos decorrentes a transportes;
- O custo de implantação e operação pode ser compensado pela venda de energia;
- As emissões gasosas provenientes das plantas de incineração podem ser controladas, conforme exigências da legislação.

Além disso, a incineração pode ainda ser considerada um processo de reciclagem energética, visto que a energia contida nos resíduos é liberada na queima e pode ser reaproveitada para outros processos. Complementando as vantagens da incineração de RSU, Itô (2014, p.21), cita os benefícios listados por Lucke (2012), dos quais destacamos:

- Eliminação de impactos ambientais na criação de novos aterros ou expansões dos existentes;
- Eliminação total dos efeitos de contaminação de águas superficiais, lençóis freáticos e mananciais subterrâneos de água potável disponíveis;
- Eliminação dos problemas de natureza social, de higiene e de saúde criados pela convivência da comunidade com os aterros, além da catação de alimentos/materiais, com a consequente eliminação dos custos sociais e hospitalares, também bancados pelo erário público;
- Melhor ocupação de espaços disponíveis para iniciativas mais nobres e adequadas à comunidade local.

No entanto, Henriques (2004), destaca que apesar da tecnologia de incineração ter dentre as vantagens a possibilidade de diminuir o volume total de resíduos em cerca de 4% dos resíduos destinados aos aterros sanitários, frequentemente é criticada por causar problemas como a emissão significativas de dioxina e furanos. Contudo, ela assinala que os “atuais incineradores distinguem-se das unidades antigas, principalmente, pela forma como os resíduos são deslocados no interior do forno e pelos volumes de lixo que são eliminados” (HENRIQUES, 2004, p.107).

À vista disso, algumas orientações básicas quanto à escolha do local de uma usina lixo-energia devem ser observadas. O guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais (FEAM, 2012, p. 82), sintetiza os aspectos técnicos relativos à infraestrutura, logística de transporte dos RSU e respeito às áreas com impedimentos ambientais, estacando entre estes:

- Zoneamento municipal e urbano;
- Localização preferencial em área/distrito industrial (para aproveitamento direto do vapor residual ou mesmo do biogás gerado);vias de acesso e implicações no trânsito devido aos veículos de transporte, principalmente dos RSU;
- Implicações que seriam decorrentes caso necessária desapropriação de áreas;
- Existência de subestação que atenda à energia elétrica a ser transmitida (para economia na implantação dos sistemas de transmissão);
- Disponibilidade de água;
- Facilidade de obtenção de mão de obra especializada;
- Distâncias econômicas das sedes municipais às estações de transbordo e destas às plantas de incineração ou aterros sanitários;
- Existência de aterro sanitário e industrial em distância econômica (para destinação final de rejeitos e RSU em eventuais paradas das unidades);

Não comprometimento ambiental quanto a unidades de conservação (UCs), áreas de proteção ambiental (APPs), espécies endêmicas da fauna e flora e ambientes de relevância ambiental.

Nessa direção, já existem alguns estudos que mostram a viabilidade de aplicação das cinzas que é um dos subprodutos da incineração dos RSU, na construção civil. Segundo Itô (2014), observa-se uma significativa evolução da incineração de resíduos sólidos ao longo dos anos, sobretudo, em países desenvolvidos.

Campello (2010), analisando a viabilidade do aproveitamento energético do lixo em Belo Horizonte, assim descreve o processo de tratamento térmico com geração de energia a partir dos resíduos urbanos:

A incineração emprega alta temperatura de fornos para a queima de resíduos, que entram em combustão completa. Isso garante o tratamento sanitário e a destruição de componentes orgânicos e minimiza a presença de resíduos combustíveis nas cinzas resultantes.

De todo modo, Magrini et al., (2012, p.193), cita como desvantagem da incineração:

Alguns materiais não deveriam ser incinerados, porque apresentam alto valor agregado, porque não são bons combustíveis ou porque geram gases nocivos a saúde ou ao ambiente.

Práticas operacionais pobres e a presença de cloro no RSU podem levar a emissões significativas de dioxina e furanos, compostos reconhecidamente tóxicos.

O controle das emissões de metais provenientes de resíduos inorgânicos que contêm metais pesados (tais como o arsênio, cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel etc) é difícil;

Os incineradores exigem elevados investimentos operacionais e de capital;

São normalmente necessários combustíveis complementares para alcançar elevadas temperaturas de combustão.

Porém, hoje, já estão disponíveis várias tecnologias para incineração de RSU, as quais devem ser utilizadas conforme o tipo e quantidade de material a ser manipulado, preparado para atender padrões rigorosos de operação. Contudo, hoje as instalações modernas já são projetadas para atender a especificações rigorosas que possam controlar a emissão de metais provenientes de resíduos inorgânicos.

Vários países utilizam a tecnologia de incineração para destinação final dos RSU, na Suíça e no Japão, por exemplo, mais de 70% dos resíduos sólidos é aproveitado na obtenção de energia elétrica.

Furtado e Serra (2009, p.4), assim sintetizaram a utilização das tecnologias de incineração com suas vantagens e custo:

De uma forma geral, as tecnologias de incineração – empregando temperaturas elevadas que proporcionam a combustão dos resíduos, mediante sua queima direta – têm como principal vantagem a possibilidade de reduzir consideravelmente o volume total dos resíduos a serem destinados aos aterros sanitários, não gerando um passivo ambiental para as gerações futuras, apresentando ainda elevadas eficiências de conversão da energia dos RSU. Os resíduos do processo apresentam ainda elevado grau de inertização. Também os processos de incineração de RSU apresentam grande diversidade de opções tecnológicas em função, principalmente, dos tipos de resíduos processados e do tipo de forno empregado (rotativos, horizontais, leito fixo ou fluidizado).

Neste processo, há dois tipos de incineração, o Mass Burn, em que é realizada por queima direta e não ocorre a separação prévia dos resíduos anteriormente ao encaminhamento para a alimentação da câmara de combustão, e o *Refused Derived Fuel*- RDF, isto é, Combustível Derivado de Resíduo-CDR, na qual os resíduos passam por uma separação prévia e o restante é transformado em resíduos com menor tamanho de partícula.

Em relação ao aproveitamento energético dos RSU, Furtado e Serra (2009), destacam como principal método a utilização de sistemas à base de turbinas a vapor, características de centrais termelétricas convencionais.

4.1 ANÁLISE DA PLANTA DE UMA USINA TERMELÉTRICA

Para esta análise, considerou-se o processo de incineração com geração de eletricidade oriunda de um ciclo a vapor, conhecido por ciclo de Rankine, o qual é constituído por processos que ocorrem em regime permanente (ITÔ, 2014; FEAM, 2012).

Segundo o guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais (FEAM, 2012), em uma planta dedicada aos RSU, a princípio, qualquer resíduo compatível a este poderá ser tratado em conjunto, independente de sua origem, desde que contemplados e aprovados no processo de regularização ambiental.

De acordo com Itô (2014), o funcionamento básico de uma usina termoelétrica consiste na transformação da energia térmica proveniente de um combustível em

energia mecânica, que por sua vez é convertida em energia elétrica. Para o autor, o processo de forma simples ocorre em três etapas, a saber:

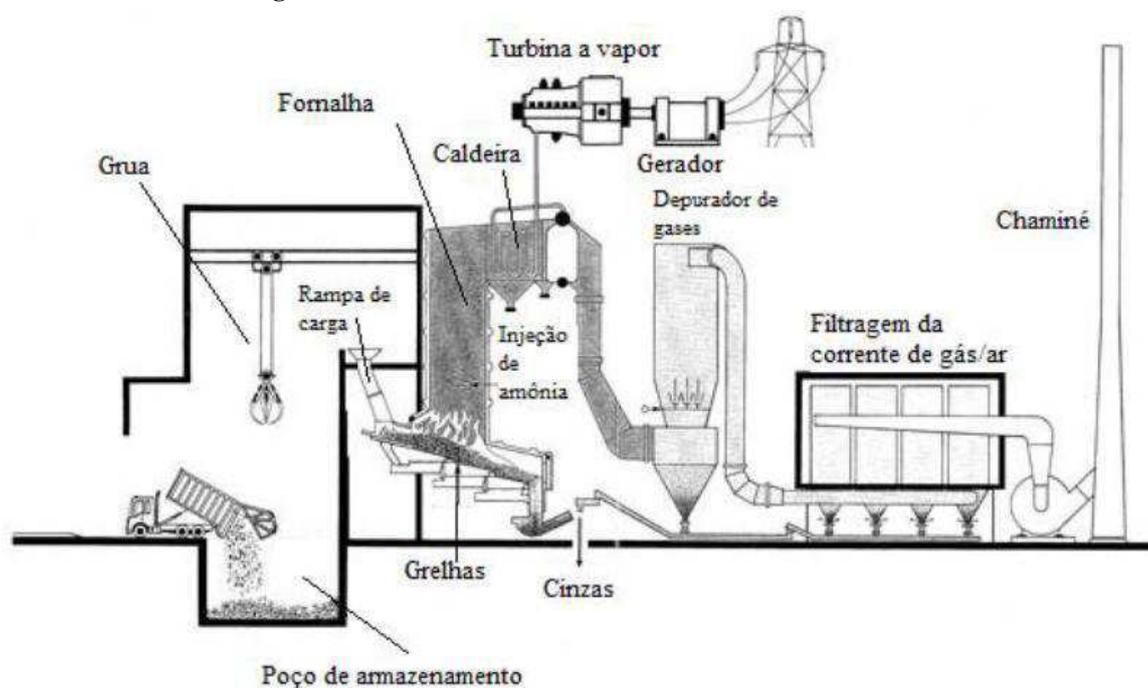
A **primeira etapa** consiste justamente em adquirir energia térmica, como por exemplo, a partir da queima de combustíveis fósseis, biomassa ou resíduos sólidos. A energia térmica é transferida para água para que ela não só mude para o estado gasoso, como também obtenha alta pressão e temperatura. Toda esta etapa é realizada na caldeira.

A **segunda etapa** consiste em usar o vapor obtido na caldeira para acionar uma turbina, que por sua vez transfere sua energia mecânica para o gerador, obtendo energia elétrica.

A **terceira etapa** fecha este o ciclo, condensando o vapor e retornando-o em forma de água líquida para a caldeira (ITÔ, 2014, p.28).

Na Figura 12, é possível identificar a planta de uma usina termelétrica, cujo termo em inglês é “Waste to Energy” (WTE), onde pode-se observar um esquema básico de uma planta de tratamento térmico, ou seja, a Incineração para recuperação energética, em que nota-se: a entrada de resíduos, o sistema de introdução dos resíduos na caldeira, a queima destes resíduos em caldeiras apropriadas, os trocadores de calor da caldeira, o sistema de tratamento de gases, a turbina de vapor, o gerador elétrico, o condensador da turbina de vapor e, o sistema de distribuição de energia térmica.

Figura 12: Planta de Tratamento Térmico



Fonte: BASTOS (2013)

Este procedimento descrito acima (Figura 12) é chamado de ciclo de Rankine, ou seja, é o ciclo termodinâmico que mais representa o processo de geração de energia a partir do vapor d'água. Neste ciclo, o vapor d'água que passa pela turbina, acoplada ao gerador elétrico, é condensado e retorna à caldeira para reinício do ciclo.

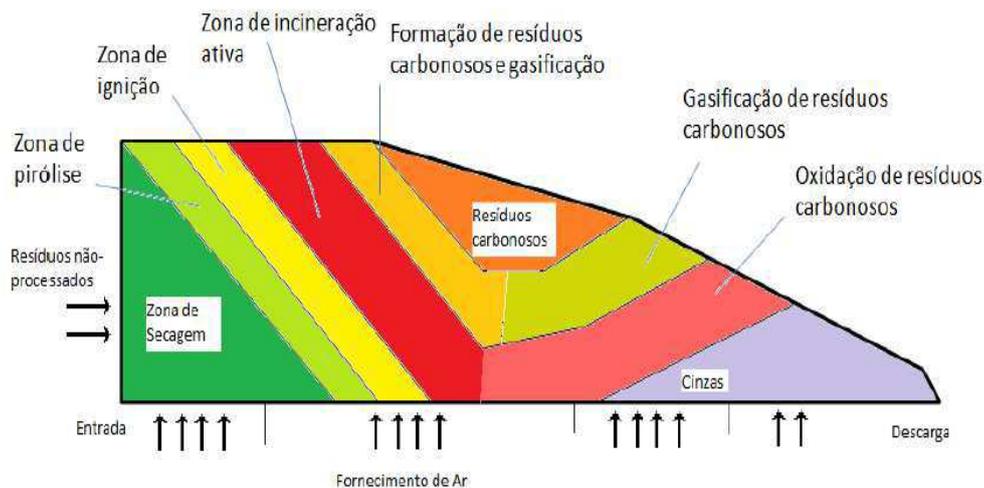
Este ciclo utiliza uma turbina a vapor, que é uma máquina térmica de combustão externa (o combustível queima na caldeira, cedendo calor ao ciclo através do vapor), baseada na conversão de energia calorífica em energia cinética da seguinte forma: o vapor de alta pressão se expande, perdendo pressão e temperatura ao passar por um rotor dotado de paletas engastadas no mesmo, cedendo parte de sua energia ao rotor da turbina (FEAM, 2012, p.145).

Em linhas gerais, o resíduo entra na unidade geradora de vapor na forma de energia disponível (Ed), gerando calor e, conseqüentemente, produzindo vapor superaquecido. De acordo com Schramm (2015, p.44), no ciclo de Rankine, a energia térmica do vapor, ao passar pela turbina, é convertida em energia mecânica, que movimenta um gerador, produzindo energia elétrica (EE). O vapor é direcionado ao condensador e, na seqüência, ao desaerador para remoção de gases dissolvidos no condensado. Por fim, é bombeado de volta à unidade geradora de vapor, fechando o ciclo térmico.

Os principais componentes de uma moderna usina convencional de incineração dos RSU são: poço de armazenamento do lixo, câmara de combustão, sistema de movimentação do lixo na câmara de combustão (grelha móvel, jateamento de ar comprimido, etc.), sistema de descarga das cinzas, sistema de geração de vapor, depurador de gases, filtros de sacos, ventilador e chaminé (BRASIL, 2014, p.27).

Neste processo, os resíduos sólidos, ao ser iniciado o processo na grelha, é secado e, depois, parcialmente pirolizado, gerando gases combustíveis e não combustíveis, conforme demonstra a Figura 13.

Figura 13: Esquema das zonas em que ocorrem os processos de incineração.



Fonte: BASTOS (2013).

No esquema acima, o autor descreve as zonas em que ocorrem os processos de secagem, pirólise, gaseificação, ignição e combustão, acima da grelha. Segundo Bastos (2013, p.30), estas etapas ocorrem em zonas específicas da fornalha, e são, em sua maioria, difíceis de controlar, porque se lida com a combustão e gaseificação de combustíveis sólidos heterogêneos, e da combustão de gases, acima das camadas de lixo e dentro delas.

As usinas de incineração para geração elétrica trabalham tipicamente na base, isto é, a geração de energia elétrica se dá de forma permanente ao longo do dia.

Isto decorre da tecnologia produzir calor, utilizado para gerar vapor e, este, mover a turbina. Para otimizar este processo, as usinas contam com sistemas de armazenamento dos RSU para até uma semana, com vistas a adequar a mistura caso haja variação do poder calorífico (BRASIL, 2014, p.26).

A tecnologia de combustão de RSU, apresenta vantagens como a redução dos resíduos sólidos, assim como desvantagens, sendo que alguns aspectos têm mais pesos do que outros na tomada de decisão sobre qual tecnologia utilizar no reaproveitamento energético.

5 PANORAMA DO APROVEITAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

No cenário mundial o aproveitamento energético a partir dos resíduos sólidos, já está bastante desenvolvido, podendo se constatar experiências exitosas em países europeus e no Japão. No Brasil, apesar das dificuldades de implantação de sistemas de geração de energia, também já existem usinas termelétricas com projetos voltados para o aproveitamento energético de RSU, a exemplo do estado de Minas Gerais.

Neste capítulo, apresenta-se uma visão geral do aproveitamento energético no Brasil e no mundo.

5.1 DIFICULDADES DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR RSU NO BRASIL

No cenário mundial as questões referentes ao setor energético, sobretudo, nos países desenvolvidos duas questões são bem definidas quando se trata deste assunto: a segurança energética e a mudança climática. Notadamente, no cenário mundial, cada nação encara a questão energética de modo diferente e também utiliza estratégias diversas para resolver tais questões.

No Brasil, o setor energético brasileiro, quando comparado ao cenário internacional, enfrenta grandes desafios, especificamente, em se tratado da utilização dos resíduos sólidos urbanos na geração de energia, pois apesar das determinações legais e dos esforços empreendidos, essa destinação inadequada de RSU está presente em todos os estados brasileiros (ABRELPE, 2013).

Furtado e Serra (2009), num estudo em que avaliaram a geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos, concluíram que a complexidade tecnológica nesse processo são as plantas de gaseificação e plasma térmico e o pouco poder de revenda, visto “se encontrarem em estágios não comerciais em grande escala”, o que eleva “os índices de investimento/custo relativo, determinando os maiores custos da energia elétrica gerada”.

De acordo com o Panorama dos Resíduos sólidos no Brasil, elaborado pela ABELPE (2015), no tocante à destinação final dos RSU, apesar das determinações da Lei 12.305/2010, os avanços alcançados pelo setor ainda não são suficientes para reduzir o volume total de RSU que são encaminhados para locais inadequados. De modo que os desafios brasileiros ainda são consideráveis nesse aspecto, pois mais de 3.300 municípios ainda fazem uso de unidades irregulares para destinação dos resíduos coletados.

Nesse sentido, se comparados aos atuais custos de disposição dos RSU em aterros, principalmente nas grandes metrópoles brasileiras, a utilização de processamento térmico ou biológico para a geração de energia, apresenta-se como uma alternativa economicamente mais atraente que o aterro sanitário. Conquanto, o Brasil dispõe de legislação e normas específicas que contemplam a destinação final dos RSU, a saber:

- Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002, dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos;
- Resolução 404, de 11/11/2008, que estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos e;
- Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010, que cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.

Uma das dificuldades na implantação do sistema de geração de energia no Brasil é (era) a influência da regulação do setor elétrico brasileiro, especificamente, nos incentivos aplicados a esses projetos. Contudo, segundo Ribeiro (2010, p.5),

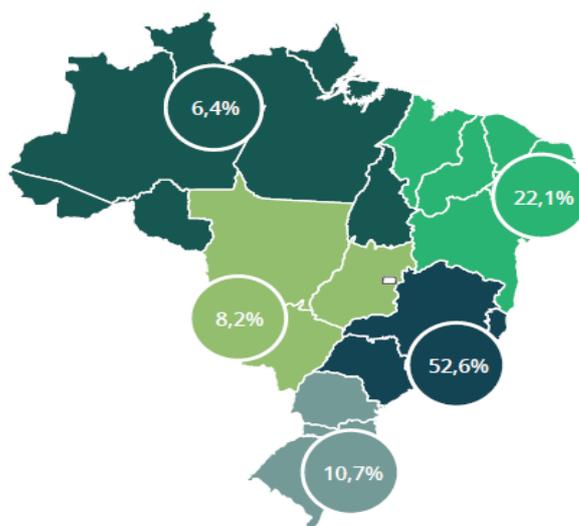
As recentes mudanças institucionais introduzidas no setor elétrico, com a criação da ANEEL e a instituição do Mercado Atacadista de Energia (MAE) deram origem a um novo modelo. Na esteira das alterações normativas já é permitido a qualquer empresa produzir energia e vendê-la, a qualquer consumidor, desde que seja ao menos 3 MW a potência instalada correspondente à energia comercializada. O transporte da energia foi também alvo de nova regulação, não havendo mais obstáculos à sua contratação.

Talvez, isso explique os poucos aterros sanitários no país, em que há o aproveitamento energético. Entretanto, para resíduos industriais e de serviços de saúde há unidades de incineração (principalmente nos estados da Bahia, São Paulo e Rio de Janeiro) e de coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer (inclusive em Minas Gerais) (FEAM, 2012).

Em tese, essa legislação considera o viés técnico e socioambiental, tendo em vista a problemática crescente dos resíduos sólidos urbanos no país, mas dentre as dificuldades para o aproveitamento energético dos RSU, está à disposição final, que

Segundo a ABRELPE (2015), a disposição final inadequada de RSU no Brasil, ainda ocorre em todas as regiões e estados brasileiros, e mais de três mil municípios ainda fazem uso desses locais impróprios, conforme mostra o mapa do país em relação a participação das regiões no total de RSU coletados (Figura 14).

Figura 14. Participação das regiões brasileiras no total de RSU coletados.



Fonte: ABRELPE (2015).

Segundo Nascimento et al., (2015), o gerenciamento dos RSU no Brasil vem seguindo uma hierarquia similar a aplicada nos países desenvolvidos, como os da União Europeia (EU, 2008) e EUA (US-EPA, 2009), por isso, a política nacional de resíduos sólidos - PNRS (BRASIL, 2010), tem como regra principal a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos. Contudo, se comparado os dados da Figura 14, ao ano de 2014, a quantidade de RSU coletados em 2015 cresceu em todas as regiões, ainda que em pequenas proporções.

5.2 VISÃO GERAL DAS USINAS TERMELÉTRICAS MOVIDAS A RSU NO MUNDO

Embora os países vivenciem realidades distintas, a experiência internacional na gestão dos RSU mostra que a destinação final dos resíduos e o aproveitamento energético destes passam por procedimentos similares.

De acordo com a FEAM (2012), há plantas comerciais para o aproveitamento energético de RSU, em todo o mundo, utilizando as tecnologias de incineração, coprocessamento e biogás de aterro. Contudo, não há dados exatos de todos os países, em que o gás é utilizado com propósito energético, embora países como os Estados Unidos, Alemanha, Inglaterra, Suécia, Holanda, Itália, Austrália, Canadá, Dinamarca e Noruega, utiliza o processamento de energia a partir dos RSU, há muito tempo.

Além da viabilidade financeira das usinas de lixo-energia, a preocupação com as questões ambientais levou a China a projetar a maior usina de conversão de lixo em energia, prevista para operar em 2020. Esta usina utilizará elementos técnicos e de construção inovadores e estima-se que a capacidade de incineração dos RSU seja em torno de cinco mil toneladas por dia. Hoje, os aterros sanitários e incineração são as principais destinações dos RSU na China, seguidos pela compostagem (TORRES, BAJAY, 2015).

Atualmente, estima-se que mais de oitocentas usinas em todo o mundo utilizam as tecnologias de obtenção de energia a partir da combustão de lixo, manipulando mais de 300 mil toneladas de resíduos sólidos por dia.

No Brasil, mesmo a geração de lixo tendo cinco vezes mais do que a população e, embora o tratamento dos RSU ainda seja incipiente, além de não haver um controle sobre depósitos ilegais, estudos mostram experiências brasileiras quanto ao aproveitamento energético de RSU utilizando a tecnologia de incineração, de Pirólise, de Coprocessamento e de Biogás de aterro sanitário, a exemplo da construção de uma planta experimental de incineração, denominada USINAVERDE, no campus da UFRJ da Ilha do Fundão, no município Rio de Janeiro.

O objetivo desta planta foi desenvolver a tecnologia de tratamento térmico de RSU com produção de energia elétrica. A planta tem capacidade para incinerar 30 t/dia de RSU e a termelétrica possui potência de 750 kW. A USINAVERDE adota uma solução modular para suas plantas em escala comercial, tendo cada módulo a capacidade de tratamento de 150 t/dia de RSU bruto, que permite atender as necessidades de disposição final de resíduos de cerca de 180 mil habitantes (ENGEBIO, 2010b *apud* FEAM, 2012, p.69).

Uma experiência de planta comercial de pirólise de RSU, na modalidade carbonização, foi instalada no município de Unaí/MG, projetada para o recebimento e processamento nominal em batelada de 3 t/h de RSU, em 3 turnos, perfazendo 72 t/dia, operando continuamente durante o ano.

A tecnologia de coprocessamento de RSU, também foi implantada no município de Cantagalo, no estado do Rio de Janeiro. Inicialmente o aproveitamento energético por meio do coprocessamento foi realizado em escala piloto com a utilização do resíduo domiciliar municipal na fábrica de cimento da empresa Lafarge, situada no mesmo município.

A experiência de aproveitamento energético de biogás de aterro sanitário se deu através da instalação de uma central de aproveitamento energético de biogás no antigo aterro sanitário da BR 040, no município de Belo Horizonte. Nesse caso, a energia gerada comprada e distribuída na rede da Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG (FEAM, 2012). Entretanto, esse experimento foi desativado desde o ano de 2007, apesar de o aterro receber cerca de 4 mil toneladas de resíduos por dia, tendo sido fechado com 25 milhões de toneladas aterradas.

Contudo, tem-se registro de biogás gerado nos aterros sanitários São João e Bandeirantes, no Estado de São Paulo, sendo o produto utilizado por duas usinas termelétricas, com potências instaladas de 24 MW e 22 MW, respectivamente. Outra experiência nesse sentido, é realizada em Salvador/BA, na termelétrica Termoverde Salvador, do Grupo Solvi, com potência instalada de 19,73 MW (FEAM, 2012).

As experiências internacionais de aproveitamento energético de RSU, mostra que as plantas estão frequentemente localizadas em áreas urbanas e possuem projetos arquitetônicos arrojados. Algumas experiências internacionais de aproveitamento energético de RSU, como a prática de incineração em países desenvolvidos. Estes exemplos foram citados no guia de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos, elaborado pela FEAM (2012, p.71), a saber:

No tocante a usinas de incineração, destaca-se que na Europa e Japão, as plantas estão frequentemente localizadas em áreas urbanas e possuem projetos arquitetônicos arrojados. Em países europeus é usual a destinação de parcela do vapor gerado para o aquecimento de residências.

Quanto à usina de Pirólise, na cidade de Günzburg, Alemanha, a empresa municipal de limpeza urbana tem uma usina de pirólise, em atividade permanente desde 1985, que processa 38.580 t/ano de resíduos (domésticos, comerciais, volumosos e lodo de esgoto). Também há uma planta de pirólise Müllpyrolyseanlage, em Burgau/Alemanha, que processa 34.000 t/ano de RSU e utiliza o syngas para a geração de energia elétrica. Salienta-se que na Alemanha é realizado o monitoramento das emissões atmosféricas quanto aos seguintes parâmetros: material particulado, HCl, SO₂, carbono total, Cd e Tl, Hg, dioxinas e furanos.

Em referência ao processando RSU pela tecnologia plasma gaseificação, existem duas plantas em operação no Japão. Uma indústria situada no parque industrial Mihama-Mikata, que começou a operar em 2002. A indústria é relativamente pequena e não produz syngas para combustível. Entretanto, são produzidos vapor e água quente, que são usados para geração de energia e calor no parque industrial. E outra indústria em Utashinai, que também começou a processar RSU em 2002. Atualmente, processa aproximadamente 300 t/dia, gerando mais de 7,9 MWh de eletricidade, enviando aproximadamente 4,3 MWh à rede elétrica.

No Canadá, em Ottawa, desde 2008 existe uma planta demonstrativa de escala comercial da Plasco Energy Group com capacidade de 100 t/dia RSU, que produz eletricidade, e as escórias são comercializadas.

No que tange a Biometização, as principais tecnologias comerciais existentes para a digestão anaeróbia de RSU são denominadas: VALORGA (francesa), DRANCO (belga), BTA (alemã), WAASA (finlandesa), KOMPOGÁS (suiça) e LINDE (suiça), as quais estão patenteadas e implantadas em diversos países. De acordo com o Guia FEAM (2012, p.75):

No final de 2004, por exemplo, a Europa tinha disponível uma capacidade de digestão anaeróbia de 2.553.000 t/ano para tratamento de resíduos orgânicos domiciliares (decorrente de 86 plantas com capacidade média de 29.686 t/ano), sendo 37 plantas na Alemanha (totalizando uma capacidade de 683.605 t/ano); no entanto, estava na Espanha a maior capacidade instalada (818.000 t/ano). As instalações na Alemanha possuíam à época capacidade média de 18.500 t/ano, enquanto que as instalações mais recentes nos arredores de Barcelona (Espanha) tratavam em média 63.000 t/ano de orgânicos presentes no RSU.

Em síntese, a prática de incineração em países desenvolvidos demonstra que esse processo está bem consolidado na Europa e no Japão. A utilização do processo de Pirólise, na cidade de Günzburg, Alemanha, a empresa municipal de limpeza urbana tem uma usina de pirólise, em atividade permanente desde 1985, que processa 38.580 t/ano de resíduos (domésticos, comerciais, volumosos e lodo de esgoto). O processo de Gaseificação (Plasma Gaseificação), no Japão, por exemplo, o plasma é usado também para fundir cinzas de incineração e, conseqüentemente, reduzir o volume descartado; na França, cinzas de incineração e asbesto são transformados, pela tecnologia de plasma, em escória inerte.

Nos últimos quinze anos, a Biometanização, especialmente na Europa, a digestão anaeróbia assumiu papel importante entre os métodos de tratamento de RSU. E o Biogás de aterro sanitário, em 2012, quando da elaboração do Guia pela FEAM, existia estudos internacionais em desenvolvimento relacionados ao aproveitamento energético de biogás de aterros sanitários, dentre eles uma publicação orientando sobre as melhores práticas em projetos de energia relacionados ao biogás de aterro, desenvolvido pela EPA.

Nesse sentido, Oliveira, Rosa e Borges (2011, p.3), assinalam que no cenário internacional devem-se considerar as “influências e interferências de ordem política, técnica e cultural, decorrentes da hegemonia do modelo capitalista e do crescente processo de globalização que contribuem para tornar a gestão de resíduos sólidos urbanos ainda mais problemática”.

Santos (2011), aponta que o desenvolvimento de novas tecnologias no tratamento de resíduos sólidos permite atualmente vislumbrar uma crescente utilização dos resíduos para geração de energia, bem como a utilização dos resíduos, após tratamento, como matéria-prima, a exemplo das cinzas provenientes da incineração para a fabricação de tijolos e telhas. Ele aponta ainda, a ampliação de soluções integradas e

consoiciadas, em regiões cada vez maiores, com custo mais baixo de implantação e maior poder de negociação junto aos empresários.

5.2.1 A EXPERIÊNCIA BRASILEIRA: O CASO DA USINAVERDE

No campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro, foi implantada, em 2004, uma Usina Protótipo de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos, denominado USINAVERDE. O objetivo da implantação desse protótipo foi evitar a formação do metano em aterro e gerar eletricidade para autoconsumo. Em 2005, a USINAVERDE começou a operar sua planta, com tecnologia desenvolvida no Brasil, porém com a caldeira de recuperação construída na Alemanha.

De acordo com o Relatório da FEAM (2010, p.74), o projeto possui três patentes: lavagem de gases, acessórios do forno (alimentação, grelhas, esgotamento) e o processo como um todo. O projeto possui certificação para venda de créditos de carbono no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

O potencial do lixo na geração de créditos de carbono foi investigado por Rocha (2011), que analisou a importância do desenvolvimento e da disseminação de projetos como o da USINAVERDE, que adquiriu certificação para pouco mais de 1800 toneladas de CO₂ equivalentes. Segundo a autora, para receber tais créditos, a usina foi submetida a um monitoramento pelo *Bureau Veritas Certification*, entidade independente creditada junto à UNFCCC9, durante o período de seis meses.

De acordo com Rocha (2011, p.30), o procedimento empregado pela USINAVERDE é o da incineração do lixo urbano não reciclável.

Tal mecanismo destrói termicamente os gases poluentes, que são lavados com água alcalinizada, gerados no processo, eliminando tais gases da atmosfera sem gerar estragos ambientais. Ao fim do processo, são liberados água e CO₂. Parte desse CO₂ é incorporado novamente no processo e a outra parte vai para a natureza, porém, em quantidade muito menor do que a liberada em formas alternativas de tratamento do lixo. A maior vantagem da tecnologia da USINAVERDE é o fato de não gerar CH₄, o que ocorre em aterros sanitários.

Para implantação de uma usina desse porte, além dos investimentos em serviços, existe o investimento em equipamentos e materiais, tais como: Pré-Processamento de Resíduos, Incineração, Recuperação de Calor, Geração de Energia Elétrica, Lavagem de gases e Vapores. De acordo com Rocha (2011), os gastos com o sistema elétrico e de

emergência, tubulação, instrumentação e equipamentos em geral também entram nesse grupo de custos. Na Figura 15, podemos ver a planta da USINAVERDE.

Figura 15: Planta da USINAVERDE



Fonte: USINAVERDE (2017)

Em linhas gerais, o processo na USINAVERDE inicia-se com o pré-tratamento dos resíduos, para que sejam selecionados os materiais a serem tratados termicamente, a fim de elevar o poder calorífico dos mesmos e assim obter maior eficiência na geração de energia. Em seguida, é realizada a segregação dos materiais recicláveis, tais como vidros e metais. Esta etapa é realizada de forma manual, em esteiras de catação e também através de detectores de metais.

De acordo com a FEAM (2010, p.76), na sequência do processo realizado pela USINAVERDE, os resíduos restantes são fragmentados e triturados em moinhos, formando o denominado Combustível Derivado de Resíduo (CDR), que será alimentado no forno. Para então ser realizado o tratamento térmico, a geração de energia e lavagem dos gases.

Uma descrição mais detalhada é descrita por Pavan (2010, p.116), em que o processo realizado pela USINAVERDE, compreende quatro etapas: i) separação dos materiais recicláveis; ii) incineração com recuperação de energia; iii) lavagem de gases e vapores; iv) mineração e decantação, sendo assim descritos:

- Na primeira etapa, os resíduos são lançados pelos caminhões de coleta diretamente no silo de recepção da planta e seguem daí para esteiras horizontais, onde se processa a seleção manual de materiais não combustíveis (tais como vidros, cerâmicas e metais).
- Concluída a etapa de separação, os resíduos são transportados por meio de uma esteira mecânica para o interior do forno que opera a temperatura acima de 850 °C. Os gases quentes (provenientes de uma câmara de pós-combustão) são conduzidos através de um duto a uma caldeira de recuperação de calor. No recuperador de calor, por sua vez, é gerado o vapor para acionar um turbo gerador e o vapor de exaustão da turbina é condensado e retorna ao sistema de geração.
- Os gases quentes que saem da caldeira de recuperação de calor vão para o sistema de lavagem de gases antes de serem liberados pela chaminé. No sistema, a solução de lavagem de gases circula entre os lavadores e o decantador, sem que sejam gerados efluentes líquidos.
- As cinzas resultantes do processo de incineração (cerca de 5% do volume inicial de resíduos tratados) são arrastadas do fundo do forno por uma corrente contínua de água e recolhidas em um tanque de decantação primária. A parte solúvel das cinzas (parte alcalina) passa para um decantador secundário que, por sua vez, recebe também as águas ácidas da lavagem dos gases. Ali ocorrem reações de neutralização e precipitação de sais.

Este processo pode ser mais bem compreendido observando o fluxograma da Figura 16, a seguir:

Figura 16: Fluxograma do processo USINAVERDE



Fonte: FEAM (2010)

Outro estudo de caso sobre a USINAVERDE, também foi realizado por Abreu e Negrão (2011), os quais em relação ao processo de tratamento, especificamente o pré-tratamento, destacam que plásticos, papéis, madeiras finas, etc são incinerados, pois o equilíbrio da combustão e o bom funcionamento do forno incinerador dependem deles, para só após os resíduos serem encaminhados para o forno de combustão.

A seguir são apresentados algumas imagens da USINAVERDE, selecionadas no Relatório 1 (FEAM, 2010), nas quais pode-se observar a) separação dos resíduos, b) esteira de recicláveis, c) forno de combustão, d) caldeira de recuperação, e) sistema de lavagem de gases e f) decantador e torre de refrigeração, equipamentos que permitem a produção de energia elétrica a partir da incineração de RSU.

Figura 17: Equipamentos USINAVERDE



Fonte: FEAM (2010)

Em relação aos créditos de carbono, Abreu e Negrão (2011), observaram que a USINAVERDE, permanecia deficitária desde sua criação, pois não haviam obtido créditos MDL - apesar de ter sido homologada pelo UNFCCC-, não produzia excedente de energia e não exportava vapor. Entretanto, os pesquisadores ressaltam que “o certificado foi emitido especificamente para essa planta da Ilha do Fundão, no contexto de evitar que os resíduos ali incinerados fossem enviados ao Lixão de Gramacho”. Isso explica porquê diferentemente de muitos outros incineradores, esse possui certificação de MDL, mesmo sem exportar energia para fora da Usina.

Contudo, segundo Winter (2011, p.44),

O centro tecnológico da USINAVERDE foi classificado como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por evitar a emissão do metano e por gerar energia alternativa, em outubro de 2005 pela Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima. A comprovação das emissões de CO2 evitadas pelo centro tecnológico Usinaverde foi certificada em outubro de 2007 pelo Bureau Veritas Certification.

De acordo com o site da USINAVERDE², hoje, a empresa oferece os seguintes serviços de tratamento térmico: de resíduos de serviços de saúde - RSS, classes A, D e E; de resíduos não perigosos (extraordinário / RSU), incluindo a descaracterização de resíduos. A empresa também trabalha de acordo com a DZ-1310, do INEA-RJ, através do sistema de Manifesto de Resíduos, e pode emitir CDF (Certificado de Destinação Final) sempre que necessário.

Sendo assim, considera-se que projetos de MDL de todos os tipos e principalmente os destinados a desenvolverem formas alternativas de energia devem ser incentivados.

² <http://www.usinaverde.com.br/>

6 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa foi possível verificar o potencial de geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos e como são constituídas as rotas tecnológicas por meio do processamento térmico e biológico. Verificou-se também que algumas tecnologias ainda não são utilizadas em escala comercial, como no caso da tecnologia do plasma, porém futuramente poderá se tornar viável.

Pode-se concluir que no Brasil, a tecnologia de incineração seria uma alternativa interessante para solucionar o problema da geração de resíduos sólidos urbanos, porém requer frações dos resíduos sólidos com elevado poder calorífico, como plásticos, papel/papelão e borrachas. No Brasil os resíduos sólidos urbanos apresentam uma elevada fração de matéria orgânica a qual, devido à sua elevada umidade, apresenta baixo poder calorífico em relação a outros materiais de modo que para o aproveitamento de geração de energia elétrica, seria preciso um aumento na utilização de combustível auxiliar para se obter a carga térmica adequada para a geração de energia.

No Brasil, a tecnologia do aproveitamento energético a partir do biogás de aterro seria mais interessante, devido à elevada fração de matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos e a simplicidade de implementação desse aproveitamento energético, porém tem o problema da produção de biogás ser variável em função do volume e idade dos resíduos sólidos urbanos depositados e ter uma geração de energia menor em comparação com a incineração.

Concluiu-se que no cenário internacional há inúmeras experiências de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, já no Brasil há apenas algumas experiências de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, como: a de incineração com a USINAVERDE, uma planta pirólise em Minas Gerais, e a utilização do biogás em alguns aterros.

A USINAVERDE foi o destaque das experiências de aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos para a geração de energia elétrica no Brasil, pois a mesma utiliza a tecnologia da incineração, A planta tem capacidade para incinerar 30 t/dia de resíduos sólidos urbanos e potência de 750 kW. Sendo a iniciativa deste projeto de grande importância para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos no país.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2014**. São Paulo, SP: ABRELPE, 2015. 120 p.

_____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2012**. São Paulo, SP: ABRELPE, 2013. 120 p.

ABRAMOVAY, R. **Lixo zero: gestão de resíduos sólidos para uma sociedade mais próspera**. São Paulo: Planeta sustentável: Instituto Ethos, 2013. 77 p.

ABREU, A; NEGRÃO, M. **Incineração, recuperação energética e a nova política de gestão de resíduos sólidos brasileira: o caso da Usina Verde S/A**. 2011. Disponível em: <http://www.gaialibrary.org>. Acesso em: agosto de 2017.

BRASIL, **Lei nº. 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: Agosto de 2017.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Nota Técnica DEA 18/14**. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro, Outubro de 2014. Série Recursos Energéticos.

BRITO FILHO, L. F. **Estudo de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro, 2005. XV, 222 p.

BROLLO, M.J.; SILVA, M.M. Política e gestão ambiental em resíduos sólidos. Revisão e análise sobre a atual situação no Brasil. In: **21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, João Pessoa, Paraíba, ABES, 2001. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/brasil21/vi-078.pdf>. Acesso em: agosto de 2017.

CAMPELLO, L.D. Análise da Viabilidade do Aproveitamento Energético do Lixo em Belo Horizonte. **Revista Brasileira de Energia**, Vol. 14, Nº 2, 2º semestre 2008. Jornal Estado de Minas. Uma solução movida a problema. Belo Horizonte, 17 de maio de 2010. Usina Verde. Disponível em www.usinaverde.com.br. Acessado em 23/05/10.

CARNEIRO, M. L.N. M. **Análise termoeconômica e ambiental de uma usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos** - Estudo de caso da planta de Zabalgarbi/Bilbao adaptada para a realidade brasileira. – 2015. 124 f.

COSTA, J.P.F. Tratamento mecânico e biológico de resíduos sólidos urbanos: avaliação do seu potencial para a recuperação de materiais recicláveis. **Relatório de Estágio de Mestrado em Ecologia Humana e Problemas Sociais Contemporâneos**. Portugal: Universidade Nova de Lisboa, setembro, 2010.

FEAM, Fundação Estadual de Meio Ambiente. Relatório 3: estudo prospectivo das alternativas governamentais, nacionais e internacionais, voltadas ao financiamento de

plantas de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos / Engebio; Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2009. 20p.

FEAM. Termo de referência para apresentação de Relatório de Controle Ambiental (RCA). Sistema de biometanização de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica. TR RCA Biometanização Versão 1.0 – 30/08/2010.

FEAM. Termo de referência para apresentação de Relatório de Controle Ambiental (RCA). Sistema de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica. TR RCA Tratamento Térmico Versão 2.0 – 01/11/2011.

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

FILIPETTO, A. V. M. **Conceito, planejamento e oportunidades.** Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 40 p. 21 cm. (Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos).

FRICKE, K; PEREIRA, C; LEITE, A; BAGNATI, M. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos:** transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015.

FURTADO, J.G.M; SERRA, E.T. Avaliação tecnológica sobre a geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos. **XX SNPTEE-** Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Recife-PE: 22 a 25 Novembro de 2009.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. ed. - São Paulo: Atlas, 2008.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos:** uma abordagem tecnológica. Rio de Janeiro, 2004. XIV, 189 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Planejamento Energético, 2004). Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

ITÔ, L. C. M. **Geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos/** Leandro Cesar Mazer Itô; orientador Valdir Schalch. São Carlos, 2014.

JURAS, I. A. G. M. **Legislação sobre resíduos sólidos:** Comparação da Lei 12.305/2010 com a legislação de países desenvolvidos. Brasil: Senado Federal, abril/2012.

LIMA, J. D. **Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.** João Pessoa. Ed. Universitária da UEPB, 1999.

LUZ, F.C. **Análise e avaliação técnico-econômica de plantas de gaseificação de lixo urbano para geração distribuída de eletricidade.** Itajubá, (MG): [sn], 2013. 255p.

MACHADO, C. F. **Incineração: Uma Análise do Tratamento Térmico dos Resíduos Sólidos Urbanos de Bauru/SP**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015. IX, 88 p.

MARCHI, C. M. D. F. Cenário mundial dos resíduos sólidos e o comportamento corporativo brasileiro frente à logística reversa. **Perspectivas em Gestão & Conhecimento**, v. 1, n. 2, art. 7, p. 118-135, 2011.

NASCIMENTO, V.F; et al., Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Rev. Ambient. Água**. vol. 10 n. 4 Taubaté – Oct. / Dec. 2015.

OLIVEIRA, J. H. **Ação para sustentabilidade: análise de viabilidade para implantação de usina para tratamento de resíduos sólidos urbanos com recuperação energética**. Cascavel (PR), 2016. 90 f.

OLIVEIRA, V.P.S; ROSA, T.D.L.F; BORGES, P.R.S. Reflexões acerca da geração, coleta e destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil e no mundo. **VII ENPPEX**. II Seminário dos Cursos de Ciências Sociais Aplicadas da FECILCAM. Campo Mourão: PR, 21 a 23 de Setembro de 2011.

PAVAN, M. C. O. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil**./ Margareth de Cássia Oliveira Pavan, orientadora Virgínia Parente. – São Paulo, 2010. 186 F.:

REIS, A. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2012. 79f.

RIBEIRO, S.G. **Geração De energia elétrica com resíduos sólidos urbanos - Usinas “Waste-To-Energy” (WTE)**. Disponível em: <http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/publicacoes/usinas_lixo_energia_no_brasill.pdf>. Acesso em: agosto de 2017.

ROCHA, P.C.P.C. B. M. **Potencial do lixo na geração de créditos de carbono: a experiência da Usina Verde**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

SANTOS, G. G. D. **Análise e Perspectivas de Alternativas de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: o Caso da Incineração e da Disposição em Aterro**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011. XV, 193 p.

SCHRAMM, Júlia Santos. **Análise preliminar do potencial energético e do processo de incineração como alternativa na gestão de resíduos sólidos urbanos em Florianópolis**. 2015. 86 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

SOUSA, R. S. M; GAIA, D.S; RANGEL, L.S. Geração de energia através do lixo. **Revista Bolsista de Valor**. v. 1 (2010). Disponível em: <http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/viewFile/1849/1027>. Acesso em: agosto de 2017.

SOUZA, C. de F.. Produção de biogás e tratamento de resíduos: Biodigestão anaeróbia. **Ação Ambiental**, Viçosa, n. 34, p.26-29, nov./dez. 2005.

TORRES, L; BAJAY, S. Análise das políticas no aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural**. Universidade de São Paulo – USP – São Paulo: 11 a 13 de novembro de 2015.

VIEIRA, A.S (Orgs). **Gestão ambiental: uma visão multidisciplinar**. 1.ed. Cajazeiras: editora Real, 2015. 288p.

WINTER, L. F. O. **Gestão de resíduos sólidos: recuperação de energia por meio de incineração e proposta de localização de usinas em Juiz de Fora-MG**. UFJF, 2011. 58 f.