

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS
ESCOLA DE ECONOMIA DE SÃO PAULO

Wallace Fernandes Menezes

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA DE GERAÇÃO ENERGÉTICA COM RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS (RSU) NO BRASIL**

SÃO PAULO
2013

Wallace Fernandes Menezes

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA DE GERAÇÃO ENERGÉTICA COM RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS (RSU) NO BRASIL**

Dissertação apresentada à Escola de Economia
de São Paulo, da Fundação Getúlio Vargas –
EESP – FGV, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Agroenergia.

Campo de conhecimento: Resíduos Sólidos , Domésticos e Industriais

Orientador Prof. Dr. José Dilcio Rocha

SÃO PAULO

2013

Menezes, Wallace Fernandes.

Avaliação Tecnológica de Geração Energética com Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil / Wallace Fernandes Menezes. – 2013.

154 f

Orientador: José Dilcio Rocha

Dissertação (MPAGRO) – Escola de Economia de São Paulo.

1. Lixo - Eliminação. 2. Resíduos industriais - Aspectos ambientais - Brasil. 3. Reciclagem. 4. Energia - Fontes alternativas - Brasil. 5. Lixo - Eliminação - Política governamental. I. Rocha, José Dilcio. II. Dissertação (MPAGRO) - Escola de Economia de São Paulo. III. Título.

CDU 628.4(81)

Wallace Fernandes Menezes

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA DE GERAÇÃO ENERGÉTICA COM RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS (RSU) NO BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Escola de Economia de São Paulo da
Fundação Getúlio Vargas – EESP/FGV,
como requisito para a obtenção de título de
Mestre em Agroenergia.

Data de Aprovação:

__/__/__

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Dilcio Rocha (Orientador)
FGV-SP

Profa. Dra. Carmen Luisa Barbosa Guedes
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Fábio Matuoka Mizumoto
FGV-SP

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo reconhecimento e incentivo ao estudo como forma de crescimento e desenvolvimento das pessoas.

Agradeço imensamente a orientação e esclarecimentos prestados pelos profissionais que participaram em momentos importantes deste trabalho: Alexandre de Angelis (Monitor), Prof. Angelo Gurgel (Coordenador MPAgro), Prof. Dilcio Rocha (Orientador), Eduardo Bigélli (CTVRR São José dos Pinhais-PR), Eduardo Tobias (Colega MPAgro), Eula Oliveira (Coordenação MPAgro), George Tomita (RGT International), Gerson Kubitz (Kubitz Soluções Sociais e Ambientais), Prof. Ricardo Rochman (Coordenador MPE), Rodrigo Rasga (Colega MPAgro) e Prof. Zilmar Souza (UNICA).

Agradeço a minha esposa Elaine pela compreensão e por ter me acompanhado nestes pouco mais de dois anos de Mestrado Profissional e superado as ausências nas sextas e sábados, além da dedicação extra nos finais de semana para conclusão da Dissertação. Somente nós sabemos o que vivemos.

RESUMO

Este estudo faz uma análise dos ambientes institucional, organizacional, tecnológico e competitivo que cercam o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, objeto de política recente lançada no país, que trata a questão superficialmente, priorizando, sobretudo, a destinação dos resíduos aos aterros sanitários, inclusive aqueles de origem orgânica. As análises realizadas mostram que, acima de uma gestão excelente do processo, as políticas de governo sobre o tema da recuperação energética de resíduos são fundamentais para a viabilidade destes empreendimentos, que é dependente também de um fortalecimento no ambiente organizacional, responsável pelas pressões políticas e centralização dos interesses sobre o tema. Uma análise do ambiente tecnológico concluiu que a recuperação energética de resíduos é dominada por empresas no Brasil e que pode ser ampliada em escala e tecnologias disponíveis, desde que o mercado de resíduos sólidos urbanos ofereça segurança ao investidor, sobretudo acima de outras fontes de energia renováveis que se valem das mesmas legislações existentes sobre a comercialização de energia elétrica, porém com menores custos de implantação. Diferentemente de outras fontes de energia, sob o contexto político atual, os empreendimentos de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos são viáveis economicamente em condições muito específicas no Brasil, especialmente aquelas ligadas à falta de espaço ou ao estabelecimento de parcerias público privadas em que pesem os interesses de ambos os parceiros, como também ponderados os ganhos para o município nos pilares ambiental, social e econômico.

Palavras Chaves: Energia, Resíduos Sólidos Urbanos, RSU, Lixo, Viabilidade, Política Nacional de Resíduos Sólidos.

ABSTRACT

This study does an analysis of institutional, organizational, technological and competitive environments that surround energy recovery of municipal solid waste in Brazil, subject of recent policy launched in the country, that cover the issue superficially, focusing mainly on the disposal of waste to landfills, including those of organic origin. The analysis performed shows that, above an excellent process management, government policy on the issue of energy recovery from waste are critical to the viability of these ventures, which also depends on a strengthening in the organizational environment, responsible for political pressures and the centralization of interests on the subject. An analysis of the technological environment concluded that the recovery of energy from waste is dominated by companies in Brazil and can be expanded in scale and technologies available, provided that the market for municipal solid waste offers security to investors, especially over other renewable energy sources which use the same existing laws on the sale of electricity, but with lower deployment costs. Unlike other energy sources, under the current political context, the developments of energy recovery from municipal solid waste are economically viable under very specific conditions in Brazil, especially those related to lack of space or the establishment of public private partnerships in weighing the interests of both partners, as well as weighted the earnings for the municipality in the environmental, social and economic pillars.

Keywords: Energy, Municipal Solid Waste, MSW, Waste, Feasibility, Solid Waste National Policy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Informalidade da economia brasileira em diferentes setores.	17
Figura 2 -	Poder calorífico superior dos resíduos sólidos urbanos comparados com outras biomassas para energia.	19
Figura 3 -	Estrutura para exposição da dissertação.	23
Figura 4 -	Caracterização e classificação de resíduos sólidos.	31
Figura 5 -	Hierarquia para o tratamento de resíduos sólidos urbanos.	34
Figura 6 -	Hierarquia para o tratamento de resíduos sólidos urbanos na União Europeia.	36
Figura 7 -	Rotas tecnológicas para aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.	59
Figura 8 -	Mapa temático - plantas instaladas para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em operação da Europa no ano de 2009.	62
Figura 9 -	Arranjo para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.	63
Figura 10 -	Símbolos para identificação de embalagens plásticas.	65
Figura 11 -	Processo de produção de pellets de termoplásticos.	66
Figura 12 -	Formação do biogás: hidrólise.	68
Figura 13 -	Formação do biogás: acidogênese.	68
Figura 14 -	Formação do biogás: acetanogênese.	69
Figura 15 -	Formação do biogás: metanogênese.	69
Figura 16 -	Arco de plasma Não Transferido.	78
Figura 17 -	Arco de plasma Transferido.	79
Figura 18 -	Resíduo vitrificado (ar atmosférico) através da gaseificação a plasma.	80
Figura 19 -	Eficiência das rotas térmicas de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.	81
Figura 20 -	Balço de energia do processo de gaseificação a plasma.	82
Figura 21 -	Modelo de reator a plasma da empresa AlterNRG.	83
Figura 22 -	Escória resfriada com água.	86
Figura 23 -	Comparação dos níveis de dioxinas e furanos observados em unidades tratamento térmico de resíduos.	94

Figura 24 -	Ciclone.	96
Figura 25 -	Coletor gravitacional.....	96
Figura 26 -	Lavador de gás tipo Venturi.....	97
Figura 27 -	Precipitador eletrostático.....	98
Figura 28 -	Filtro de mangas.....	98
Figura 29 -	<i>Layout</i> central de triagem de São José dos Pinhais-PR.	115
Figura 30 -	Balanco de massa e taxas de conversão energética do sistema de recuperação energética a partir do tratamento de resíduos sólidos urbanos adotado pela Prefeitura Municipal de São José dos Campos-SP.....	119
Figura 31 -	Análise de sensibilidade para VPL (R\$ milhões) - tarifa de energia elétrica x tarifa de tratamento dos resíduos.	136
Figura 32 -	Análise de sensibilidade para VPL (R\$ milhões) - porcentagem de capital próprio x taxa de juros.	138
Figura 33 -	Análise de sensibilidade para VPL (R\$ milhões) - comercialização de créditos de carbono x investimento em crédito de carbono.	139
Figura 34 -	Efeito complementar de curvas de aprendizado lineares no valor presente líquido.	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. - Codificação de resíduos não perigosos.	32
Tabela 2. - Limites de emissões gasosas em processos térmicos de resíduos estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente.	40
Tabela 3. - Comparação dos limites de emissões gasosas em processos térmicos de resíduos.....	41
Tabela 4. - Projeções de emissões de gases de efeito estufa no Brasil até 2020..	47
Tabela 5. - Classificação de empresas para linhas de financiamento do Banco Nacional do Desenvolvimento.....	51
Tabela 6. - Projetos de Lei apresentados na Câmara dos Deputados nos últimos 10 anos relacionados ao aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos...	58
Tabela 7. - Plantas instaladas para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em operação na Europa em 2009.....	61
Tabela 8. - Relação carbono:nitrogênio de resíduos orgânicos.	70
Tabela 9. - Principais parâmetros de controle no biodigestor.....	71
Tabela 10. - Concentrações tóxicas de substâncias no biodigestor.	73
Tabela 11. - Componentes típicos e impurezas do biogás.	74
Tabela 12. - Compromisso de redução ou permissão de gases de efeito estufa – Protocolo de Quioto.	87
Tabela 13. - Unidades de gaseificação de resíduos participantes do estudo de emissões desenvolvido pela Bioenergy Producers Association.....	92
Tabela 13. - Unidades de gaseificação de resíduos participantes do estudo de emissões desenvolvido pela Bioenergy Producers Association.....	93
Tabela 14. - Modelos comerciais de gaseificadores da Westinghouse Plasma Corporation.	108

Tabela 15. -	Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil adotada.	109
Tabela 16. -	Coleta per capita de resíduos sólidos urbanos.	110
Tabela 17. -	Fluxo físico de aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos....	111
Tabela 18. -	Parâmetros para composição do fluxo de caixa.	114
Tabela 19. -	Investimentos, receitas e despesas previstas para o cálculo do fluxo de caixa para o aproveitamento de materiais recicláveis.	117
Tabela 20. -	Parâmetros para fluxo de caixa do aproveitamento de materiais recicláveis.	118
Tabela 21. -	Investimentos, receitas e despesas previstas para o cálculo do fluxo de caixa para o aproveitamento energético da fração orgânica do resíduo sólido urbano.	120
Tabela 22. -	Parâmetros para fluxo de caixa para o aproveitamento energético da fração orgânica do resíduo sólido urbano.	121
Tabela 23. -	Investimento, receitas e despesas para fluxo de caixa para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos através da gaseificação a plasma.	123
Tabela 24. -	Parâmetros para fluxo de caixa para o aproveitamento energético através da gaseificação a plasma.	124
Tabela 25. -	Benefício líquido ambiental da reciclagem de materiais.	125
Tabela 26. -	Investimento, receitas e despesas para fluxo de caixa de geração de créditos de carbono.	127
Tabela 27. -	Parâmetros para fluxo de caixa de geração de créditos de carbono.	128
Tabela 28. -	Valor presente líquido para cada etapa do processo de tratamento de resíduos sólidos urbanos.	129
Tabela 29. -	Fluxo de caixa a moeda constante para a etapa de triagem de materiais recicláveis.....	130

Tabela 30. - Fluxo de caixa a moeda constante para a etapa de tratamento anaeróbico de resíduos.	131
Tabela 31. - Fluxo de caixa a moeda constante para a etapa de gaseificação a plasma de resíduos.....	132
Tabela 32. - Fluxo de caixa a moeda constante para a etapa de obtenção de créditos de carbono.	133
Tabela 33. - Fluxo de caixa a moeda constante para todas as etapas.....	134
Tabela 34. - Parâmetros verificados na análise de sensibilidade e utilizados para a construção do fluxo de caixa.	140
Tabela 35. - Fluxo de caixa a moeda constante após aplicação dos parâmetros verificados na análise de sensibilidade.....	141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
BTU	<i>British Thermal Unit</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CEWEP	<i>Confederation of European Waste to Energy Plants</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSLL	Contribuição Social sobre o Lucro Líquido
EC	<i>European Commision</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGP-M	Índice Geral de Preços Mercado
IR	Imposto de Renda
kW	Quilowatt

kWh	Quilowatt hora
MNCR	Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis
MOD	Mão de Obra Direta
MOI	Mão de Obra Indireta
pH	Potencial Hidrogeniônico
PL	Projeto de Lei
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPCS	Plano de Ação para a Produção e Consumo Sustentáveis
PPM	Partes por Milhão
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SMA	Secretaria do Meio Ambiente
TIR	Taxa Interna de Retorno
TJLP	Taxa de Juros de Longo Prazo
VPL	Valor Presente Líquido
WTE	<i>Waste to Energy</i>

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	16
1.1. Contexto dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil	16
1.2. Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos	18
1.3. Objetivos.....	20
1.4. Levantamento Bibliográfico	21
2 - METODOLOGIA	23
3 - AMBIENTE INSTITUCIONAL	29
3.1. Normas Nacionais	29
3.2. Legislações Internacionais	33
3.3. Limites de Emissões Gasosas e Licenciamento Ambiental.....	39
3.4. Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS	43
3.5. Políticas Complementares.....	47
3.6. Fontes de Financiamento	50
3.7. Análise do Ambiente Institucional.....	53
4 - AMBIENTE ORGANIZACIONAL	55
4.1. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE.....	55
4.2. Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos - ABETRE...	55
4.3. Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO	55
4.4. CONGENERES	56
4.5. Associação da Indústria de Cogeração de Energia - COGEN.....	56
4.6. ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade.....	56
4.7. Grupo de Estudos em Tratamento de Resíduos Sólidos - GETRES	57
4.8. Análise do Ambiente Organizacional	57
5 - AMBIENTE TECNOLÓGICO	59
5.1. Triagem de Materiais Recicláveis	64
5.2. Tratamento Biológico (Biodigestão Anaeróbia)	66

5.3. Gaseificação a Plasma	76
5.4. Créditos de Carbono.....	86
5.5. Sistema de Limpeza de gases.....	90
5.6. Estudos e projetos em andamento no Brasil	99
5.7. Análise do Ambiente Tecnológico.....	102
6 - AMBIENTE COMPETITIVO	104
7 - ESTRATÉGIAS INDIVIDUAIS	107
7.1. Modelo de Estudo.....	107
7.2. Fluxo de Caixa Descontado.....	128
7.3. Cenário 01 – Tarifas de Energia Elétrica e Tratamento de Resíduos.....	135
7.4. Cenário 02 – Equity e Taxa de Juros.....	137
7.5. Cenário 03 – Comercialização de Créditos de Carbono.....	138
7.6. Conclusão da Análise de Sensibilidade.....	140
8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	144
REFERÊNCIAS	147

1 - INTRODUÇÃO

1.1. Contexto dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

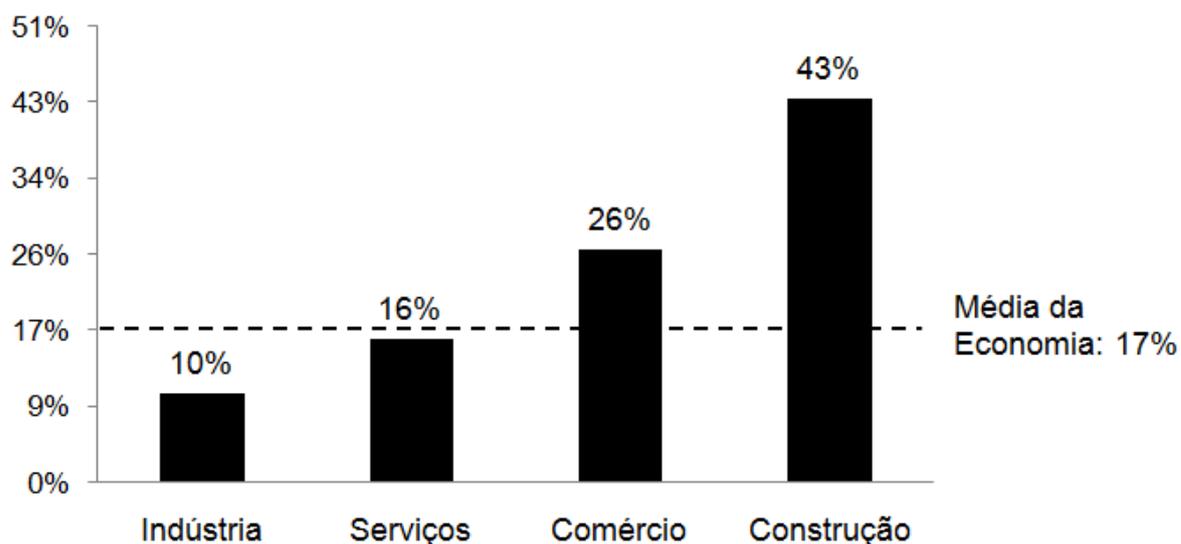
Os Resíduos Sólidos Urbanos - RSU estão presentes em qualquer atividade produtiva, podem ser obtidos até gratuitamente e normalmente são subavaliados quanto ao seu potencial energético.

Em um contexto de produção sustentável e com o lançamento de políticas recentes de resíduos sólidos, mudanças do clima e saneamento básico, surge uma tendência de que os sistemas produtivos melhorem seus índices de sustentabilidade e reduzam cada vez mais os resíduos de seus processos.

Apesar da iniciativa política para regulamentação da questão em torno dos resíduos sólidos, a exemplo de países como Estados Unidos, Japão e aqueles membros da Comunidade Européia, muito há que se trabalhar no campo institucional para o incentivo do surgimento de uma cadeia de fornecedores locais para criar uma gestão eficaz de resíduos, bem como uma legislação que incentive a separação de resíduos na fonte, principalmente aqueles biodegradáveis, grandes responsáveis pela produção de gases de efeito estufa.

A discussão sobre o aproveitamento energético de RSU no Brasil esbarra em questões ligadas a incertezas quanto às emissões lançadas no meio ambiente e a disputa da matéria-prima com catadores de materiais recicláveis, que deflagram outros assuntos com influência indireta sobre a recuperação energética de RSU, como a taxa de economia informal no país, que representa cerca 16,8% do PIB, podendo chegar a valores maiores em setores diferentes da economia, conforme mostrado na Figura 1 (ETCO, 2011).

Figura 1 - Informalidade da economia brasileira em diferentes setores.



Fonte: Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos (DIEESE); McKinsey Global Institute Analysis *apud* MGI, 2013. p31 (adaptado).

Há diversos exemplos da utilização de tecnologias disponíveis comercialmente para o aproveitamento energético de RSU, com estágios bem maduros de evolução em outros países, tais como a Comunidade Europeia, Japão e Estados Unidos, que assim como o Brasil, possuem rigorosas restrições quanto aos níveis de emissões geradas por estes empreendimentos, tendo estes países, no entanto, estabelecido uma hierarquia para destinação dos resíduos que minimizasse os danos causados ao meio ambiente, além de terem criado condições e incentivos que permitissem a viabilidade econômica dos empreendimentos.

1.2. Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos

Os resíduos sólidos, segundo Lei 12.305/10 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS pode ser definido como:

XVI - 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, Art. 3º Inciso XVI)

Quanto à origem dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010 Lei 12.305/10 Art. 13º), este trabalho tem o objetivo de avaliar do ponto de vista técnico e econômico o aproveitamento energético dos seguintes resíduos:

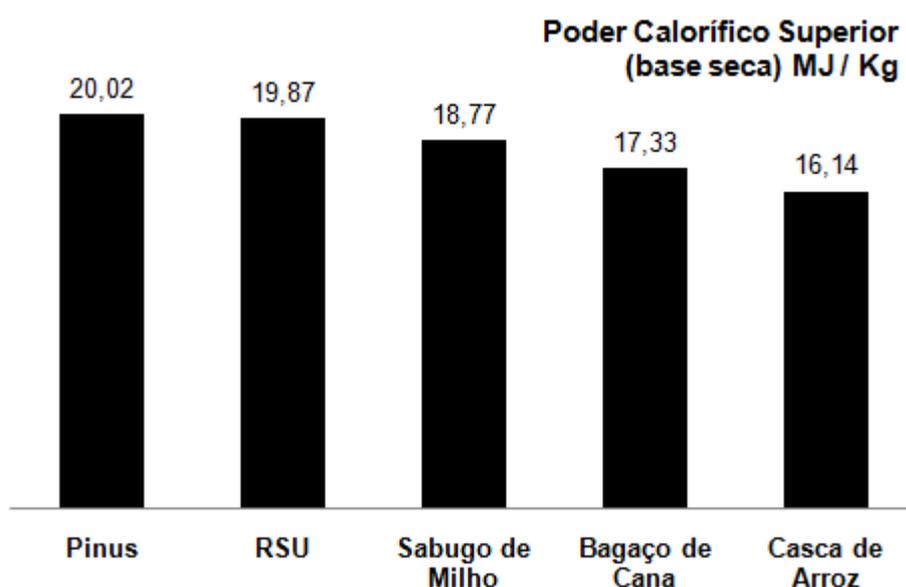
- a) Resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) Resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, exceto resíduos do saneamento básico, serviços de saúde, construção civil e serviços de transporte;

São denominados resíduos sólidos urbanos pela PNRS aqueles englobados pelos itens a) e b), como são também os resíduos assinalados pelo item c), desde que caracterizados como não perigosos, ou seja, não apresentem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade (BRASIL, 2010, Lei 12.305/10 Art. 13º Inciso II).

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são atrativos do ponto de vista energético e econômico quando são comparados com outras biomassas, como, por

exemplo, o bagaço de cana de açúcar e pinus (Figura 2), pois, contrariamente a estes, o RSU não necessita de custos de manejo para sua produção, não é afetado por variações climáticas e não necessita de tempo para que esteja disponível para fins energéticos, oferecendo, contudo, os mesmos produtos no mercado, normalmente eletricidade, calor e biocombustíveis.

Figura 2 - Poder calorífico superior dos resíduos sólidos urbanos comparados com outras biomassas para energia.



Fonte: JENKINS (1990)¹ *apud* CORTEZ (2009)

Cabe destacar ainda que a parte inorgânica presente no RSU é formada através de processos industriais que demandam energia, em suas diversas formas e que, em um contexto onde este material é destinado diretamente para aterros, perde-se a oportunidade de recuperar esta energia, aumentando as perdas no ciclo de vida do resíduo.

¹ JENKINS, B. M. **Fuel properties for biomass materials**. *International Symposium on Application and Management of Energy in Agriculture: The Role of Biomass Fuels*. Delhi, 21-23 maio, 1990.

1.3. Objetivos

1.3.1. Geral

Tendo em vista o contexto do RSU no Brasil e sua caracterização, sob que condições seu aproveitamento energético pode ser viabilizado economicamente? Com o objetivo de responder esta pergunta, serão utilizados parâmetros e valores divulgados por autores no Brasil e Exterior para compor uma análise de viabilidade técnica e econômica do aproveitamento energético de RSU, oferecendo subsídios para fomentar os debates acerca das tecnologias e alternativas disponíveis para recuperação energética de RSU.

1.3.2. Específicos

- Agrupar as etapas para o aproveitamento energético de RSU (Reciclagem, Tratamento Biológico, Tratamento Térmico, Créditos de Carbono) em unidades de negócio interdependentes possibilitando identificar as variáveis para viabilizar economicamente cada etapa do negócio;
- Oferecer um conjunto de parâmetros para o estudo de viabilidade econômica e para o ajuste de sensibilidade em cada etapa do processo;
- Verificar o valor daqueles parâmetros ligados a fatores institucionais e de competitividade que viabilizam o empreendimento;
- Verificar aqueles parâmetros que, se subsidiados, podem contribuir para viabilizar o empreendimento;
- Oferecer alternativas a resíduos de biomassa, quando estes são utilizados empreendimentos para comercialização de energia elétrica, vapor ou biocombustíveis.

1.4. Levantamento Bibliográfico

As informações para este trabalho foram reunidas através de um levantamento bibliográfico sobre as matérias que cercam o tema do aproveitamento energético de RSU, buscando referências tanto nacionais, quanto internacionais para as análises que serão feitas nos capítulos seguintes.

A partir das fontes listadas a seguir e dos registros encontrados, os parâmetros para a análise de viabilidade técnica e econômica foram selecionados de maneira a cumprir o objetivo a que este trabalho se propõe, priorizando, sobretudo, referências recentes para os dados econômicos, que datam em sua maioria, dos anos de 2012 e 2013.

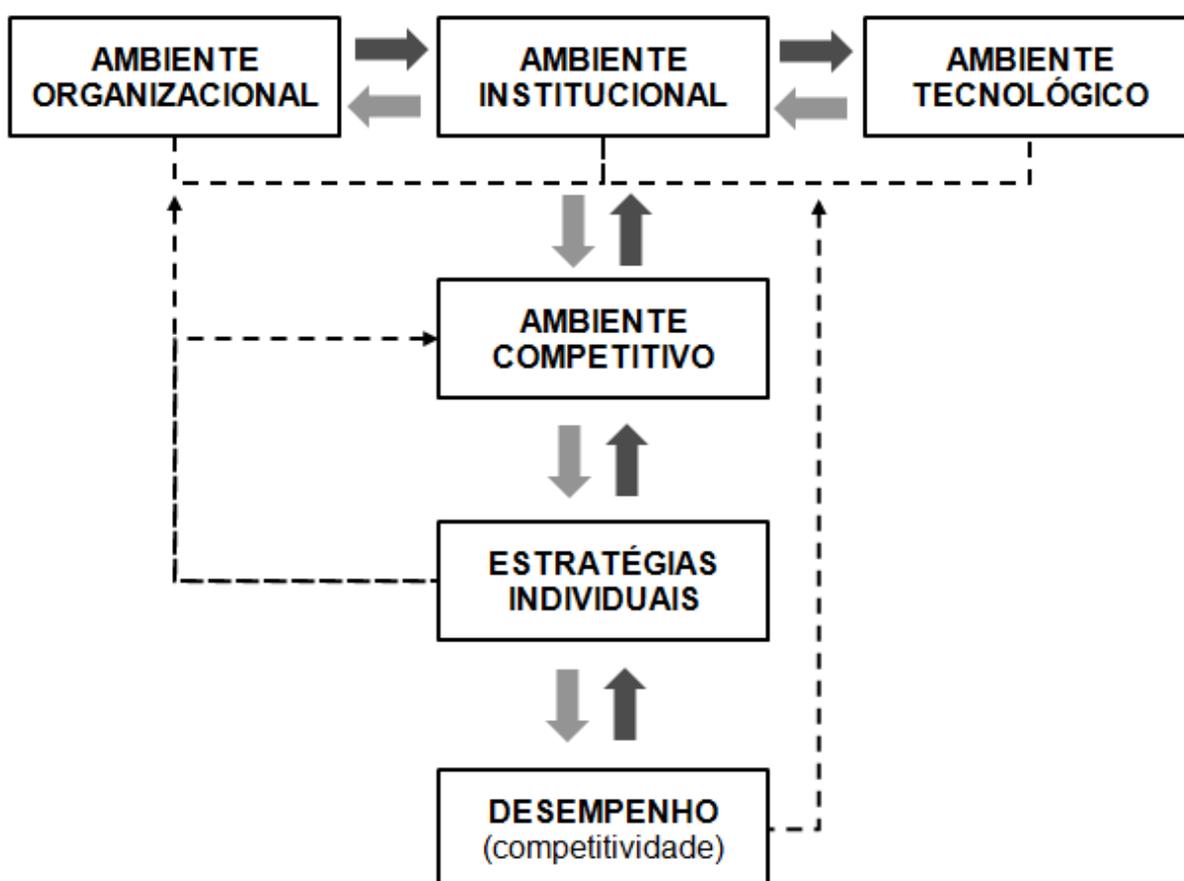
- **Apresentações:** vinte e seis referências de apresentações realizadas em seminários, conferências e aulas ministradas;
- **Artigos Científicos:** quatorze referências de autores nacionais e oitenta e cinco referências de autores internacionais;
- **Dissertações:** cinco referências do Mestrado Profissional em Agroenergia EESP FGV, uma referência do Mestrado em Engenharia Mecânica da UNESP, duas referências do Mestrado em Energia do IEE-USP, uma referência do Mestrado em Tecnologia Ambiental do IPT, uma referência do Mestrado em Ciências e Aproveitamento Energético da UFRJ, uma referência do Mestrado em Engenharia Civil da UFPE, uma referência do Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da UFPR, três referências do Mestrado em Ciências e Engenharia de Recursos da Terra da Universidade de Columbia;
- **Editais Públicos:** oito referências de editais de chamamento e concorrência pública na área de aproveitamento de RSU;

- **Empresas:** nove referências em território internacional e cinco em território nacional de empresas com atividades na área de recuperação energética de resíduos e cogeração;
- **Instituições de Financiamento:** três referências de instituições públicas no Brasil que oferecem linhas de financiamento para projetos de escopo compatível com aquele abordado neste estudo;
- **Legislações e Normas:** vinte e seis referências nacionais e treze referências internacionais de legislações e normas ligadas ao aproveitamento energético de RSU;
- **Livros:** treze referências, sendo quatro de autores nacionais e nove de autores internacionais, versando sobre os assuntos de reciclagem, biodigestão de resíduos, aproveitamento energético de resíduos, síntese de biocombustíveis com gás de síntese e tecnologias para a disposição final de resíduos;
- **Publicações Especializadas:** várias publicações originadas de empresas de consultoria, associações empresariais, entidades de classe, ministérios e prefeituras, totalizando quarenta e quatro entidades nacionais e internacionais pesquisadas;
- **Sites Especializados:** uma referência de site de divulgações de índices econômicos, uma referência de site para acesso de informações e documentos governamentais, uma referência de site para acesso de dados referência a gestão de RSU no Brasil, além de vários sites nacionais e internacionais com notícias atuais sobre empreendimentos de recuperação energética de RSU;
- **Teses:** uma referência do Doutorado em Administração da FEA-USP, uma referência do Doutorado em Planejamento Energético do COPPE-UFRJ.

2 - METODOLOGIA

A estrutura deste trabalho foi adaptada da abordagem sistêmica para a agroindústria proposta por FARINA et al. (1997), que estabelece variáveis para direcionar a estrutura de governança do sistema produtivo, onde são mostradas as principais interações entre as variáveis (Figura 3):

Figura 3 - Estrutura para exposição da dissertação.



Fonte: Adaptado de FARINA et al., 1997, p. 175.

Ao abordar a agroindústria, Farina (1999) concluiu que a “competitividade das empresas é o resultado de políticas públicas e privadas, individuais e coletivas, e não depende apenas da excelência de sua gestão”.

As variáveis abordadas por Farina (1999) são descritas da seguinte forma:

- Ambiente Institucional: sistema legal, tradições e costumes, sistema político, regulamentações, política macroeconômica, políticas setoriais governamentais;
- Ambiente Organizacional: organizações corporatistas, bureaus públicos e privados, sindicatos, institutos de pesquisa e políticas setoriais e privadas;
- Ambiente Tecnológico: paradigma tecnológico, fase da trajetória tecnológica;
- Ambiente Competitivo: ciclo de vida da indústria, estrutura da indústria, padrões de concorrência, característica do consumo;
- Estratégias Individuais: preço/custo, segmentação, diferenciação, inovação, crescimento interno, crescimento por aquisição;
- Desempenho (Competitividade): sobrevivência, crescimento.

Em função da baixa frequência dos empreendimentos de aproveitamento energético de RSU no Brasil e muitas vezes da indisponibilidade de dados públicos sobre o assunto, surge a questão de como aplicar o modelo proposto por FARINA (1997) em sistemas pouco estruturados no país. Tendo em vista as dificuldades de aplicação do modelo, a metodologia proposta foi replicada para este trabalho abordando os seguintes assuntos em cada variável:

- Ambiente Institucional: legislações internacionais sobre a gestão de RSU, políticas existentes e em andamento no Brasil sobre a matéria, além de fontes de financiamento disponíveis em instituições nacionais;

- Ambiente Organizacional: principais instituições que desenvolvem estudos sobre a utilização de energias renováveis e a gestão de RSU;
- Ambiente Tecnológico: fundamentação técnica para as alternativas escolhidas nas etapas de gerenciamento de RSU, bem como alguns trabalhos em andamento no Brasil sobre seu aproveitamento energético;
- Ambiente Competitivo: aspectos ligados à concorrência de mercado com os produtos a serem comercializados obtidos com o gerenciamento de RSU;
- Estratégias Individuais: estratégias e parâmetros utilizados para a viabilidade do empreendimento.

A variável Desempenho não foi abordada em um capítulo específico, mas na conclusão da Análise de Sensibilidade realizada no final deste trabalho, indicando as condições em que há competitividade e sobrevivência dos empreendimentos de aproveitamento energético de RSU no contexto atual do país.

Para a análise econômica de viabilidade, foram aplicadas as técnicas de análise de projetos valor presente líquido – VPL e taxa interna de retorno – TIR.

O VPL considera o valor do investimento no tempo, descontado a cada período através de uma taxa que representa a expectativa de retorno do valor investido. O VPL é então, a diferença entre o valor presente do fluxo de caixa (valores positivos e negativos), indicando a viabilidade do investimento sempre que o VPL for um valor positivo. COSTA (2012) destaca que apesar da decisão baseada no VPL ser simples, ela ignora as probabilidades e assume-se o risco de que as projeções financeiras serão exatas.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - FC_0$$

FC = Fluxo de Caixa

FC₀ = Investimento inicial

i = Taxa de Desconto (expectativa de retorno do valor investido)

Pela fórmula do VPL, nota-se que este é basicamente dependente da expectativa de retorno do capital empregado, e quanto maior esta, menor será o VPL. Outra observação direta da fórmula é que, para maximizar o VPL, os valores de fluxo de caixa de maior valor devem ser disponibilizados logo no início do empreendimento, o que é difícil de ser obtido devido à curva de aprendizagem do negócio.

A taxa interna de retorno é conceitualmente a taxa de desconto (i) que faz com que o VPL seja igual a zero. A TIR é calculada através de aproximações sucessivas e fornece como retorno uma taxa de juros, que será avaliada pelo investidor na decisão de prosseguir com o projeto, caso a taxa seja atrativa com relação a outras opções de investimento disponíveis no mercado.

As técnicas de análise de projetos foram aplicadas às variáveis e parâmetros do empreendimento de recuperação energética de RSU, considerando que este foi delimitado pelos fatores mostrados a seguir:

- Ausência de carências nas linhas de financiamento;
- Ausência do tempo necessário para realização de estudos de viabilidade, projetos e construção do empreendimento;
- Ausência dos custos envolvidos e do prazo necessário para a obtenção das licenças ambientais;

- Ausência do tempo necessário para obtenção dos recursos financeiros;
- Disponibilidade dos bens de capital para instalação em território nacional;
- Plena aplicação dos recursos financeiros em todos os bens de capital necessários;
- Disponibilidade de cadeia de fornecimento de insumos e serviços viabilizada no local de instalação do empreendimento e todos os fornecedores com participação ativa no mercado nacional;
- Disponibilidade de recursos humanos no local de instalação do empreendimento com *expertise* para operação do negócio;
- Garantia de fornecimento de matéria prima diária no período analisado;
- Garantia de venda dos produtos comercializados em cada mercado;
- Ausência dos custos com a logística do RSU desde sua coleta nos domicílios até a unidade de aproveitamento energético;
- Ausência dos custos com a destinação final dos resíduos finais gerados no processo;
- Ausência de custos com Estação de Tratamento de Efluentes;
- Separação na fonte da parcela orgânica do RSU;
- Disponibilidade de aumento do tráfego na capacidade das vias locais do empreendimento;

- Ausências de greves ou manifestações contrárias ao funcionamento do empreendimento;
- Disponibilidade de água para os processos.

3 - AMBIENTE INSTITUCIONAL

3.1. Normas Nacionais

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT é o “órgão responsável pela normalização técnica no país, fornecendo a base necessária ao desenvolvimento tecnológico brasileiro” (ABNT, 2013).

A NBR 10004 dispõe sobre a classificação dos Resíduos Sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

Segundo a referida Norma, os Resíduos Sólidos são definidos conforme citação a seguir:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT NBR 10004:2004, p. 1).

Os Resíduos Sólidos, segundo NBR 10004 são classificados como segue:

- a) Resíduos Classe I – Perigosos;
- b) Resíduos Classe II – Não Perigosos;
 - Resíduos Classe II A – Não Inertes.
 - Resíduos Classe II B – Inertes.

São considerados Resíduos Classe I - Perigosos, aqueles que apresentam características quanto a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (ABNT NBR 10004:2004).

Os Resíduos Classe II A – Não Inertes são aqueles que não se enquadram nas classificações de Resíduos Classe I ou Resíduos Classe II B, e

podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT NBR 1004:2004).

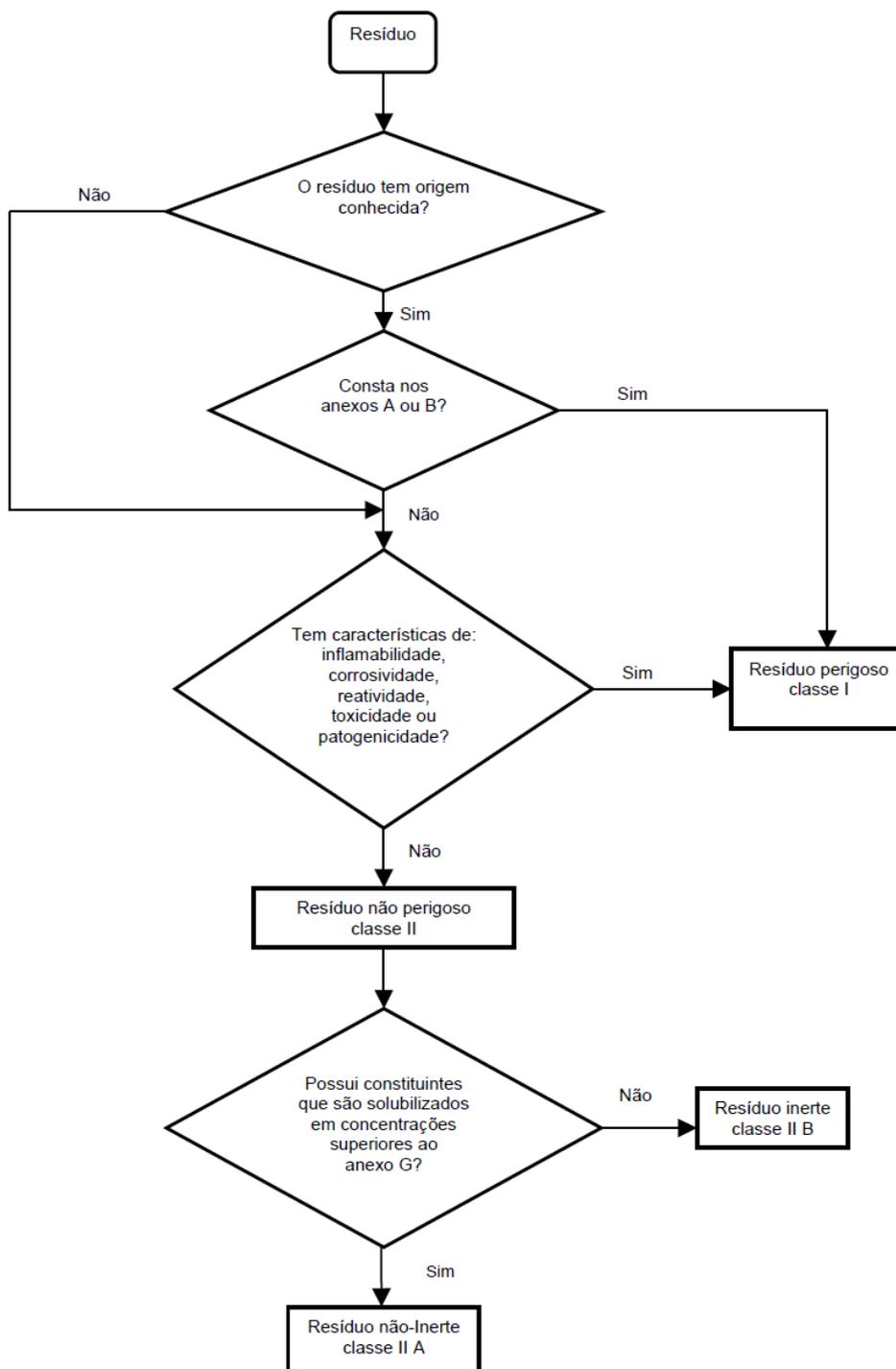
São classificados como Resíduos Classe II B – Inertes, aqueles que quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem seus constituintes solubilizados (ABNT NBR 10004:2004, p. 5)

Todos os resíduos são detalhados na ABNT NBR 10004:2004 através dos anexos a seguir:

- a) Anexo A – Resíduos perigosos de fontes não específicas;
- b) Anexo B – Resíduos perigosos de fontes específicas;
- c) Anexo C – Substâncias de conferem periculosidade aos resíduos;
- d) Anexo D – Substâncias agudamente tóxicas;
- e) Anexo E – Substâncias tóxicas;
- f) Anexo F – Concentração – limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação;
- g) Anexo G – Padrões para o ensaio de solubilização;
- h) Anexo H – Codificação de alguns resíduos classificados como não perigosos.

O RSU, por ser heterogêneo em sua composição, não possui uma classificação específica segundo a ABNT NBR 10004:2004, porém alguns de seus constituintes tem classificação definida como não perigosa, como se pode observar na Tabela 1 nas páginas seguintes, e ainda segundo o fluxograma apresentado na Figura 4 a seguir, conclui-se que o RSU pode ser classificado como Resíduo Não Perigoso Classe II.

Figura 4 - Caracterização e classificação de resíduos sólidos.



Fonte: ABNT NBR 10004, 2004, p. vi.

Tabela 1. - Codificação de resíduos não perigosos.

Código de Identificação	Descrição do resíduo	Código de Identificação	Descrição do resíduo
A001	Resíduo de restaurante (restos de alimentos)	A009	Resíduo de madeira
A004	Sucata de metais ferrosos	A010	Resíduo de materiais têxteis
A005	Sucata de metais não ferrosos (latão etc.)	A011	Resíduos de minerais não-metálicos
A006	Resíduo de papel e papelão	A016	Areia de fundição
A007	Resíduos de plástico plimerizado	A024	Bagaço de cana
A008	Resíduos de borracha	A099	Outros resíduos não perigosos

Fonte: ABNT NBR 10004, 2004 – Anexo H, p. 71.

Nota da Fonte: excluídos aqueles contaminados por substâncias constantes nos anexos C, D ou E e que apresentem características de periculosidade.

A ABNT NBR 11174 dispõe sobre o armazenamento correto de Resíduos Classe II (Não Perigosos) - não inertes e inertes, de maneira a minimizar os riscos de contaminação ambiental.

Adotando a premissa de classificação do RSU como Resíduo de Classe II (Não Perigoso) na concepção do projeto de aproveitamento energético do RSU, conforme ABNT NBR 11174, deverão ser tomadas as seguintes ações quanto ao local para estocagem e armazenamento do resíduo:

- a) Isolamento e sinalização: isolamento para impedir o acesso de pessoas estranhas e identificar o resíduo armazenado;
- b) Acesso à área: permitir sob quaisquer condições climáticas os acessos internos e externos ao local de armazenamento;
- c) Controle da poluição do ar: medidas para minimizar a ação dos ventos e controle de poluição atmosférica;

- d) Controle da poluição do solo e das águas: medidas para impermeabilização da base do local e contenção de vazamentos;
- e) Treinamento de pessoal: treinamento das medidas de manutenção operacional e procedimentos em caso de emergência;
- f) Segurança da instalação: medidas para minimizar possibilidade de incêndio ou fatores danosos à saúde humana ou ao meio ambiente;
- g) Equipamentos de segurança: medidas quanto aos equipamentos necessários para combate a incêndio.

A ABNT NBR 11174 também exige a implantação de registros de movimentação e armazenamento do resíduo, identificando as entradas e saídas conforme fonte geradora e tipo do resíduo, oferecendo modelo detalhado nos Anexos A e B da referida norma.

Além das normas ABNT NBR 10004 e 11174, destacam-se as seguintes normas disponíveis na ABNT: NBR 10007 (Amostragem de Resíduos Sólidos) e NBR13591 (Compostagem).

Com exceção das normas disponíveis para Aterros Sanitários, não foi verificada dentre as normas brasileiras vigentes ou aquelas disponíveis para consulta pública na ABNT, aquela que aborda exclusivamente o tratamento térmico do RSU, o que poderia disciplinar a utilização das tecnologias disponíveis.

3.2. Legislações Internacionais

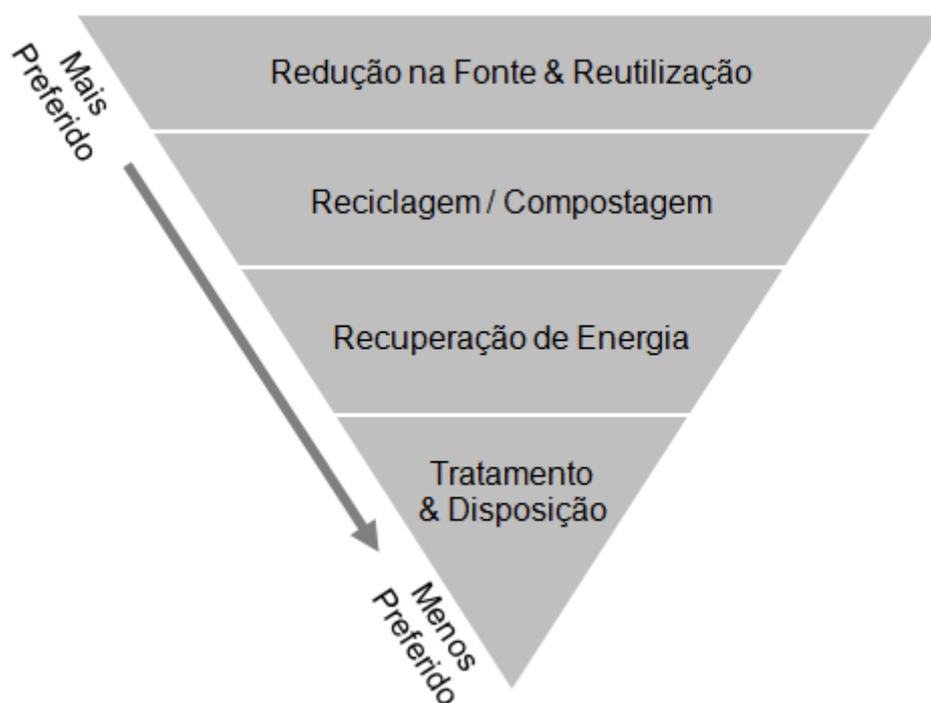
As legislações apresentadas a seguir foram extraídas de países maduros na adoção de tecnologias de tratamento térmico de resíduos, alcançando este estágio, seja pela percepção do risco causado destinação incorreta de seus resíduos, pela necessidade de solucionar questões ligadas a falta de espaço para

destinação dos resíduos, ou até mesmo pelo reconhecimento do potencial energético presente no RSU.

3.2.1. Estados Unidos

A Agência de Proteção Ambiental – EPA dos Estados Unidos estabeleceu uma hierarquia para o gerenciamento do RSU não perigoso conforme Figura 4 a seguir, indicando desde o método mais preferido até o menos preferido nas estratégias municipais para gestão do RSU:

Figura 5 - Hierarquia para o tratamento de resíduos sólidos urbanos.



Fonte: adaptado de EPA, 2013.

O método mais preferido é a redução e reutilização de resíduos na fonte, incluindo a fabricação de produtos com materiais mais leves e com *design* de maneira a utilizar a menor quantidade de matéria-prima possível.

O método menos preferido é a disposição do RSU em aterros, que devem ser aprovados através de rigorosos critérios de concepção, operação e encerramento de suas atividades.

Entre as legislações relacionadas ao gerenciamento do RSU nos Estados Unidos, destacam-se aquelas sobre a Conservação de Recuperação de Recursos de 1976 (RCRA – *Resource Conservation and Recovery Act*) e sobre a Limpeza de Ar de 1970 (CAA – *Clean Air Act*).

Através do RCRA, os Estados Unidos baniram em 1976 a utilização de lixões e encorajaram os estados a produzirem planos para gestão de seus resíduos, além de regular outros aspectos referente à gestão de resíduos, como o seu processamento térmico e disposição em aterros.

O CAA estabelece os limites para as emissões e proteção da camada de ozônio, além de ter conduzido a criação de inovações tecnológicas para a criação de equipamentos de controle da poluição do ar.

3.2.2. *União Europeia*

A União Europeia - UE adota suas políticas no sentido de fortalecer o topo da hierarquia que trata sobre o gerenciamento de RSU, deixando como último recurso, a disposição dos resíduos em aterros sanitários, após outras formas de recuperação, notadamente a recuperação energética.

Figura 6 - Hierarquia para o tratamento de resíduos sólidos urbanos na União Europeia.



Fonte: EC, 2013.

A Diretiva Europeia 2008/98/EC (*Waste Framework Directive*) estabeleceu uma hierarquia para gerenciamento dos resíduos nos países membros da União Europeia, conforme mostrada na Figura 6, e determinou que os produtores de resíduos se responsabilizassem pelo seu tratamento juntamente com a cooperação dos países.

A hierarquia dá preferência a prevenção na geração de resíduos, através da redução ou otimização de materiais na fabricação de produtos. Esgotadas as possibilidades de prevenção, a ordem de preferência decresce para reutilização, reciclagem, recuperação energética e por último a disposição do resíduo em aterros, onde nenhum valor pode ser recuperado.

A mesma Diretiva estabeleceu que os países membros realizassem planos para gestão dos resíduos gerados dentro do seu território, estabelecendo os

tipos, quantidade, fontes de geração, sistema de coleta e critério de localização de seus resíduos, juntamente com a obrigação da criação de programas de prevenção de maneira a reduzir os impactos ambientais com a geração de resíduos, associados com o crescimento econômico do país.

De maneira a controlar os impactos causados no meio ambiente com relação às águas de superfície, lençóis freáticos, solo, ar e a saúde humana, a Comissão Europeia estabeleceu a Diretiva 1999/31/EC (*Landfill Directive*), que previne ou reduz os efeitos de aterros no meio ambiente. A principal contribuição desta Diretiva foi estabelecer metas de redução aos países membros da quantidade da fração biodegradável disposta em aterros, bem como de estabelecer melhorias nos padrões ambientais de aterros e exigir a coleta de metano nos aterros existentes, diminuindo a geração de gases de efeito estufa.

Com relação aos danos que podem ser causados ao meio ambiente devido a incineração de resíduos, a Comissão Europeia estabeleceu a Diretiva 2000/76/EC (*Incineration Directive*), estabelecendo os limites de operação para as plantas de incineração quanto ao tipo de resíduo e emissões, bem como o sistema de monitoramento que deve ser implementado nestas plantas.

3.2.3. Japão

O Japão é um país caracterizado por uma deficiência de área para tratamento e destinação de resíduos, bem como uma economia crescente de bens manufaturados o que direciona suas políticas de gerenciamento de resíduos para a redução, reutilização e reciclagem, levando também a uma utilização intensiva de opções de recuperação energética de resíduos, devido a limitação de espaço para construção de aterros sanitários. Destaca-se que o Japão apresenta um dos maiores índices de reciclagem do mundo, chegando à casa dos 50% e a utilização intensiva de incineração para redução do volume dos resíduos gerados (FADE, 2012).

A situação vivida pelo país quanto ao seu crescimento industrial, populacional e econômico, levou ao estabelecimento de uma legislação abrangente

sobre a gestão de seus resíduos, como se pode observar na relação a seguir, disponível no Ministério do Meio Ambiente Japonês:

- 1970: Lei de Gestão de Resíduos e Limpeza Pública (*Waste Management and Public Cleansing Law*);
- 1997: Lei de Reciclagem de Embalagens e Container (*Container and Packaging Recycling Law*);
- 1992: Lei de Controle de Exportação, Importação e outros sobre Resíduos Perigosos Específicos e outros Resíduos (*Law for the Control of Export, Import and Others of Specified Hazardous Wastes and Other Wastes*);
- 1998: Lei de Reciclagem de Aparelhos Domésticos (*Home Appliance Recycling Law*);
- 2000: Ato Base para Estabelecer uma Sociedade com Ciclo Material Adequado (*The Basic Act for Establishing a Sound Material-Cycle Society*);
- 2000: Lei para a Promoção da Utilização Efetiva de Recursos (*Law for Promotion of Effective Utilization of Resources*);
- 2000: Lei para a Reciclagem de Resíduos Alimentares (*Food Waste Recycling Law*);
- 2000: Lei para a Reciclagem de Materiais de Construção (*Construction Material and Recycling Law*);
- 2002: Lei para a Reciclagem de Veículos sem Uso (*Law for the Recycling of End-Life Vehicles*).

FADE (2012) fez uma análise da legislação japonesa e cita as principais tendências na gestão de RSU e políticas de reciclagem naquele país:

- Utilização do Conceito dos 3 R's (reduzir, reutilizar, reciclar) ao longo do ciclo de vida dos produtos e serviços;
- Responsabilidades dos negócios de geração de resíduos através do princípio do poluidor pagador;
- Conceito de responsabilidade estendida ao produtor objetivando a redução de resíduos na fonte, a prevenção de resíduos, o desenvolvimento de produtos compatíveis com o meio ambiente e a responsabilidade sobre o ciclo de vida do produto;
- Colaboração entre as partes envolvidas na gestão dos resíduos com a colaboração entre governos centrais e locais com responsabilidades definidas para cada parte.

3.3. Limites de Emissões Gasosas e Licenciamento Ambiental

As emissões gasosas geradas no tratamento térmico (acima de 800 °C) de resíduos são regulamentadas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA através das resoluções nº 316/2002 e 386/2006, cujo conteúdo é sumarizado na Tabela 2 mostrada a seguir:

Tabela 2. - Limites de emissões gasosas em processos térmicos de resíduos estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente.

EMISSIONES GASOSAS	LIMITE
Material Particulado (MP)	100 mg/Nm ³
Monóxido de Carbono (CO)	100 ppm/Nm ³
Óxidos de Enxofre (SO _x)	280 mg/Nm ³
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	560 mg/Nm ³
Compostos Clorados Inorgânicos (Cloroeto de Hidrogênio - HCl)	80 mg/Nm ³
Compostos Fluorados Inorgânicos (Fluoreto de Hidrogênio - HF)	5 mg/Nm ³
Dioxinas e Furanos	0,5 ng/Nm ³
Substâncias Inorgânicas Particuladas Classe I Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg), Tálcio (Tl)	0,28 mg/Nm ³
Substâncias Inorgânicas Particuladas Classe II Arsênio (As), Cobalto (Co), Níquel (Ni) Telúrio (Te), Selênio (Se)	1,4 mg/Nm ³
Substâncias Inorgânicas Particuladas Classe III Antimônio (Sb), Chumbo (Pb), Cromo (Cr), Cianetos (CN) Cobre (Cu), Estanho (Sn), Flúor (F), Manganês (Mn) Platina (Pt), Paládio (Pd), Ródio (Rh), Vanádio (V)	7 mg/Nm ³

Fonte: adaptado das resoluções CONAMA nº 316/02 e 386/06, que tratam dos procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.

Nota da fonte: Os parâmetros medidos devem ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca.

Alguns estados podem ser mais rigorosos quanto aos limites de emissão de gases gerados em Usinas de Tratamento Térmico de RSU, como é o caso do Estado de São Paulo (Tabela 3).

Tabela 3. - Comparação dos limites de emissões gasosas em processos térmicos de resíduos.

EMISSIONES GASOSAS	LIMITES CONAMA	LIMITES SP
Material Particulado (MP)	100 mg/Nm ³	10 mg/Nm ³
Monóxido de Carbono (CO)	100 ppm/Nm ³	50 mg/Nm ³
Óxidos de Enxofre (SO _x)	280 mg/Nm ³	50 mg/Nm ³
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	560 mg/Nm ³	200 mg/Nm ³
Compostos Clorados Inorgânicos (Cloro de Hidrogênio - HCl)	80 mg/Nm ³	10 mg/Nm ³
Compostos Fluorados Inorgânicos (Fluoreto de Hidrogênio - HF)	5 mg/Nm ³	1 mg/Nm ³
Dioxinas e Furanos	0,5 ng/Nm ³	0,1 ng/Nm ³
Substâncias Inorgânicas Particuladas Classe I Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg), Tálcio (Tl)	0,28 mg/Nm ³	0,05 mg/Nm ³
Substâncias Inorgânicas Particuladas Classe II Arsênio (As), Cobalto (Co), Níquel (Ni) Telúrio (Te), Selênio (Se)	1,4 mg/Nm ³	0,5 mg/Nm ³
Substâncias Inorgânicas Particuladas Classe III Antimônio (Sb), Chumbo (Pb), Cromo (Cr) Cianetos (CN), Cobre (Cu), Estanho (Sn) Flúor (F), Manganês (Mn), Platina (Pt) Paládio (Pd), Ródio (Rh), Vanádio (V)	7 mg/Nm ³	0,5 mg/Nm ³

Fonte: adaptado da Resolução SMA nº 079/2009 (valor médio diário).

Nota da fonte: valores em base seca e corrigidos a 11% de oxigênio.

Além do controle das emissões e efluentes, os seguintes itens deverão ser considerados nos sistemas de tratamento térmico dos resíduos (Resolução CONAMA nº 316/2002):

- Procedimentos para atenuação ou eliminação de odores;
- Área coberta para o recebimento dos resíduos;

- Sistema de coleta e tratamento do chorume;
- O tratamento térmico deve ser precedido de sistema de coleta e reciclagem para reaproveitamento;
- O sistema de tratamento térmico deve possuir unidades de recepção, armazenamento, alimentação, tratamento das emissões de gases e partículas, tratamento de efluentes líquidos, tratamento de cinzas e escórias;
- O sistema de tratamento térmico deverá possuir responsável técnico habilitado e registrado no órgão profissional competente;
- Guarda dos registros e relatórios da operação por 25 anos;
- Treinamento mínimo sobre conceitos ambientais, trabalhistas e operação do sistema para o responsável pela operação;
- Plano de Inspeção e Manutenção e sistema de automonitoramento;
- Sistemas de monitoramento de gases e intertravamentos em caso de falhas.

Cabe observar que a norma mencionada do CONAMA, apesar de tratar dos sistemas de tratamento térmico de resíduos, também insere a necessidade do sistema de tratamento ser precedido por etapas de coleta e reciclagem, o que é frequente em outras políticas de governo abordadas mais adiante neste trabalho, o que é importante para a regularização de trabalhos informais envolvidos nestas atividades.

Para o licenciamento da unidade de tratamento térmico de resíduos, cujo prazo máximo da licença de operação é de 5 (cinco) anos, o CONAMA exige os seguintes estudos (Resolução CONAMA nº 316/2002):

- I. Projeto Básico e de Detalhamento;
- II. Estudo e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) ou outro estudo, definido pelo órgão ambiental competente;
- III. Análise de Risco;
- IV. Plano do Teste de Queima;
- V. Plano de Contingência;
- VI. Plano de Emergência.

3.4. Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS foi instituída pela Lei nº 12.305/10 e se aplica, entre outras, a entidades que desenvolvam ações relacionadas a gestão integrada ou ao gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, Lei nº 12.305, 2010).

Por gerenciamento de resíduos sólidos e gestão integrada, o art. 3º da Lei 12.305/2010 definiu como se segue:

X – gerenciamento de resíduos sólidos: conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com o plano de gerenciamento de resíduos sólidos [...]” (BRASIL, 2010, Art. 3º Inciso X)

XI – gestão integrada de resíduos sólidos: conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável” (BRASIL, 2010, Art. 3º Inciso XI).

A PNRS observa a seguinte prioridade para a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos: “não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2010, Lei 12.305/2010, Art. 9º).

Nota-se na PNRS que as prioridades definidas para o gerenciamento de resíduos sólidos, apesar de seguirem padrões adotados internacionalmente, não estabelece uma hierarquia formal para o tratamento do RSU, como se pode observar nos países mencionados anteriormente, o que favorece a implantação da medida legal de menor custo ao gestor público, o que não significa aquela que ofereça maior sustentabilidade ao município, redução dos riscos ao meio ambiente e a redução de perdas de energia no país.

De maneira a planejar as ações para controle do RSU, a PNRS estabeleceu a criação de Planos de Resíduos Sólidos nas esferas nacional, estadual e municipal, todos com validade de 20 (vinte) anos e renovados a cada 4 (quatro) anos, sendo que nos casos dos estados e municípios, os planos são condicionantes para o recebimento de verbas da União relacionadas com a gestão dos resíduos sólidos, bem como com o recebimento de incentivos de instituições federais de crédito para a mesma finalidade. A PNRS estabelece ainda que serão priorizados para acesso aos recursos da União aqueles municípios que “implantarem a coleta seletiva com a participação de cooperativas ou outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis formadas por pessoas físicas de baixa renda” (BRASIL, 2010, Lei 12.305/10 Caplítulo II).

Com relação ao RSU e seu aproveitamento energético, destacam-se as seguintes diretrizes apontadas pelo Plano de Resíduos Sólidos elaborado para a esfera nacional, em consulta pública (Proposta para o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, agosto de 2012):

- Desenvolvimento de tecnologias para reduzir a disposição final em aterros sanitários;
- Induzir a compostagem, o aproveitamento energético do biogás gerado em biodigestores ou em aterros sanitários e o desenvolvimento de outras tecnologias visando à geração de energia utilizando como matéria-prima a parcela úmida dos resíduos coletados. Todavia, deverão ser realizados estudos prévios de avaliação técnico-econômica e ambiental, e para a

produção de composto orgânico com fins agricultáveis, deverá haver aprovação pelos órgãos competentes.

Assim como realizado para as esferas nacional, estadual e municipal, a PNRS também estabeleceu a criação do Plano de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos para os empreendimentos geradores que se enquadrarem nos critérios do Art. 20 da Lei 12.305/10 e condicionou o referido plano como parte integrante do processo de licenciamento ambiental do empreendimento (BRASIL, 2010, Lei 12.305/10 Art. 24). Com a regulamentação da PNRS, as entidades obrigadas a elaborar o Plano de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos, ficam ainda obrigadas a atualizar os dados operacionais de implementação do plano anualmente nos órgãos competentes (BRASIL, 2010, Decreto 7.404/10 Art. 56).

No que diz respeito ao aproveitamento energético do RSU, a PNRS fixa 2014 como o último ano para a existência de lixões no Brasil e condiciona a utilização da tecnologia para o aproveitamento energético do RSU a sua viabilidade técnica e ambiental, bem como a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental (BRASIL, Lei nº 12.305, 2010). Na regulamentação da PNRS através do Decreto 7.404/10, o aproveitamento energético do RSU, foi instituído como matéria a “[...] ser disciplinada, de forma específica, em ato conjunto dos Ministérios do Meio Ambiente, de Minas e Energia e das Cidades”, excluindo os casos do aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário, que já encontra-se difundido no país (BRASIL, 2010, Decreto 7.404/10 Art. 37).

De maneira a sistematizar e reunir todos os dados sobre a gestão dos resíduos sólidos, foi instituído também pela PNRS, o Sistema Nacional de Informações sobre a gestão dos resíduos sólidos – SINIR (<http://www.sinir.gov.br/>) que terá o Ministério do Meio Ambiente - MMA como coordenador e articulador para sua implementação.

Também coordenado pelo MMA, foi instituído um Comitê Interministerial encarregado da implantação e implementação da PNRS, onde especificamente o

Grupo Técnico 02 – GT-02 ficou encarregado de normatizar a recuperação energética de RSU.

Coordenado pelo Ministério das Minas e Energia – MME, participaram do GT-02 representantes do governo, entidades e universidades com objetivo de subsidiar a portaria interministerial que irá regulamentar a recuperação energética de RSU. Foram concluídos os trabalhos do GT-02 através de 06 reuniões conforme datas relacionadas a seguir:

1º Reunião GT 02: 08/12/2011

2º Reunião GT 02: 18/01/2012

3º Reunião GT 02: 28/02/2012 (seminário)

4º Reunião GT 02: 29/02/2012

5º Reunião GT 02: 28/03/2012

6º Reunião GT 02: 26/04/2012

Nota-se nas atas de reuniões geradas, uma divergência do assunto inicial proposto, que era o de discutir a recuperação energética do RSU, devido ainda a incertezas, principalmente quanto aos impactos ambientais causados pelas emissões nos processos de tratamento térmico de resíduos, bem como quanto a preocupação da reserva de matéria prima para as atividades dos catadores de materiais recicláveis.

As reuniões foram finalizadas com a recomendação de que a regulamentação a ser criada sobre a recuperação energética do RSU seguisse as prioridades definidas na Lei 12.305/10, quais sejam a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

3.5. Políticas Complementares

3.5.1. Política Nacional de Mudanças Climáticas

A Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC foi instituída pela Lei 12.187 de 29 de dezembro de 2009, e posteriormente regulamentada pelo Decreto 7.390 de 9 de dezembro de 2010.

Através da PNMC o país assumiu o compromisso voluntário de redução de suas emissões projetadas até 2020 entre 36,1% e 38,9% (BRASIL, Lei 12.187/09 art. 12º). As projeções de emissões até 2020 foram estimadas em 3.236 milhões tonCO₂eq, de acordo com Tabela 4 mostrada a seguir, onde almeja-se uma redução entre 1.168 milhões de tonCO₂eq e 1.259 milhões de tonCO₂eq (BRASIL, Decreto 7.390/10 art. 5º).

Tabela 4. - Projeções de emissões de gases de efeito estufa no Brasil até 2020.

Descrição	Projeção para 2020 (milhões tonCO ₂ eq)
Mudança de Uso da Terra	1.404
Energia	868
Agropecuária	730
Processos Industriais e Tratamento de Resíduos	234
	3.236

Fonte: BRASIL, Decreto 7.390/10, art. 5º.

O Plano Nacional sobre Mudança do Clima é um dos instrumentos definidos pela Política Nacional sobre Mudança do Clima, e tem o objetivo de identificar, planejar e coordenar as ações e medidas para mitigação das emissões

de gases de efeito estufa no Brasil (BRASIL, Plano Nacional sobre Mudança do Clima, 2008).

O RSU está entre as oportunidades de mitigação identificadas pelo Plano Nacional sobre Mudança do Clima, onde destaca-se os vários instrumentos criados para implementação das ações de mitigação nas esferas a seguir (BRASIL, Plano Nacional sobre Mudança do Clima, 2008):

- Instrumentos econômicos: linhas de financiamento específicas criadas pelo Banco Nacional do Desenvolvimento – BNDES e Caixa Econômica Federal – CEF, Fundo Nacional sobre Mudança do Clima e Programa Pró-MDL para financiamento de projetos ligados ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL;
- Instrumentos de cooperação internacional: cooperação internacional na execução de projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo – MDL, cooperação internacional em projetos de mudança do clima, cooperação internacional no desenvolvimento de tecnologias limpas;
- Instrumentos legais: Política Nacional sobre Mudança do Clima, alterações na Lei que institui a Política Energética Nacional, Projeto de Lei para a Política Nacional de Resíduos Sólidos e incentivo aos consórcios municipais.

Apesar da abertura legal tanto na PNRS, como na PNMC, para viabilizar empreendimentos de recuperação energética de RSU, não foram observados instrumentos específicos ligados a comercialização de energia que pudessem viabilizar estes empreendimentos, que concorrem direta e indiretamente com aterros sanitários e outras fontes de energia voltadas para o mercado livre ou regulado.

3.5.2. *Política Federal de Saneamento Básico*

A Política Federal de Saneamento Básico foi estabelecida pela Lei 11.445 de 05 de janeiro de 2007.

O RSU foi incluído na matéria através do artigo 3º da Lei 11.445/07:

Art. 3º Para os efeitos desta Lei, considera-se:

I - saneamento básico: conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de:

c) limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destino final do lixo doméstico e do lixo originário da varrição e limpeza de logradouros e vias públicas;

A regulamentação da Lei 11.445/07 foi realizada através do Decreto nº 7.217/10, que estabelece diretrizes e ações para a legislação.

Destacam-se dois produtos estabelecidos pela Política Federal de Saneamento Básico que podem ser aproveitados nos estudos de implantação de empreendimentos de recuperação de energética de RSU:

- Plano Nacional de Saneamento Básico - Plansab: coordenado pelo Ministério das Cidades, o Plansab encontrava-se em consulta pública no momento de elaboração desta dissertação;
- Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS: este banco de dados encontra-se operacional através do site <http://www.snis.gov.br>, oferecendo informações e indicadores sobre o manejo de resíduos sólidos no Brasil.

Tendo em vista que o Brasil possui mais de 5.500 municípios em seu território, segundo dados do IBGE, nota-se que nem todos se encontram contemplados nas tabelas de dados disponíveis no SINIS, que possui o cadastro de apenas 507 lixões, 419 aterros controlados e 550 aterros sanitários (SINIS, 2010).

Considerando as 1.476 unidades cadastradas, informações tais como, a quantidade diária de resíduos destinados, o ano de operação e a área de cada Unidade, estão disponíveis de maneira incompleta ou inexistente no SINIS, o que inviabiliza a formulação de políticas de governo que tenham como referência a capacidade instalada, capacidade utilizada e a formulação de projeções para as unidades de destinação do país.

3.5.3. Plano de Ação Para Produção e Consumo Sustentáveis - PPCS

O Plano de Ação para Produção e Consumo Sustentáveis – PPCS foi elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente e lançado em 23 de Novembro de 2011, e entre outros assuntos, define as prioridades para os objetivos elencados nas ações definidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS e o Plano Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC.

No que diz respeito aos Resíduos Sólidos, as prioridades assinaladas pelo PPCS para o período de 2011 a 2014 dizem respeito principalmente aos estímulos a reciclagem e minimização de resíduos.

3.6. Fontes de Financiamento

3.6.1. Banco Nacional do Desenvolvimento - BNDES

O BNDES direciona suas linhas de financiamento de acordo com a classificação de cada empresa tendo em vista sua receita operacional bruta anual (Tabela 5).

Tabela 5. - Classificação de empresas para linhas de financiamento do Banco Nacional do Desenvolvimento.

Classificação	Receita Operacional Bruta Anual
Microempresa	Menor ou igual a R\$ 2,4 milhões
Pequena empresa	Maior que R\$ 2,4 milhões e menor ou igual a R\$ 16 milhões
Média empresa	Maior que R\$ 16 milhões e menor ou igual a R\$ 90 milhões
Média-grande empresa	Maior que R\$ 90 milhões e menor ou igual a R\$ 300 milhões
Grande empresa	Maior que R\$ 300 milhões

Fonte: BNDES, 2013.

De maneira a construir o estudo de viabilidade para o projeto, as linhas de financiamento utilizadas foram baseadas nos dados informados pelo BNDES, considerando, conforme informado pelo órgão:

3.6.1.1. BNDES Finem – Infraestrutura – Energias Alternativas

- Projetos de bioeletricidade, biodiesel, bioetanol, energia eólica, energia solar, pequenas centrais hidrelétricas e outras energias alternativas;
- Valor mínimo de financiamento: R\$ 10 milhões;
- Encargos de Comissão de Estudo: 0,2% do valor solicitado até o limite de R\$ 841.927,29;
- Encargos de Comissão de Estruturação: 0,2% do valor solicitado até o limite de R\$ 8.419.277,68;

- Encargo por Confirmação da Carta de Crédito: 1,5% na data da confirmação da carta de crédito e 1% ao ano sobre o saldo devedor da dívida garantida;
- Taxa de Juros (operação direta com o BNDES): estimada de 9,9 % a.a. até 11,08 % a.a. (Custo Financeiro + Remuneração Básica do BNDES + Taxa de Risco de Crédito);
- Custo Financeiro: Estimado em 6% a.a. tendo em vista a Taxa de Juros de Longo Prazo – TJLP;
- Remuneração Básica do BNDES: informado em 0,9% a.a.;
- Taxa de Risco de Crédito: até 4,18% a.a. conforme risco de crédito do cliente;
- Participação do BNDES: 80%;
- Amortização: até 16 anos;
- Garantia: a ser definida na análise da operação.

3.6.1.2. BNDES Programa Fundo Clima – Resíduos com Aproveitamento Energético

- O Fundo Clima ou Fundo Nacional sobre Mudança do Clima é um dos instrumentos da Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC com o objetivo de garantir recursos para empreendimentos que promovam a mitigação das mudanças climáticas;
- Valor mínimo de financiamento: R\$ 10 milhões;
- Encargos de Comissão de Estudo: 0,2% do valor solicitado até o limite de R\$ 841.927,29;

- Encargos de Comissão de Estruturação: 0,2% do valor solicitado até o limite de R\$ 8.419.277,68;
- Encargo por Confirmação da Carta de Crédito: 1,5% na data da confirmação da carta de crédito e 1% ao ano sobre o saldo devedor da dívida garantida;
- Taxa de Juros (operação direta com o BNDES): estimada de 9,4 % a.a. até 10,58 % a.a. (Custo Financeiro + Remuneração Básica do BNDES + Taxa de Risco de Crédito);
- Custo Financeiro: estimado em 5% a.a;
- Remuneração Básica do BNDES: informado em 0,9% a.a;
- Taxa de Risco de Crédito: até 4,18% a.a. conforme risco de crédito do cliente;
- Taxa de Intermediação Financeira: 0,5% a.a. (Micro, Pequenas e Médias Empresas estão isentas desta taxa);
- Participação do BNDES: 90%;
- Amortização: até 15 anos, incluído período de carência, que terminará em até 6 meses após a data de entrada em operação comercial do empreendimento, não ultrapassando 5 anos.

3.7. Análise do Ambiente Institucional

Nota-se no Ambiente Institucional pesquisado, pouca informação e regulamentação sobre o tema ligado ao aproveitamento energético de RSU, porém com uma abertura legal para o lançamento de políticas específicas que podem impulsionar esta atividade no Brasil.

As prioridades definidas na Política Nacional de Resíduos Sólidos seguem modelos internacionais, porém sem o estabelecimento de uma hierarquia para regular a gestão dos resíduos sólidos, favorecendo a implantação de soluções de menor custo para o gestor público, o que não significa aquela que ofereça maior sustentabilidade ao município, redução dos riscos ao meio ambiente e a redução de perdas de energia no país.

A discussão sobre o tema esbarra na disputa de matéria prima com entidades representantes dos profissionais que atuam na coleta de materiais recicláveis, estimados em cerca de 800 mil pessoas, segundo dados apresentados por MNCR (2010).

Segundo dados divulgados em IPEA (2012), diariamente são coletados cerca de 183.481,50 toneladas de RSU, com aproximadamente 41,5% deste montante sendo constituído por materiais recicláveis. A partir dos dados divulgados por BIGELLI (2013), que gerencia uma Cooperativa de materiais recicláveis em São José dos Pinhais-PR onde todos os trabalhadores são registrados formalmente, pode-se estimar um indicador de sete catadores para coletar cada tonelada diária de RSU processado em uma Cooperativa de materiais recicláveis.

Estes números, mesmo que estimativos, mostram que a parcela reciclável de RSU disponível conseguiria fornecer matéria prima diária de trabalho para cerca de 533 mil catadores atuando formalmente em suas atividades, o que atenderia pouco mais de 65% da demanda de profissionais.

Nota-se, portanto, que ainda há um grande desafio para o governo brasileiro na definição de políticas de públicas que solucionem a questão dos catadores, como também da recuperação energética de RSU, sendo esta última já em estágio de implantação em algumas cidades brasileiras, de acordo com dados levantados nos capítulos seguintes.

4 - AMBIENTE ORGANIZACIONAL

Uma rápida pesquisa na internet irá mostrar uma lista vasta de instituições com interesse na promoção de energias renováveis no Brasil. A relação a seguir foi selecionada entre aquelas instituições brasileiras pesquisadas durante o desenvolvimento desta dissertação que divulgam trabalhos e pesquisas na área do aproveitamento energético de RSU, constituindo importante fonte de informação e consulta para qualquer trabalho que trate deste tema no Brasil.

4.1. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE

A ABRELPE é a representante no Brasil da Associação Internacional de Resíduos Sólidos (*International Solid Waste Association – ISWA*), entidade com membros em todo o mundo atuando no interesse público para promover e desenvolver o gerenciamento de resíduos de forma sustentável (<http://www.abrelpe.org.br>).

4.2. Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos - ABETRE

A ABETRE congrega 21 empresas especializadas na destinação ambientalmente adequada de resíduos sólidos e tem a missão de representar o setor empresarial na área de resíduos (<http://www.abetre.org.br>).

4.3. Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO

O CENBIO (1996) é um grupo de pesquisa localizado na Universidade de São Paulo no Instituto de Eletrotécnica e Energia e foi criado com a finalidade de promover o desenvolvimento das atividades de pesquisa e divulgação de informações científicas, tecnológicas e econômicas para viabilizar o uso da biomassa como fonte eficiente de energia no Brasil.

O CENBIO possui diversas publicações disponíveis em seu site sobre o aproveitamento energético de resíduos, que inclui o Atlas de Bioenergia do Brasil, a Revista Brasileira de Bioenergia, além de projetos de pesquisa em andamento (<http://cenbio.iee.usp.br>).

4.4. CONGENERES

O CONGENERES, Conselho de Pesquisa em Tecnologia de Geração de Energia a partir de Resíduos, é o representante no Brasil do consórcio indústria-universidade denominado Conselho de Pesquisa e Tecnologia para o Aproveitamento Energético de Resíduos (*Waste to Energy Research and Technology Concil - WTERT*), sendo uma rica fonte de informações em pesquisa e desenvolvimento na área de aproveitamento energético de resíduos (<http://www.wtert.com.br>).

4.5. Associação da Indústria de Cogeração de Energia - COGEN

A COGEN foi fundada por empresas do setor baseada na experiência da organização internacional *COGEN Europe*, com a intenção de desenvolver a utilização dos sistemas de cogeração, valendo-se dos recursos disponíveis no país como a biomassa de cana de açúcar e gás natural.

O endereço eletrônico da Associação possui dados de empreendimentos de cogeração, empresas que atuam no setor, além de disponibilizar uma compilação sobre a legislação aplicável em empreendimentos e outros documentos (<http://www.cogen.com.br>).

4.6. ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade

O ICLEI é uma associação mundial de governos e cidades para apoiar o desenvolvimento sustentável dos municípios.

Na área de RSU, o ICLEI possui vários projetos para apoiar os municípios na gestão de seus resíduos, oferecendo estudos e treinamentos, inclusive na modalidade ensino a distância – EAD (<http://www.iclei.org.br/residuos>).

4.7. Grupo de Estudos em Tratamento de Resíduos Sólidos - GETRES

A UFRJ mantém através do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, o Grupo de Estudos em Tratamento de Resíduos Sólidos – GETRES, fundado em 1998.

O Grupo possui vários projetos em andamento e realizados na área de resíduos sólidos, bem como laboratórios e pesquisadores em várias disciplinas (<http://www.getres.ufrj.br>).

4.8. Análise do Ambiente Organizacional

As Organizações e Institutos de Pesquisa relacionados mostram que o Brasil possui importantes centros referência e profissionais para suportar a questão do desenvolvimento de tecnologias de recuperação energética de RSU.

A representação política, no entanto, ainda necessita ser fortalecida, como se pode verificar na Tabela 6 a seguir, através da quantidade de projetos apresentados na Câmara dos Deputados nos últimos 10 anos, relacionados com o aproveitamento energético de RSU:

Tabela 6. - Projetos de Lei apresentados na Câmara dos Deputados nos últimos 10 anos relacionados ao aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.

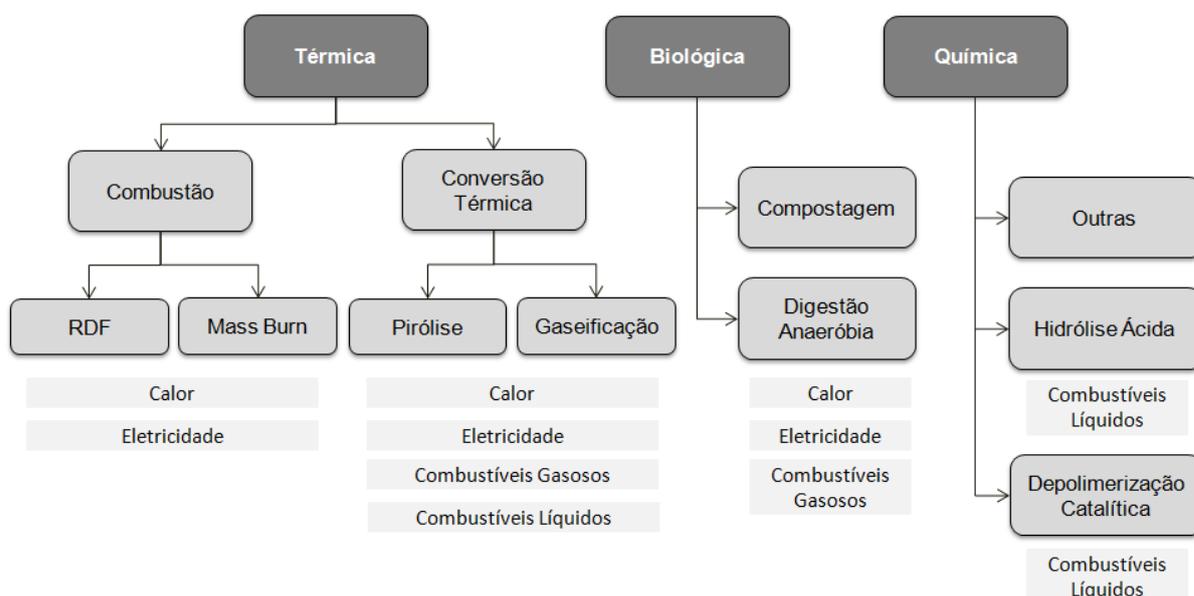
Projeto	Descrição	Apresentação	Autor (a)
PL 3899/2012	Institui a Política Nacional de Estímulo à Produção e ao Consumo Sustentáveis.	22/05/12	Jandira Feghali
PL 2866/2008	Institui o Programa Nacional de Geração de Energia Elétrica a partir do Lixo (Progel) e dá outras providências.	21/02/08	Lelo Coimbra
PL 2388/2007	Dispõe sobre a adoção de metas de processamento de lixo urbano em cidades com mais de 250 mil habitantes.	07/11/07	Rogério Lisboa
PL 5248/2005	Institui o Programa de Geração de Energia a partir do Lixo (Progelixo) e dá outras providências.	17/05/05	Ivo José

Fonte: CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2013.

5 - AMBIENTE TECNOLÓGICO

O aproveitamento energético do RSU pode ser realizado através das rotas mostradas na Figura 7 a seguir:

Figura 7 - Rotas tecnológicas para aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.



Fonte: JUCÁ, 2012

A seguir são definidas as tecnologias sob cada rota térmica, biológica e química:

Combustível Derivado de Resíduos (*Refused Derived Fuel - RDF*): Resíduo resultante de processo de pré-tratamento de separação e pré-aquecimento, que tem o objetivo de aumentar o poder calorífico do RSU para fins energéticos.

Incineração em Massa (*Mass Burn*): esta tecnologia exotérmica utiliza a incineração direta do RSU na presença de oxigênio ou ar para gerar os produtos comercializados, que são normalmente calor e eletricidade.

Pirólise: a Pirólise é um processo endotérmico de decomposição de compostos orgânicos em uma atmosfera deficiente de oxigênio, através de fonte indireta de calor variando entre 650°C e 1200°C (YOUNG, 2010).

Gaseificação: a gaseificação é um processo exotérmico de decomposição de compostos orgânicos em uma atmosfera com quantidade limitada de ar e oxigênio, necessários para realizar o balanço estequiométrico das reações presente no reator. O principal produto da gaseificação é o gás de síntese, composto predominantemente por CO e H₂, utilizado para cogeração de eletricidade e vapor, bem como para produção de combustíveis líquidos via síntese Fischer Tropsch (YOUNG, 2010).

Compostagem: a compostagem é a biodigestão dos compostos orgânicos presentes no RSU na presença de oxigênio (aeróbia) com o objetivo de estabilizar o material orgânico, gerando como produto final fertilizantes para utilização na agricultura.

Digestão Anaeróbia: a digestão anaeróbia é a biodigestão dos compostos orgânicos presentes no RSU na ausência de oxigênio, gerando como produtos finais o biogás, composto sobretudo de metano (CH₄) e CO₂, além de um produto biodigerido, que também pode ser utilizado como fertilizante na agricultura.

Hidrólise Ácida e Depolimerização Catalítica: tecnologias utilizadas na síntese de biocombustíveis, utilizando como matéria-prima a Biomassa ou produtos derivados de petróleo, onde é possível quebrar polímeros como a celulose e plásticos em cadeias menores para a produção de, por exemplo, etanol de segunda geração e biodiesel.

Somente na Europa, o número de plantas para o aproveitamento energético de RSU chegou a 450 unidades no ano de 2009 (Tabela 7), segundo dados da Confederação Europeia de Plantas de Recuperação Energética de Resíduos (*Confederation of European Waste to Energy Plants – CEWEP*), havendo uma maior concentração destes empreendimentos na França, Alemanha e Itália (Figura 8).

Tabela 7. - Plantas instaladas para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em operação na Europa em 2009.

Pais	Plantas WTE em Operação
França	130
Alemanha	70
Itália	49
Dinamarca	31
Suécia	31
Suíça	28
Reino Unido	23
Noruega	20
Bélgica	16
Austria	14
Holanda	12
Espanha	10
Portugal	3
Finlândia	3
República Checa	3
Eslováquia	2
Luxemburgo	1
Polônia	1
Hungria	1
Eslovênia	1

Fonte: adaptado de CEWEP, 2009.

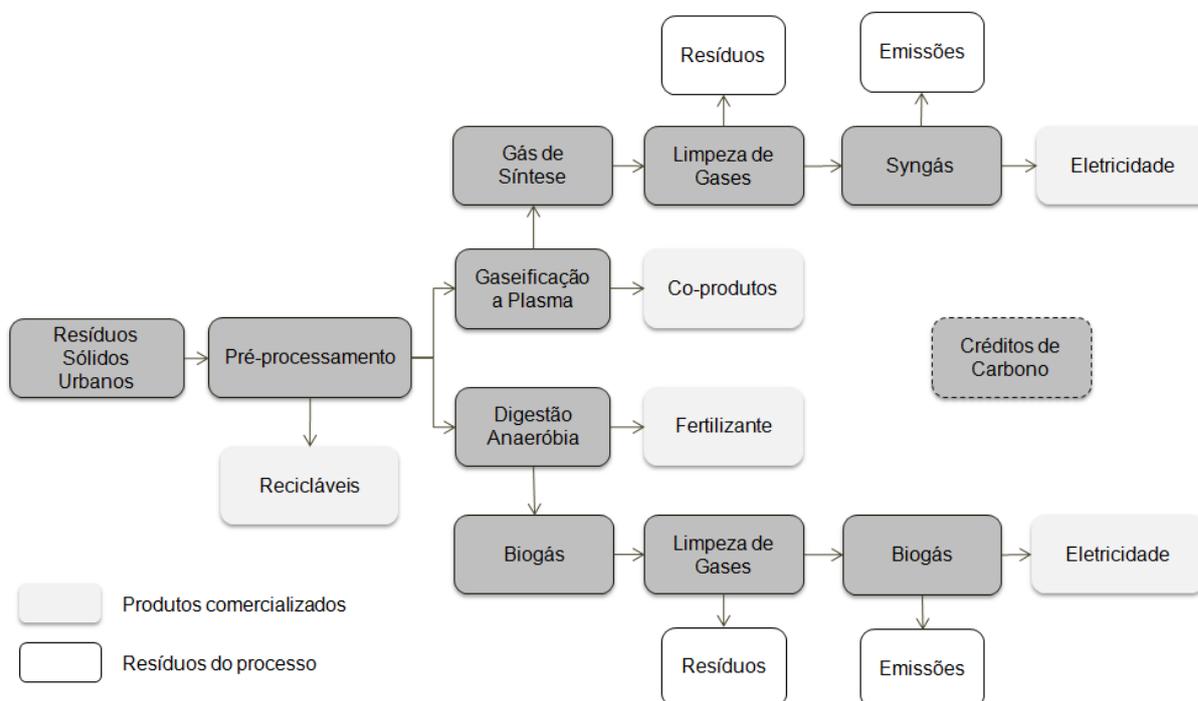
Figura 8 - Mapa temático - plantas instaladas para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em operação da Europa no ano de 2009.



Fonte: adaptado CEWEP, 2009.

Tendo em vista as rotas mostradas na Figura 7, procurou-se verificar o arranjo que contemplasse o aproveitamento energético de toda a diversidade que compõe o RSU, priorizando as tecnologias, com dados técnicos e financeiros disponíveis para a elaboração do estudo de viabilidade. A Figura 9 a seguir mostra o arranjo tecnológico adotado nesta dissertação para o aproveitamento energético de RSU.

Figura 9 - Arranjo para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Entre os processos mostrados na Figura 8, a gaseificação a plasma é um processo emergente para o tratamento térmico de RSU. Este processo trabalha com temperaturas que variam entre 3900°C a 6900°C, transformando os compostos orgânicos em gás de síntese e os inorgânicos presentes no RSU, em um resíduo vitrificado, inerte e não lixiviado, que contribui para a sustentabilidade dos processos de aproveitamento energético de RSU.

A escolha desta tecnologia neste estudo, apesar do alto custo em comparação com outras existentes, foi motivada pelos seguintes aspectos (YOUNG, 2010):

- Não necessita prévio tratamento da matéria prima recebida após a coleta dos materiais recicláveis (YOUNG, 2010);
- Maior taxa de conversão de energia por resíduo tratado (YOUNG, 2010);

- Maior abrangência dos resíduos a serem tratados (CIRCEO, 2010);
- Liberação do gás de síntese de maneira mais uniforme, requerendo menor investimento para sua limpeza (FURLAN, 2007);
- Reduz a necessidade de aterros, devido ao fato dos resíduos gerados no processo poderem ser aproveitados como agregados ou convertidos em outros produtos com valor comercial (CIRCEO, 2010);

Embora a combinação de compostagem e digestão anaeróbia possa trazer benefícios para o melhor aproveitamento do processo de tratamento biológico de materiais orgânicos, principalmente aqueles compostos de lignina, cuja digestão anaeróbia tem uma degradação mais difícil, nesta dissertação, optou-se por estudar somente o processo anaeróbio combinado com a gaseificação, sendo este último processo responsável pela conversão térmica daqueles materiais não direcionados para o biodigestor.

5.1. Triagem de Materiais Recicláveis

A triagem dos materiais recicláveis inicia-se logo na recepção do RSU em esteiras, sendo finalizada com a expedição do material reciclável já enfardado para venda, sendo recomendado que o galpão possua declividade no sentido de expedição de maneira a organizar o fluxo de materiais (BRASIL, 2008).

Este estudo considera a triagem dos seguintes materiais:

- Papel, papelão, latas de aço, alumínio: materiais sem classificação específica e identificados facilmente entre o RSU, não devendo apresentar contaminação com outros produtos orgânicos;
- Plásticos recicláveis: são aqueles identificados conforme norma ABNT NBR 13.230: PET (Politereftaleno de Etileno), PEAD (Polietileno de Alta Densidade), PVC (Policloreto de Vinila), PEBD

(Polietileno de Baixa Densidade), PP (Polipropileno), PS (Poliestireno), e outros. Estes tipos de plásticos são identificados nas embalagens através dos símbolos mostrados na Figura 9 a seguir.

Figura 10 - Símbolos para identificação de embalagens plásticas.



Fonte: CEMPRE, 2003.

A triagem de RSU pode ser dividida nas seguintes etapas (FUNASA, 2011):

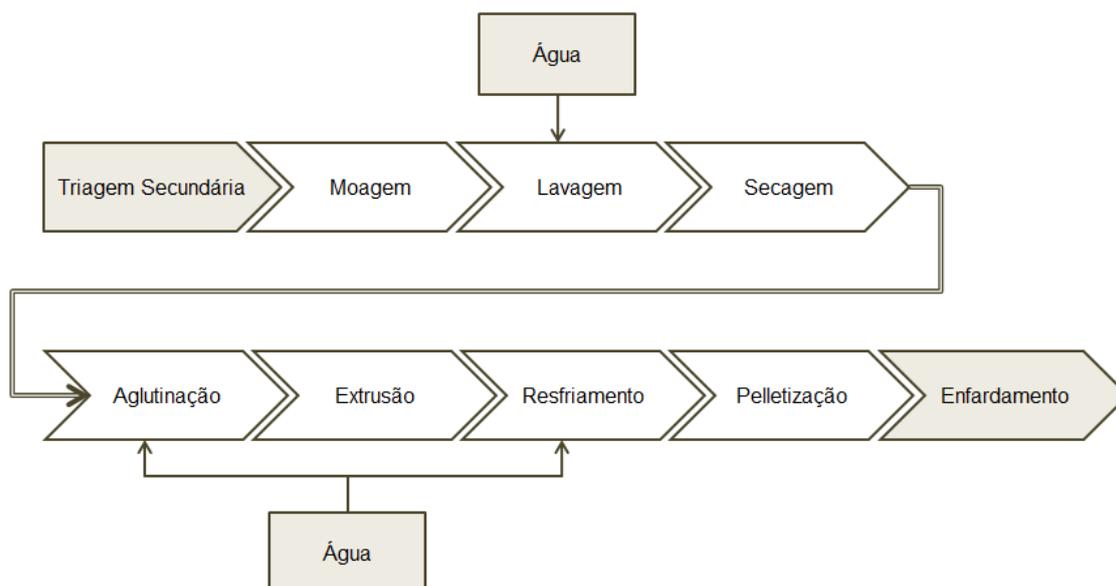
- Triagem Primária: triagem manual realizada na esteira e separação do material a ser reciclado em bombonas ou tambores, de maneira a possibilitar o transporte até a etapa seguinte;
- Triagem Secundária: local reservado para estoque temporário dos resíduos de acordo com cada material de maneira a atingir o volume necessário para a etapa seguinte;
- Enfardamento: enfardamento do material através de prensas ou a disposição em *big bags*, que após pesados, são estocados no Galpão de Triagem;
- Estocagem: estocagem dos fardos ou *big bags* de materiais recicláveis em locais não sujeitos a ação das chuvas, possibilitando o acúmulo até a expedição;

- Expedição: expedição dos materiais para venda através de veículos em nível com a plataforma de carga.

Os materiais recicláveis obtidos com a triagem são comercializados na forma de fardos após serem prensados, havendo, no entanto, a opção de comercialização dos termoplásticos recicláveis através de pellets, que podem agregar valor ao resíduo, requerendo investimentos adicionais.

Diferente dos plásticos termorrígidos ou termofixos, os termoplásticos são aqueles que se fundem com o aquecimento e se solidificam com o resfriamento, cujo pellet pode ser fabricado através do processo mostrado na Figura 11 a seguir após a etapa de Triagem Secundária dos resíduos.

Figura 11 - Processo de produção de pellets de termoplásticos.



Fonte: adaptado de CEMPRE, 2003

5.2. Tratamento Biológico (Biodigestão Anaeróbia)

O aproveitamento energético da fração orgânica de RSU tem crescido, sobretudo, na Europa após a Diretiva 1999/31/EC, que impõe metas de redução aos

países membros da União Europeia para o aterramento de compostos orgânicos biodegradáveis, evitando a produção de gases de efeito estufa e incentivando o desenvolvimento de tecnologias como a compostagem e digestão anaeróbia nos países onde a Diretiva se aplica.

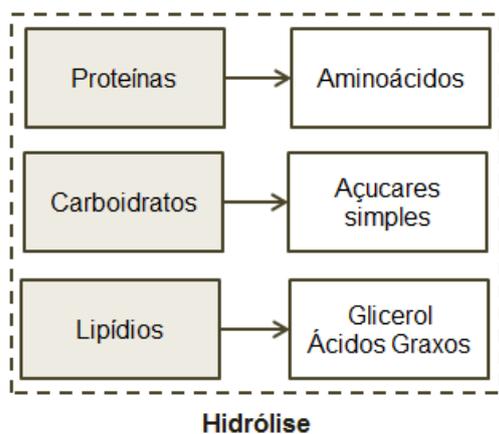
Várias empresas como Valorga (França), Dranco (Bélgica), BTA (Alemanha), Wassa (Finlândia), Kompogas (Suiça) e Linde-KCA (Suiça) comercializam tecnologias para o aproveitamento energético da fração orgânica através da biodigestão anaeróbia, que é bastante dependente de uma matéria orgânica homogênea e livre de contaminantes, podendo ser obtida através da separação da fração orgânica na fonte durante o processo de coleta de RSU, o que não é realidade na maioria das cidades brasileiras.

5.2.1. Processo de Formação do Biogás

A formação do Biogás passa por quatro estágios teóricos no momento em que o substrato entra em contato com as enzimas e bactérias anaeróbias presentes no biodigestor:

- **Hidrólise:** as cadeias de carbono presentes nas proteínas, carboidratos e lipídios são quebradas sucessivamente em aminoácidos, açúcares, glicerol e ácidos graxos (Figura 12). A hidrólise dos carboidratos acontece em algumas horas e a hidrólise de proteínas e lipídios em alguns dias. Materiais lignocelulósicos e lignina são degradados lentamente e de forma incompleta (DEUBLEIN, 2011).

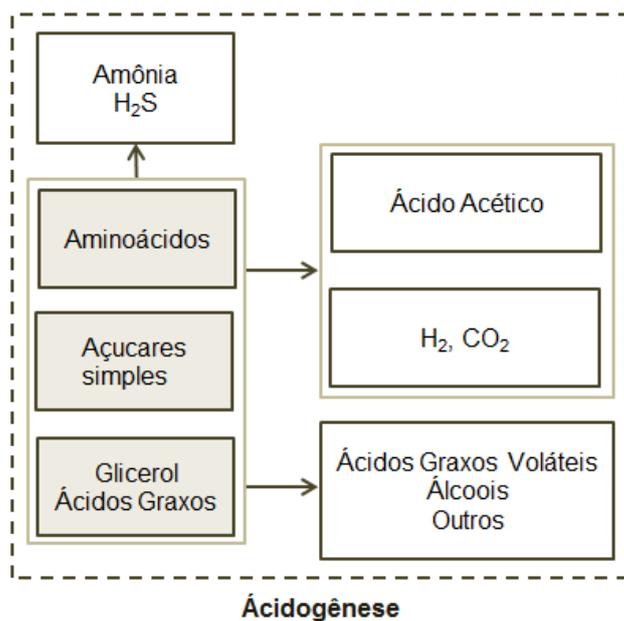
Figura 12 - Formação do biogás: hidrólise.



Fonte: DEUBLEIN, 2011.

- Acidogênese: transformação dos produtos da hidrólise em ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, ácidos graxos voláteis, álcoois e impurezas no processo de biodigestão, conforme mostrado na Figura 13 (KARAGIANNIDIS, 2012).

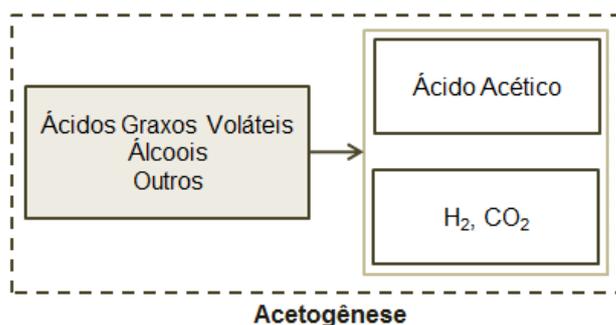
Figura 13 - Formação do biogás: acidogênese.



Fonte: KARAGIANNIDIS, 2012.

- Acetanogênese: transformação de ácidos graxos voláteis em ácido acético, liberando também hidrogênio e dióxido de carbono, conforme mostrado na Figura 14 (KAGIANNIDIS, 2012).

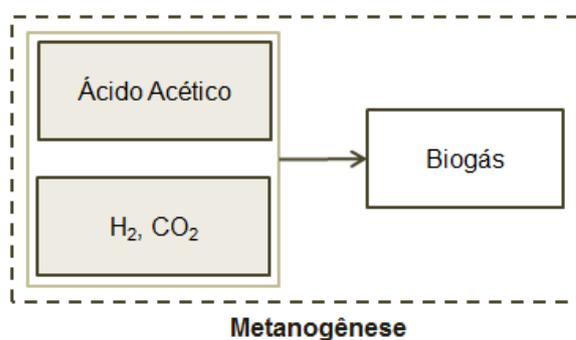
Figura 14 - Formação do biogás: acetanogênese.



Fonte: KARAGIANNIDIS, 2012.

- Metanogênese: estágio composto por dois grupos de bactérias que irão gerar como produto final o metano (CH₄). O primeiro grupo irá converter o ácido acético (CH₃COOH = CH₄ + CO₂) em metano e o segundo realizará esta conversão com o hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂), conforme mostrado na Figura 15 (ABBASI, 2012).

Figura 15 - Formação do biogás: metanogênese.



Fonte: ABBASI, 2012.

Por se tratar de um processo biológico, o substrato exerce influência direta sobre o metabolismo dos microorganismos. Os substratos são degradados mais facilmente de acordo com a ordem açúcar-proteína-lipídios-hemicelulose-celulose-lignina, podendo haver uma queda de metabolismo na ausência de macronutrientes (N, P, S, Ca, Mg, Fe) ou micronutrientes (Mn, Mo, Zn, Cu, Co, Ni, V, B, Cl, Na, Se, Si, W) (DEUBLEIN, 2011).

De maneira a balancear a composição de macronutrientes no biodigestor, diferentes substratos, tais como aqueles mostrados na Tabela 8, podem ser co-processados para atingir a faixa ideal da relação carbono-nitrogênio (C:N) que encontra-se entre 16:1 e 25:1 (DEUBLEIN, 2011). Se a relação C:N for muito baixa, o nitrogênio liberado acumula-se na forma de amônia, aumentando o pH da mistura, comprometendo o metabolismo do processo biológico (ABBASI, 2012)

Tabela 8. - Relação carbono:nitrogênio de resíduos orgânicos.

Substrato	Relação C:N
Tomate	44:1
Resíduo de serraria	511:1
Papel	173:1
Lixo doméstico	18:1
Lodo de esgoto	6:1
Estrume de gado	24:1
Estrume de porco	18:1
Aguapé	25:1

Fonte: DEUBLEIN, 2011. p128; ABBASI, 2012. p6.

Dependendo da faixa de temperatura de operação do processo de biodigestão escolhido, que dependerá da matéria-prima a ser utilizada, diferentes microorganismos irão atuar no substrato para produção de biogás (Tabela 9).

A temperatura, juntamente com o pH, constitui um dos principais parâmetros para controle do metabolismo do processo biológico, devendo ser monitorados continuamente (Tabela 9).

Tabela 9. - Principais parâmetros de controle no biodigestor.

Parâmetro	Controle	Influência
Temperatura (Termofílicos)	50 - 65°C	Faixa de temperatura de trabalho para microorganismos Termofílicos, com temperatura ótima de em 55°C
Temperatura (Mesofílicos)	20 - 40°C	Faixa de temperatura de trabalho para microorganismos mesofílicos, com temperatura ótima de em 35°C
Temperatura (Psicrofílicos)	< 10°C	Faixa de temperatura de trabalho para microorganismos Psicrofílicos
pH	6 a 7	Valores abaixo comprometem a formação de Biogás, enquanto que valores acima de 10 podem cessar de forma irreversível a atividade das bactérias

Fonte: DEUBLEIN, 2011; ABBASI, 2012. p6, 7, 137.

Outros parâmetros de controle dizem respeito a manutenção diária do processo de biodigestão e estão associados aos itens a seguir:

- Tempo de retenção: tempo em que o substrato deve permanecer no Biodigestor para alcançar um desejado nível de degradação. (ABBASI, 2012);
- Umidade: a umidade do substrato a ser utilizado deve ser de pelo menos 50% (DGS, 2005);

- Taxa de alimentação: reposição diária de matéria orgânica no Biodigestor para alimentação dos microorganismos. Níveis ótimos desta taxa estão entre 1 e 3 Kg de matéria orgânica – MO/m³/dia (DGS, 2005);

O tempo de retenção e o volume anual de substrato utilizado determinam o volume do biorreator, bem como do tanque de armazenamento do substrato digerido através das fórmulas a seguir (DGS, 2005):

Volume biorreator (m³) = substrato (m³/ano) x tempo de retenção (dias)/365

Volume do tanque de armazenamento (m³) = substrato (m³/ano) x tempo de armazenamento (meses)/12 – volume do biodigestor (m³)

No dimensionamento do tanque ou dispositivo de armazenagem que irá estocar o biogás para utilização, deve-se levar em conta se o sistema previsto para geração de energia irá operar em regime contínuo ou somente nos horários de pico, de maneira a prever o material que irá suportar a pressão gerada no interior. O seu volume pode ser estimado como 20 a 50% da produção diária de biogás. Assim se, por exemplo, são produzidos 600 m³/dia de biogás, o volume do tanque ou dispositivo de armazenamento será de 120 a 180 m³ (DGS, 2005).

Assim como é importante balancear os macronutrientes, fornecer micronutrientes essenciais e controlar os principais parâmetros no biodigestor, também é preciso observar quando estas substâncias tornam-se inibidoras da atividade metabólica. A Tabela 10 mostra algumas concentrações destas substâncias onde se inicia a inibição do metabolismo.

Tabela 10. - Concentrações tóxicas de substâncias no biodigestor.

Substância	Símbolo	Concentração inibidora (mg l ⁻¹)	
		como ions	como carbonato
Cromo	Cr	28-300	530
Ferro	Fe	-	1750
Níquel	Ni	10-300	-
Cobre	Cu	40-300	170
Zinco	Zn	400	160
Cádmio	Cd	70-600	180
Chumbo	Pb	8-340	-
Manganês	Mn	1500	-
Magnésio	Mg	1000-2400	-
Cálcio	Ca	2500-7000	-
Sódio	Na	3500-30000	-
Potássio	K	2500-5000	-

Fonte: adaptado de DEUBLEIN, 2011. p138.

Além das substâncias mencionadas, também são inibidores do processo de produção do biogás os desinfetantes, detergentes, solventes orgânicos herbicidas, inseticidas e antibióticos que podem estar presente no RSU.

O componente do biogás responsável por seu poder calorífico é o metano (CH₄), com conteúdo típico entre 55% e 65% (ABBASI, 2012) e poder calorífico variando entre 650 e 750 Btu/ft³ (5.784 Kcal/m³ a 6674 Kcal/m³) (LEE, 2007).

Como regra prática, o poder calorífico do biogás em MJ/Nm³ pode ser determinado multiplicando o conteúdo de metano em % por 34. Assim, um biogás com 65% de Metano em sua composição, possui um poder calorífico aproximado de 22,1 MJ/Nm³ (DGS, 2005).

Outros componentes presentes no biogás são considerados impurezas para seu aproveitamento energético, apresentando os efeitos relacionados na

Tabela 11, e concentração que pode variar de acordo com o substrato utilizado (DEUBLEIN, 2011):

Tabela 11. - Componentes típicos e impurezas do biogás.

Componente	Concentração	Fórmula	Efeito
Dióxido de Carbono	25 a 50% (vol)	CO ₂	Redução do Poder Calorífico. Efeito corrosivo em tubulações e equipamentos.
Sulfeto de Hidrogênio	0 a 0,5% (vol)	H ₂ S	Efeito corrosivo em tubulações e equipamentos. Emissão de Dióxido de Enxofre (SO ₂) após sofrer combustão.
Amônia	0 a 0,05% (vol)	NH ₃	Emissão de Óxidos de Nitrogênio (NO _x) após sofrer combustão. Limitador da produção de Metano em altas concentrações.
Vapor D'água	1 a 5% (vol)	H ₂ O	Efeito corrosivo reagindo com H ₂ S e CO ₂ . Quando condensado pode provocar danos nos instrumentos.
Nitrogênio	0 a 5% (vol)	N ₂	Redução do Poder Calorífico.
Siloxanos	0 a 50mg Nm ⁻³	-	Age como abrasivo causando danos a motores.

Fonte: DEUBLEIN, 2011, p. 89 / DGS, 2005, p75.

5.2.2. Sistema de Limpeza do Biogás

A limpeza do Biogás tem o objetivo de reduzir substâncias que tem efeito corrosivo nas tubulações e motores, bem como reduzir a concentração de gases com efeito nocivos ao meio ambiente.

Os principais itens a serem observados na limpeza do Biogás são:

- Sulfeto de Hidrogênio (H₂S): pode ter seus efeitos reduzidos através da introdução de 2 a 6% (volume) de ar no biodigestor, que fará com que este seja convertido em enxofre e acrescido no

substrato em digestão. Este procedimento deve ser controlado uma vez que a combinação de ar e biogás pode ser explosiva, bem como pode haver formação de ácido sulfúrico, caso seja introduzido muito ar no Biodigestor (DGS, 2005);

- Umidade: este componente presente no biogás pode prejudicar a vida útil do grupo gerador de energia, pois se combina com impurezas formando ácidos que danificam as peças internas do motor. Seu efeito pode ser reduzido através de trocadores de calor de maneira a condensar a umidade do gás;

5.2.3. *Geração de Energia Através de Biogás*

O aproveitamento energético do biogás pode ser realizado através de motores ciclo Otto ou microturbinas, utilizando também no processo, flares de maneira a queimar o metano ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$), evitando a emissão de CH_4 para a atmosfera e a perda de créditos de carbono.

Os motores ciclo Otto, ou ciclo de combustão interna, trabalham com a geração de energia mecânica através da combustão da mistura ar – combustível em quatro tempos: admissão, compressão, combustão e exaustão.

Nas microturbinas o ar é aspirado e forçado para o interior da turbina a alta velocidade e alta pressão, sendo posteriormente misturado ao combustível e queimado na câmara de combustão. Os gases produzidos na queima são expandidos na palheta da turbina produzindo trabalho e exauridos para a atmosfera logo em seguida.

Comparativamente aos motores ciclo Otto, as microturbinas apresentam menores emissões de NO_x , chegando a 9 ppm nos modelos de 30 a 100 kW e 100 ppm nas de maiores potência (GARCILASSO, 2012).

A potência gerada considerando o aproveitamento energético do biogás pode ser estimada através da fórmula mostrada a seguir (DGS, 2005):

Potência (kW) = [biogás produzido (m³/ano) x poder calorífico em MJ/m³/3,6] / operação da unidade (h/ano)

Desta maneira, considerando as eficiências elétrica e térmica do sistema de cogeração utilizado, podem-se calcular as potências elétrica e térmica como se segue:

Potência elétrica (kW_e) = potência (kW) x eficiência elétrica (%)

Potência térmica (kW_t) = potência (kW) x eficiência térmica (%)

Assim, se, por exemplo, uma unidade de biodigestão produz 192.400 m³/ano de biogás, com poder calorífico de 20 MJ/Nm³, operação a plena carga em 7500 h/ano, com 30% de eficiência elétrica e 50% de eficiência térmica, temos os seguintes parâmetros calculados:

Potência elétrica = 42,8 kW

Potência térmica = 71,3 kW

5.3. Gaseificação a Plasma

As tochas de plasma foram criadas pela Westinghouse Corporation juntamente com a Agência Espacial Americana – NASA nos anos 60 de maneira a testar a resistência dos cascos das naves espaciais a temperaturas de 5.500°C. Desde então, a primeira planta de gaseificação a plasma para conversão de RSU foi construída no Japão no final dos anos 90 (DODGE, 2012).

O plasma é considerado o quarto estado da matéria, sendo composto de um gás (normalmente ar) ionizado por uma corrente elétrica e capaz de atingir temperaturas da ordem de 3.900°C a 6.900 °C, podendo ser gerado através de corrente contínua ou alternada (rádio frequência, micro-ondas, etc...), sendo preferencialmente gerado pela primeira (DUCHARME, 2010).

Devido às altas temperaturas envolvidas, a tecnologia é ideal para o tratamento de resíduos tóxicos ou perigosos, incluindo solos contaminados, aterros, lixões, bem como uma grande diversidade de matérias primas.

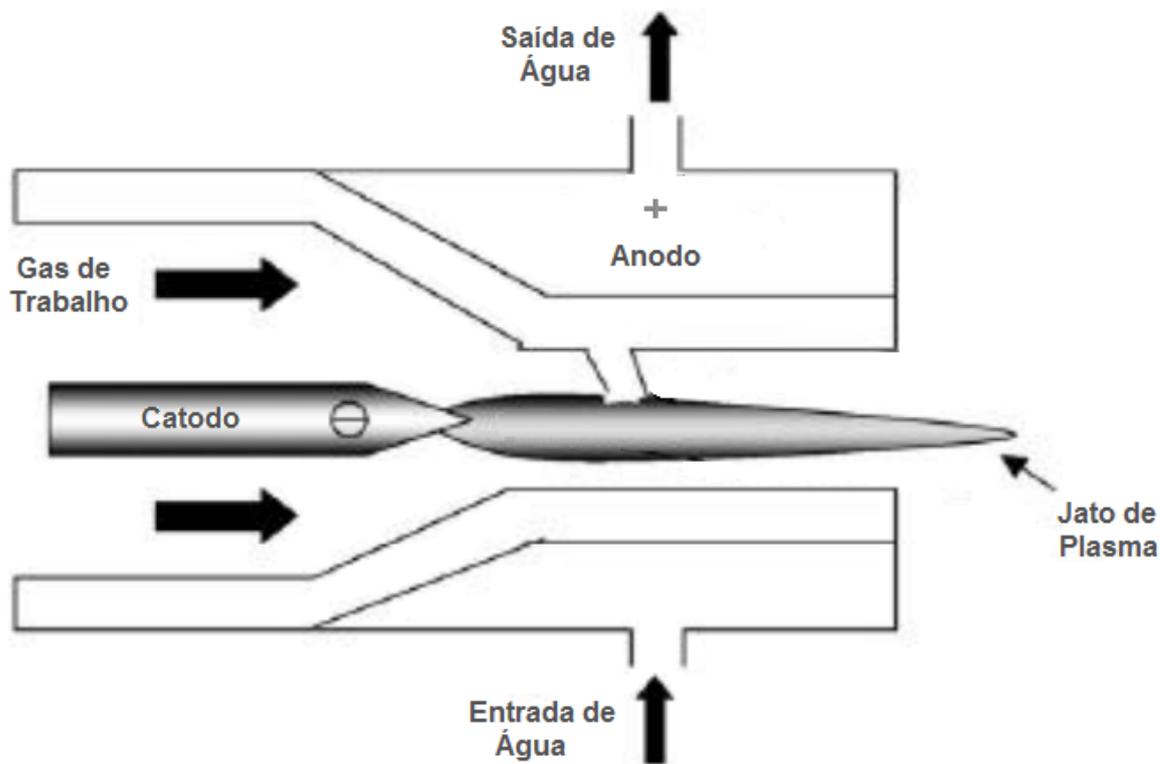
As configurações mais comuns dos reatores a plasma podem ser resumidas nos itens a seguir (DUCHARME, 2010):

- Polidores de Gás de Síntese (*Syngas Polishers*): as tochas de plasma são utilizadas para aquecer e tratar o gás após o processo convencional de gaseificação, ou mesmo para vitrificar os resíduos provenientes do processo tradicional;
- Destruidores de Resíduos (*Waste Zappers*): nesta configuração o resíduo passa diretamente pelas tochas de plasma para ser gaseificado, havendo, no entanto um grande dispêndio de energia elétrica para conversão da matéria-prima em gás de síntese;
- Plasma Assistido (*Plasma Assisted*): as tochas de plasma são utilizadas para acelerar o processo de gaseificação, aumentando conversão de resíduos orgânicos em H_2 e CO , bem como transformando a parte inorgânica em resíduos vitrificados;

Quanto ao arco de plasma formado, este pode ser do tipo Não Transferido (Figura 16) e Transferido (Figura 17), conforme descrição a seguir (DUCHARME, 2010):

- Não Transferido: é o tipo mais utilizado, onde o arco elétrico é formado através da descarga elétrica de um catodo em formato axial para um anodo em formato anelar, sendo este último resfriado continuamente através da circulação de água, o que gera também perda de energia no processo e queda na eficiência de transformação da energia elétrica em energia térmica.

Figura 16 - Arco de plasma Não Transferido.

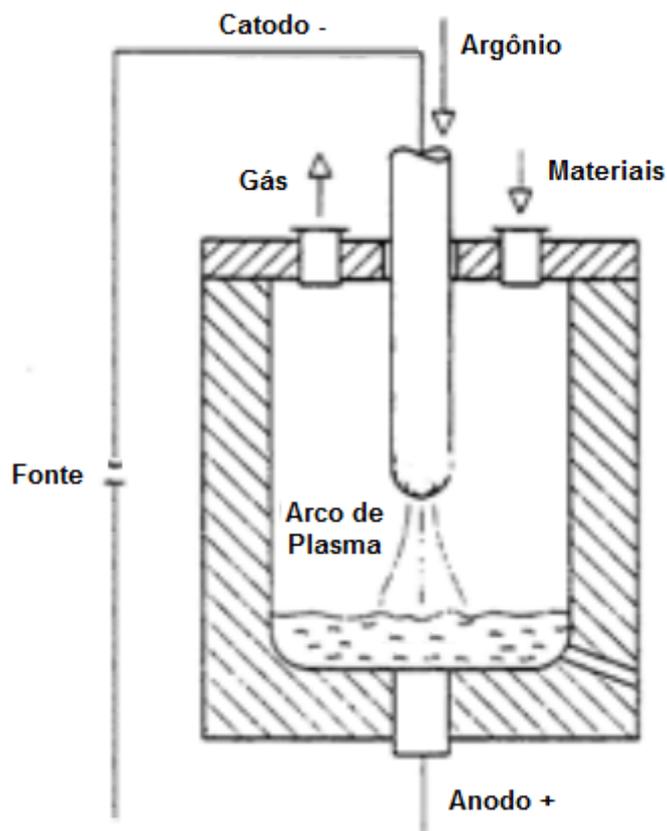


Fonte: HEBERLEIN² *apud* DUCHARME, 2010. P 22.

- Transferido: nesta configuração o catodo é um cilindro de grafite, onde o gás passa por ele, sendo ionizado pela corrente elétrica que é formada com o eletrodo externo, abaixo do catodo, juntamente com o material onde o arco será aplicado. O anodo também precisa ser resfriado nesta configuração, porém a perda de calor para a água é minimizada, o que eleva a eficiência de conversão da energia elétrica para energia térmica.

² HEBERLEIN, J. MURPHY, A. B. Thermal Plasma Waste Treatment, IOP Publishing. 2008.

Figura 17 - Arco de plasma Transferido.



Fonte: THEMELIS³ *apud* DUCHARME, 2010. P 23.

Quando em contato com a tocha de plasma, os resíduos orgânicos são convertidos em gás de síntese ($H_2 + CO +$ outros gases) e os inorgânicos fundidos e transformados em resíduos inertes não lixiviados (Figura 18), não oferecendo riscos ao meio ambiente, podendo inclusive ser utilizado como material agregado na construção civil (YOUNG, 2010).

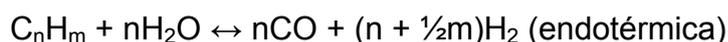
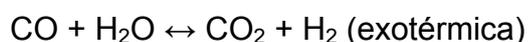
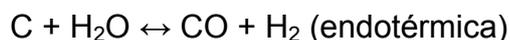
³ THEMELIS N. J. KIM, Y. H. Energy Recovery from New York City Waste, Waste Management and Research, 2002

Figura 18 - Resíduo vitrificado (ar atmosférico) através da gaseificação a plasma.



Fonte: <http://gas2.org/2009/10/19/up-close-and-personal-with-coskatas-new-flex-ethanol-plant/>, acesso em 18/05/2009

A seguir são relacionadas as reações químicas básicas ocorridas em um reator de gaseificação. Nas reações, o vapor d'água cumpre o papel de promoção da produção de CO e H₂, enquanto que o oxigênio reage com o carbono presente na matéria-prima para produção de calor, necessário para as demais reações de produção de gás de síntese (reações endotérmicas). Ambos os componentes, vapor d'água e oxigênio (ou ar), são injetados no reator em quantidades limitadas para completar o balanço estequiométrico das equações (YOUNG, 2010)



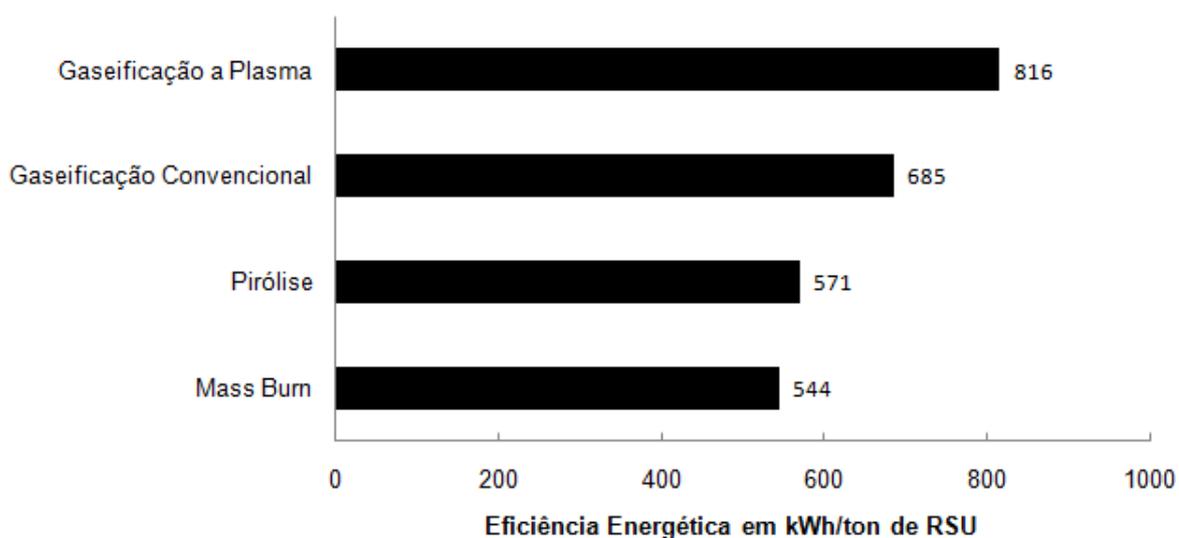
O gás de síntese (syngas) deixa o reator a cerca de 1000 °C, sendo resfriado para recuperação de calor e geração de vapor, com a consequente geração de eletricidade através de turbinas (CIRCEO, 2010).

A manutenção da temperatura do gás de síntese na saída do reator é um importante parâmetro de controle do processo, devendo ser mantido entre 900°C e 1100 °C para prevenir a formação de alcatrão e a mistura de partículas menores no gás, sendo controlado através das tochas de plasma (DUCHARME, 2010).

Em uma etapa seguinte, já a cerca de 200 °C, o gás de síntese passa por um processo de limpeza antes de ser enviado para as turbinas de combustão (CIRCEO, 2010).

Quando comparada com outras tecnologias de gaseificação mostradas na Figura 19, a tecnologia a plasma possui uma maior taxa de conversão líquida de energia por unidade de RSU, permitindo um ganho de eficiência no processo.

Figura 19 - Eficiência das rotas térmicas de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.



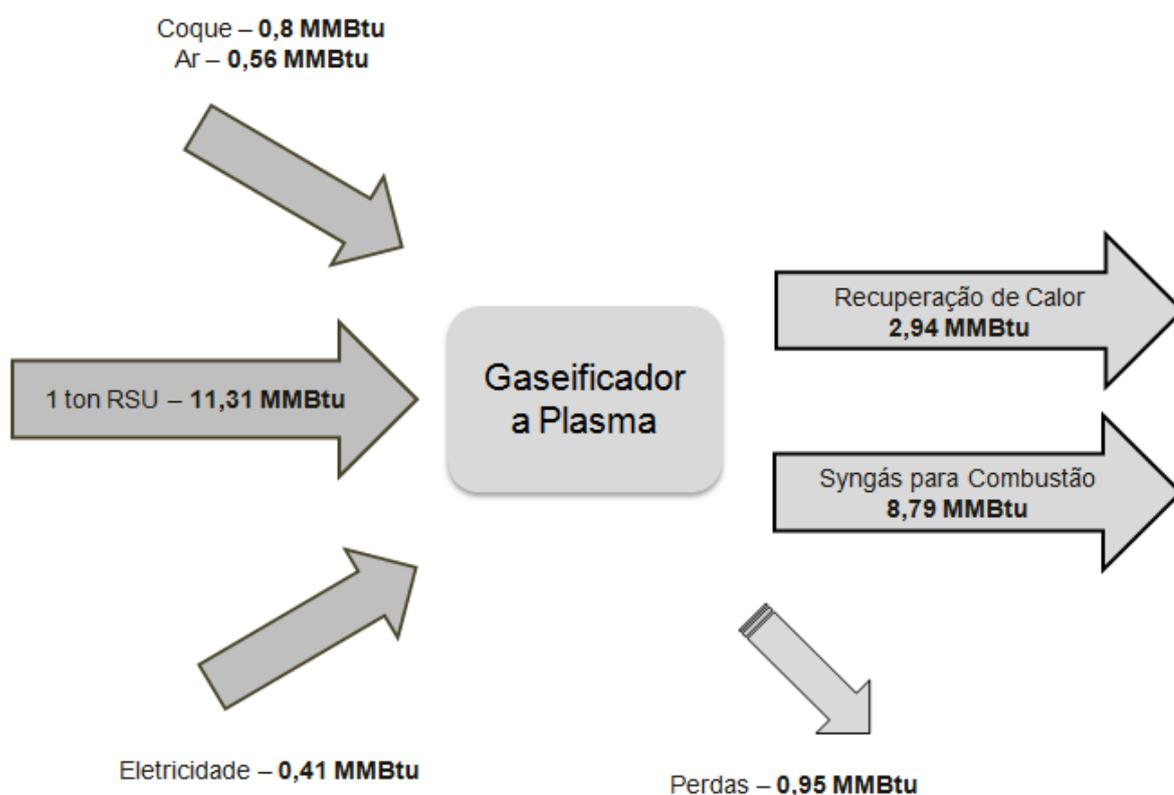
Fonte: adaptado de CIRCEO, 2010.

DODGE (2012) afirma que se pode chegar a valores de 900 a 1200 kWh por tonelada de RSU em turbinas a gás utilizando ciclo combinado para recuperação do calor através do gás de escape da turbina.

O processo de gaseificação a plasma é considerado autossuficiente em termos de energia elétrica, apresentando um consumo de energia elétrica pela tocha de cerca de 120 kWh por tonelada de RSU, sendo necessária a utilização de um gerador para a partida no processo.

A Figura 20 a seguir apresenta o balanço de energia para a gaseificação a plasma em MMBtu (10^6 Btu):

Figura 20 - Balanço de energia do processo de gaseificação a plasma.



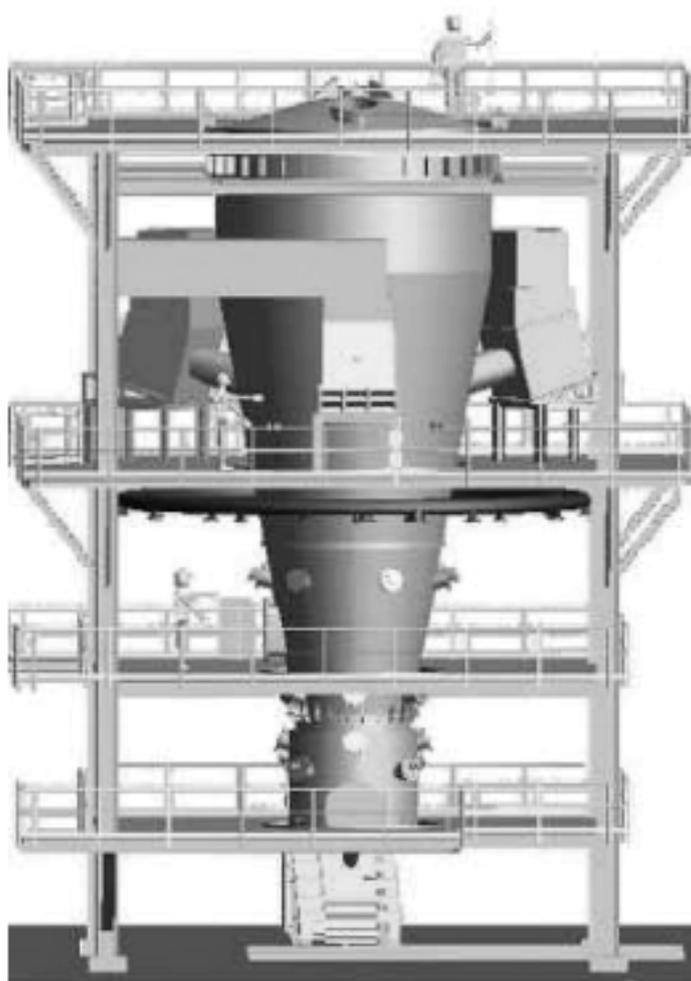
Fonte: adaptado de CIRCEO, 2010.

O ar mostrado na relação é utilizado para equilibrar o balanço estequiométrico das reações químicas no reator a plasma, enquanto que o coque é

alimentado juntamente com o RSU (4% em peso) para uniformizar a distribuição de calor sobre o resíduo e ao mesmo tempo criar uma camada no fundo do reator para reter a energia liberada pelas tochas de plasma (DUCCHARME, 2010).

A Figura 21 mostra um modelo de reator a plasma comercializado pela empresa AlterNRG e suas dimensão comparada com o homem.

Figura 21 - Modelo de reator a plasma da empresa AlterNRG.



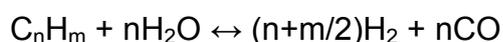
Fonte: NRG FOCUS, 2012

O gás de síntese produzido é um material nobre, cujo aproveitamento energético pode ser dado através da recuperação de calor do processo, combustão

do gás em turbinas apropriadas, conversão em biocombustíveis via síntese Fischer Tropsch ou reações bioquímicas utilizando bactérias específicas.

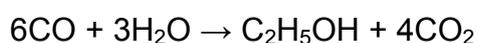
O gás de síntese possui cerca de um terço do poder calorífico do gás natural, sendo que a turbina a ser utilizada deverá estar adaptada para esta condição. Caso necessário, poderá ser acrescentado gás natural ao gás de síntese para atingir o poder calorífico especificado na turbina, o que não é desejável, pois aumentaria o custo operacional da planta (DUCHARME, 2010).

A conversão química do syngas em etanol é realizada através de reações de síntese, após o mesmo passar pelas etapas de recuperação de calor e limpeza de gases. Após essa etapa, o gás de síntese irá passar por processos adicionais, a saber: (i) purificação para retirada de mercúrio (Hg) e enxofre (S); (ii) conversão do metano (CH₄) em hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO) através da reação mostrada a seguir; e (iii) ajuste da relação H₂/CO requerida para as reações químicas no reator (FELLER, 2011).



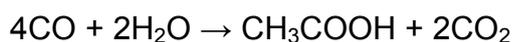
O reator utiliza-se de um catalizador apropriado em meio aquoso para reação com o gás de síntese e o controle de parâmetros como temperatura, pressão, relação H₂/CO, injeção de CO₂ e velocidade do gás, de maneira a realizar a síntese de etanol, que posteriormente será separado e purificado, devido à presença de outros álcoois formados no reator como, metanol, propanol, butanol e pentanol (FELLER, 2011).

A conversão bioquímica do syngas em etanol pode ser realizada pela bactéria anaeróbia *Clostridium ljungdahlii* através das reações a seguir, logo após o syngas passar pelas etapas de recuperação de calor e limpeza (KHAN, 1996):





O processo bioquímico é realizado através de um reator com água como meio de cultura da bactéria, que deve ser mantido sob condições específicas de temperatura, pressão, pH e nutrientes, que caso não adequadas, podem levar a produção de ácido acético pela bactéria (KHAN, 1996):



Além do aproveitamento energético do gás de síntese, outros subprodutos com valor de mercado podem ser obtidos com a escória formada com a parte inorgânica do RSU no reator a plasma (CIRCEO, 2010):

- Agregado para a construção civil: obtido através do resfriamento da escória com ar, podendo ser moldado ou triturado, dependendo da utilização desejada;
- Lã de rocha: obtido através do resfriamento da escória com ar comprimido em cilindros rotativos. Os fios de lã de rocha são formados por força centrífuga à medida que a escória deixa o cilindro rotativo. O material formado pode ser utilizado na agricultura em culturas hidropônicas, como isolamento térmico, isolamento acústico, e também absorvendo óleo em derramamentos no oceano, devido a sua propriedade de ser mais leve que a água (YOUNG, 2010).
- Areia e metais: obtido através do resfriamento da escória com água, formando um composto granulado semelhante a areia mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Escória resfriada com água.



Fonte: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/ci-ic/article/v16n3-4>. Acesso em 18 mai 2013.

5.4. Créditos de Carbono

O Protocolo de Quioto, adotado em 1997, estabeleceu metas de adequação das emissões de gases de efeito estufa – GEE para 39 países durante o quinquênio 2008 – 2012, correspondente a cerca de 5% de redução do volume de emissão de GEE verificado em 1990. (UN, 2012)

A Tabela 12, conhecida como Anexo B, mostra a permissão (limite ou redução) em % aos níveis verificados em 1990:

Tabela 12. - Compromisso de redução ou permissão de gases de efeito estufa – Protocolo de Quioto.

Parte	Permissão (% 1990)	Parte	Permissão (% 1990)
Alemanha	92	Japão	94
Austrália	108	Letônia	92
Áustria	92	Liechtenstein	92
Bélgica	92	Lituânia	92
Bulgária	92	Luxemburgo	92
Canadá	94	Mônaco	92
Comunidade Européia	92	Noruega	101
Croácia	95	Nova Zelândia	100
Dinamarca	92	Países Baixos	92
Espanha	92	Polónia	94
Estados Unidos	93	Portugal	92
Estônia	92	Reino Unido	92
Federação Russa	100	Irlanda do Norte	92
Finlândia	92	República Checa	92
França	92	Romenia	92
Grécia	92	Slováquia	92
Hungria	94	Slovenia	92
Irlanda	92	Suécia	92
Islândia	110	Suíça	92
Itália	92	Ucrânia	100

Fonte: UN, 2012.

De maneira a cumprir as metas estabelecidas entre as partes, o Protocolo de Quioto estabeleceu os seguintes mecanismos:

- Comércio de Emissões: realizada entre países do Anexo B para adequação dos níveis de emissões permitidas (países abaixo e acima do nível permitido). O comércio dentro deste mecanismo é

negociado em Unidades de Quantidades Atribuídas (*Assigned Amount Units – AAU's*);

- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: realizado entre países do Anexo B e países em desenvolvimento (não Anexo B) através de implementação de projetos de redução de GEE. O comércio neste mecanismo é negociado em Certificado de Emissões Reduzidas (*Certified Emission Reduction – CER*), sendo um CER equivalente a uma tonelada de CO₂ equivalente;
- Implementação Conjunta: realizado entre países do Anexo B através da implementação de projetos de redução de GEE. O comércio neste mecanismo é negociado em Unidades de Emissões Reduzidas (*Emission Reduction Units – EUR*), sendo um EUR equivalente a uma tonelada de CO₂ equivalente;

O Brasil realiza comércio de créditos de carbono através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL, devendo cumprir os itens a seguir para serem elegíveis (UN, 1998):

- Cada uma das partes envolvidas deve aprovar a participação voluntária;
- Benefícios reais e mensuráveis a longo termo relacionados com a mitigação de mudança no clima;
- Deve haver redução nas emissões de GEE em comparação ao cenário base (sem a implantação do projeto);

Para que créditos de carbono sejam comercializados no âmbito do MDL, o projeto deverá passar pelo ciclo a seguir para que seja emitido o Certificado de Emissões Reduzidas - CER (CDM, 2012):

- **Elaboração do Documento de Concepção do Projeto (Project Design Document - PDD):** o PDD deve ser submetido baseado em uma metodologia aprovada para o cálculo dos créditos de carbono. Caso não seja uma metodologia existente, esta deve ser aprovada antes da submissão e validação do projeto;
- **Carta de Aprovação:** carta de aprovação do projeto emitida pela Autoridade Nacional Designada (*Designated National Authority – DNA*), que no Brasil é representada pela Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima, subordinada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação;
- **Avaliação Independente:** avaliação de terceira parte realizada por Entidade Operacional Acreditada (*Designated Operational Entity – DOE*), que irá avaliar o projeto sob a ótica dos requisitos do MDL;
- **Registro:** aceitação formal do projeto pelo Conselho Executivo do MDL;
- **Monitoramento:** monitoramento das emissões de acordo com a metodologia utilizada no PDD e Plano de Monitoramento;
- **Verificação:** verificação por Entidade Operacional Acreditada do monitoramento realizado e a emissão de Certificação assegurando de que durante o período monitorado houve redução de emissões de GEE;
- **Certificação de Emissões Reduzidas (CER):** submissão ao Conselho Executivo do relatório de verificação pela Entidade Operacional Acreditada de maneira que seja emitido o CER para comercialização no MDL.

Em setembro de 2012 foi aprovada a metodologia ACM0022: Processos Alternativos de Tratamento de Resíduos (*Alternative Waste Treatment Processes*),

que abrange os principais processos para tratamento de RSU e encontra-se disponível para utilização no site da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (*United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC*).

5.5. Sistema de Limpeza de gases

O objetivo da implantação do sistema de limpeza de gases é adequar as emissões do processo aos limites definidos em legislação para cada localidade, além de tratar o gás de síntese para utilização em processos de recuperação de energia e conversão química / bioquímica de biocombustíveis.

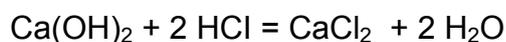
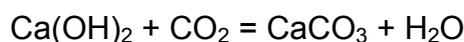
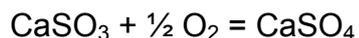
Um sistema de limpeza de gases em aplicações de tratamento térmico de resíduos sólidos pode ter vários arranjos com tecnologias de controle disponíveis, que dependerão do nível de eficiência que se deseja alcançar e das características da tecnologia, mas que passam normalmente pelos processos a seguir:

- Neutralização de gases ácidos e redução do teor de metais pesados;
- Redução dos níveis de NO_x através de processos de desnitrificação;
- Retenção de particulados e resíduos.

5.5.1. Neutralização de Gases Ácidos (*Spray Dryer*)

A neutralização de gases ácidos é realizada com cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) na forma de gotas (nebulizador), que entram em contato com o gás, neutralizando-o através da absorção de compostos ácidos tais como SO_2 (dióxido de enxofre), SO_3 (trióxido de enxofre), HCl (ácido clorídrico) e HF (ácido fluorídrico). Este processo também cumpre a função de resfriar o gás, condensando compostos que se encontram na forma de vapor, como o mercúrio (Hg), dioxinas e furanos, que são adsorvidos em seguida, através da injeção de carvão ativado seco.

SGW (2012) relaciona as reações químicas simplificadas com a cal hidratada no processo de neutralização dos gases ácidos por absorção:



ROGOFF (2011) descreve que se pode atingir eficiências de cerca de 90% na redução dos níveis de mercúrio e dioxinas quando a injeção de carvão ativado é situada entre o sistema de neutralização de gases ácidos (*Spray Dryer*) e o filtro de mangas, descrito mais adiante.

BPA (2009) comparou os níveis de emissões de 16 plantas que processam RSU, resíduos hospitalares, resíduos industriais e placas de circuito impresso. O estudo não entra nos detalhes da configuração do sistema de limpeza de gases adotado em cada unidade, mas no resultado final obtido com a comparação da análise de emissões em cada caso.

A Tabela 13 contém a relação de unidades comparadas e na Figura 23 seguinte, os níveis de dioxinas e furanos observados. Observa-se que todas as unidades atendem ao limite de emissões estabelecido pelo CONAMA (Resolução nº 316/2002), que é 0,5ng/Nm³ na mesma base utilizada nos estudos.

Tabela 13. - Unidades de gaseificação de resíduos participantes do estudo de emissões desenvolvido pela Bioenergy Producers Association.

				(continua)
Empresa	Tecnologia	Matéria Prima	Local	
S2 2000/76/EC	-	-	-	
S3 Padrão Japonês	-	-	-	
A Ebarra TwinRec	Gaseificação Leito Fluidizado / Fusão de Cinzas	420 tpd Resíduos Industriais / RSU	Kawaguchi, Japão	
B Entech Renewable Energy Technologies	Gaseificação	3,5 tpd Resíduos Hospitalares	Kuznica, Polônia	
C InEnTec	Gaseificação a Plasma	10 tpd Placas de Circuito Impresso	Richland, EUA	
D InEnTec	Gaseificação a Plasma	10 tpd Resíduos Hospitalares	Richland, EUA	
E INEOS Bio	Gaseificação / Biosíntese	1,5 tpd RSU	Fayetteville, EUA	
F International Environmental Solutions	Pirólise / Caldeira a Gás de Síntese	30 tpd RSU	Romoland, EUA	

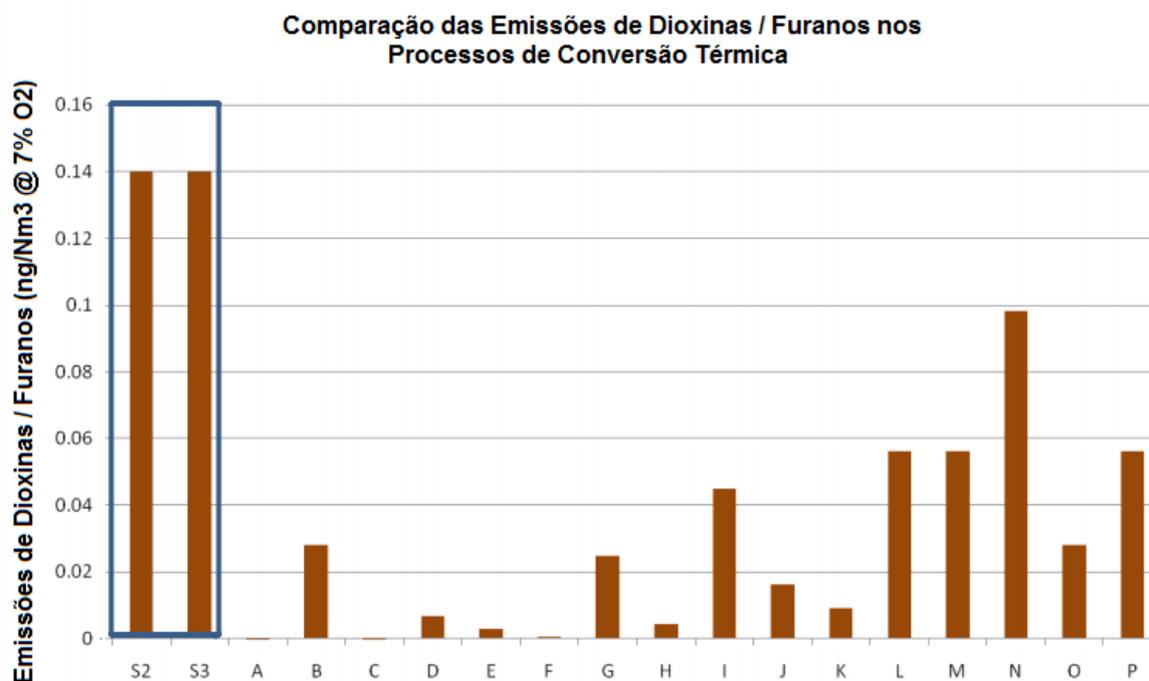
Fonte: adaptado de BPA, 2009. p.25.

Tabela 13. - Unidades de gaseificação de resíduos participantes do estudo de emissões desenvolvido pela Bioenergy Producers Association.

				(conclusão)
	Empresa	Tecnologia	Matéria Prima	Local
G	JFE Environmental Services / Thermoselect	Pirólise + Gaseificação / Combustão a Gás de Síntese e Caldeira	300 tpd RSU	Nagasaki, Japão
H	Mitsui Recycling 21 (R21)	Pirólise + Gaseificação / Turbina a vapor	400 tpd RSU	Toyohashi, Japão
I	Nippon Steel DMS	Gaseificação a Alta Temperatura	200 tpd RSU	Kazusa, Japão
J	Nippon Steel DMS	Gaseificação a Alta Temperatura	400 tpd RSU	Akita, Japão
K	Plasco Energy	Gaseificação a Plasma	110 tpd RSU	Ottawa, Canada
L	OE Gasification	Gaseificação	20 tpd RSU	Heanam, Korea
M	OE Gasification	Gaseificação	25 tpd RSU	Gangjin, Korea
N	OE Gasification	Gaseificação	45 tpd RSU	Bosung, Korea
O	OE Gasification	Gaseificação	25 tpd RSU	Pyungshan, Korea
P	OE Gasification	Gaseificação	20 tpd RSU	Hapchon, Korea

Fonte: adaptado de BPA, 2009. p.25.

Figura 23 - Comparação dos níveis de dioxinas e furanos observados em unidades tratamento térmico de resíduos.



Fonte: adaptado de BPA, 2009. p.31.

5.5.2. Desnitrificação (*Selective Non Catalytic Reduction - SNCR e Selective Catalytic Reduction - SCR*)

Os óxidos de nitrogênio ou NO_x são formados através do nitrogênio presente no RSU e no ar utilizado para completar o balanço estequiométrico durante as reações de combustão que acontecem no reator a plasma (ROGOFF, 2011).

Sua desnitrificação, ou conversão do composto para N_2 , pode ser realizada por um Sistema Redutor Não Catalítico - SRNC ou um Sistema Redutor Catalítico - SRC, sendo que este último apresenta uma maior eficiência de redução de NO_x . Em ambos os sistemas é utilizado amônia aquosa ou uréia, que são

injetados no fluxo de gás para reduzir o composto NO_x em N_2 e vapor d'água (ROGOFF, 2011).

Dados disponíveis em EPA (2013) mostram que o SRNC é efetivo a temperaturas entre 870°C e 1150°C com eficiências entre 30% e 50%, podendo ser acrescentados aditivos do fabricante para reduzir a faixa de temperatura em que as reações de redução ocorrem no equipamento. Já para o SRC, a eficiência do tratamento está situada entre 70% a 90%, com a efetividade do aparelho na faixa de temperatura do gás entre 250°C e 427°C .

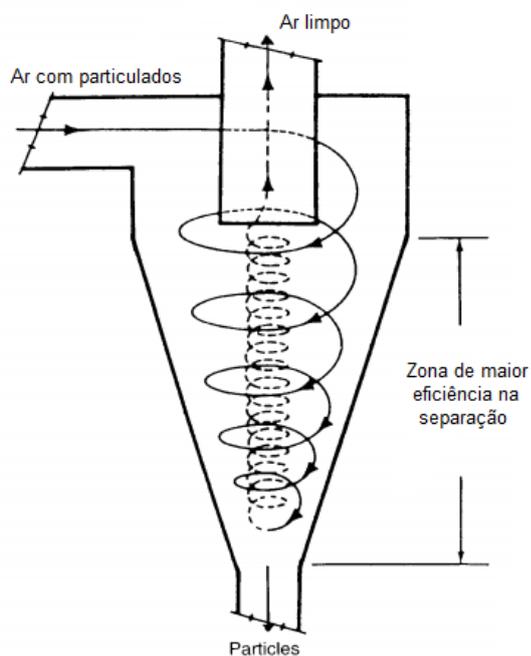
5.5.3. Controle de Particulados

O controle de particulados é um processo físico e a escolha da tecnologia adequada depende da eficiência que se deseja atingir. O dimensionamento dos equipamentos depende de parâmetros como: diâmetro dos particulados, vazão do gás, temperatura do gás, umidade do gás, entre outros (EPA, 2013).

Os equipamentos a seguir são utilizados na retenção de particulados, de acordo com cada necessidade:

- Ciclonas: coletam as partículas através da força centrífuga que é gerada quando o gás muda de direção ao passar pelo equipamento, fazendo com que as partículas continuem seu movimento e sejam separadas do fluxo de gás (Figura 24). Os ciclones são indicados para a coleta de partículas de maiores diâmetros.

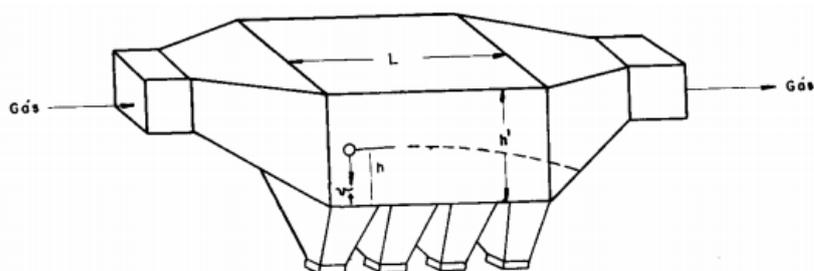
Figura 24 - Ciclone.



Fonte: adaptado de REIS, 2013.

- Coletores Gravitacionais (*Settling Chambers*): o gás passa por uma câmara onde ele é expandido e perde velocidade, fazendo com que as partículas maiores se depositem por gravidade no fundo do equipamento (Figura 25). Os coletores gravitacionais são indicados para a coleta de partículas de maiores diâmetros.

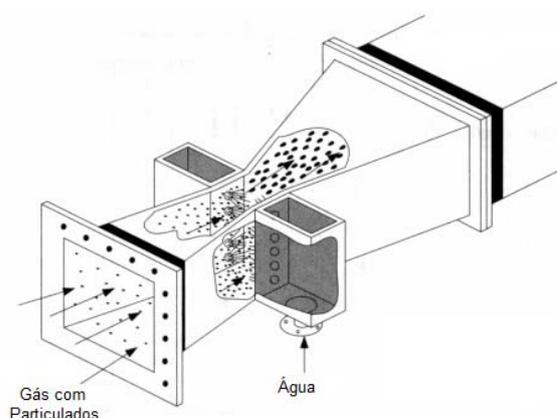
Figura 25 - Coletor gravitacional.



Fonte: REIS, 2013.

- Lavadores de gases (*venturi scrubbers*): o gás passa por uma constricção ao entrar no equipamento, o que eleva sua velocidade e pressão. Neste momento um spray de água é lançado sobre o gás, fazendo com que os particulados se aglutinem (Figura 26). Em seguida o gás é expandido e as partículas com água são recolhidas na parte de baixo do equipamento.

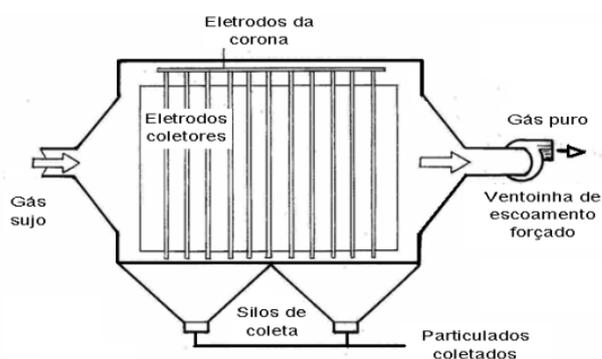
Figura 26 - Lavador de gás tipo Venturi.



Fonte: REIS, 2013.

- Precipitadores eletrostáticos (*electrostatic precipitators*): ao entrar no equipamento, as partículas passam por um campo elétrico, onde são ionizadas, para então serem coletadas em placas com carga oposta e depositadas em silos (Figura 27).

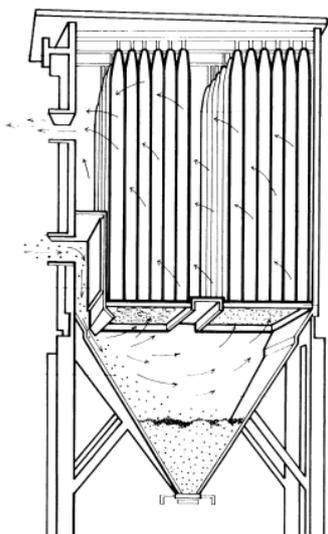
Figura 27 - Precipitador eletrostático.



Fonte: POLETTO, 2008.

- Filtro de Mangas (*Bag Filters*): retenção das partículas através de um tecido permeável ao gás, sendo as partículas coletadas em um silo através da agitação das mangas ou a passagem de um fluxo reverso de gases (Figura 28).

Figura 28 - Filtro de mangas.



Fonte: REIS, 2013

5.6. Estudos e projetos em andamento no Brasil

A lei de acesso a informação nº 12.527 foi sancionada em 18 de novembro de 2011 e permite o acesso a estudos e trabalhos técnicos realizados com o financiamento público, de forma simples e rápida através do portal <http://www.acessoainformacao.gov.br>, tornando-se um importante instrumento para universalização da informação no país.

Os estudos e projetos relacionados a seguir não têm a pretensão de esgotar os trabalhos realizados na área de recuperação energética de RSU no Brasil, que se encontram em constante crescimento, mas de listar aqueles encontrados durante o trabalho de pesquisa desta dissertação, muitos deles valendo-se desta importante Lei sancionada no Brasil.

5.6.1. Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA

O Comando da Aeronáutica através do Instituto Tecnológico da Aeronáutica firmou convênio nº 01.07.0601.02 com a FINEP (<http://www.finep.gov.br>) com vigência de 13/12/2007 a 13/12/2013 com o título “Sistema de produção de gás de síntese a partir de resíduos da indústria do petróleo por processo a plasma térmico, com geração de energia elétrica”.

O Coordenador do Projeto é o Dr. Choyu Otani e tem o objetivo de realizar prova de conceito da construção e operação de um reator a plasma capaz de transformar resíduos da indústria do petróleo em gás de síntese aplicável como combustível para produção de energia elétrica.

São parceiros no projeto a Petrobrás e a empresa Multivácuo Indústria e Comercio de Filtros Ltda.

5.6.2. Universidade Federal da Bahia - UFBA

A UFBA através da Fundação de Apoio a Pesquisa e Extensão - FAPEX-BA firmou convênio nº 01.12.0135.00 com a FINEP (<http://www.finep.gov.br>) com

vigência de 02/05/2012 a 02/05/2014 com o título “Metodologias e tecnologias para a gestão sustentável de resíduos sólidos: ênfase na redução e valorização em ambientes urbanos”.

O trabalho é desenvolvido sob coordenação da Sra. Viviana Zanta Baldochi e com a participação de co-executores e parceiros na pesquisa: a Universidade Federal do Ceará, Universidade Federal de Minas Gerais, Fundação Universidade Federal do Tocantins, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa, Fundação de Apoio a Serviços Técnicos Ensino e Fomento a Pesquisa, Fundação de Apoio Científico e Tecnológico do Tocantins.

5.6.3. Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

A Universidade Federal de Pernambuco, através da Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da UFPE, desenvolve de acordo com a chamada pública BNDES FEP nº 02/2010 a pesquisa intitulada “Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos” com prazo previsto de entrega de todos os produtos até setembro de 2012.

O trabalho é desenvolvido sob a Coordenação do Prof. Dr. José Fernando Jucá e os produtos gerados em um total de 12 (doze) são divulgados no site <http://www.tecnologiasresiduos.com.br> a medida que finalizados.

5.6.4. Reciclagem de Embalagens Longa Vida – Piracicaba-SP

As empresas Klabin, Tetrapak, Alcoa e TSL Ambiental possuem uma planta de reciclagem de embalagens longa vida em Piracicaba-SP, onde através da Gaseificação a Plasma, é separado o alumínio e o plástico que compõe a embalagens.

O investimento total da planta com capacidade de 8 mil ton/ano foi de R\$ 14 milhões segundo dados divulgados pelas empresas e a tecnologia de gaseificação a Plasma foi desenvolvida pela TSL Engenharia.

5.6.5. *Centro Tecnológico Usina Verde*

A Usina Verde S.A. é uma empresa brasileira de capital privado criada em 2001 e possui uma planta piloto para o aproveitamento energético de RSU com capacidade de 30 ton/dia instalada no campus da UFRJ.

A planta foi construída com tecnologia 100% nacional e os resíduos somente são incinerados após a separação de materiais recicláveis realizada em outra unidade.

A Usina Verde comercializa módulos para aproveitamento energético de resíduos nas capacidades de 150 ton/dia e 300 ton/dia, podendo ser agrupados para capacidades maiores, bem como informações para montagem do estudo de viabilidade.

5.6.6. *Universidade do Sul da Santa Catarina - Unisul*

A Unisul, sob coordenação da Prof^ª Anelise Leal Vieira Cubas, possui um laboratório de plasma onde foi desenvolvido um protótipo para experimentos e pesquisas, incluindo a inertização de resíduos perigosos.

5.6.7. *Empresas*

A seguir, algumas empresas que comercializam a tecnologia de gaseificação a Plasma no Brasil voltadas para o tratamento de resíduos e efluentes:

- Biogroup (www.biogroup.net.br) - São Paulo-SP;
- Ecochamas (www.ecochamas.com.br) – Resende-RJ
- Ecoplasma (www.ecoplasma.com.br) - Nova Lima-MG;
- RGT International (www.rgtinternational.com.br) – São Paulo-SP;
- TSL Ambiental (www.tslambiental.com.br) – São Paulo-SP;

5.6.8. *Prefeituras Municipais*

Várias prefeituras já iniciaram as discussões a respeito do aproveitamento energético de RSU no Brasil, representando, porém, um número inexpressivo frente aos cerca de 5.564 municípios existentes no país.

Entre os municípios brasileiros, destacam-se a prefeitura de São Bernardo do Campo e Barueri no estado de São Paulo, que já possuem os processos de contratação concluídos para a recuperação energética de seus resíduos.

Demais cidades com projetos de implantação de unidades de aproveitamento energético de RSU: Arujá-SP, Barueri-SP, Bragança Paulista-SP, Belo Horizonte-MG, Biritiba Mirim-SP, Camaçari-BA, Guararema-SP, Hortolândia-SP, Mogi das Cruzes-SP, Mineiros-GO, Penápolis-SP, Salesópolis-SP, São Bernardo do Campo-SP, São José dos Campos-SP e Taubaté-SP.

5.7. **Análise do Ambiente Tecnológico**

A maioria das tecnologias para o aproveitamento energético de RSU e o sistema de limpeza de gases são conhecidas e dominadas por empresas brasileiras. Não foram encontrados registros de empresas brasileiras que comercializassem a biodigestão anaeróbia de RSU, pouco incentivada no campo Institucional, pela ausência de separação na fonte da fração orgânica, como também do envio da mesma fração para aterros.

A gaseificação a plasma descrita neste estudo é utilizada no Brasil principalmente no tratamento de resíduos industriais e perigosos, que trazem um maior retorno financeiro ao projeto, devido a receita obtida com o tratamento destes resíduos.

A aplicação da tecnologia de gaseificação a plasma no tratamento térmico de RSU possui escala comercial em outros países, que se encontram em diferentes estágios de evolução no seu Ambiente Institucional e Organizacional descrito nos

capítulos anteriores, possuindo, no entanto, representações comerciais no Brasil com atuação ativa junto aos municípios para divulgação dos benefícios associados a tecnologia.

O tratamento biológico anaeróbio do RSU requer um controle rígido, não somente de parâmetros como temperatura e pH, mas também dos macro e micronutrientes que podem interromper o metabolismo do processo biológico e, conseqüentemente, a comercialização dos produtos finais, como energia elétrica e biofertilizante.

Cabe ainda ressaltar que, devido à variedade presente na composição do RSU, o tratamento biológico é bastante dependente da separação do resíduo orgânico dos demais componentes, seja por via mecânica, com custo e eficiência associados, ou através de separação na fonte, o que não é realidade nas maiorias das cidades brasileiras.

Observa-se que, embora haja o domínio técnico e as empresas estejam preparadas para oferecer seus produtos ao mercado de recuperação energética de RSU através das tecnologias descritas, há pontos que precisam ser fortalecidos no campo Institucional e Organizacional para que o mercado efetivamente se estabeleça.

6 - AMBIENTE COMPETITIVO

O mercado de aproveitamento energético de RSU tem como principal barreira de entrada o alto investimento necessário para implantação dos processos, não acessível para a maioria das empresas brasileiras.

A competitividade dos processos de incineração / gaseificação de RSU, principalmente a gaseificação a plasma, que requer um investimento considerável em relação às outras tecnologias, está fundamentada em bases Institucionais e Organizacionais que tem um peso maior sobre aquelas que consideram a viabilidade econômica somente com as receitas provenientes dos produtos comercializados, como energia elétrica, combustíveis (via síntese Fischer-Tropsch) e subprodutos.

YOUNG (2010) afirma, no entanto, que a viabilidade econômica do processamento de RSU, considerando a comercialização dos produtos obtidos pode ser alcançada com o ganho de escala, requerindo maiores volumes de investimento disponíveis.

Outro fator a ser levado em consideração nos estudos de viabilidade é que, salvo incentivos específicos definidos em lei, os produtos comercializados dentro do mercado relevante, que são os consumidores de energia em suas diversas formas (eletricidade, vapor e biocombustíveis), obedecem à lei do mercado de oferta e demanda, com regras bem definidas de comercialização, como, por exemplo, é o caso da energia elétrica, comercializada principalmente através dos Ambientes de Contratação Regulada – ACR e Contratação Livre – ACL, devendo os preços serem adequados a estes mercados.

A seguir são relacionadas algumas bases Institucionais, Organizacionais e situações que podem suportar a decisão de implantação de plantas de processamento de RSU em municípios no Brasil, aumentando sua competitividade:

- Estabelecimento de uma hierarquia para o tratamento de RSU que considere a utilização de aterros como última alternativa para a

disposição de RSU, principalmente os resíduos orgânicos, causadores dos gases de efeito estufa;

- Estabelecimento de instrumentos legais de incentivo a coleta seletiva de materiais e resíduos nos municípios;
- Necessidade crítica de governos locais na busca de soluções para o tratamento de resíduos devido à ausência de espaços disponíveis para a criação de aterros sanitários;
- Garantia da continuidade de fornecimento de RSU para incineração / gaseificação pelo período de vida útil da planta, que pode ser comprometida pela adoção de estratégias de redução dos resíduos gerados;
- Escolha do local apropriado para a instalação da planta de incineração / gaseificação que considere aspectos ambientais, técnicos, sociais e políticos aceitáveis (ROGOF, 2011);
- Criação de linhas de financiamento específicas para a implementação de empreendimentos de tratamento de RSU;
- Estabelecimento de parcerias público privadas para a utilização local dos produtos gerados com o processamento de RSU, considerando as vantagens com a redução dos resíduos dispostos em aterros, otimização da logística necessária para disposição do resíduo e o custo com o tratamento de passivos ambientais;
- Criação de consórcios públicos entre cidades próximas, de maneira a unir esforços para a gestão e tratamento de seus RSU;
- Realização de parcerias com plantas próximas através de contratos de longo prazo para comercialização de vapor e/ou eletricidade;

- Maior controle sobre o tratamento dos resíduos industriais gerados pelo setor produtivo de maneira a incentivar as tecnologias para tratamento de resíduos industriais, entre elas o tratamento com plasma;
- Fortalecimento e incentivo a indústria nacional responsável pelo fornecimento dos equipamentos, assegurando também a existência de uma cadeia de suprimentos local para manutenção e operação da usina de tratamento;
- Conscientização dos representantes dos municípios sobre os benefícios do tratamento adequado do RSU.

7 - ESTRATÉGIAS INDIVIDUAIS

7.1. Modelo de Estudo

Para construção do fluxo de caixa do negócio, e de maneira a visualizar a viabilidade do investimento para cada etapa e seus gargalos, os processos de aproveitamento energético de RSU, foram agrupados em unidades interdependentes com produtos próprios para comercialização, conforme descrição a seguir:

- Galpão de triagem de materiais recicláveis: comercialização de fardos de papel/papelão, plásticos e metais;
- Geração / cogeração utilizando biogás: comercialização de composto maturado biodigerido e energia elétrica;
- Geração / cogeração utilizando gás de síntese: comercialização de energia elétrica;
- Créditos de carbono: comercialização de Certificado de Emissões Reduzidas – CER devido a benefícios da reciclagem de materiais, digestão anaeróbia de resíduos biodegradáveis e gaseificação a plasma de RSU.

Além dos produtos citados, em todas as etapas foi considerado também como receita, o pagamento de compensação por tratamento do resíduo sólido urbano gerado, como alternativa para o custo existente nas cidades para manutenção de aterros, remediação de áreas contaminadas, riscos potenciais, além da logística adicional a coleta, requerida em algumas regiões no Brasil, devido a necessidade de exportação dos resíduos municipais para outras áreas com disponibilidade de espaço para o tratamento do RSU.

Os valores econômicos e cálculos foram produzidos considerando uma planta com capacidade para processar cerca de 300 ton/dia de RSU, sendo os resíduos comuns de residências e estabelecimentos comerciais direcionados primeiramente para triagem de materiais recicláveis, e aqueles resíduos puramente orgânicos não lignocelulósicos separados na fonte, direcionados para biodigestão.

A planta com capacidade para 300 ton/dia representa um valor intermediário entre os gaseificadores comercializados pela Westinghouse Plasma Corporation mostrados na Tabela 14, com capacidade de operação suficiente para tratar os resíduos, após estes passarem pelas etapas de triagem de recicláveis e biodigestão:

Tabela 14. - Modelos comerciais de gaseificadores da Westinghouse Plasma Corporation.

Modelo Gaseificador	Matéria Prima	Capacidade (ton/dia)			
		Injeção Ar		Injeção Oxigênio	
		Baixa	Alta	Baixa	Alta
	RSU	540	620	1000	1000
G65	Resíduos Perigosos	430	720	830	1000
	RSU	120	140	240	290
W15	Resíduos Perigosos	100	160	190	300
	RSU	40	50	80	100
P5	Resíduos Perigosos	30	50	60	100

Fonte: adaptado de WPC, 2013.

A escolha da escala para o cálculo da viabilidade do empreendimento foi também limitada pela disponibilidade de dados para estudo, seja pelo montante de investimento necessário em escalas maiores, reduzindo a frequência dos destes, seja pela dificuldade introduzida em se buscar referências de aplicações de larga escala para as etapas mostradas de reciclagem, tratamento biológico e tratamento térmico.

A composição gravimétrica média do RSU para definição das parcelas a serem aproveitadas em cada etapa do processo foi aquela estimada em IPEA (2012) mostrada na Tabela 15, através de estudo do diagnóstico de RSU no Brasil.

Tabela 15. - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil adotada.

Resíduos	Participação (%)
Material Reciclável	41,5%
Metais	2,5%
Aço	2,0%
Alumínio	0,5%
Papel, papelão e tetrapak	11,2%
Plástico total	11,5%
Plástico filme	7,7%
Plástico rígido	4,0%
Vidro	2,1%
Matéria Orgânica	44,2%
Outros	14,3%
Total	100,0%

Fonte: IPEA, 2012. p 4.

Neste mesmo estudo desenvolvido por IPEA (2012) foi estimada a quantidade de RSU gerado per capita para as cidades brasileiras, ou seja, a quantidade diária de resíduos estimada neste estudo seria equivalente a aquela gerada por municípios com população acima de 360 mil habitantes no Brasil de acordo com os valores da Tabela 16.

Tabela 16. - Coleta per capita de resíduos sólidos urbanos.

Municípios	Coleta per capita (kg/hab./dia)
Grandes	1,15
Médios	0,84
Pequenos	0,74
Total/média	0,88

Fonte: IPEA, 2010. p 22.

Realizada a triagem de materiais recicláveis e a separação da fração orgânica do RSU, o restante do material é enviado ao gaseificador a plasma, conforme fluxo de produção físico estimado na Tabela 17.

Tabela 17. - Fluxo físico de aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos.

Resíduos	Composição Gravimétrica	Resíduos Recebidos (ton/dia)	Resíduos Recicladados (ton/dia)	Resíduos Biodigeridos (ton/dia)	Resíduos Gaseificados (ton/dia)
Metais	2,50%	7,5	0	0	7,5
Aço	2,00%	6,0	0,3	0,0	5,7
Alumínio	0,50%	1,5	0,1	0,0	1,4
Papel, Papelão, Tetrapak	11,20%	33,6	1,7	0,0	31,9
Plástico Total	11,50%	34,5	0,5	0,0	34,0
Plástico Filme	7,70%	23,1	1,2	0,0	21,9
Plástico Rígido	4,00%	12,0	0,6	0,0	11,4
Vidro	2,10%	6,3	0,0	0,0	6,3
Matéria Orgânica	44,20%	132,6	0,0	45,1	87,5
Outros	14,30%	42,9	0,0	0,0	42,9
	100%	300,0	4,3	45,1	250,6

Fonte: IPEA, 2012. p 4. (composição gravimétrica).

Além dos valores econômicos mostrados no estudo de viabilidade, outros fatores devem ser considerados na implantação de um empreendimento para aproveitamento energético do RSU, tais como a logística necessária para escoamento dos produtos, a capacidade das vias locais para aumento do tráfego, disponibilidade de água para utilização na planta e ganhos ou perdas de escala para cada etapa do processo.

Neste estudo de viabilidade não foi considerado o custo com a implantação e manutenção de estação de tratamento de efluentes, prevendo que seja utilizada uma ETE municipal disponível próxima ao local de instalação da planta.

Também não foi considerado no estudo o custo logístico para recebimento do RSU e disposição dos rejeitos do processo, bem como o custo para aterramento destes rejeitos, principalmente particulados e materiais coletados no sistema de limpeza de gases que não podem ser aproveitados economicamente.

Em estudos mais detalhados, deve-se levar em conta ainda que algumas etapas do empreendimento possuem fases de pré-implantação específicas, tais como a obtenção de licenças ambientais, obtenção de contratos de garantia de compra, a condução de processos de aquisição e obtenção de financiamento, que se traduzem em custos e despesas de transação, também não previstos neste estudo.

Para alguns dos procedimentos mencionados no parágrafo anterior, CLARK (2010) estima cerca de 2 (dois) anos para a obtenção das permissões legais, condução dos processo de aquisições, obtenção de financiamento, 2 (dois) anos também para a construção do empreendimento e mais 1 (um) ano para sua consolidação e aceitação final.

Os valores adotados nesta dissertação foram obtidos através de estudos realizados por diversos autores em áreas comuns, onde foram utilizados os principais parâmetros para composição do fluxo de caixa no estudo de viabilidade, oferecendo uma base para a realização de análises de sensibilidade.

Todos os valores para projeção de receita, custos com financiamento, investimento com aquisição de equipamentos e operação do projeto são estimativos e não refletem os valores ofertados pelas organizações de financiamento e empresas fornecedoras de bens e equipamentos citadas, devendo ser detalhados com propostas específicas para cada empreendimento.

7.1.1. Parâmetros para Composição do Fluxo de Caixa

Os investimentos, receitas e despesas do negócio foram analisados em um fluxo de caixa descontado a moeda constante para um período de 15 anos e tributação pelo lucro real (34%), sendo o imposto convertido em crédito, quando o lucro operacional calculado no período for negativo.

O custo do capital próprio empregado foi baseado em ASSAF (2011) para a indústria de energia elétrica a um valor nominal de 15,5% para o ano de 2011, que convertido para valores reais considerando uma inflação de 6,5%, segundo dados do Banco Central do Brasil para o mesmo ano, chega-se a um valor real de 8,45%, aplicando a fórmula abaixo:

$$(1+Taxa\ Nominal\%) = (1+Taxa\ Real\%) \times (1+Taxa\ Inflação\%)$$

A receita com a venda de energia elétrica comercializada em leilões foi baseado no preço médio para empreendimentos de biomassa obtido no leilão A-5/2011 promovido pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, que alcançou um valor de R\$ 103,06/MWh.

A receita com a venda de energia elétrica comercializada no mercado livre foi baseada em estudo realizado por SAVOIA (2012), que estimou um valor de R\$ 135,00/MWh para o preço da energia incentivada durante uma projeção de preços para contratos firmados naquele mercado.

Os indicadores econômicos utilizados, a saber, o câmbio de moedas estrangeiras (R\$/US\$ e R\$/€\$) e o Índice Geral de Preços do Mercado IGP-M (FGV), foram estimados baseados em valores médios divulgados.

Para os valores envolvidos no financiamento de capital de terceiros, foram utilizados como referência, dados das linhas de crédito do Banco Nacional do Desenvolvimento BNDES disponíveis para empreendimentos deste porte.

O resumo dos parâmetros para composição do fluxo de caixa pode ser conferido na Tabela 18 mostrada a seguir.

Tabela 18. - Parâmetros para composição do fluxo de caixa.

PARÂMETROS	DADO
Energia Elétrica	
Energia Elétrica ACR (R\$ / MWh)	103,06
Energia Elétrica ACL (R\$ / MWh)	135,00
Garantia física negociada em Leilão	20%
Garantia física negociada no Mercado Livre	80%
Indicadores Econômicos	
IGP-M / ano	7,0%
Câmbio R\$ / US\$	2,06
Câmbio R\$ / €\$	2,70
Impostos	
Impostos sobre o Lucro Operacional	34%
IR	25%
CSLL	9%
Financiamento do Empreendimento	
% Capital Próprio	20%
% Capital Terceiros	80%
Juros (% ao semestre)	4,83%
Juros (% a.a)	9,90%
TJLP	6,00%
Remuneração do empréstimo	0,90%
Taxa de Risco de Crédito	3,00%
Taxas de Financiamento sobre o empréstimo	1,90%
Encargos Comissão de Estudo (máx R\$ 841.927,29)	0,20%
Encargos Comissão de Estruturação (máx R\$ 8.419.277,68)	0,20%
Encargo confirmação da carta de crédito	1,50%
Custo do Capital Próprio (% a.a)	8,45%
Nº de pagamentos / ano (amortização SAC)	2

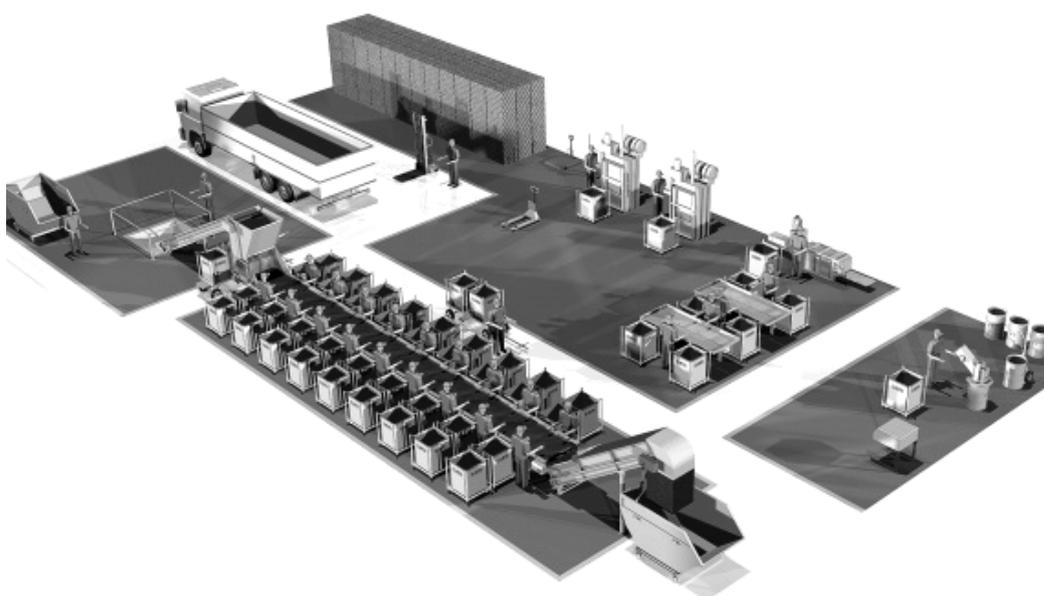
Fonte: dados adotados pelo autor / EPE, 2011 / SAVOIA, 2012.

7.1.2. Triagem de Materiais Recicláveis

O investimento necessário para montagem do galpão de triagem de materiais foi baseado nos dados fornecidos por BIGÉLLI (2013) e KUBITZ (2013), referente a uma central de triagem instalada no município de São José dos Pinhais-PR, cujo layout é mostrado na Figura 29, possuindo uma capacidade para processar 150 ton/mês de RSU (5,8 ton/dia) com aproximadamente 32% de rejeitos, contando com um efetivo direto de 41 pessoas e indireto de 06 pessoas.

A central de triagem e valorização de resíduos recicláveis – CTVRR de São José dos Pinhais-PR possui área total de 1.500 m² e área coberta de 900 m², conforme *layout* mostrado na figura a seguir. Para processamento dos resíduos, foram mobilizados os seguintes equipamentos: 02 (duas) prensas verticais (papel e plástico), 01 (uma) prensa horizontal (metal), 01 (uma) esteira de triagem, 02 (duas) esteiras de elevação, 01 (uma) empilhadeira elétrica, 02 (duas) empilhadeiras manuais, 01 (um) funil de alimentação, 01 (uma) fragmentadora de papel, 01 (um) display balança, 01 (uma) balança eletrônica e demais acessórios como *big bags*, carros de movimentação, mesas de triagem e *containers*.

Figura 29 - *Layout* central de triagem de São José dos Pinhais-PR.



Para se chegar nos valores a serem investidos, estimou-se um custo do terreno de R\$ 700/m² e despesas com construção civil de R\$ 2500/m², tomando como referência dados de imóveis disponíveis na grande São Paulo. O custo com equipamentos foi estimado em cerca de R\$ 370.000,00, calculado através de orçamentos de fornecedores.

Para o valor dos produtos comercializados e receitas esperadas, foi utilizada estimativa média baseada nos dados divulgados pelo CEMPRE (2013) e CICLOSOFT (2012).

As despesas anuais com pessoal foram agrupadas em despesas com mão de obra direta - MOD e despesas com mão de obra indireta - MOI, ambas referenciadas através do salário mínimo nacional.

A manutenção dos equipamentos mobilizados foi estimada em cerca de 5% do valor de aquisição dos mesmos.

O resumo dos cálculos com os investimentos, receitas e despesas, bem como os parâmetros utilizados para o cálculo, podem ser verificados nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19. - Investimentos, receitas e despesas previstas para o cálculo do fluxo de caixa para o aproveitamento de materiais recicláveis.

Investimentos

Descrição	Valor Total
Terreno	R\$ 1.050.000,00
Capital próprio	R\$ 824.000,00
Capital de terceiros	R\$ 3.296.000,00
Taxas de financiamento	R\$ 62.624,00
	R\$ 5.232.624,00

Receitas

Descrição	Valor ano
Fardo de Papel / Papelão	R\$ 102.735,36
Fardo de Latas de Aço	R\$ 25.272,00
Fardo de Latas de Alumínio	R\$ 58.500,00
Fardo de Plástico Filme	R\$ 63.063,00
Fardo de Plástico Rígido	R\$ 243.360,00
Fardo de Plástico PET	R\$ 270.445,50
Tratamento de resíduos	R\$ 108.014,40
	R\$ 871.390,26

Despesas

Descrição	Valor ano
Despesas com Mão de Obra Direta	R\$ 530.441,60
Despesas com Mão de Obra Indireta	R\$ 210.882,88
Custos com Manutenção	R\$ 18.500,00
	R\$ 759.824,48

Fonte: dados calculados pelo autor / BIGÉLLI, 2013 / KUBITZ, 2013 / CEMPRE, 2013 / CICLOSOFT, 2012.

Tabela 20. - Parâmetros para fluxo de caixa do aproveitamento de materiais recicláveis.

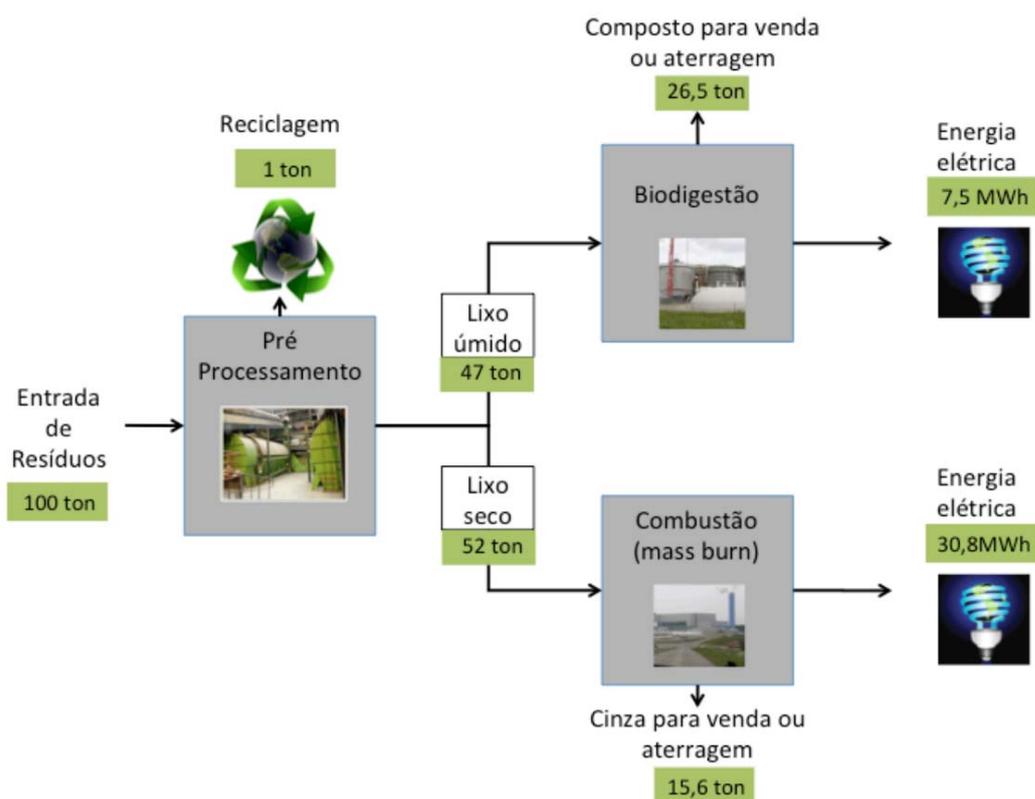
PARÂMETROS	DADO
RSU coletado em Ton/dia	300
RSU destinado a reciclagem (com perdas)	5,7
Perdas na produção de reciclados (%)	32%
Construção, Montagem e Manutenção	
Área total (m ²)	1500
Terreno (R\$ / m ²)	700,00
Equipamentos (R\$)	370.000,00
Construção Civil (R\$ / m ²)	2.500,00
% do investimento gasto com manutenção (% / ano)	5%
Custos com Mão de Obra	
Salário Mínimo Nacional (SM)	R\$ 622,00
Encargos Sociais Trabalhistas	60%
Mão de Obra Direta	41
Salário MOD (nº de SM)	1,0
Salário MOI - Engenheiro (nº de SM)	8,5
Salário MOI - Técnico de Segurança (nº de SM)	3,0
Salário MOI - Líder de Reciclagem (nº de SM)	1,5
Salário MOI - Porteiro (nº de SM)	1,0
Salário MOI - Auxiliar Adm. (nº de SM)	1,3
Produtos Comercializados	
Fardo de Papel / Papelão (R\$ / ton)	196,00
Fardo de Latas de Aço (R\$ / ton)	270,00
Fardo de Latas de Alumínio (R\$ / ton)	2500,00
Fardo de Plástico Filme (R\$ / ton)	175,00
Fardo de Plástico Rígido (R\$ / ton)	1300,00
Fardo de PET (R\$ / ton)	1675,00
Compensação pelo tratamento de resíduos (R\$/ton)	80,0
Dias produtivos (dias/mês)	26

Fonte: dados calculados pelo autor / BIGÉLLI, 2013 / KUBITZ, 2013 / CEMPRE, 2013 / CICLOSOFT, 2012.

7.1.3. Tratamento Biológico (Biodigestão Anaeróbia)

Os dados adotados para construção do modelo de tratamento biológico de RSU foi baseado em estudo realizado pela Prefeitura Municipal de São José dos Campos-SP no ano de 2011, quando foi lançado o edital para consulta pública sobre a construção e gestão do sistema de recuperação energética a partir do tratamento de RSU. A Figura 30 mostra o Balanço de Massa previsto no Edital de Consulta Pública lançado.

Figura 30 - Balanço de massa e taxas de conversão energética do sistema de recuperação energética a partir do tratamento de resíduos sólidos urbanos adotado pela Prefeitura Municipal de São José dos Campos-SP.



Fonte: SJC, 2011. p 6.

No ano de 2010, antes da publicação do edital, a Prefeitura realizou visitas técnicas a plantas em funcionamento nos países do Canadá, Bélgica e Holanda, que fundamentaram a escolha do processo e o cálculo da conversão

energética adotada de 0,159 MWh/ton de resíduos úmidos (separados na fonte), já descontado o consumo interno de energia da planta (30%).

Para o valor de comercialização do composto maturado, foi utilizado dado estudado por REICHERT (2005), corrigido pelo Índice Geral de Preços Mercado - IGP-M.

O resumo dos cálculos com os investimentos, receitas e despesas, bem como os parâmetros utilizados para o cálculo, podem ser verificados nas Tabelas 21 e 22.

Tabela 21. - Investimentos, receitas e despesas previstas para o cálculo do fluxo de caixa para o aproveitamento energético da fração orgânica do resíduo sólido urbano.

Investimentos

Descrição	Valor Total
Terreno	R\$ 4.200.000,00
Capital próprio	R\$ 2.979.921,70
Capital de terceiros	R\$ 11.919.686,81
Taxas de financiamento	R\$ 226.474,05
	R\$ 19.326.082,56

Receitas

Descrição	Valor ano
Composto Maturado	R\$ 293.639,74
Energia Elétrica	R\$ 285.800,35
Tratamento de Resíduos	R\$ 1.118.083,20
	R\$ 1.697.523,29

Despesas

Descrição	Valor ano
Despesas	R\$ 259.632,68
	R\$ 259.632,68

Fonte: dados calculados pelo autor / SJC, 2011 / REICHERT, 2005.

Tabela 22. - Parâmetros para fluxo de caixa para o aproveitamento energético da fração orgânica do resíduo sólido urbano.

PARÂMETROS	DADO
Matéria Prima	
Resíduos orgânicos (ton/dia)	45,1
Manutenções, Indisponibilidade de RSU e outros (dias / ano)	55
Produção de Biogás e Energia	
Energia Líquida Produzida (MWh/ton)	0,159
Potência Gerada (MW)	0,299
Comercialização de Composto Maturado	
Composto maturado gerado para comercialização (%)	56,0%
Preço de venda do composto maturado (R\$/ton)	37,5
Outras Receitas	
Compensação pelo tratamento de resíduos (R\$/ton)	80,0
Custos Operação & Manutenção - O & M	
Custos O & M Biodigestor (R\$/ano)	259.633
Investimentos	
Biodigestor (R\$)	5.499.609
Área necessária (m ²)	6.000
Terreno (R\$/m ²)	700
Construção Civil (R\$)	9.400.000

Fonte: dados adotados pelo autor / SJC, 2011 / REICHART, 2005.

7.1.4. Gaseificação a Plasma

Entre as etapas mostradas neste estudo de viabilidade, a gaseificação a plasma de RSU é o processo com o maior custo e investimento envolvido, devendo-se ter em conta que o principal benefício a ser atingido é a redução dos resíduos em volume e a conversão destes em compostos que ofereçam menor risco ao meio ambiente, evitando a contaminação de lençóis freáticos, geração de gases de efeito estufa e passivos ambientais.

Os dados deste estudo foram baseados em um sistema de gaseificação a plasma de resíduos comercializado pela Westinghouse Plasma Corporation com capacidade para tratar 260 ton/dia de resíduos, onde foi também incluído o tratamento de resíduos industriais, como parte da matéria-prima tratada, de maneira a viabilizar o empreendimento.

Os dados apresentados por CORTEZ (2008) sugerem que o tratamento de resíduos industriais no Brasil pode se tornar um mercado atraente, desde que haja a efetiva fiscalização de sua geração e correta destinação junto aos pólos industriais do país.

A taxa de conversão de energia elétrica utilizada foi baseada em CIRCEO (2010), com um valor de 0,816 MWh/ton de resíduos, capaz de produzir até 9 MW de potência (líquida) no sistema utilizado, o suficiente para abastecer cerca de 13.500 residências, com um consumo estimado de 220 kWh/mês.

Em estudos específicos, deve-se levar em conta que a taxa de conversão de energia elétrica pode variar em função da origem do RSU utilizado, de acordo com o teor de matéria orgânica presente ou do método de separação utilizado para os resíduos.

Estimou-se ainda, baseado em CLARK (2010), que o sistema irá parar cerca de 55 dias/ano, de maneira a cobrir paradas para manutenções, ausências de matéria-prima e outros eventos não previstos.

O resumo dos cálculos com os investimentos, receitas e despesas, bem como os parâmetros utilizados para o cálculo, podem ser verificados nas Tabelas 23 e 24.

Tabela 23. - Investimento, receitas e despesas para fluxo de caixa para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos através da gaseificação a plasma.

Investimentos

Descrição	Valor Total
Terreno	R\$ 21.000.000,00
Transmissão de Energia	R\$ 6.000.000,00
Capital próprio	R\$ 40.000.000,00
Capital terceiros	R\$ 160.000.000,00
Taxas de Financiamento	R\$ 3.040.000,00
	R\$ 230.040.000,00

Receitas

Descrição	Valor ano
Energia Elétrica	R\$ 8.458.759,80
Recuperação de metais e agregados	R\$ 1.923.076,92
Tratamento de Resíduos Industriais	R\$ 2.480.000,00
Tratamento de Resíduos Municipais	R\$ 6.200.000,00
	R\$ 19.061.836,72

Despesas

Descrição	Valor ano
Custo Fixo	R\$ 7.240.000,00
Custo Variável	R\$ 5.596.153,85
	R\$ 12.836.153,85

Fonte: dados calculados pelo autor / CLARK, 2010 / CIRCEO, 2010 / RGT, 2012 / TOMITA, 2013.

Tabela 24. - Parâmetros para fluxo de caixa para o aproveitamento energético através da gaseificação a plasma.

PARÂMETROS	DADO
Matéria Prima	
Resíduo Sólido urbano coletado em ton/dia	250
Resíduos industriais coletados em ton/dia	10
Manutenções, Indisponibilidade de RSU e outros (dias / ano)	55
Produção de Energia Elétrica	
Energia Elétrica Gerada (MWh) por ton de RSU	0,816
Investimentos	
Custo de transmissão em 13,8 kV (R\$ / km)	600.000,0
Distância estimada para conexão (km)	10,0
Área necessária (m ²)	30.000
Custo do terreno (R\$ / m ²)	700,00
CAPEX - produção de Syngás (R\$)	200.000.000,00
Despesas	
Custo Fixo (R\$ / ano)	7.240.000,00
Custo Variável (R\$ / ton)	72,21
Outras Receitas	
Recuperação de metais e agregados (R\$/ton de RSU recebido)	24,81
Receita com o tratamento de resíduos industriais (R\$/ton)	800,00
Compensação pelo tratamento de resíduos municipais (R\$/ton)	80,0

Fonte: dados adotados pelo autor / CLARK, 2010 / CIRCEO, 2010 / RGT, 2012 / TOMITA, 2013.

7.1.5. Créditos de Carbono

O investimento necessário para elaboração do Documento de Concepção do Projeto (PDD) e seu trâmite até a aprovação foi estimado em US\$ 350.000,00.

As receitas com a comercialização de carbono foram valorizadas considerando o preço negociado na Bolsa de Mercadorias & Futuro – BM&F através

do leilão nº 001/12, que atingiu um valor de €\$3,30/tCO₂eq para os créditos de carbono.

Os benefícios líquidos alcançados com a reciclagem dos materiais foram baseados em IPEA (2010), que apresentou o cálculo dos custos ambientais associados à emissão de gases de efeito estufa para a produção primária da matéria-prima virgem e os subtraiu dos custos ambientais associados a emissão de gases de efeito estufa para a reciclagem, chegando nos valores a seguir:

Tabela 25. - Benefício líquido ambiental da reciclagem de materiais.

Materiais	Custos ambientais associados à emissão de GEE para produção primária (tCO ₂ eq/t)	Custos ambientais associados à emissão de GEE para reciclagem (tCO ₂ eq/t)	Benefício líquido da reciclagem (tCO ₂ eq/t)
Aço	1,46	0,02	1,44
Alumínio	5,1	0,02	5,08
Celulose	0,28	0,01	0,27
Plástico	1,94	0,41	1,53

Fonte: IPEA, 2010. p 17.

O benefício líquido com a redução das emissões de gases de efeito estufa para o tratamento anaeróbico de RSU foi baseado em SMITH et al (2001), através de um sistema de geração / cogeração de energia, onde chega-se a um valor de 0,193 tCO₂eq/ton de resíduos orgânicos separados na fonte, não considerando as emissões ocasionadas pelo transporte dos resíduos.

Para a gaseificação a plasma, o benefício líquido da redução das emissões de gases de efeito estufa foi baseado em estudo independente contratado pela empresa Advanced Plasma Power e divulgado na edição nº 09/2009 da publicação *British Bioenergy News*, que chega a um montante de 0,543 tCO₂eq/ton de resíduo tratado.

Para as despesas de operação & manutenção, foram estimados custos com pessoal de R\$ 42.000,00/ano para monitoramento das emissões de acordo com a metodologia adotada e R\$ 20.000,00/ano para acreditação dos Certificados de Emissões Reduzidas – CER.

Considerando os valores envolvidos no cálculo das emissões reduzidas para cada etapa de processamento de RSU e o valor de comercialização adotado, chega-se a um número estimado de 46 mil Certificados de Emissões Reduzidas – CER emitidos anualmente.

O resumo dos cálculos com os investimentos, receitas e despesas, bem como os parâmetros utilizados para o cálculo, podem ser verificados nas Tabelas 26 e 27.

Tabela 26. - Investimento, receitas e despesas para fluxo de caixa de geração de créditos de carbono.

Investimentos

Descrição	Valor Total
Capital próprio	R\$ 144.200,00
Capital de terceiros	R\$ 576.800,00
Taxas de financiamento	R\$ 10.959,20
	R\$ 731.959,20

Receitas

Descrição	Valor ano
Benefícios da reciclagem de plásticos	R\$ 9.665,57
Benefícios da reciclagem de alumínio	R\$ 1.059,15
Benefícios da reciclagem de papel / papelão	R\$ 1.260,97
Benefícios de reciclagem de aço	R\$ 1.200,93
Benefícios da digestão anaeróbia	R\$ 24.033,62
Benefícios da gaseificação a plasma	R\$ 389.953,28
	R\$ 427.173,52

Despesas

Descrição	Valor ano
Despesas	R\$ 62.000,00
	R\$ 62.000,00

Fonte: dados calculados pelo autor / BM&F, 2012 / IPEA, 2010 / SMITH et al, 2001 / BBN, 2009.

Tabela 27. - Parâmetros para fluxo de caixa de geração de créditos de carbono.

PARÂMETROS	DADO
Elaboração de PDD e trâmite para aprovação (US\$)	350.000,00
Valor de comercialização (€\$ / tCO ₂ eq)	3,30
Benefício líquido da reciclagem para plásticos (tCO ₂ eq / ton)	1,53
Benefício líquido da reciclagem para alumínio (tCO ₂ eq / ton)	5,08
Benefício líquido da reciclagem para papel (tCO ₂ eq / ton)	0,27
Benefício líquido da reciclagem para aço (tCO ₂ eq / ton)	1,44
Benefício líquido da gaseificação a plasma (tCO ₂ eq / ton)	0,543
Benefício líquido da digestão anaeróbia (tCO ₂ eq / ton)	0,193
Custo O & M - monitoramento (R\$ / ano)	42.000,00
Custo O & M - acreditação (R\$ / ano)	20.000,00

Fonte: dados adotados pelo autor / BM&F, 2012 / IPEA, 2010 / SMITH et al, 2001 / BBN, 2009.

7.2. Fluxo de Caixa Descontado

Com os parâmetros mostrados em cada etapa do processo, chega-se a um VPL negativo de cerca de R\$ 190 milhões, sendo o processo de comercialização de créditos de carbono, único que apresenta VPL positivo (Tabela 28).

Tabela 28. - Valor presente líquido para cada etapa do processo de tratamento de resíduos sólidos urbanos.

ETAPA	VPL (R\$ milhões)
Triagem de Materiais Recicláveis	-3,5
Tratamento Anaeróbico de Resíduos	-2,2
Gaseificação a Plasma de Resíduos	-138,1
Créditos de Carbono	1,3
Processo geral	-192,2

Fonte: dados calculados pelo autor.

A etapa de triagem de materiais recicláveis mostrada é caracterizada pela utilização de mão de obra intensiva e um desbalanceamento do custo da mão de obra direta com a mão de obra indireta, chegando esta última a quase 30% do custo total com mão de obra no empreendimento.

É comum também neste tipo de atividade, o empreendedor, organizado através de cooperativa de catadores, ser beneficiado com a doação de terreno, construção civil do galpão, além de impostos municipais, que podem contribuir para o retorno financeiro e viabilidade do empreendimento.

Na Tabela 29 é mostrado o fluxo de caixa construído para análise financeira da etapa de triagem de materiais recicláveis.

Tabela 29. - Fluxo de caixa a moeda constante para a etapa de triagem de materiais recicláveis.

Triagem de Materiais Recicláveis (valores em R\$ milhões)

Itens	0	1	2	3	4	5	6	7
Receita		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Despesas		-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
Depreciações		-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
Juros		-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
Lucro operacional		-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3
Impostos		0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Amortizações		-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
Depreciações		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Investimentos	-1,9							
Fluxo de Caixa	-1,9	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2

Itens	8	9	10	11	12	13	14	15
Receita	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Despesas	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
Depreciações	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
Juros	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0
Lucro operacional	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
Impostos	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Amortizações	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
Depreciações	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Investimentos								
Fluxo de Caixa	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1

Fonte: dados calculados pelo autor.

Não foram encontradas referências nacionais de equipamentos para biodigestão da parcela orgânica de RSU em escala comercial, sendo adotado os dados pesquisados por SJC (2011) para estimativa do fluxo de caixa conforme Tabela 30 a seguir.

Tabela 30. - Fluxo de caixa a moeda constante para a etapa de tratamento anaeróbico de resíduos.

Tratamento Anaeróbico de Resíduos (valores em R\$ milhões)								
Itens	0	1	2	3	4	5	6	7
Receita		1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Despesas		-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
Depreciações		-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3
Juros		-1,1	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,7
Lucro operacional		-1,0	-0,9	-0,8	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5
Impostos		0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
Amortizações		-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
Depreciações		1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Investimentos	-3,2							
Fluxo de Caixa	-3,2	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
Itens	8	9	10	11	12	13	14	15
Receita	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Despesas	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
Depreciações	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3
Juros	-0,6	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1
Lucro operacional	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1
Impostos	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Amortizações	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
Depreciações	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Investimentos								
Fluxo de Caixa	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6

Fonte: dados calculados pelo autor.

O fluxo de caixa montado para a etapa de gaseificação a plasma na Tabela 31 parte da premissa de que os custos fixos e as variáveis estão otimizados e, neste caso, a viabilidade desta etapa torna-se bastante dependente das receitas estimadas para o processo. A receita obtida com o tratamento de resíduos industriais foi baseada em TOMITA (2013), sendo uma variável fundamental para ser assegurada em casos reais.

A obtenção de valores confiáveis para a receita estimada com a comercialização de energia elétrica pode ser mais crítica, uma vez que esta compete com outras fontes de energia renováveis, de menor custo de implantação e igualmente beneficiadas por tarifas incentivadas de energia definidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica em ANEEL (2004).

Tabela 31. - Fluxo de caixa a moeda constante para a etapa de gaseificação a plasma de resíduos.

Gaseificação a Plasma de Resíduos (valores em R\$ milhões)

Itens	0	1	2	3	4	5	6	7
Receita		19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1
Despesas		-12,8	-12,8	-12,8	-12,8	-12,8	-12,8	-12,8
Depreciações		-13,7	-13,7	-13,7	-13,7	-13,7	-13,7	-13,7
Juros		-15,2	-14,2	-13,1	-12,1	-11,1	-10,1	-9,0
Lucro operacional		-22,7	-21,7	-20,7	-19,6	-18,6	-17,6	-16,5
Impostos		7,7	7,4	7,0	6,7	6,3	6,0	5,6
Amortizações		-10,7	-10,7	-10,7	-10,7	-10,7	-10,7	-10,7
Depreciações		13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7
Investimentos	-70,0							
Fluxo de Caixa	-70,0	-11,9	-11,2	-10,6	-9,9	-9,2	-8,5	-7,8
Itens	8	9	10	11	12	13	14	15
Receita	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1
Despesas	-12,8	-12,8	-12,8	-12,8	-12,8	-12,8	-12,8	-12,8
Depreciações	-13,7	-13,7	-13,7	-13,7	-13,7	-13,7	-13,7	-13,7
Juros	-8,0	-7,0	-5,9	-4,9	-3,9	-2,8	-1,8	-0,8
Lucro operacional	-15,5	-14,5	-13,4	-12,4	-11,4	-10,3	-9,3	-8,3
Impostos	5,3	4,9	4,6	4,2	3,9	3,5	3,2	2,8
Amortizações	-10,7	-10,7	-10,7	-10,7	-10,7	-10,7	-10,7	-10,7
Depreciações	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7
Investimentos								
Fluxo de Caixa	-7,2	-6,5	-5,8	-5,1	-4,4	-3,8	-3,1	-2,4

Fonte: dados calculados pelo autor.

A possibilidade de comercializar créditos de carbono é, sem dúvida, um importante instrumento para auxílio na viabilização de empreendimentos deste porte, o que contribui também para a aprovação do Documento de Concepção do Projeto (PDD) pelas autoridades competentes. Na Tabela 32 é mostrado o fluxo de caixa para esta etapa do processo.

Tabela 32. - Fluxo de caixa a moeda constante para a etapa de obtenção de créditos de carbono.

Créditos de Carbono (valores em R\$ milhões)								
Itens	0	1	2	3	4	5	6	7
Receita		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Despesas		-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Depreciações		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Juros		-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lucro operacional		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Impostos		-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Amortizações		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Depreciações		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Investimentos	-0,2							
Fluxo de Caixa	-0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Itens	8	9	10	11	12	13	14	15
Receita	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Despesas	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Depreciações	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Juros	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lucro operacional	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
Impostos	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Amortizações	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Depreciações	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Investimentos								
Fluxo de Caixa	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Fonte: dados calculados pelo autor.

No fluxo de caixa mostrado na Tabela 33 são mostrados os valores obtidos quando agrupadas as etapas anteriores, servindo como referência para a construção dos cenários para análise da viabilidade do empreendimento.

Tabela 33. - Fluxo de caixa a moeda constante para todas as etapas.

Processo geral (valores em R\$ milhões)								
Itens	0	1	2	3	4	5	6	7
Receita		22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1
Despesas		-13,9	-13,9	-13,9	-13,9	-13,9	-13,9	-13,9
Depreciações		-15,3	-15,3	-15,3	-15,3	-15,3	-15,3	-15,3
Juros		-16,7	-15,6	-14,4	-13,3	-12,2	-11,0	-9,9
Lucro operacional		-23,9	-22,7	-21,6	-20,5	-19,3	-18,2	-17,1
Impostos		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Amortizações		-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7
Depreciações		15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3
Investimentos	-75,3							
Fluxo de Caixa	-75,3	-20,3	-19,2	-18,0	-16,9	-15,8	-14,6	-13,5
Itens	8	9	10	11	12	13	14	15
Receita	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1
Despesas	-13,9	-13,9	-13,9	-13,9	-13,9	-13,9	-13,9	-13,9
Depreciações	-15,3	-15,3	-15,3	-15,3	-15,3	-15,3	-15,3	-15,3
Juros	-8,8	-7,6	-6,5	-5,4	-4,2	-3,1	-2,0	-0,8
Lucro operacional	-15,9	-14,8	-13,7	-12,5	-11,4	-10,3	-9,1	-8,0
Impostos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Amortizações	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7
Depreciações	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3
Investimentos								
Fluxo de Caixa	-12,4	-11,2	-10,1	-9,0	-7,8	-6,7	-5,6	-4,4

Fonte: dados calculados pelo autor.

De maneira a verificar como o processo de tratamento pode ser viabilizado, a seguir são mostradas algumas análises de sensibilidade com os parâmetros a seguir:

- Tarifa de energia elétrica comercializada (R\$/MWh);
- Compensação pelo tratamento de RSU (R\$/ton);
- Porcentagem do capital próprio investido (R\$);
- Taxa de juros do capital de terceiros (% a.a);
- Valor de comercialização dos créditos de carbono (€/tCO₂eq);
- Elaboração do PDD e trâmite para aprovação (US\$).

Com exceção das variáveis ligadas a obtenção de créditos de carbono, todas as demais podem ser objeto de políticas de governo estabelecidas no campo institucional e suportadas por um fortalecimento no campo organizacional.

Outros parâmetros não analisados neste estudo de sensibilidade, como as carências para o pagamento dos empréstimos tomados, descontos fornecidos nos impostos municipais e prazos para construção do empreendimento, também são fatores que devem ser observados em condições mais específicas para cada projeto.

7.3. Cenário 01 – Tarifas de Energia Elétrica e Tratamento de Resíduos

Nesta análise considerou-se que o terreno para montagem da planta foi cedido pelo governo local para exploração dos resíduos municipais e a instalação do parque industrial será próxima a um ponto de conexão existente, não sendo necessária a construção de linhas de transmissão.

A planta utilizará um misto de RSU e resíduos industriais na proporção 70/30, não ultrapassando a capacidade de processamento do reator a plasma de 260 ton/dia, baseado em TOMITA (2013), representante no Brasil dos equipamentos comercializados pela Westinghouse Plasma Corporation.

Nesta análise, o valor presente líquido - VPL (R\$ milhões) foi submetido a variações da tarifa de energia elétrica resultante da garantia física negociada no ambiente de contratação regulada - ACR e ambiente de contratação livre – ACL, como também da tarifa de tratamento dos resíduos municipais, o equivalente a tarifa de destinação de resíduo (*Tipping Fee*) praticada em outros países.

Figura 31 - Análise de sensibilidade para VPL (R\$ milhões) - tarifa de energia elétrica x tarifa de tratamento dos resíduos.

		Tarifa de energia elétrica resultante da garantia física negociada no ACR e ACL (R\$/MWh)									
		100	129	140	160	180	200	220	240	260	280
Tarifa tratamento dos resíduos municipais (R\$/ton)	60	-59,4	-44,7	-39,0	-29,3	-19,8	-10,7	-2,0	6,2	13,9	21,4
	65	-56,6	-42,1	-36,4	-26,7	-17,4	-8,4	0,1	8,3	15,9	23,4
	70	-53,9	-39,4	-33,8	-24,2	-15,0	-6,1	2,3	10,3	17,9	25,3
	75	-51,2	-36,8	-31,3	-21,8	-12,6	-3,8	4,5	12,4	19,8	27,3
	80	-48,5	-34,2	-28,7	-19,3	-10,2	-1,6	6,6	14,3	21,8	29,3
	85	-45,8	-31,7	-26,2	-16,9	-7,9	0,6	8,7	16,3	23,8	31,3
	90	-43,2	-29,1	-23,7	-14,5	-5,6	2,8	10,8	18,3	25,8	33,2
	95	-40,5	-26,6	-21,3	-12,1	-3,4	5,0	12,8	20,2	27,7	35,2
	100	-37,9	-24,1	-18,8	-9,7	-1,1	7,0	14,7	22,2	29,7	37,2
	105	-35,3	-21,6	-16,4	-7,5	1,1	9,1	16,7	24,2	31,7	39,1
	110	-32,7	-19,2	-14,0	-5,2	3,2	11,2	18,7	26,2	33,6	41,1

Fonte: dados calculados pelo autor.

Nos cenários seguintes serão utilizados os valores de R\$200/MWh e R\$85/ton, que tornam o VPL positivo, conforme mostrado na Figura 31.

7.4. Cenário 02 – Equity e Taxa de Juros

Neste cenário foi considerada a instalação do empreendimento em cidades com alto índice de coleta seletiva de seus resíduos, que hoje está presente em somente cerca de 766 municípios no Brasil, segundo dados de CICLOSOFT (2012). A instalação do empreendimento em cidades com alto índice de coleta seletiva tornaria a tarefa de triagem de materiais recicláveis mais eficiente, reduzindo os custos com mão de obra direta - MOD, aqui estimado em cerca de 20% para efeito de cálculo.

Outros parâmetros que poderiam aumentar a eficiência de conversão energética do processo, como a utilização de ciclo combinado conforme aponta DODGE (2012), e diferentes tipos de oxidantes para a gaseificação a plasma descritos por CLARK (2010), não foram aqui considerados, em razão da implicação em maiores investimentos, além daqueles previstos inicialmente.

Considerou-se ainda neste cenário os valores de R\$ 200/MWh e R\$ 85/ton identificados no cenário anterior para os parâmetros de venda da energia elétrica e tratamento de RSU, que tornaram o VPL positivo para a implantação do empreendimento.

Tendo em vista os dados ajustados para este cenário, foram avaliados os valores do VPL (R\$ milhões) para as variações na % capital próprio (*equity*) investido, e taxa de juros (% a.a) cobrada pelo órgão financiador, resultando nos dados mostrados na Figura 32.

Os ajustes dos dados neste Cenário referente à etapa de reciclagem contribuíram inicialmente para elevar o VPL em R\$ 0,6 milhões. O aumento do VPL a partir deste ponto converge no sentido da redução da taxa de juros e a porcentagem de capital próprio investido, que foi fixado em 20%, conforme dados obtidos no BNDES e descrito no capítulo deste estudo sobre o Ambiente Institucional pesquisado.

Figura 32 - Análise de sensibilidade para VPL (R\$ milhões) - porcentagem de capital próprio x taxa de juros.

	Porcentagem de capital próprio investido (%)									
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
6,0%	34,2	29,2	24,2	19,3	14,3	9,3	4,4	-0,6	-5,6	-10,5
6,5%	30,6	26,0	21,4	16,8	12,1	7,5	2,9	-1,7	-6,3	-10,9
7,0%	27,0	22,7	18,5	14,2	10,0	5,7	1,5	-2,8	-7,0	-11,2
7,5%	23,1	19,5	15,6	11,7	7,8	3,9	0,1	-3,8	-7,7	-11,6
8,0%	19,0	16,2	12,7	9,2	5,7	2,2	-1,4	-4,9	-8,4	-12,0
8,5%	14,6	12,7	9,9	6,7	3,5	0,4	-2,8	-6,0	-9,1	-12,3
9,0%	10,2	8,9	7,0	4,2	1,4	-1,4	-4,2	-7,0	-9,9	-12,7
9,5%	5,6	5,0	3,9	1,7	-0,7	-3,2	-5,6	-8,1	-10,6	-13,0
9,9%	1,9	1,9	1,2	-0,3	-2,4	-4,6	-6,8	-9,0	-11,1	-13,3
10,5%	-3,8	-3,1	-2,8	-3,4	-5,0	-6,7	-8,5	-10,2	-12,0	-13,7
11,0%	-8,6	-7,2	-6,3	-6,1	-7,1	-8,5	-9,9	-11,3	-12,7	-14,1

Fonte: dados calculados pelo autor.

Após este cenário, será mantido a porcentagem de capital próprio investido em 20% e adotado uma taxa de juros de 9%, dentro da margem de risco de crédito praticada pelas instituições financeiras.

7.5. Cenário 03 – Comercialização de Créditos de Carbono

Os parâmetros adotados nos cenários anteriores foram mantidos, considerando a porcentagem de capital próprio investido de 20% e a redução da taxa de juros para 9,0% a.a., podendo alcançar valores menos conservadores, dentro do limite da taxa de risco de crédito, verificada em 3,0%.

Neste cenário procurou-se verificar as variações do VPL (R\$ milhões) aos parâmetros utilizados para a comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas, submetendo o VPL a diferentes valores utilizados para quantificar o

custo com a elaboração do Documento de Concepção do Projeto (PDD) em US\$ e a receita com créditos de carbono equivalentes (€\$ / tCO₂eq), conforme Figura 33 a seguir:

Figura 33 - Análise de sensibilidade para VPL (R\$ milhões) - comercialização de créditos de carbono x investimento em crédito de carbono.

		Valor de comercialização dos créditos de carbono (€\$ / tCO ₂ eq)									
		2,0	2,5	3,0	3,3	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Elaboração do PDD e trâmite para aprovação (US\$)	410.000	5,9	6,3	6,6	6,9	7,4	7,8	8,1	8,5	8,8	9,2
	380.000	5,9	6,3	6,7	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,3
	350.000	6,0	6,4	6,7	7,0	7,5	7,9	8,2	8,6	9,0	9,3
	320.000	6,1	6,4	6,8	7,0	7,6	7,9	8,3	8,7	9,0	9,4
	290.000	6,1	6,5	6,9	7,1	7,6	8,0	8,4	8,7	9,1	9,4
	260.000	6,2	6,5	6,9	7,1	7,7	8,0	8,4	8,8	9,1	9,5
	230.000	6,2	6,6	7,0	7,2	7,7	8,1	8,5	8,8	9,2	9,5
	200.000	6,3	6,7	7,0	7,3	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2	9,6
	170.000	6,3	6,7	7,1	7,3	7,8	8,2	8,6	8,9	9,3	9,6
	140.000	6,4	6,8	7,1	7,4	7,9	8,3	8,6	9,0	9,3	9,7
110.000	6,4	6,8	7,2	7,4	8,0	8,3	8,7	9,0	9,4	9,8	

Fonte: dados calculados pelo autor.

Os dados indicam que o valor do PDD na faixa mostrada, pouco afeta o desempenho do VPL, diferentemente do valor de comercialização dos créditos de carbono, que leva a uma sensível variação do valor presente líquido.

Neste cenário será mantido o valor inicial previsto para elaboração do PDD e o valor de comercialização de créditos de carbono será aumentado para €\$6,0 / tCO₂eq.

7.6. Conclusão da Análise de Sensibilidade

Quando os parâmetros verificados na análise de sensibilidade realizada em cada cenário são utilizados para a construção do fluxo de caixa descontado a moeda constante, tem-se um VPL positivo de cerca de R\$ 9 milhões de reais e 11% de TIR, o que representa um acréscimo de quase R\$ 200 milhões no VPL original, considerando as condições resumidas na Tabela 34.

Tabela 34. - Parâmetros verificados na análise de sensibilidade e utilizados para a construção do fluxo de caixa.

PARÂMETROS	DADO
Tarifa da Energia Elétrica Comercializada (R\$ / MWh)	200
Receita com o tratamento de RSU (R\$/ton)	85,00
% Capital próprio investido	20%
Taxa de juros de capital de terceiros (% a.a)	9,0%
Comercialização dos créditos de carbono (€\$ / tCO ₂ eq)	6,0
Elaboração do PDD e trâmite para aprovação (US\$)	350.000
Terreno (R\$ / m ²)	0,00
Distância estimada para conexão (km)	0
Resíduos industriais coletados (ton/dia)	78,00
Redução dos custos com MOD - Reciclagem (%)	20%

Fonte: dados calculados pelo autor.

Tabela 35. - Fluxo de caixa a moeda constante após aplicação dos parâmetros verificados na análise de sensibilidade.

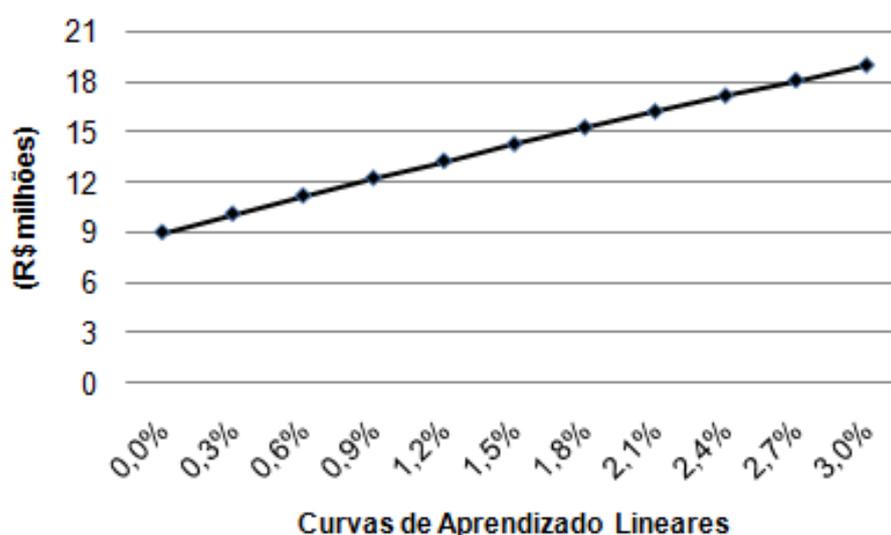
Processo geral (valores em R\$ milhões)								
Itens	0	1	2	3	4	5	6	7
Receita		42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3
Despesas		-12,3	-12,3	-12,3	-12,3	-12,3	-12,3	-12,3
Depreciações		-14,6	-14,6	-14,6	-14,6	-14,6	-14,6	-14,6
Juros		-15,2	-14,2	-13,2	-12,1	-11,1	-10,1	-9,0
Lucro operacional		0,1	1,2	2,2	3,2	4,3	5,3	6,3
Impostos		0,0	-0,4	-0,8	-1,1	-1,5	-1,8	-2,2
Amortizações		-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7
Depreciações		14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6
Investimentos	-47,3							
Fluxo de Caixa	-47,3	3,0	3,7	4,4	5,0	5,7	6,4	7,1
Itens	8	9	10	11	12	13	14	15
Receita	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3
Despesas	-12,3	-12,3	-12,3	-12,3	-12,3	-12,3	-12,3	-12,3
Depreciações	-14,6	-14,6	-14,6	-14,6	-14,6	-14,6	-14,6	-14,6
Juros	-8,0	-7,0	-5,9	-4,9	-3,9	-2,8	-1,8	-0,8
Lucro operacional	7,4	8,4	9,4	10,5	11,5	12,5	13,6	14,6
Impostos	-2,5	-2,9	-3,2	-3,6	-3,9	-4,3	-4,6	-5,0
Amortizações	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7
Depreciações	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6
Investimentos								
Fluxo de Caixa	7,8	8,4	9,1	9,8	10,5	11,2	11,8	12,5

Fonte: dados calculados pelo autor.

Neste novo fluxo de caixa, nota-se uma margem de quase R\$ 30 milhões entre receita e despesas, o que é relativamente superior ao valor antes calculado de cerca de R\$ 10 milhões, suficiente, no entanto, para viabilizar economicamente o projeto.

A análise de sensibilidade realizada não considerou efeitos complementares no fluxo de caixa do projeto, que podem contribuir ainda mais para viabilizá-lo, tais como a introdução de curvas de aprendizagem. A introdução de uma curva de aprendizagem linear nas despesas anuais previstas para o projeto pode provocar os resultados adicionais mostrados na Figura 34.

Figura 34 - Efeito complementar de curvas de aprendizado lineares no valor presente líquido.



Fonte: dados calculados pelo autor.

Com os dados mostrados, pode-se concluir que a viabilidade do empreendimento delineado se dá em condições muito específicas com as políticas em vigor no país, devendo o empreendimento valer-se de situações como aquelas descritas a seguir:

- Subsídios locais com terrenos, estações de tratamento, impostos e pontos de conexão;
- Maximização da receita com o tratamento de resíduos;
- Tarifas de energia elétrica negociadas no ACL a longo prazo;

- Municípios com alto índice de coleta seletiva;
- Negociação do risco de crédito;
- Mercados com valorização dos créditos de carbono.

8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A viabilidade de tecnologias para o tratamento de RSU no Brasil, especificamente aquela objeto deste estudo, que trata da gaseificação a plasma de resíduos, está fortemente apoiada em fatores institucionais e organizacionais, que reconheçam a sua necessidade de aplicação, garantindo condições favoráveis para a instalação da tecnologia no país.

As políticas de governo necessárias para o desenvolvimento das tecnologias para o aproveitamento energético de RSU em larga escala no país passam primeiramente pelo estabelecimento de uma hierarquia para o tratamento de RSU, reconhecendo a importância de não se destinar resíduos não tratados para os aterros, que podem não só aumentar a emissão de gases de efeito estufa, como também oferecer riscos para o meio ambiente e população.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, Política Nacional de Mudanças Climáticas e Política Federal de Saneamento Básico já possuem as bases legais para que sejam criadas linhas de crédito específicas e a promoção de incentivos que subsidiem a ampliação do mercado de tratamento térmico de RSU, necessitando uma maior representação política no setor.

Ainda no campo institucional, a viabilidade dos projetos deve ser complementada com o suporte de governos locais, associados ou não em consórcios públicos, para a criação de subsídios em impostos, seleção e cessão de local para a instalação do empreendimento e o aproveitamento da energia no município, valendo-se dos contratos no Ambiente de Contratação Livre – ACL, que podem oferecer melhores tarifas do que aquelas praticadas no Ambiente de Contratação Regulada – ACR.

Com as políticas existentes, ainda é inexpressivo o número de cidades no Brasil que buscam soluções para o tratamento adequado de seus resíduos, reconhecendo seu valor como matéria-prima e fonte de energia, como também comparando os custos de manutenção dos padrões atuais de destinação dos

resíduos, a disponibilidade de local adequado e os passivos ambientais que podem ser gerados.

O fator ambiental é um dos maiores benefícios das alternativas para o aproveitamento energético dos resíduos, que já possuem tecnologias de limpeza de gases maduras e boas práticas reconhecidas por entidades ambientais, onde a tecnologia é utilizada.

Entre as vantagens ambientais de adoção das tecnologias de tratamento térmico de RSU, a ausência de espaço disponível para a destinação de resíduos, a exemplo de outros países e regiões específicas no Brasil, ainda é um fator decisório na escolha da tecnologia de tratamento, devido a sua capacidade de inertização e redução física dos resíduos, oferecendo ganhos indiscutíveis ao município.

Este estudo procurou quantificar os principais parâmetros envolvidos em cada etapa do processo reciclagem, tratamento biológico, tratamento térmico e aproveitamento dos créditos de carbono provenientes do aproveitamento de resíduos, submetendo os dados encontrados a uma análise através do Valor Presente Líquido – VPL e Taxa Interna de Retorno – TIR. Foram então selecionados para uma análise de sensibilidade, aqueles parâmetros que pudessem refletir variáveis institucionais e ambientais, tais como a tarifa de energia elétrica comercializada, receita com o tratamento de resíduos, taxa de juros de capital de terceiros, valor do terreno para implantação do empreendimento, conexão com o sistema de transmissão de energia elétrica e nível de aplicação da coleta seletiva no município.

Os dados mostraram um ganho de cerca de R\$ 200 milhões no VPL calculado para o fluxo de caixa com as alternativas e tecnologias escolhidas, demonstrando a importância dos parâmetros destacados.

Este ganho pode ser otimizado quando ponderados os fatores econômicos, sociais e ambientais dentro da necessidade de cada município, valendo-se de outras tecnologias e processos diferentes existentes para o tratamento de RSU.

A demanda por alternativas para o tratamento de RSU no mundo faz com que haja uma evolução das tecnologias de tratamento, oferecendo sugestões para outros estudos de viabilidade como aqueles relacionados a seguir:

- Síntese química / bioquímica de biocombustíveis a partir de gás de síntese;
- Biodigestão de materiais lignocelulósicos;
- Tratamento do biogás para aumento de seu poder calorífico;
- Inertização de resíduos em aterros através do uso de plasma (CIRCEO, 2010)
- Efeito da escala sobre a viabilidade econômica de empreendimentos de recuperação energética de RSU.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, Tasneem et al. **Biogas Energy**. 1st ed. New York, USA: Springer, 2012.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**: dados institucionais disponíveis no site. Disponível em: <www.abnt.org.br>. Acesso em 09 mar 2013.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica - Resolução Normativa nº 77, de 18 de agosto de 2004. **Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidroelétricos e aqueles com fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, com potência instalada menor ou igual a 30.000 kW**. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 17 ago 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004 Resíduos Sólidos**: Classificação. Segunda Edição. [s.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11174 Armazenamento de Resíduos Classe II Não Inertes e Inertes**. Segunda Edição. [S.L.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990.

BNDES. **Classificação do porte da empresa adotada pelo Banco Nacional do Desenvolvimento**. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/porte.html>. Acesso em 26 mai 2013.

BRITISH BIOENERGY NEWS. Aston University, UK: [s.n.], edição nº 09 de 2009. Disponível em <www.super-gen-bioenergy.net>. Acesso em: 24 nov 2012.

BIGÉLLI, Eduardo Monteiro. **Dados Gerais da Central de Triagem de São José dos Pinhais**. Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <dudutransresiduos@hotmail.com> em 24 jan 2013.

BM&F. Bolsa de Mercadorias e Futuros: **Ata do Leilão nº 001/12 de venda de Redução Certificada de Emissão - RCE**. Disponível em: <www.bmfbovespa.com.br>. Acesso em: 24 nov 2012.

BIOENERGY PRODUCERS ASSOCIATION. **Evaluation of Emissions from Thermal Conversion Technologies Processing Municipal Solid Waste and Biomass**: Final Report. University of California, Riverside: [s.n.], 2009

BRASIL. Resolução CONAMA nº 316, de 28 de outubro de 2002. **Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos**. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/>. Acesso em: 14 ago. 2012.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 386, de 27 de dezembro de 2006. **Altera o art. 18 da Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002**. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/>. Acesso em: 14 ago 2012.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências.** Disponível em: <<http://legis.senado.gov.br/sicon/>>. Acesso em: 10 ago 2012.

BRASIL. Ministério das Cidades, Ministério do Meio Ambiente: **Elementos para a Organização da Coleta Seletiva e Projetos de Galpão de Triagem.** Brasília: [s.n.], 2008.

BRASIL. **Plano Nacional Sobre Mudança do Clima: Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima.** Brasília: [s.n.], 2008. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 09 ago 2012.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. **Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima.** Disponível em: <<http://legis.senado.gov.br/sicon/>>. Acesso em: 09 ago 2012.

BRASIL. Decreto nº 7.217, de 21 de junho de 2010. **Regulamenta a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências.** Brasília: [s.n.], 2010. Disponível em: <<http://legis.senado.gov.br/sicon/>>. Acesso em: 13 ago 2012.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Brasília: [s.n.], 2010. Disponível em: <<http://legis.senado.gov.br/sicon/>>. Acesso em: 16 jul 2012.

BRASIL. Decreto nº 7.390, de 09 de dezembro de 2010. **Regulamenta os Artigos 6º, 11º e 12º da Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, e dá outras providências.** Brasília: [s.n.], 2010. Disponível em: <<http://legis.senado.gov.br/sicon/>>. Acesso em: 09 ago 2012.

BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. **Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.** Brasília: [s.n.], 2010. Disponível em: <<http://legis.senado.gov.br/sicon/>>. Acesso em: 19 jul 2012.

BRASIL. **Plano de Ação para Produção e Consumo Sustentáveis - PPCS.** Brasília: [s.n.], 2011. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 13 ago 2012.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos – versão preliminar.** Brasília: [s.n.], agosto de 2012. Disponível em: <<http://srhursu.mma.gov.br/>>. Acesso em: 06 jan 2013.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Pesquisa proposições de leis no site.** Disponível em: <www.camara.leg.br>. Acesso em: 09 mar 2013.

CDM. **Clean Development Mechanism – United Nations Framework Convention on Climate Change**. Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int>>. Acesso em 31 ago 2012.

CEMPRE. **Compromisso Empresarial para a Reciclagem: Perfil de Recicladora de Plásticos**. 3ª ed. São Paulo-SP: [s.n], 2003.

CEMPRE. **Compromisso Empresarial para a Reciclagem**: preços de mercado de materiais recicláveis. Disponível em: <www.cempre.org.br>. Acesso em: 02 fev. 2013.

CEWEP. **Confederation of European Waste to Energy Plants**: heating and lighting the way to a sustainable future. Bélgica: [s.n], 2009. Disponível em: <www.cewep.eu>. Acesso em: 27 out 2012.

CHAPMAN, Chris. **Gasplasma**: Clean, renewable energy from waste. *British Bio Energy News*, Birmingham, agosto de 2009. Página 06. Disponível em: <www.supergen-bioenergy.net>. Acesso em: 16 nov 2012.

CICLOSOFT. **CEMPRE: Pesquisa sobre o perfil da coleta seletiva no Brasil**. [s.l]: [s.n], 2012. Disponível em: <www.cempre.org.br>. Acesso em: 02 fev 2013.

CIRCEO, L.J. **Plasma Arc Gasification Georgia Tech Research Institute – Electro Optical System Laboratory**. 2010. Disponível em: <www.thesciencecouncil.com>. Acesso em: 15 nov 2012.

CLARK, Bruce J. ROGOFF, Marc J. Economic Feasibility of a Plasma Arc Gasification Plant, City of Marion, Iowa. **18th Annual North American Waste to Energy Conference – NAWTEC18**. Orlando, Florida, USA. 2010.

CORTEZ, Luiz Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GOMEZ, Edgardo Olivares (Organização). **Biomassa para Energia**. 1º reimpressão. Campinas-SP: Editora da Unicamp, 2008.

COSTA, Ricardo Tolomei. **Utilização de uma sistemática de decisão para selecionar e priorizar um portfólio de projetos de investimento**. 2012. 116 fls. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Escola de Economia de São Paulo – Fundação Getúlio Vargas, São Paulo-SP, 2012.

DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. **Biogas from waste and renewable resources**: an Introduction. 2nd edition. Germany: Wiley-VCH, 2011.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FUR SONNENENERGIE; ECOFYS. **Planning and Installing Bioenergy Systems**: a guide for installers, architects and engineers. London: Earthscan, 2005.

DODGE, Ed. **Plasma Gasification: clean renewable fuel through vaporization of waste**. Cornell University in Ithaca – NY. 2012. Disponível em: <www.waste-management-world.com>. Acesso em: 15 nov 2012.

DUCHARME, Caroline. **Technical and Economic analysis of Plasma Assisted Waste to Energy Processes**. 2010. 79 fls. Dissertação (Master of Science Degree in Earth Resources Engineering) – Earth Engineering Center – Columbia University, USA, 2010.

EC. European Commission: **hierarquia para o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos**. Disponível em: < <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/> >. Acesso em: 11 fev. 2013.

EPA. Agência de Proteção Ambiental Americana – **hierarquia para gerenciamento de resíduos sólidos urbanos**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/municipal/hierarchy.htm> >. Acesso em: 11 fev 2013.

EPA. Agência de Proteção Ambiental Americana – **Air Pollution Control Orientation Course**. Disponível em: <www.epa.gov>. Acesso em: 16 jan 2013.

EPA. Agência de Proteção Ambiental Americana - **Air Pollution Control Technology Fact Sheet** – SNCR - EPA-452/F-03-031. Disponível em: <www.epa.gov>. Acesso em: 16 jan 2013.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética – **Leilão de Energia A5/2011**. 2011. Disponível em: <www.epe.gov.br>. Acesso em: 19 jan 2013.

ETCO. Instituto Brasileiro de Ética Concorrencial. **Índice de Economia Subterrânea divulgado em conjunto com o Instituto Brasileiro de Economia da Fundação Getúlio Vargas**. [s.l]: [s.n], 2011. Disponível em: <www.etco.org.br>. Acesso em: 13 ago 2012.

SÃO PAULO (Estado). Resolução SMA nº 079, de 04 de novembro de 2009. **Estabelece Diretrizes e Condições para a Operação e o Licenciamento da Atividade de Tratamento Térmico de Resíduos Sólidos em Usinas de Recuperação de Energia – URE**. São Paulo: [s.n]. Disponível em: <www.ambiente.sp.gov.br>. Acesso em: 21 out 2012.

FADE. Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco. **Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão** – Produto 4: Relatório final do perfil institucional, quadro legal e políticas públicas relacionadas a resíduos sólidos urbanos no exterior e no Brasil. Julho de 2012. Disponível em: <www.tecnologiasresiduos.com.br>. Acesso em: 06 jan 2013.

FARINA, Elizabeth M.M.Q.; AZEVEDO, Paulo F. de; SAES, Maria Sylvania M. **Competitividade: mercado, estado e organizações**. São Paulo: Ed. Singular, 1997.

FARINA, Elizabeth M.M.Q. **Competitividade e Coordenação de Sistemas Agroindustriais**: um ensaio conceitual. Revista Gestão e Produção. Vol.6, n.3, p.147-161, 1999.

FELLER, Samantha M. (editor). **Using Municipal Solid Waste for Fuel**. 1st ed. New York, USA: Nova Science Publishers, 2011.

FINEP. Ministério da Ciência e Tecnologia – FINEP - **Política Operacional 2012-2014**. Rio de Janeiro: [s.n], 2012. Disponível em: <www.finep.gov.br>. Acesso em: 15 ago 2012.

FINEP. Financiadora de Estudos e Projetos – **Projetos contratados pela FINEP – convênio nº 01.07.0601.02**. Disponível em: <www.finep.gov.br>. Acesso em: 15 ago 2012.

FINEP. Financiadora de Estudos e Projetos – **Projetos contratados pela FINEP – convênio nº 01.12.0135.00**. Disponível em <www.finep.gov.br>. Acesso em: 15 ago 2012.

FUNASA. Fundação Nacional de Saúde – Edital de Chamamento Público nº 01/2011 DENSP/FUNASA/MS – **Implementação de Projetos de Coleta e Reciclagem de Materiais – Anexo XV Termo de Referência para fomento para a organização e o desenvolvimento de associações e cooperativas atuantes com resíduos**. [s.l], [s.n], 2011.

FURLAN, Walter. **Modelo de decisão para escolha de tecnologia para o tratamento de resíduos sólidos no âmbito de um município**. 2007. Tese (Doutorado em Administração) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GARCILASSO, Vanessa Pecora. VESCOVO, Edgardo. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. **4º Congresso de Cogeração de Energia – Geração de energia elétrica a partir de biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando microturbina a gás**. 29 de março de 2012. Disponível em: <www.cenbio.iee.usp.br>. Acesso em: 09 dez 2012.

GT-02. Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Grupo de Trabalho nº 02 para normatização do art. 37º do Decreto 7.404/10. **Ata de reunião de 08 de dezembro de 2011**. Disponível em: <www.acessoainformacao.gov.br/>. Acesso em: 23 jul 2012.

GT-02. Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Grupo de Trabalho nº 02 para normatização do art. 37º do Decreto 7.404/10. **Ata de reunião de 18 de janeiro de 2012**. Disponível em: <www.acessoainformacao.gov.br/>. Acesso em: 23 jul 2012.

GT-02. Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Grupo de Trabalho nº 02 para normatização do art. 37º do Decreto 7.404/10. **Ata de reunião de 28 de fevereiro de 2012**. Disponível em: <www.acessoainformacao.gov.br/>. Acesso em: 23 jul 2012.

GT-02. Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Grupo de Trabalho nº 02 para normatização do art. 37º do Decreto 7.404/10. **Ata de reunião de 29 de fevereiro de 2012**. Disponível em <www.acessoainformacao.gov.br/>. Acesso em: 23 jul 2012.

GT-02. Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Grupo de Trabalho nº 02 para normatização do art. 37º do Decreto 7.404/10. **Ata de reunião**

de 28 de março de 2012. Disponível em <www.acessoinformacao.gov.br/>. Acesso em: 23 jul 2012.

GT-02. Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Grupo de Trabalho nº 02 para normatização do art. 37º do Decreto 7.404/10. **Ata de reunião de 26 de abril de 2012.** Disponível em: <www.acessoinformacao.gov.br/>. Acesso em: 23 jul 2012.

INSTITUTO ASSAF. **Custo do Capital Próprio K_e para a indústria, comércio e serviço:** segmento energia no ano de 2011. Disponível em: <www.institutoassaf.com.br>. Acesso em: 19 jan. 2013.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada: **Pesquisa sobre Pagamento por Serviços Ambientais Urbanos para Gestão de Resíduos Sólidos.** Brasília: [s.n], 2010. Disponível em: <<http://agencia.ipea.gov.br/>>. Acesso em: 05 mar 2012.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada: **Comunicado nº 145. Plano Nacional de Resíduos Sólidos: Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos, agrosilvopastoris e a questão dos catadores.** Brasília: [s.n], 2012. Disponível em: <www.ipea.gov.br>. Acesso em: 27 ago 2012.

JUCÁ, José Fernando Thomé. **Tecnologias Disponíveis para Tratamento dos Resíduos Sólidos Urbanos.** In: *Rio +20 Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável*, 64 p, 2012, Rio de Janeiro. Disponível em: <www.iswa.org>. Acesso em: 21 out 2012.

KARAGIANNIDIS, Avraam (editor). **Waste to Energy: opportunities and challenges for developing and transition economies.** 1st ed. London: Springer, 2012.

KHAN, M. Rashid (editor). **Conversion and Utilization of Waste Materials.** 1st ed. Washington D. C., USA: Taylor & Francis Publishers, 1996.

KUBITZ. **Kubitz Soluções Sociais e Ambientais:** proposta comercial nº 121.006.021-3. Cascavel-PR: [s.n], 2013.

LEE, Sunggyu; SPEIGHT, James G.; LOYALKA, Sudarshan. **Handbook of alternative fuel technologies.** 1st ed. USA: CRC Press, 2007.

MGI. MacKinsey Global Institute. **Infrastructure productivity: how to save \$1 trillion a year.** [s.l]: [s.n], 2013.

MNCR. **De Catador para Catador.** Jornal do Movimento Nacional dos Catadores de Material Reciclável. [s.l]: [s.n], edição nº 04 de 2010. Disponível em <www.mncr.org.br>. Acesso em 09 mar 2013

NRG FOCUS. [s.l.]: [s.n], edição junho de 2012. Disponível em <<http://www.alternrg.com/media/publications/>>. Acesso em: 18 mai 2013.

POLETTI, J. A. **Viabilidade Energética e Econômica da Incineração de Resíduo Sólido Urbano Considerando a Segregação para Reciclagem.** 2008. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

REICHERT, Geraldo Antônio. SILVEIRA, Diego Altieri. *23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – Estudo de Viabilidade da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos com Geração de Energia*, 16 p, 2005, Campo Grande-MT. Disponível em <www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em 05 jan 2013.

REIS, Neyval Costa Jr. Universidade Federal do Espírito Santo – Departamento de Engenharia Ambiental - **Poluição do Ar Módulo VI – Equipamentos de Controle de Poluição do Ar**. 2013. Disponível em: <www.inf.ufes.br/~neyval/>. Acesso em: 16 jan 2013.

RGT International. **Apresentação tecnologia de Incineração a Plasma da Westinghouse Corporation**. São Paulo. 2012

ROGOFF, Marc J.; SCREVE, Francois. *Waste to Energy Technologies and Project Implementation*. 2nd ed. USA: Elsevier: USA, 2011.

SAVOIA, Ricardo. **Cenários para os Preços da Energia no Brasil 2013 / 2015 - Andrade & Canellas - A MP 579 e suas consequências para a geração, transmissão e distribuição de energia**. São Paulo, 2012.

SGW. SGW Services Engenharia Ambiental Ltda - **Estudo de Impacto Ambiental para implantação da Unidade de Recuperação de Energia a partir de RSU do município de Barueri**. Barueri: [s.n], 2012.

SINIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Disponível em <www.sinis.gov.br>. Acesso em 26 mai 2013.

SJC. Prefeitura Municipal de São José dos Campos - Edital de Concorrência Pública – **Concessão Administrativa para realização de obra e gestão de um sistema de recuperação energética a partir do tratamento de resíduos sólidos urbanos no município de São José dos Campos** - Anexo Plano de Negócio de Referência. São José dos Campos: [s.n], 2011.

SMITH, Alison et al. **Waste Management Options and Climate Change**: Final Report to the European Commission DG Environment. Luxembourg: Office for Official Publications of European Communities, 2001. Disponível em <<http://europa.eu>>. Acesso em 24 nov 2012

TOMITA, George. **Publicação eletrônica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <george.tomita@gmail.com> em 21 jan. 2013.

UN. United Nations: **Framework Convention on Climate Change**. Disponível em: <<http://unfccc.int>>. Acesso em: 31 ago. 2012.

UN. United Nations: **Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change**. Disponível em: <<http://unfccc.int>>. Acesso em: 31 ago. 2012.

WPC. **Westinghouse Plasma Corporation**: modelos de gaseificadores comerciais. Disponível em: <www.westinghouse-plasma.com>. Acesso em: 12 fev 2013.

YOUNG, Gary C. **Municipal Solid Waste to Energy Conversion Process: economic, technical and renewable comparisons**. USA: John Wiley & Sons, 2010.