

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

JULIA SAITO DI TULLIO

Subsídios para uso de gases gerados pela digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica

São Carlos, SP

2014

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

Subsídios para uso de gases gerados pela digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica

Aluno: Julia Saito Di Tullio

Orientador: Prof. Dr. Valdir Schalch

Monografia apresentada ao curso de graduação em Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

São Carlos, SP

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

D617s Di Tullio, Julia Saito
Subsídios para uso de gases gerados pela digestão
anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos
urbanos para geração de energia elétrica / Julia Saito
Di Tullio; orientador Valdir Schalch. São Carlos, 2014.

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

1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Biogás. 3. Aterro
sanitário. 4. Biometanização. 5. Energia elétrica. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Julia Saito di Tullio**

Título da Monografia: **Subsídios para Uso de Gases Gerados pela Digestão Anaeróbia da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos para Geração de Energia Elétrica**

Data da Defesa: 10/07/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado Valdir Schalch (Orientador(a))

APROVADO

Prof. Dr. Nivaldo Aparecido Corrêa

Aprovado

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Córdoba

Aprovado

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

Dedico este trabalho aos meus pais, principais responsáveis pela oportunidade de desenvolver esta monografia e maiores provedores de confiança, aprendizado e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família. À minha mãe Rosa por sempre me dar a mão, carinho, cuidado, por todas as experiências compartilhadas e por mostrar o mundo de forma mais clara. Ao meu pai Marcos por dizer as coisas certas nas horas certas, pela honestidade e por ser guiado por amor. Ao meu irmão Henrique por me dar a segurança de que sempre o terei ao meu lado. Ao Max pela fidelidade.

Agradeço à companhia da vó Dida, ao charme da vó Didi, às delícias da vó Adelina, à garra do vô Geraldo, à sabedoria do vô Nelson e às histórias do vô Edgard. Agradeço às minhas tias e primas, exemplos de mulheres guerreiras.

Agradeço ao professor Valdir Schalch, pelo apoio, orientação e confiança, por sempre fazer das reuniões de trabalho ambientes produtivos, mas acima de tudo agradáveis. Ao professor Marcus, ao Rodrigo e à Carolina pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Osni José Pejon e Marcelo Montaña pela oportunidade de desenvolver outras atividades acadêmicas que me trouxeram grande aprendizado. Ao professor paraninfo Victor Ranieri e ao professor homenageado Eugenio Foresti, por serem exemplos de grandes pessoas. Ao Oscar “Chuck”, que além de um excelente professor se mostrou um grande amigo, agradeço toda a ajuda e todas as risadas.

À galera fantástica da Ambiental 09, por ser a turma mais companheira e amiga que eu tive a sorte de fazer parte. A todos os amigos que fiz nestes anos de São Carlos, que eu pretendo carregar por toda a minha vida. Aos amigos de Campinas que, apesar da distância, estiveram ao meu lado. À República Porópópó pelo samba, pela união e pela saudade que deixou.

À minha segunda família, a República Disfarça, agradeço à nossa insistência de realizar este sonho que acabou sendo a melhor parte de São Carlos. Obrigada por cada história vivida, por cada lição de vida, obrigada pelo amor, pelas lágrimas e pelos abraços apertados.

Agradeço ao NAPRA e às pessoas de coração lindo que conheci em São Paulo e em Rondônia, por todo dia me incentivarem a ser alguém melhor.

Por fim, agradeço à Universidade de São Paulo pelas oportunidades que oferece, prover conhecimentos dentro e fora de sala de aula, por esclarecer meu papel como cidadã e por instigar a busca por um mundo mais justo.

"Porque a cabeça da gente é uma só, e as coisas que há e que estão para haver são demais de muitas, muito maiores diferentes, e a gente tem de necessitar de aumentar a cabeça, para o total. Todos os sucedidos acontecendo, o sentir forte da gente - o que produz os ventos. Só se pode viver perto de outro, e conhecer outra pessoa, sem perigo de ódio, se a gente tem amor. Qualquer amor já é um pouquinho de saúde, um descanso na loucura."

João Guimarães Rosa

RESUMO

DI TULLIO, J.S. Subsídios para uso de gases gerados pela digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica. 2014. 90 p. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

Diante do intenso desenvolvimento tecnológico e econômico provido mundialmente nas últimas décadas, a administração pública tem enfrentado diversos desafios para elaborar e adequar modelos de gestão de resíduos sólidos, cuja geração tem aumentado significativamente. Além da preocupação com sistemas de limpeza urbana, coleta de resíduos nos municípios, implantação de unidades ambientalmente adequadas para disposição final de rejeitos, é necessário investir no aproveitamento e na valoração dos resíduos. Os programas de coleta seletiva de materiais recicláveis já apresentam grande difusão nas diversas regiões brasileiras, contudo o destino da matéria orgânica ainda é majoritariamente a mesma que os rejeitos, ou seja, lixões, aterros controlados ou aterros sanitários. Frente à necessidade de promover o desenvolvimento sustentável e a mitigação de impactos ambientais, estão sendo desenvolvidas tecnologias que visam o aproveitamento energético da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos. Em aterros sanitários já existem projetos em operação que captam o biogás proveniente da degradação anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos, que contém alta concentração de metano, em busca de usá-lo como combustível para geração de energia elétrica. Contudo, com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída em 2010, e seu decreto regulamentador, os aterros sanitários devem ser a unidade final apenas de rejeitos. Estão sendo estudadas, portanto, tecnologias de aproveitamento energético do biogás a partir de biodigestores que recebem a matéria orgânica e controlam a degradação anaeróbia. Estes sistemas são conhecidos como biometanizadores e, além de promoverem uma fonte renovável de energia, reduzem os impactos ambientais oriundos da disposição de matéria orgânica em aterro sanitário, principalmente a geração de chorume. Portanto, se apresentam como uma melhor alternativa para o aproveitamento dos resíduos sólidos orgânicos.

Palavras-chave: resíduos sólidos urbanos, biogás, aterro sanitário, biometanização, energia elétrica.

ABSTRACT

DI TULLIO, J.S. **Subsidies for the use of gases provided by the anaerobic digestion of the organic matter from urban solid waste to electric energy production.** 2014. 90 p. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

In front of the intense technological and economic development provided all around the world in the last few decades, the public administration has been facing a several challenges to elaborate and suit models of solid waste management, which production has been increasing significantly. Besides the worry about urban cleaning services, solid waste collection, implementation of sanitary landfills to final disposal of waste, it is necessary to invest on the use and the valuation of the solid waste. The selective recyclable material collection programs present great diffusion through the Brazilian regions already, however the organic matter destiny still is majority the landfills or another inappropriate locals of solid waste final disposal. Above the need to promote the sustainable development and environmental impacts mitigation, the technologies that aim the use of solid waste organic matter for energy production are already being developed. There are several projects in operation in sanitary landfills that capture the biogas produced by the anaerobic digestion of the organic matter, which contains high concentration of methane, looking for using it as a fuel to electric energy production. However, with the National Politics of Solid Waste implementation in 2010, the sanitary landfills should not receive solid waste that presents reuse possibility. Therefore, technologies of biodigestors that receive the organic matter from solid waste and control the anaerobic digestion are currently being studied. These systems are known as biomethanization and, beyond providing a renewable source of energy, the technology reduces the environmental impacts from the organic matter disposal on sanitary landfills, specially the reduction of manure production. Therefore, the biomethanization technology represents a better alternative to the organic matter of solid waste use to electric energy production.

Key words: urban solid waste, biogas, sanitary landfill, biomethanization, electric energy.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Empreendimentos de geração de energia elétrica em operação no Brasil.....	2
Tabela 2: Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008.....	8
Tabela 3: Quantidade diária de resíduos sólidos urbanos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para os anos 2000 e 2008	9
Tabela 4: Estimativa da participação dos programas de coleta seletiva formal (2008)	13
Tabela 5: Composição típica percentual do biogás	26
Tabela 6: Propriedades físicas do metano, gás carbônico e gás sulfídrico.....	27
Tabela 7: Equivalência energética de 1Nm ³ de biogás	28
Tabela 8: Técnicas de remoção de impurezas do biogás.....	29
Tabela 9: Etapas de funcionamento de um motor ciclo Otto	34
Tabela 10: Classificação de tecnologias de digestão anaeróbia e biometanização da matéria orgânica conforme parâmetros específicos.....	38
Tabela 11: Vantagens e desvantagens de sistemas multi-estágio.....	39
Tabela 12: Vantagens e desvantagens de sistemas secos e sistemas úmidos de estágio único	40
Tabela 13: Principais plantas de biometanização de resíduos em operação em 2005.....	47
Tabela 14: Leis e programas de incentivo à utilização de fontes renováveis para geração de energia no mundo	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estratégia de gestão integrada de resíduos sólidos	7
Figura 2: Municípios, segundo a destinação final dos resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos	10
Figura 3: Operações efetuadas para tratamento de resíduos domiciliares	11
Figura 4: Procedimentos de tratamento de resíduos sólidos orgânicos e recicláveis	12
Figura 5: Tratamento adequado de resíduos sólidos orgânicos.....	15
Figura 6: Esquema ilustrativo da configuração de um aterro sanitário	18
Figura 7: Representação esquemática de um ecossistema aterro sanitário	19
Figura 8: Representação esquemática das fases de digestão anaeróbia	21
Figura 9: Fases da degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de aterro sanitário	22
Figura 10: Dreno típico de gases de aterro sanitário, presente na unidade de Rio Claro/SP	31
Figura 11: Cabeçote de adaptação de dreno existente, modelo nacional	32
Figura 12: Diagrama com as alternativas de aproveitamento do biogás	33
Figura 13: Turbina a gás: (a) circuito aberto – processo real de combustão interna; (b) circuito fechado – aproximação por um processo ideal de transferência de calor	35
Figura 14: Esquemas de turbinas Ciclo Brayton: (a) aberto e simples; (b) com cogeração	35
Figura 15: Componentes do sistema da microturbina	36
Figura 16: Aspectos para análise de viabilidade do uso de biogás para geração de energia elétrica	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Poder calorífico do biogás (kcal/m ³).....	27
Gráfico 2: Plantas de aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário no mundo em 2003	46
Gráfico 3: UTE de biogás em operação no Brasil conforme a fonte do combustível	49
Gráfico 4: UTE de biogás em operação no Brasil conforme a região de implantação	49
Gráfico 5: UTE de biogás em operação no Brasil conforme o tipo de proprietário.....	50
Gráfico 6: UTE de biogás em outorga no Brasil conforme a fonte de combustível	51
Gráfico 7: UTE de biogás em outorga no Brasil conforme a região de implantação.....	51
Gráfico 8: UTE de biogás em outorga no Brasil conforme o tipo de proprietário	52
Gráfico 9: Composição gravimétrica de RSU em São Carlos/SP em 1989	54
Gráfico 10: Composição gravimétrica de RSU em São Carlos/SP em 2007	54
Gráfico 11: Projetos MDL em aterros sanitários por região	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APE	Autoprodução de Energia
ATS	Alto Teor de Sólidos
BTS	Baixo Teor de Sólidos
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
C	Carbono
CH ₄	Metano
CO ₂	Gás Carbônico
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases do Efeito Estufa
H ₂	Gás Hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
kW	Quilo Watts
m ³	Metros Cúbicos
m ³ /h	Metros cúbicos por hora
MW	Mega Watts
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira Registrada
PIE	Produção Independente de Energia
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
PR	Paraná
REG	Registro
REG-RN482	Registro mini micro Geradores RN482/2012
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

Sisnama	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SP	São Paulo
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
t	Tonelada
TCO	Taxa de Carregamento Orgânico
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
TMB	Tratamento Mecânico-Biológico
TWh	Tera Watts Hora
URE	Unidade de Recuperação Energética
UTE	Usina Termelétrica
°C	Graus Celsius
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Objetivos	4
2.1 Objetivos Específicos.....	4
3. Revisão Bibliográfica.....	5
3.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos	5
3.2 Resíduos Domiciliares	8
3.3 Aterro Sanitário como Unidade Final de Disposição de Resíduos	16
3.4 Decomposição da Matéria Orgânica em Aterros Sanitários	19
3.5 Aspectos Físico-Químicos do Biogás	25
3.6 Reaproveitamento do Biogás de Aterro Sanitário.....	29
3.7 Biometanização.....	36
4. Metodologia	44
5. Resultados e Discussões.....	45
5.1 Panorama Mundial.....	45
5.2 Panorama Nacional.....	48
5.3 Disponibilidade de Matéria-Prima	53
5.4 Tecnologias Disponíveis.....	56
5.5 Legislação Vigente e Programas Governamentais de Incentivo	56
5.6 Impactos no Meio Ambiente	59
5.7 Aspectos Econômicos	60
5.8 Aceitação Social	62
6. Conclusão	63
7. Referências Bibliográficas	64
8. Apêndices	70

1. INTRODUÇÃO

A adequada gestão e tratamento de resíduos sólidos é um importante desafio enfrentado pelos governos, setor empresarial e sociedade civil. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída em 2010 através da Lei nº 12.305 e regulamentada pelo Decreto 7.404, de 23 de dezembro de 2010, representa um importante avanço nas políticas públicas brasileiras que tratam do tema.

Com a PNRS fica vedada a disposição final em aterros sanitários de resíduos que ainda apresentem possibilidade de outra destinação, como reutilização ou tratamento que viabilize algum uso posterior, sendo uma importante meta a exclusiva disposição de rejeitos. Esta nova diretriz implica na elaboração e implantação de medidas e metas que determinem a coleta seletiva de materiais reaproveitáveis, sejam eles recicláveis ou orgânicos.

Uma das possibilidades de reutilização dos resíduos sólidos orgânicos é a sua aplicação como fonte renovável de energia, o que diversifica a matriz energética nacional e contribui na redução de emissão de gases do efeito estufa (PECORA, 2006). O processo de digestão anaeróbia desta parcela de resíduos gera o biogás, cuja composição é majoritariamente de gás metano (CH_4) que apresenta propriedades combustíveis. As tecnologias de conversão da energia química presente nas moléculas do biogás em energia elétrica são variadas, e têm sido desenvolvidas principalmente após os choques de petróleo na década de 70.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em seu Banco de Informações de Geração apresenta os dados de capacidade de geração de energia elétrica no Brasil, em relação aos empreendimentos em operação, em construção ou outorgados (ainda sem construção). A Tabela 1 mostra como está a matriz energética no Brasil atualmente, conforme a capacidade instalada e total de geração de energia elétrica a partir de cada tipo de usina. As usinas hidrelétricas ainda predominam no território nacional, o uso de biomassa aparece como terceiro mais explorado, contudo o uso de biogás ainda apresenta uma contribuição pouco significativa diante dos demais combustíveis desta categoria.

Tabela 1: Empreendimentos de geração de energia elétrica em operação no Brasil

Empreendimentos em Operação							
Tipo		Capacidade Instalada		%	Total		%
		N.º de Usinas	(kW)		N.º de Usinas	(kW)	
Hidro		1.111	87.122.988	63,44	1.111	87.122.988	63,44
Gás	Natural	115	12.533.616	9,13	156	14.281.039	10,40
	Processo	41	1.747.423	1,27			
Petróleo	Óleo Diesel	1.171	3.571.954	2,60	1.204	7.655.567	5,57
	Óleo Residual	33	4.083.613	2,97			
Biomassa	Bagaço de Cana	378	9.390.071	6,84	481	11.606.658	8,45
	Licor Negro	17	1.657.582	1,21			
	Madeira	53	437.635	0,32			
	Biogás	24	84.937	0,06			
	Casca de Arroz	9	36.433	0,03			
Nuclear		2	1.990.000	1,45	2	1.990.000	1,45
Carvão Mineral	Carvão Mineral	13	3.389.465	2,47	13	3.389.465	2,47
Eólica		151	3.106.190	2,26	151	3.106.190	2,26
Fotovoltaica		127	9.933	0	127	9.933	0
Importação	Paraguai		5.650.000	5,46		8.170.000	5,95
	Argentina		2.250.000	2,17			
	Venezuela		200.000	0,19			
	Uruguai		70.000	0,07			
Total		3.247	137.336.190	100	3.247	137.336.190	100

Fonte: ANEEL, 2014 (atualizado em 20/06/2014)

Das as usinas termelétricas (UTE) de biogás em operação a fonte mais comum do combustível utilizada é representada pelos resíduos eliminados em frigoríficos, ou seja, de origem animal. A maioria das fazendas que contam com a tecnologia utiliza o biogás provido de dejetos suínos em biodigestores, e geram energia para suprir a demanda do próprio local, podendo comercializar o excedente. Em segundo lugar aparecem os empreendimentos que exploram o biogás gerado em aterros sanitários, atualmente existem oito. Em relação aos empreendimentos em outorga, os aterros sanitários ocupam 67% do total, com seis usinas já autorizadas.

Contudo, uma vez que existe a meta de que não haja mais a disposição final de resíduos sólidos orgânicos em aterros sanitários, o desenvolvimento e uso destas tecnologias estão comprometidos.

Dessa forma, destaca-se a biometanização, isto é, a digestão anaeróbia controlada em reatores para o processamento da matéria orgânica e consequente geração de energia elétrica.

Esta tecnologia é bastante recente e vem sendo estudada principalmente na Europa, onde evitar o aterramento de resíduos sólidos orgânicos está em vigor desde a Diretiva 1999/31/EC, de 29 de abril de 1999 (REICHERT, 2005).

O presente trabalho visa, portanto, o estudo das tecnologias de destinação de resíduos sólidos orgânicos no Brasil, por meio de recuperação energética do biogás gerado em aterros sanitários, bem como pelo tratamento pela biometanização, como estas estão sendo incentivadas pelo poder público de forma a contribuir com a redução de impactos ambientais e qual a viabilidade de implantação de cada uma delas. Assim, espera-se que esta pesquisa contribua no debate sobre as políticas públicas de gestão de resíduos sólidos existentes no Brasil e sobre as tecnologias presentes no país para tratamento e reaproveitamento de resíduos e, finalmente, como ambos os aspectos devem estar integrados em função do desenvolvimento sustentável.

2. OBJETIVOS

Por meio de levantamento teórico, o presente trabalho visa subsidiar pesquisas futuras quanto à utilização de gases gerados na digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos como combustível para produção de energia elétrica.

2.1 Objetivos Específicos

- i)** Análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, ao se tratar de tratamento de resíduos sólidos urbanos;
- ii)** Levantamento bibliográfico sobre o aterro sanitário como unidade de disposição final ambientalmente adequada de rejeitos;
- iii)** Levantamento bibliográfico sobre o processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos, em aterro sanitário e em biometanizadores, e sobre as tecnologias que visam o reaproveitamento de seus substratos;
- iv)** Identificação dos aspectos que influenciam na geração de energia elétrica a partir do biogás provido pela digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos

A relação entre saúde pública e meio ambiente está cada vez mais clara com o crescimento econômico e desenvolvimento de novas tecnologias, o que exige construção de políticas públicas para orientar ações que visam o bem estar social. Assim, em 2007 foi instituída no Brasil a Lei nº 11.445 a fim de estabelecer as diretrizes para o saneamento básico, ou seja, os objetivos, instrumentos, metas e ações para adequar os sistemas de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem urbana. Contudo, cada um destes sistemas apresenta características e desafios específicos, o que indica a necessidade de haver políticas direcionadas para cada uma destas grandes áreas. Dessa forma, surgiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, a qual define resíduos sólidos como

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.

Em seu Artigo 13º, a PNRS ainda classifica os resíduos sólidos conforme sua origem e periculosidade.

I - quanto à origem:

- 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 sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;

- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
 - j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
 - k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;
- II - quanto à periculosidade:
- a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
 - b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a”.

O parágrafo único do mesmo artigo ainda determina que os resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços caracterizados como não perigosos podem ser tratados como resíduos domiciliares pelo poder público municipal.

Dentre as definições presentes do Artigo 3º da PNRS, é importante destacar a diferença entre gerenciamento e gestão integrada de resíduos sólidos. O primeiro contempla o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas diversas etapas de tratamento presentes em um plano de gerenciamento, desde a coleta até a destinação final dos resíduos ou disposição final dos rejeitos, ambas respeitando o meio ambiente. Por sua vez, a gestão integrada indica o conjunto de ações que visam soluções para os resíduos sólidos, considerando fatores políticos, econômicos, ambientais, culturais e sociais, com a presença de controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável.

Diante destes mecanismos de gestão, a PNRS determina também alguns objetivos a serem alcançados, em seu Art. 7º. Além da proteção da saúde pública e da qualidade ambiental, da adoção de tecnologias limpas e da articulação entre as diferentes esferas do poder público e setor empresarial em busca de cooperação técnica e financeira em busca por soluções para os resíduos sólidos, destaca-se a hierarquia do tratamento de resíduos. A prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos é apresentada no Artigo 9º da PNRS (Figura 1), favorecendo o alcance de outros objetivos presentes na política, como o estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo, incentivo à indústria de reciclagem e redução do volume e periculosidade de resíduos perigosos.



Figura 1: Estratégia de gestão integrada de resíduos sólidos
Fonte: NEPER, 2014

A não geração, redução, reutilização, reciclagem e recuperação energética dos resíduos sólidos são medidas de prevenção à poluição e, em relação ao desenvolvimento de produtos, devem sempre seguir os princípios de produção mais limpa (NEPER, 2014). A redução, reutilização, reciclagem e recuperação energética devem ser praticadas até os seus limites.

O Decreto 7.404 de 2010, regulamentador da PNRS, em seu Artigo 37º determina que a recuperação energética de RSU deva ser disciplinada, de forma específica, em ato conjunto do Ministério do Meio Ambiente, Ministério de Minas e Energia e Ministério das Cidades. Contudo, no parágrafo único deste mesmo artigo, os gases gerados na digestão da matéria orgânica em aterros sanitários são excluídos do que foi disposto.

3.2 Resíduos Domiciliares

Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, importante instrumento da PNRS, a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados no Brasil em 2008 tem como maior contribuinte os resíduos orgânicos, seguidos pelos materiais recicláveis, os quais representam 31,9% do total (Tabela 2). O Plano apresenta também que em 2009 quase 90% dos domicílios brasileiros estavam sendo atendidos por coleta regular de resíduos, sendo que na área urbana o índice supera 98%, enquanto na rural não chega a 33%.

Tabela 2: Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008

Resíduos		Percentual (%)	Quantidade (t/dia)
Material Reciclável	Metais	2,9	5.293,50
	Aço	2,3	4.213,70
	Alumínio	0,6	1.079,90
	Papel, papelão e tetrapak	13,1	23.997,40
	Plástico total	13,5	24.847,90
	Plástico filme	8,9	16.399,60
	Plástico Rígido	4,6	8.448,30
	Vidro	2,4	4.388,60
Matéria Orgânica		51,4	94.335,10
Outros		16,7	30.618,90
Total		100,0	183.481,50

Fonte: Brasil, 2012

O Plano traz também uma comparação entre os anos 2000 e 2008 de como se procedeu a destinação final dos resíduos sólidos urbanos diariamente, como mostra a Tabela 3. É apresentado que mais de 90%, em massa, dos resíduos são destinados para unidades como aterros sanitários, aterros controlados e lixões, enquanto 10% distribuem-se pelas unidades de compostagem, triagem para reciclagem, incineração, vazadouros em áreas alagáveis e outros destinos. Já a Figura 2 ilustra, no mapa do Brasil, qual é a predominância de destinação final de resíduos em cada região. É evidente a grande quantidade de aterros sanitários em São Paulo e na região Sul. Já no restante da região Sudeste os aterros controlados são as unidades mais comuns de disposição. Nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste o índice de vazadouros a céu aberto (lixão) como único destino final de resíduos sólidos é muito alto, o que indica uma carência de medidas socioambientais e falhas administrativas para adequada gestão e manejo dos RSU destas localidades.

Tabela 3: Quantidade diária de resíduos sólidos urbanos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para os anos 2000 e 2008

Destino Final	2000		2008	
	Quantidade (t/dia)	Percentual (%)	Quantidade (t/dia)	Percentual (%)
Aterro sanitário	49.614,50	35,4	110.044,40	58,3
Aterro controlado	33.854,30	24,2	36.673,20	19,4
Vazadouros a céu aberto (lixão)	45.484,70	32,5	37.360,80	19,8
Unidade de compostagem	6.364,50	4,5	1.519,50	0,8
Unidade de triagem para reciclagem	2.158,10	1,5	2.592,00	1,4
Unidade de incineração	483,10	0,3	64,80	<0,1
Vazadouros em áreas alagáveis	228,10	0,2	35,00	<0,1
Locais não fixos	877,30	0,6	Sem Informação	
Outra unidade	1.015,10	0,7	525,20	0,3
Total	140.080,70	99,9	188.814,90	

Fonte: Brasil, 2012

O diagnóstico de RSU presente no Plano Nacional de Resíduos Sólidos foi realizado através do levantamento de dados de diversos dados fornecidos pelo IBGE e artigos diversos. Contudo, o documento que deveria ser norte para a elaboração de diagnósticos, prognósticos, metas e ações para planos de abrangência regional ou municipal, apresenta pouca discussão a respeito dos números e estatísticas apresentadas. A Tabela 3 mostra índices preocupantes quanto a redução em aproximadamente 76% das unidades de compostagem presentes no país, um decaimento também nas unidades de incineração e de triagem para reciclagem.

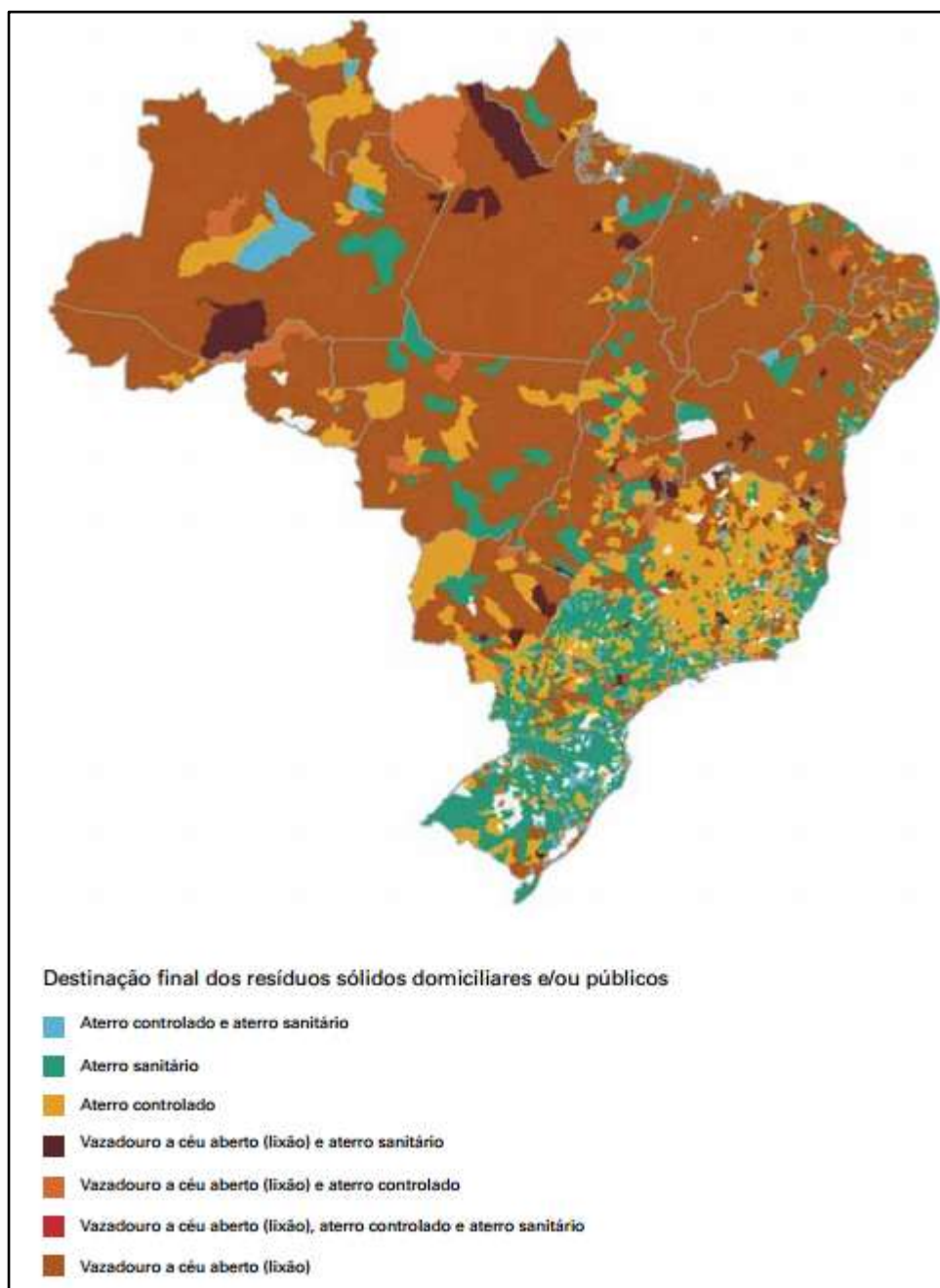


Figura 2: Municípios, segundo a destinação final dos resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos
Fonte: Brasil, 2010b

A partir destes dados nota-se um aumento significativo na destinação final de RSU em aterros sanitários, e uma redução em aterros controlados e vazadouros, o que indica uma crescente melhora na gestão municipal dos resíduos e investimentos em unidades adequadas de disposição final. Contudo, o aterro sanitário não é local ideal para recebimento de matéria orgânica e de material reciclável, uma vez que estes resíduos podem ser reaproveitados ou

reciclados. O encaminhamento destes materiais junto aos resíduos domiciliares para aterros sanitários gera despesas aos municípios que poderiam ser evitadas.

Para cada tipo de resíduo devem ser definidas operações a fim de encaminhar o adequado tratamento após sua geração (SCHALCH, 1992). Portanto, a segregação na fonte, isto é, a separação dos diversos tipos de materiais que compõem um determinado montante a ser descartado, é a etapa mais importante para orientar as atividades a serem desenvolvidas até a disposição final dos resíduos sólidos. A Figura 3 ilustra o esquema dessas operações tratando-se de resíduos domiciliares.

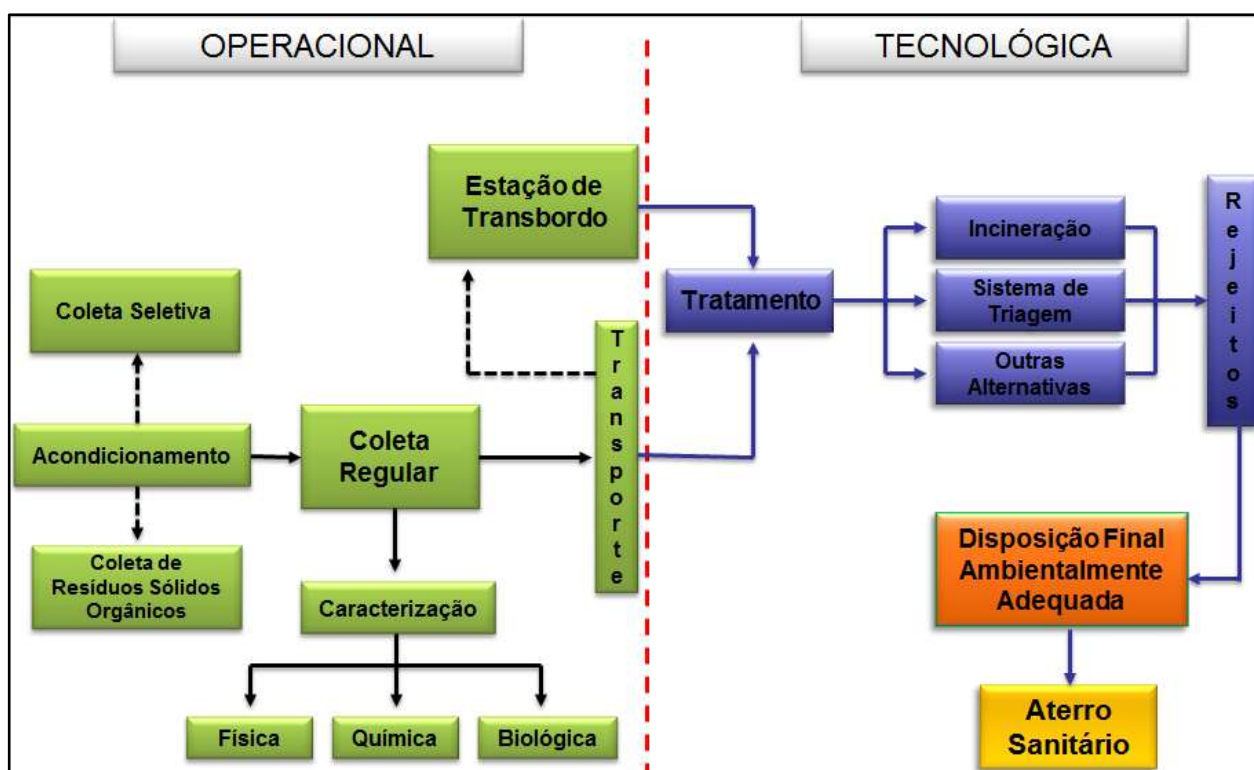


Figura 3: Operações efetuadas para tratamento de resíduos domiciliares

Fonte: NEPER, 2014

Através do diagrama conclui-se que apenas os aterros sanitários são a unidade final ambientalmente adequada apenas para os rejeitos, ou seja, os resíduos sólidos que não apresentam outra possibilidade que não esta depois de esgotadas todas as alternativas de tratamento e recuperação. A PNRS define também, em seu Art. 54, que a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos deverá ser implantada até 2014 pelos gestores, ou seja, ainda devem ser erradicados 2.906 lixões no Brasil (BRASIL, 2012).

3.2.1 Coleta Seletiva

A coleta seletiva é definida como “coleta de resíduos sólidos previamente segregados conforme sua constituição ou composição”, segundo a PNRS (BRASIL, 2010). Já Brasil (2010b), especifica a coleta seletiva como “recolhimento diferenciado e específico de materiais reaproveitáveis, tais como papéis, vidros, plásticos, metais, ou resíduos orgânicos compostáveis, previamente separados do restante do lixo nas suas próprias fontes geradoras”.

Portanto, a fim de reduzir a disposição final em aterros sanitários, a coleta seletiva se apresenta como um importante instrumento da PNRS, junto à logística reversa e outras ferramentas de implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. A Figura 4 ilustra como deve ser o tratamento de resíduos sujeitos à coleta seletiva ou à coleta de resíduos sólidos orgânicos. Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, de 2000 a 2008 houve aumento de 12% no número de municípios que desenvolvem programas e ações de incentivo à coleta seletiva de materiais recicláveis, a maioria nas regiões Sul e Sudeste.

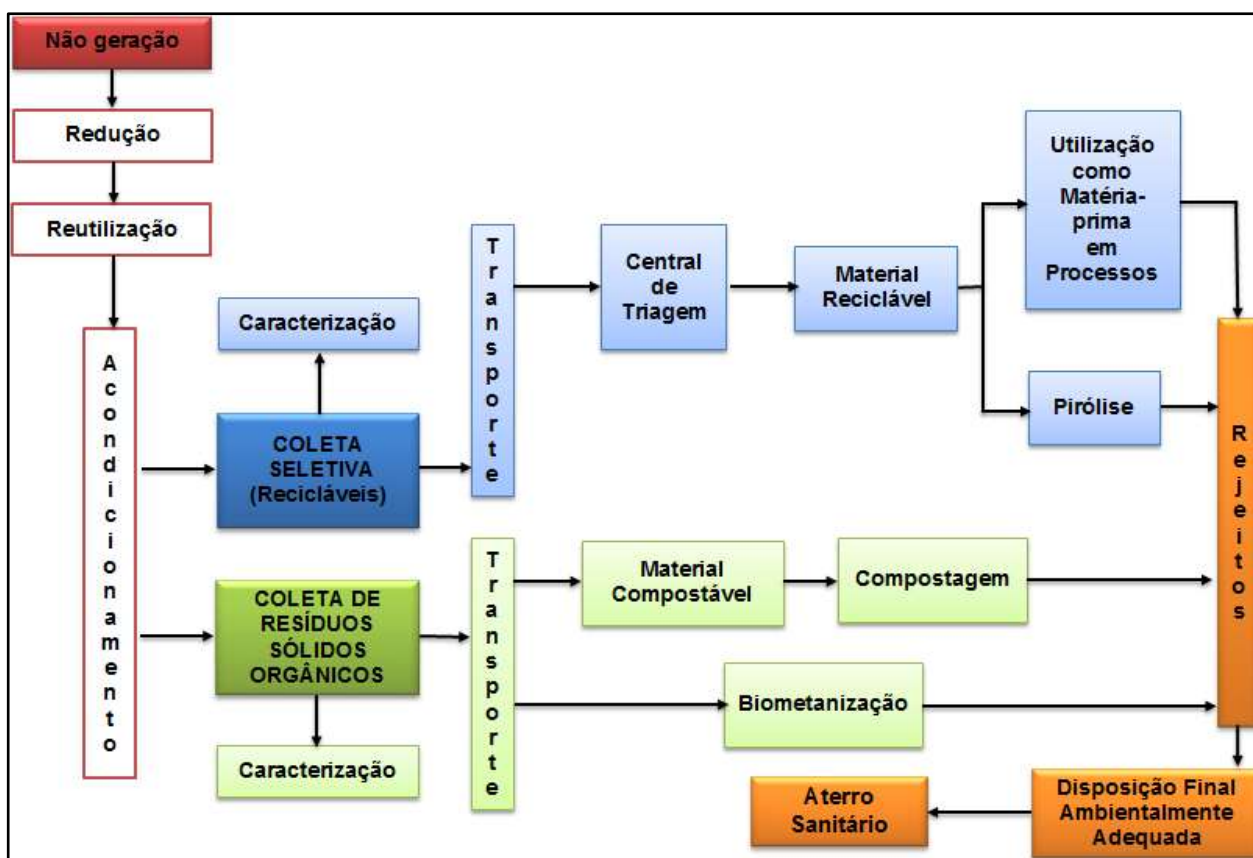


Figura 4: Procedimentos de tratamento de resíduos sólidos orgânicos e recicláveis

Fonte: NEPER, 2014

O Artigo 19º da PNRS prevê como conteúdo mínimo de um plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos metas de redução, reutilização, coleta seletiva e reciclagem, assim como as formas e limites de participação do poder público nas ações relativas à responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Os municípios que implantarem a coleta seletiva com a participação de associações de catadores são priorizados no acesso aos recursos da União, e o poder público municipal pode instituir incentivos econômicos aos consumidores que aderirem ao sistema de coleta seletiva, segundo o Artigo 35º.

Contudo, não basta apenas definir as medidas estruturais de apoio à coleta seletiva, é necessário também investir em programas e ações de educação ambiental que disseminem a importância socioambiental da reutilização e reciclagem de materiais reaproveitáveis, assim como das cooperativas e associações de catadores. Os programas formais de coleta seletiva no Brasil ainda não apresentam um número satisfatório de adesão, como mostra a Tabela 4 (BRASIL, 2012).

Tabela 4: Estimativa da participação dos programas de coleta seletiva formal (2008)

Resíduos	Quantidade de resíduos reciclados no país (mil t/ano)	Quantidade recuperada por programas oficiais de coleta seletiva (mil t/ano)	Participação da coleta seletiva formal na reciclagem total (%)
Metais	9.817,8	72,3	0,7
Papel/Papelão	3.827,9	285,7	7,5
Plástico	962,0*	170,3	17,7
Vidro	489,0	50,9	10,4

Fonte: Brasil, 2012

3.2.2 Coleta de Resíduos Sólidos Orgânicos

Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, somente 1,6% do total de resíduos sólidos orgânicos coletados no Brasil é encaminhado para tratamento via compostagem. Existem 211 municípios com unidades de compostagem, 78 no estado de Minas Gerais e 66 no Rio Grande do Sul (BRASIL, 2012). A coleta seletiva de resíduos sólidos orgânicos aparece como uma recomendação do Plano, uma vez que a qualidade final do composto depende da eficiência na segregação da fonte geradora de resíduos.

Neste mesmo documento constam as diretrizes e estratégias para atingimento dos objetivos dispostos no Artigo 7º da PNRS e das metas previstas no próprio Plano. A primeira

diretriz, a redução da geração de RSU, apresenta 19 diferentes estratégias, dentre elas o incentivo a separação de resíduos orgânicos compostáveis, recicláveis e rejeitos, a fim de implantar polos regionais para o reaproveitamento e reciclagem de materiais.

Há também uma diretriz específica para a redução de RSU úmidos dispostos em aterros sanitários e tratamento e recuperação de gases nas unidades finais de disposição, a qual pretende induzir a compostagem, o aproveitamento energético do biogás gerado em biodigestores ou em aterros sanitários, além da busca por novas tecnologias com o mesmo fim. Para tanto, é necessário comprovar viabilidade técnica e ambiental, segundo o parágrafo 1º do Artigo 9º da PNRS, e também devem ser elaborados programas de monitoramento de emissão de gases tóxico aprovado pelo órgão ambiental competente. Portanto, dentre as 19 estratégias propostas, destacam-se:

i) Estratégia 1

Implementar melhorias na segregação da parcela úmida dos RSU, a fim de propiciar a obtenção de uma fração orgânica de melhor qualidade, otimizando o seu aproveitamento independente de qual será seu fim (composto ou geração de energia).

ii) Estratégia 2

Implementar medidas para aproveitamento do potencial dos materiais provenientes dos serviços de poda e capinação, integrando ao processo de aproveitamento.

iii) Estratégia 3

Disponibilizar recursos financeiros e incentivos fiscais para novas iniciativas, modernização ou ampliação de unidades de compostagem e biodigestão.

iv) Estratégia 4

Disponibilizar recursos para estudos de viabilidade técnica, ambiental e econômica de unidades de biodigestão e sistema de captação de gases em aterros sanitários.

v) Estratégia 5

Disponibilizar recursos para implantação de sistemas de captação e geração de energia em aterros sanitários.

vi) Estratégia 7

Realizar atividades de difusão tecnológica e de conhecimentos dos processos de biodigestão para a produção de biogás e composto.

vii) Estratégia 8

Promover o desenvolvimento tecnológico visando à otimização e o aumento da eficiência dos processos de biodigestão com aproveitamento dos resíduos sólidos orgânicos, considerando-se as especificidades regionais.

viii) Estratégia 15

Disponibilizar recursos para capacitação da sociedade para redução de geração de resíduos orgânicos, prática da compostagem e geração de renda através da comercialização do composto.

A implantação de sistema de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articulação com agentes econômicos e sociais sobre as formas de utilização do composto produzido é de responsabilidade do titular dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos municipais, de acordo com a PNRS. A Figura 5 ilustra o diagrama de tratamento adequado dos resíduos sólidos orgânicos compostáveis gerados.

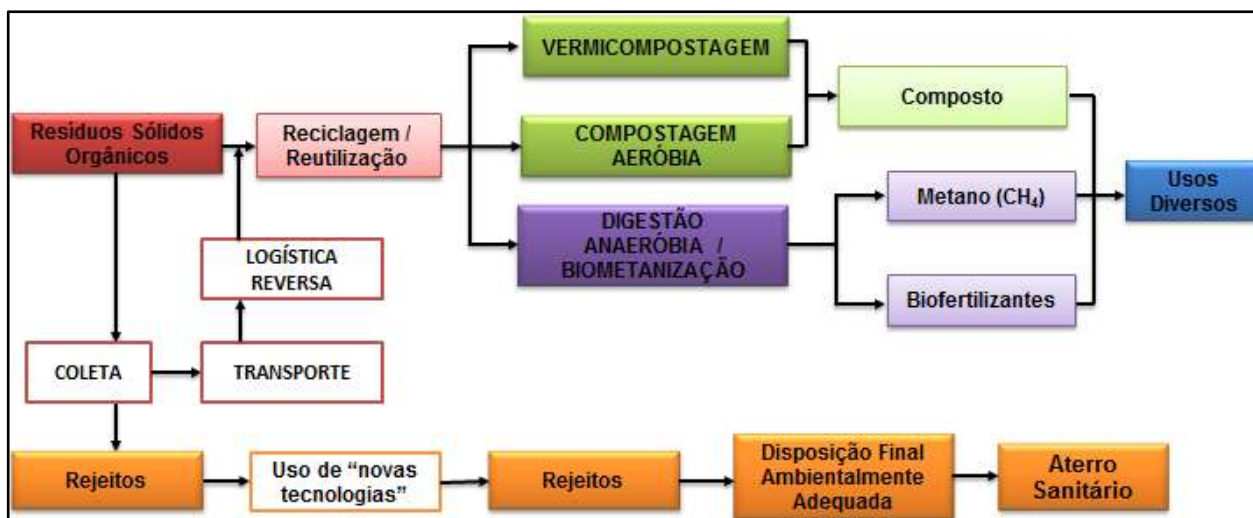


Figura 5: Tratamento adequado de resíduos sólidos orgânicos

Fonte: NEPER, 2014

Embora a PNRS determine muito claramente que devem ser encaminhados para aterros sanitários somente os rejeitos, isto é, a fração não aproveitável dos resíduos, no Plano Nacional de Resíduos Sólidos constam diversas medidas que incentivam o aproveitamento da matéria orgânica nestas unidades.

3.2.3 Logística Reversa

A PNRS define Logística Reversa como

instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada

O Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010 que, além de regulamentar a PNRS, cria o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, dispõe dos instrumentos e formas de implantação da logística reversa em seu Capítulo III. Segundo o 33º Artigo da PNRS, são obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa os fabricantes, importadores e distribuidores de agrotóxicos (seus resíduos e embalagens), pilhas e baterias, pneus, óleos lubrificantes (seus resíduos e embalagens), lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista, produtos eletroeletrônicos e seus componentes.

Contudo, como se tratando de uma estratégia para reaproveitamento de resíduos, é conveniente a sua aplicação tratando-se de resíduos sólidos orgânicos, em que o setor empresarial deva implantar sistemas de tratamento que visem a valorização desta parcela de resíduos.

3.3 Aterro Sanitário como Unidade Final de Disposição de Resíduos

Ainda é comum em muitos municípios e regiões brasileiras o lançamento de resíduos sólidos domiciliares a céu aberto, em que a disposição ocorre diretamente sobre o solo, vias e logradouros públicos, margens de corpos da água, áreas alagáveis, entre outros, sem nenhuma proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Segundo Bidone e Povinelli (1999), esses acúmulos de resíduos facilitam a proliferação de vetores, geração de maus odores, poluição das águas superficiais e subterrâneas e obstrução de vias públicas. Por outro lado, os aterros controlados são locais específicos para disposição final de resíduos que apresentam algumas precauções tecnológicas para evitar impactos, como a cobertura dos resíduos com argila.

Os aterros sanitários representam a forma ambientalmente adequada para a disposição final de rejeitos urbanos no solo, em que são adotadas diversas tecnologias e obras de engenharia para prevenção contra impactos ambientais e à saúde pública, respeitando normas operacionais específicas. Assim, em um aterro sanitário incluem-se: cobertura dos resíduos sólidos com argila selecionada e compactada, sistemas de drenagem periférica e superficial para afastamento de

águas pluviais, sistemas de coleta e tratamento de lixiviado, sistemas de drenagem e queima de gases gerados durante a degradação da matéria orgânica (BIDONE E POVINELLI, 1999).

De uma forma geral, os RSU são dispostos em camadas compactadas envoltas por materiais de baixa permeabilidade, cada célula do aterro é vedada no topo, na base e, quando necessário, nas laterais com esses materiais (ARAB, 2011). As principais camadas e partes físicas de um aterro sanitário são:

- Camadas de impermeabilização de fundo e nas laterais: função de evitar a contaminação do subsolo e de aquíferos subjacentes pela migração de poluentes;
- Camadas de cobertura final: visa à minimização da infiltração de águas pluviais e, assim, evitar o aumento no volume de percolado;
- Células de resíduo: consistem no volume de resíduos dispostos durante um período de lançamento, incluindo o material de recobrimento que o envolve;
- Recobrimento da célula: camada de material inerte (solo ou outros) que cobre a superfície da célula para impedir o espalhamento dos resíduos e minimizar a proliferação de vetores, reduzir a exalação de odores e formação de poeiras, permitir o tráfego de veículos coletores sobre o aterro;
- Bermas: em aterros com altura superior a 15 metros, garantem a estabilidade do talude lateral;
- Sistemas de drenagem de águas, líquidos percolados e gases, e sistemas de coleta de efluentes.

A Figura 6 ilustra esquematicamente a configuração de um aterro sanitário tradicional. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) instituiu diversas normas que norteiam os critérios e projetos de diferentes tipos de aterros sanitários. Encontra-se em vigor: ABNT NBR 8418:1984 – Apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos; ABNT NBR 8849:1985 – Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos; ABNT NBR 10157:1987 – Aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, construção e operação; ABNT NBR 8419:1992 – Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos; ABNT NBR 13896:1997 – Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação; ABNT NBR 15113:2004 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação; ABNT NBR 8419:1992 – Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos –

Procedimento e ABNT NBR 15849:2010 – Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.

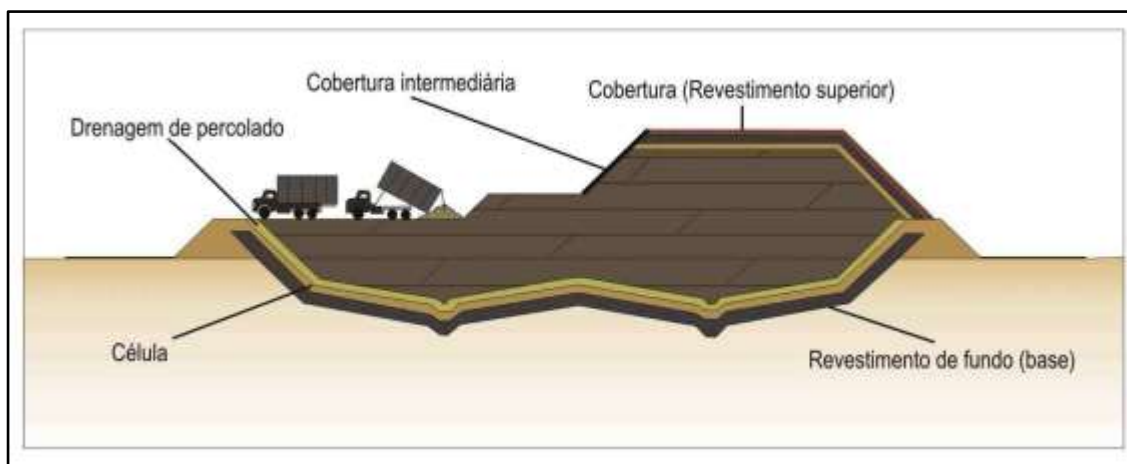


Figura 6: Esquema ilustrativo da configuração de um aterro sanitário
Fonte: Boscov, 2008

3.3.1 O Ecossistema Aterro Sanitário

As condições socioeconômicas de uma população interferem diretamente na composição dos resíduos gerados e, portanto, em suas características físicas, químicas e biológicas. Assim, em cada aterro sanitário há um ecossistema particular que geralmente torna-se um meio de favorecimento à multiplicação de microrganismos e o estabelecimento de populações bacterianas (SCHALCH, 1992). As interações que ocorrem nestes meios são bastante complexas, uma vez que existem inúmeras variáveis que influenciam a degradação da matéria orgânica, internas (gradiente de temperatura, migrações gasosas e de líquidos, potencial de oxidação-redução, pH, atividades enzimáticas) e externas (compactação/impermeabilização conferida à massa de resíduos, precipitação pluviométrica, variação sazonal de temperatura na região). Dessa forma, admite-se que a evolução temporal de parâmetros característicos de aterros sanitários apresenta comportamento semelhante, contudo com implicações próprias às interações internas de cada meio. A Figura 7 ilustra um ecossistema aterro sanitário.

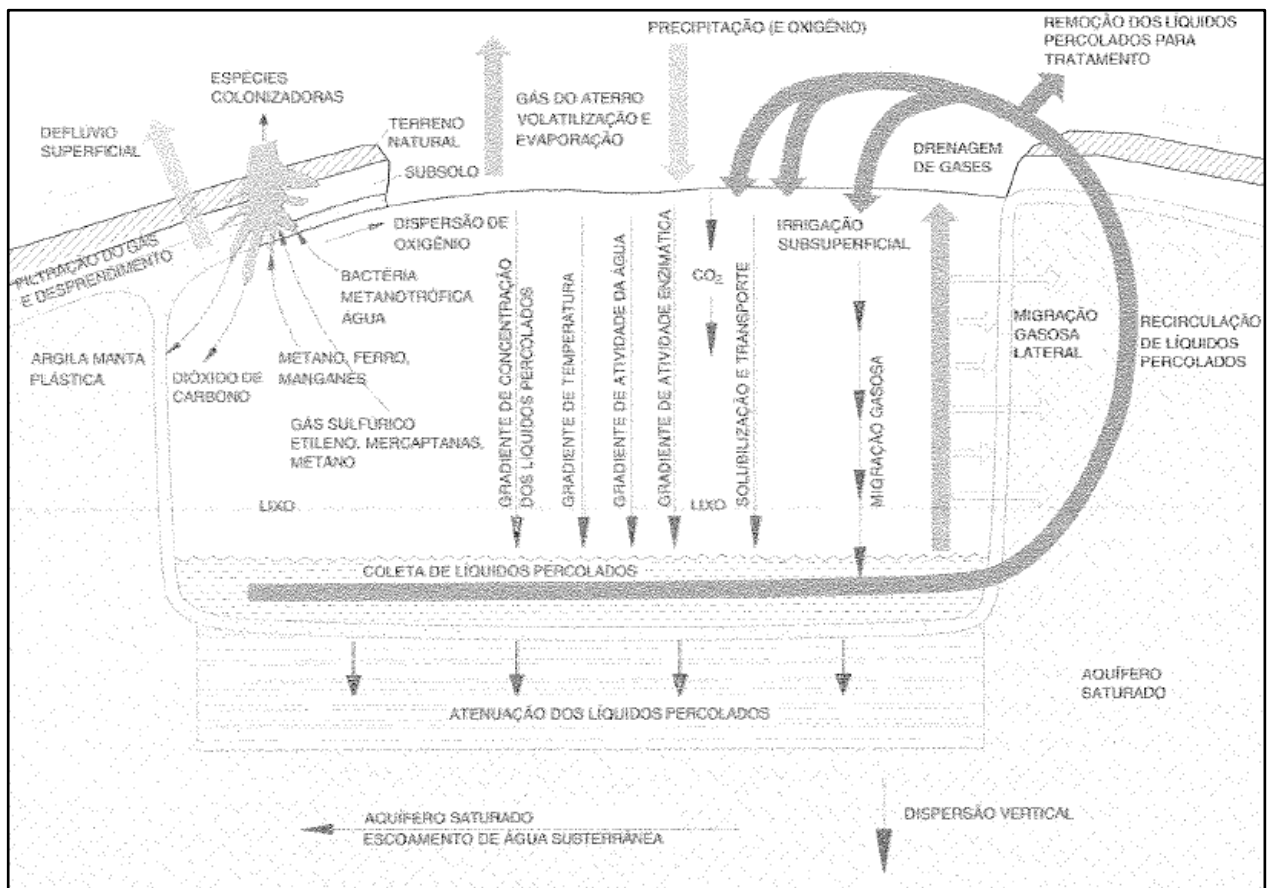


Figura 7: Representação esquemática de um ecossistema aterro sanitário

Fonte: Schalch, 1992

3.4 Decomposição da Matéria Orgânica em Aterros Sanitários

Os aterros sanitários são importantes fontes de poluição devido à emissão de lixiviados e biogás, originados a partir da conversão da matéria orgânica em formas solúveis e gasosas por microrganismos e também por dissolução de elementos minerais e do carreamento de micropartículas pela água (CASTILHOS JUNIOR, 2003). A água presente nos resíduos em conjunto com a água proveniente de chuvas foram os principais fatores que promovem o processo de degradação de compostos orgânicos e inorgânicos.

Estão presentes no ecossistema aterro sanitário e são responsáveis pela degradação da matéria orgânica os microrganismos heterótrofos, que utilizam o substrato presente nos resíduos sólidos urbanos a fim de suprir suas necessidades energéticas. As condições aeróbias são favorecidas somente na fase inicial, durante e logo após a deposição de resíduos no aterro e predominam fungos e bactérias fotossintéticas, a maior parte da degradação ocorre em meio anaeróbio, ou seja, com ausência de oxigênio. Enquanto a decomposição aeróbia acontece de

forma mais acelerada e dura aproximadamente um mês, a degradação anaeróbia dos resíduos constitui uma etapa mais complexa e lenta e pode ser dividida em quatro fases, como ilustra a Figura 8 (CAMPOS, 1999).

i) Hidrólise

A primeira fase da digestão anaeróbia consiste na conversão do material orgânico particulado, polímeros, em compostos dissolvidos mais simples. A velocidade de hidrólise pode ser fator limitante para todo o processo de digestão, ou seja, de formação de biogás. Para que o processo ocorra atuam exo-enzimas excretadas por bactérias fermentativas e, assim, as proteínas se transformam em aminoácidos, os carboidratos em açúcares solúveis e os lipídios em ácidos graxos de longa cadeia de carbono.

ii) Acidogênese

Os produtos formados na hidrólise são agora absorvidos por bactérias fermentativas e com a acidogênese são excretados na forma de substâncias orgânicas mais simples, como ácidos graxos de curta cadeia de carbono, álcoois, ácido lático e compostos minerais (gás carbônico, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio).

iii) Acetogênese

Os produtos gerados na acidogênese são oxidados por bactérias acetogênicas e convertidos em substratos para as bactérias metanogênicas, ou seja, que viabilizam a produção de metano. Assim, são formados o acetato, o hidrogênio e o dióxido de carbono, contudo apenas os dois primeiros são diretamente utilizados pelas metanogênicas. Cerca de 70% da demanda química de oxigênio (DQO) digerida é convertida em ácido acético e os outros 30% é concentrado no hidrogênio formado. A formação do ácido pode ser acompanhada do surgimento de CO_2 ou H_2 dependendo do estado de oxidação, e o CO_2 também é gerado na etapa seguinte, a metanogênese.

iv) Metanogênese

Existem dois processos diferentes para a formação do metano por bactérias metanogênicas, o primeiro é através do grupo de metanogênicas acetotróficas a partir da redução de ácido acético, e o segundo pelo grupo de metanogênicas hidrogenotróficas a partir da redução de dióxido de carbono, com a presença de hidrogênio (H_2). Além destes, outros substratos utilizados por essas bactérias são o ácido fórmico, o metanol, metilaminas e dióxido de carbono. As bactérias do primeiro grupo são os microrganismos predominantes na digestão anaeróbia e

geralmente limitam a velocidade de conversão do material orgânico complexo, uma vez que crescem mais lentamente que aquelas do segundo grupo.

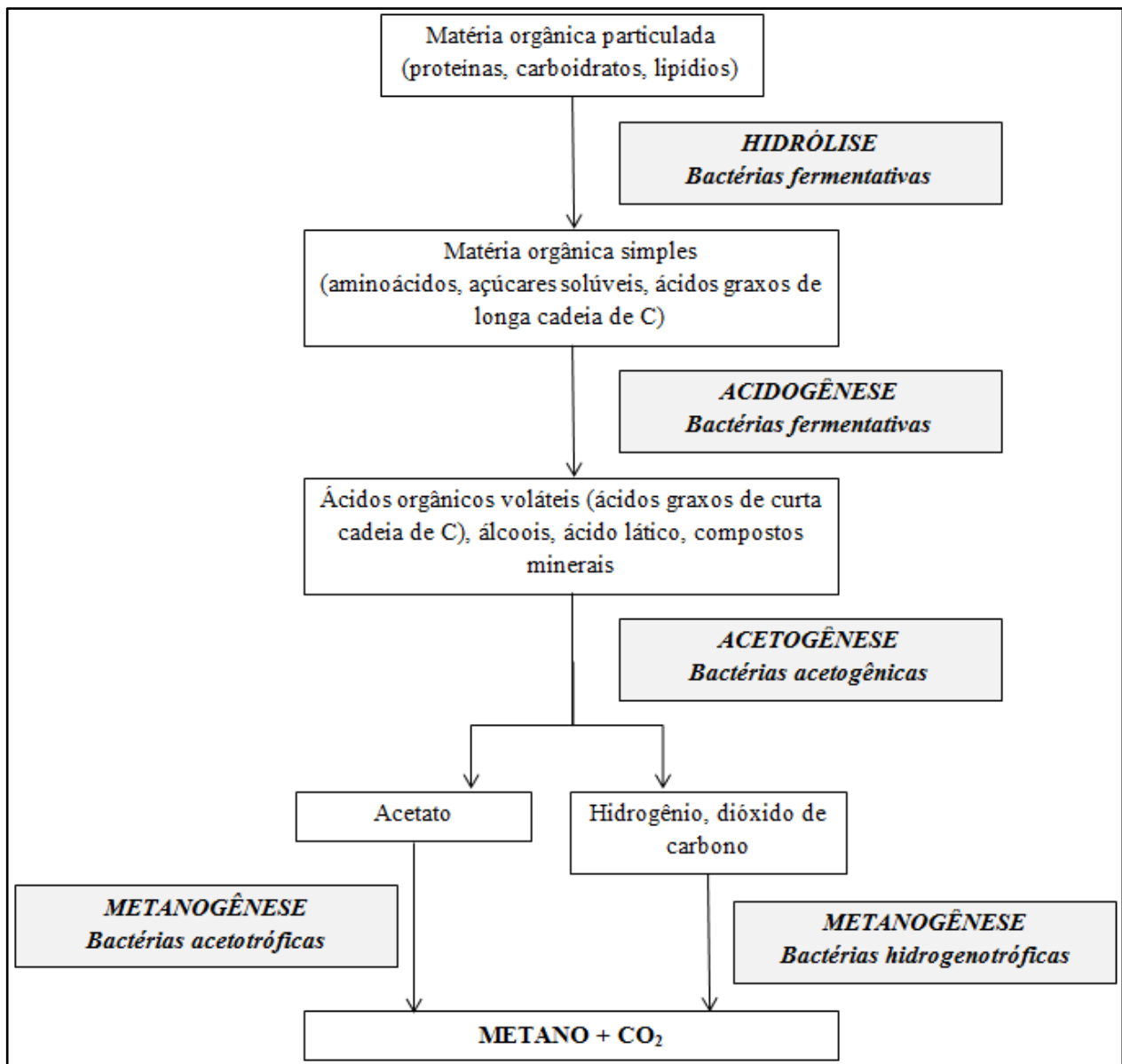


Figura 8: Representação esquemática das fases de digestão anaeróbia

Fonte: adaptado de Schallch, 1992

Para o caso específico da digestão anaeróbia da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos confinados em aterros sanitários, em 1986 Pohland e Gould apresentaram um modelo de representação das variações de parâmetros indicadores das fases de estabilização da matéria orgânica nestes meios. Assim, o processo de digestão é dividido em cinco fases distintas (Figura 9).

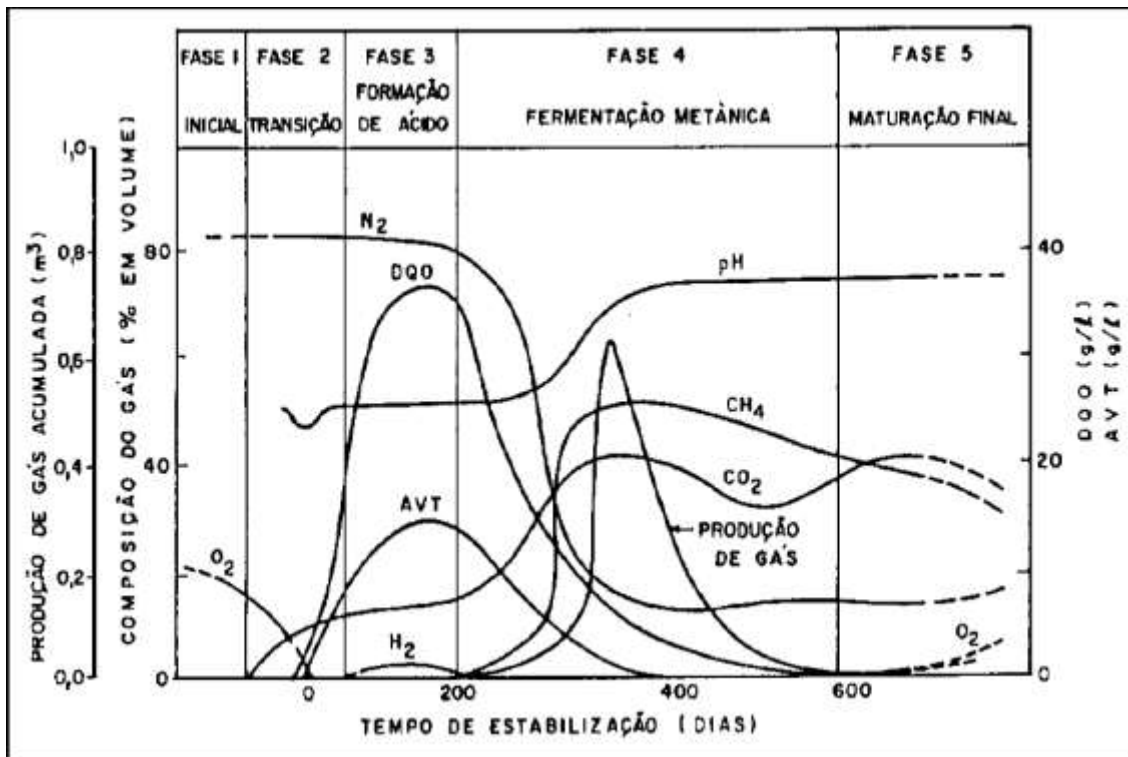


Figura 9: Fases da degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de aterro sanitário
Fonte: Pohland e Gould, 1986

A fase I – Ajuste inicial compreende a decomposição aeróbia da matéria orgânica, logo após a deposição dos resíduos sólidos no aterro. Os microrganismos aeróbios e anaeróbios facultativos que atuam nessa fase são provenientes do solo usado como cobertura para divisão das células do aterro, inclusive a camada final deste material. A umidade acumulada favorece a ocorrência de reações que iniciam a formação de gás e líquidos percolados.

Durante a fase II – Transição há decaimento na concentração de oxigênio e é atingido o limite máximo que um resíduo pode reter umidade, portanto se iniciam as reações anaeróbias, as quais podem utilizar nitratos e sulfetos como receptores finais de elétrons nas reações biológicas de conversão. Assim, o material orgânico complexo é convertido em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários, e então o pH do lixiviado sofre queda também pela formação de gás carbônico. A Figura 3.6 mostra elevação da concentração de DQO nesta etapa.

A fase III – Formação de Ácido é caracterizada pela predominância de formação de ácidos voláteis totais, os quais, quando dissolvidos, geram grande aumento na concentração de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO, assim como decaimento nos valores de pH.

Já na fase IV – Fermentação Metânica ocorre a conversão dos compostos intermediários, ácido acético e hidrogênio, em metano e excesso de dióxido de carbono, redução na intensidade

de produção de líquidos percolados, aumento nos valores de pH, redução do potencial de oxidação-redução e acelerada complexação e redução das espécies iônicas. Segundo Russo (2005), o pH ótimo para a fermentação metanogênica varia entre 6,8 e 7,2, isto é, valores próximos do neutro.

Finalmente, a fase V – Maturação Final é caracterizada pela escassez dos nutrientes, isto é, há menor quantidade de substratos disponíveis para degradação (que agora deve ocorrer de maneira lenta), há decaimento na produção de gás e constituintes orgânicos e inorgânicos dos líquidos percolados apresentam condições de pós-estabilização.

Schalch (1992) afirma que o modelo conceitual apresentado é um entre vários outros que pretendem demonstrar a variação de alguns parâmetros durante a digestão anaeróbia, todos baseados em experimentos particulares, isto é, não existe modelo definitivo do processo. A digestão anaeróbia em aterro sanitário é influenciada por condições específicas do local, como a composição física dos resíduos e o grau de umidade. Portanto, as várias células de um aterro se apresentam em diferentes fases e a taxa de desenvolvimento através dessas fases pode variar em função do tempo, condições físicas, químicas e biológicas.

3.4.1 Fatores de Influência Sobre a Digestão Anaeróbia

O desempenho da digestão anaeróbia depende de diversos fatores que exercem plena influência em todo o processo.

i) Temperatura

As propriedades físicas, químicas, biológicas e mecânicas dos resíduos sólidos e do material sobre o qual são dispostos são alteradas pela temperatura ambiente, segundo Yesiller et al. (2003). Especialmente, este parâmetro associa-se com a natureza das populações microbianas, uma vez que cada espécie tem seu desenvolvimento favorecido conforme uma faixa de temperatura, por exemplo, em aterros sanitários predominam as bactérias mesofílicas (15 - 45°C) e termofílicas (40 - 65°C). A temperatura controla a velocidade das cinéticas bioquímicas, portanto para cada uma dessas populações há um intervalo ótimo de temperatura para ocorrer a metanogênese (RUSSO, 2005).

ii) Nutrientes

Os substratos presentes nos resíduos sólidos são fonte de alimento para constituição de material celular e de elementos químicos necessários às atividades enzimáticas dos

microrganismos (CAMPOS, 1999). Alguns elementos em fortes concentrações podem inibir o processo de fermentação, como cálcio, magnésio, potássio, sódio e ferro. Por outro lado, o carbono, nitrogênio, oxigênio, fósforo e enxofre são denominados elementos majoritários e são fundamentais para bom rendimento dos gases de fermentação.

iii) pH

Segundo Campos (1999), ao longo do processo de digestão anaeróbia há alteração nos valores de pH do meio, uma primeira fase em que este se encontra baixo, devido à liberação de ácidos graxos voláteis uma segunda em que se estabiliza próximo da neutralidade, com valores por volta de sete, devido à catálise do ácido acético pelas bactérias metanogênicas.

Geralmente, o pH ótimo de desenvolvimento varia de população para população de microrganismos e, para evitar sua destruição, as células microbianas possuem a propriedade de absorver ou eliminar íons de hidrogênio e manter seu pH no intervalo ideal para realização de suas funções (RUSSO, 2005).

iv) Umidade

A umidade dos resíduos é fator determinante nas cinéticas de degradação, foram estabelecidos teores de umidade abaixo dos quais microrganismos não se desenvolvem adequadamente (RUSSO, 2005). Mas também, valores muito altos de umidade, próximos a saturação, podem ter efeito inibidor sobre o processo. Contudo, o teor de umidade não interfere na quantidade de biogás produzida, ou seja, para um mesmo valor de umidade as concentrações de gás podem variar, pois depende das características dos resíduos depositados.

v) Oxigênio

Para a digestão anaeróbia ocorrer com sucesso, ou seja, crescimento de microrganismos e conversão de carbono sólido para CH_4 e CO_2 , é essencial que o ambiente esteja isento de oxigênio livre (REGATTIERI, 2009).

vi) Hidrogênio

A conversão dos ácidos propiônico e butírico em acetato, e posterior formação de metano, pode ser prejudicada devido a altas pressões parciais de H_2 .

vii) Sulfato

Tanto bactérias sulforredutoras como metanogênicas convertem ácido acético e hidrogênio, assim, a diminuição na produção de metano por sulfato ocorre pela competição de substratos.

viii) Dióxido de carbono

Pressões parciais em torno de 0,2 de CO₂ podem inibir a conversão de ácido acético em metano.

3.4.2 Recirculação de Lixiviado

A realização de recirculação de lixiviado em aterros sanitários é justificada pela possibilidade de tratamento interno e pelo aumento da produção de metano devido à aceleração do processo de degradação (REGATTIERI, 2009). Experimentos indicam que em ambiente relativamente úmido, a recirculação traz benefícios somente no primeiro ano de operação do aterro, já em climas secos este período pode ser mais longo, para que seja aprimorada a distribuição de água no aterro.

Segundo Matos (2008), os estudos sobre a recirculação de lixiviado em aterros sanitários se iniciaram na década de 70, quando Pohland realizou experimentos que detectaram aumento do desenvolvimento de populações microbianas e da taxa de estabilização dos resíduos a partir da técnica. Além deste, outros autores e em décadas seguintes apresentaram trabalhos que chegavam à mesma conclusão.

3.5 Aspectos Físico-Químicos do Biogás

Os resíduos sólidos domésticos orgânicos, resíduos de atividades agrícolas e pecuárias e lodo de estação de tratamento de esgoto são importantes fontes de produção de biogás devido a degradação da matéria orgânica (FIGUEIREDO, 2011). Como apresentado anteriormente, o processo de degradação anaeróbia da matéria orgânica que gera o biogás em aterro sanitário é bastante complexo, que envolve diversas variáveis físicas, químicas e biológicas. Predominam na composição do biogás os gases metano e dióxido de carbono (Tabela 5), contudo as contribuições de cada gás variam conforme o tipo de resíduo e com o tipo e eficiência de tratamento aplicado.

A etapa de metanogênese da digestão anaeróbia é realizada por dois grupos de bactérias metanogênicas, os quais se diferenciam pelo substrato utilizado para a conversão. As metanogênicas acetotróficas realizam a redução do ácido acético e as metanogênicas hidrogenotróficas reduzem o dióxido de carbono. As respectivas equações químicas que governam este processo são (REGATTIERI, 2009):

- i) **Metanogênese acetotrófica:** $\text{CH}_3\text{COOOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
- ii) **Metanogênese hidrogenotrófica:** $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

Tabela 5: Composição típica percentual do biogás

Gás	Fórmula Química	Percentual (%)
Metano	CH_4	45,0 – 60,0
Dióxido de Carbono	CO_2	40,0 – 60,0
Nitrogênio	N_2	2,0 – 5,0
Oxigênio	O_2	0,1 – 1,0
Monóxido de Carbono	CO	0,0 – 0,2
Sulfeto de Hidrogênio	H_2S	0,0 – 0,1
Amônia	NH_3	0,1 – 1,0
Hidrogênio	H_2	0,0 – 0,2
Componentes Traço	-	0,01 – 0,6

Fonte: (Regattieri, 2009)

Segundo Figueiredo (2011), como a contribuição de outros gases na composição do biogás é muito menor comparada ao metano e gás carbônico, convencionalmente caracteriza-se o biogás com base nas propriedades destes dois componentes (Tabela 6). Contudo, para a adoção de tecnologias de operação, limpeza e combustão deve ser levada em conta toda a sua composição.

O metano é o principal componente do biogás ao utilizá-lo como combustível, os outros que não apresentam propriedade de combustão prejudicam o processo de queima ao absorver parte da energia gerada (PECORA, 2006). Quanto maior for o índice de outros gases e impurezas presentes no biogás, menor torna-se o seu poder calorífico. O Gráfico 1 ilustra a relação entre o poder calorífico do biogás e a concentração de metano. Além disso, a presença de vapor de água, por exemplo, favorece a corrosão de equipamentos após sua condensação, processo que pode também ocorrer através do gás sulfídrico, mesmo em pequenas concentrações, reduzindo a vida útil de equipamentos utilizados (FIGUEIREDO, 2011).

Como mostra a Tabela 6, as características do biogás dependem também da temperatura e da pressão, assim como do teor de umidade, variáveis de extrema importância para o estudo do aproveitamento energético de gases (PECORA, 2006). Também é fundamental conhecer seu volume e poder calorífico. A umidade afeta a temperatura da chama, os limites de inflamabilidade, reduz o poder calorífico e a taxa ar-combustível do gás, o volume (representado

pelo peso específico) é relevante para a manipulação do gás para armazenamento e, por sua vez, o poder calorífico depende da eficiência dos equipamentos adotados para o uso energético do gás.

Tabela 6: Propriedades físicas do metano, gás carbônico e gás sulfídrico

Propriedades	Metano	Dióxido de Carbono	Gás Sulfídrico
Peso molecular	16,04	44,01	34,08
Peso específico (ar = 1)	0,555 ¹	1,52 ¹	1,189 ²
Volume específico (cm³/g)	1.473,3 ¹	543,1 ²	699,2 ²
Capacidade calorífica a 1 atm (kcal/kg°C)	0,775 ¹	0,298 ³	0,372 ²
Relação CP/CV	1,307	1,303	1,320
Poder calorífico (kcal/kg)	13.268	0	4.633
Limite de inflamabilidade (% por volume)	5 – 15	Nenhum	4 – 46

1: -60°C, 1 atm; 2: -70°C, 1 atm; 3: -77°C, 1 atm

Fonte: Pecora, 2006

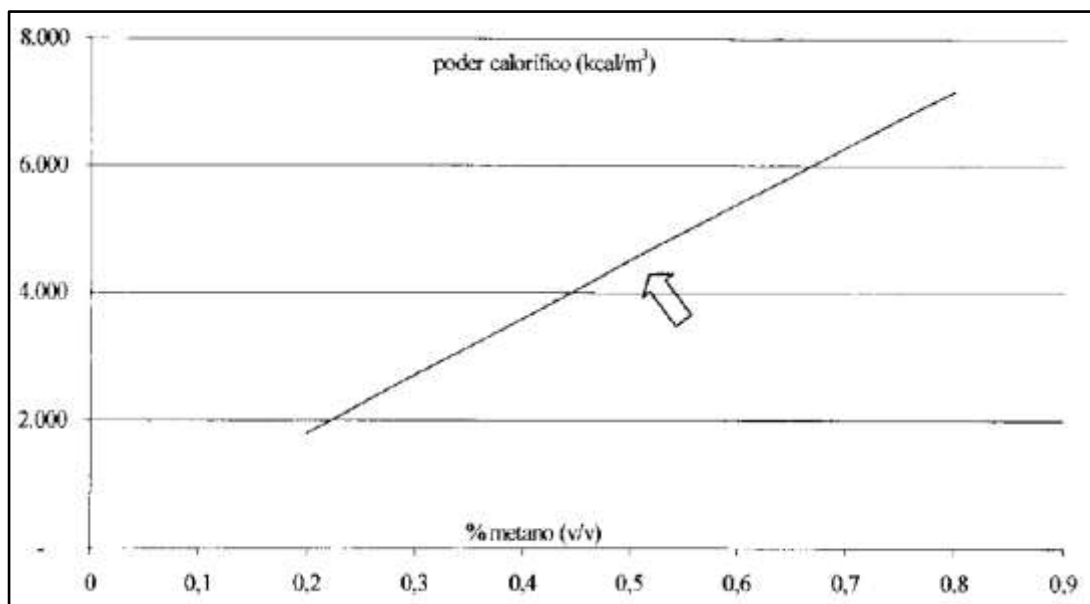


Gráfico 1: Poder calorífico do biogás (kcal/m³)

Fonte: Alves, 2000

Com a eficiência média de combustão e o poder calorífico, é possível obter a equivalência energética entre o biogás e outros combustíveis, como mostra a Tabela 7. Assim, é viável a substituição de algumas fontes de energia pelo biogás na indústria. Além disso, pode-se usar esta alternativa para iluminação, aquecimento de água e de caldeiras e fornos de uso

industrial (FIGUEIREDO, 2011). Em relação à saúde humana, o biogás pode provocar asfixia devido à diluição do oxigênio, embora não seja tóxico e sua combustão não libera resíduos.

Tabela 7: Equivalência energética de 1Nm³ de biogás

Combustível	Quantidade equivalente a 1 Nm³ de biogás
Carvão vegetal	0,8 kg
Lenha	1,5 kg
Óleo diesel	0,55 L
Querosene	0,58 L
Gasolina amarela	0,61 L
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	0,45 L
kWh	1,43
Álcool carburante	0,80 L
Carvão mineral	0,74 kg

Fonte: Pecora, 2006

A equivalência energética do biogás comparada a outros combustíveis é o primeiro fator a ser estudado para avaliar a viabilidade de sua utilização. Para tanto deve haver um levantamento dos contaminantes e outras substâncias presentes em sua composição, além do poder calorífico, pois estes aspectos influenciam diretamente nos custos de operação e manutenção das instalações (FIGUEIREDO, 2011). Portanto, existem diversas técnicas que utilizam processos físicos ou químicos com fins de purificar o biogás, sendo que o alvo de remoção varia conforme a aplicação energética que se pretende, como mostra a Tabela 8 (ALVES, 2000).

Segundo Espirito Santo Filho (2013), o biogás purificado corresponde ao Gás Natural Combustível (GNC), e sua relação entre massa e volume é de 0,6 kg/Nm³. Portanto, para uma proporção de 60% de CH₄ e 40% de CO₂ o poder calorífico do biogás é igual a 5.000 kcal/Nm³, equivalente a um litro de óleo diesel.

Tabela 8: Técnicas de remoção de impurezas do biogás

Alvo	Descrição Geral	Detalhes
Água	Adsorção	Sílica gel
		Peneira molecular
		Alumina
	Absorção	Etileno glicol (temperatura -6,7°C)
		Selexol
	Refrigeração	Resfriamento a 2°C
Hidrocarbonos	Adsorção	Carvão ativado
	Absorção	Óleo leve
		Etileno glicol
		Selexol (temperaturas entre -6,7°C e -33,9°C)
	Combinação	Refrigeração com etileno glicol e adsorção em carvão ativado
CO₂ e H₂S	Absorção	Solventes orgânicos
		Selexol
		Flúor
		Rectisol
		Soluções de sais alcalinos
		Potássio quente e potássio quente inibido (talvez tamponado)
		Alcanolaminas
		Mono, di-tri-etanol amina
		Deglicolamina
		Ucarsol-CR
	Adsorção	Peneiras moleculares
		Carvão ativado
	Separação por membranas	Membrana de fibra oca

Fonte: Alves, 2000

3.6 Reaproveitamento do Biogás de Aterro Sanitário

A captação de biogás gerado em aterros sanitários foi incentivada de modo a oferecer uma alternativa de produção de energia, devido aos choques do petróleo em 1973 e 1979, quando o preço do barril chegou a subir cerca de 900% (ESPIRITO SANTO FILHO, 2013). O antigo lixão do Caju, localizado no Rio de Janeiro, foi palco de uma das primeiras iniciativas de

aproveitamento energético de biogás no Brasil, em que foram instalados sistemas de coleta e transporte de biogás, com equipamentos disponíveis no mercado nacional na década de 70.

Os sistemas de captação e coleta de biogás devem ser planejados desde a concepção até o fim da última célula de disposição de RSU do aterro sanitário, para os sistemas de drenagem é essencial o conhecimento da vazão e de condicionantes geométricos da massa de resíduos (ESPIRITO SANTO FILHO, 2013). Assim, é possível elaborar um projeto de aproveitamento energético do biogás drenado, mas também é preciso levantar outros dados, listados abaixo, de modo a justificar a sua implementação.

i) Condições locais e informações disponíveis

Quantidade e composição dos resíduos, tipo e configuração do aterro sanitário, condições climáticas locais, taxa de geração e tratamento de percolato.

ii) Características e operação do aterro

Análises de campo, reconhecimento de áreas vizinhas.

iii) Potencial de recuperação do biogás

Estimativa através de modelagem computacional baseada na informação disponível, testes de campo e experiência com outros aterros semelhantes.

iv) Potencial de recuperação energética e benefícios ambientais

Quantificação das reduções de emissões de gases do efeito estufa ao longo do tempo.

v) Esquemas institucionais, de mercado e de negócios

Mercado de Desenvolvimento Limpo (MDL), venda de créditos de carbono.

vi) Tendências atuais e futuras do setor energético nacional

Incentivos ou impactos sobre um projeto de geração de energia com o biogás como combustível.

vii) Modelo conceitual dos sistemas de captação, coleta e aproveitamento

A fim de avaliar os custos de capital envolvidos, estimativa do custo de implantação e operação dos mecanismos de recuperação energética e identificação de fontes de receita.

3.6.1 Sistemas de captação de biogás de aterro sanitário

Para que o investimento inicial não seja muito elevado, geralmente os sistemas de captação de biogás em grandes aterros são planejados em etapas (ICLEI, 2009). Segundo Figueiredo (2011), a forma mais simples de realizar a coleta dos gases é através de uma rede de

tubos verticais perfurados. Inicialmente ou durante a operação da célula do aterro, isto é, enquanto os resíduos são dispostos, ocorre a instalação de tubos de sucção horizontais para que a coleta ocorra desde o início da produção de biogás. Compõem o sistema também sopradores, filtros para remoção de material particulado e tanques separadores de condensado. A maioria dos aterros sanitários no Brasil contém sistemas de drenagem de gases (Figura 10), os quais podem ser incorporados ao sistema de captação através da impermeabilização da parte superior dos drenos e instalação de um cabeçote (Figura 11).



Figura 10: Dreno típico de gases de aterro sanitário, presente na unidade de Rio Claro/SP



Figura 11: Cabeçote de adaptação de dreno existente, modelo nacional
Fonte: ICLEI, 2009

Figueiredo (2011) explica que a coleta de biogás se torna efetiva após parte do aterro ser fechada por terra ou pelos próprios resíduos e existe um coletor principal para o qual é transportado o gás coletado em cada tubo. A extração do biogás ocorre devido à pressão negativa gerada por um soprador, ao qual está ligada a linha principal. Nos poços de coleta ocorre a sucção dos gases através de compressores. Durante o percurso nas tubulações o biogás produzido em alta temperatura sofre condensação o que pode bloquear o sistema de coleta. Assim, é necessário instalar conectores e tubos inclinados para a drenagem e remoção do condensado. O material recolhido pode ser descartado na rede pública de esgoto, no sistema de tratamento do local ou usado para recirculação no aterro sanitário, conforme suas características, custos e legislação vigente.

A maioria dos aterros sanitários que possuem o sistema conta também com *flare* para queimar o biogás, quando há excesso ou quando é necessário realizar alguma manutenção dos equipamentos de geração de energia, assim evita-se a emissão dos gases para a atmosfera (ICLEI, 2009). O biogás também pode ser utilizado para iluminação a gás, uso veicular e geração de energia térmica (Figura 12). Conforme o uso final do biogás coletado é necessário aplicar algum tipo de tratamento, seja para remover condensado, CO₂, impurezas e outros componentes que reduzem a eficiência do uso determinado.

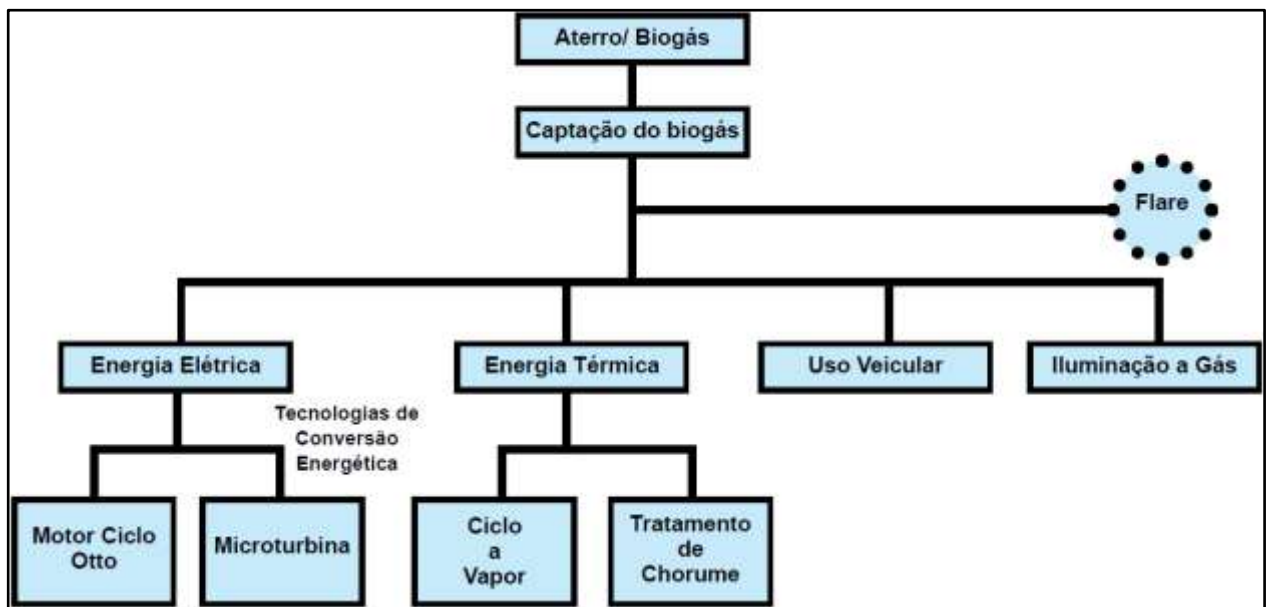


Figura 12: Diagrama com as alternativas de aproveitamento do biogás

Fonte: ICLEI, 2009

3.6.2 Conversão do biogás em energia elétrica

Através do processo de combustão controlada, a energia química presente nas moléculas de biogás é convertida em energia mecânica que, por sua vez, aciona um alternador e gera energia elétrica. Dentre as vantagens da produção de energia elétrica utilizando biogás como combustível destaca-se a baixa emissão de poluentes e balanço de carbono negativo, baixo custo do combustível e produção próxima aos pontos de distribuição (FIGUEIREDO, 2011). A conversão energética do biogás pode ser realizada a partir de diferentes tecnologias, a adoção de uma delas depende de fatores ambientais, econômicos e características do combustível.

i) Motores de combustão interna

A energia mecânica é produzida no interior de um cilindro através da queima de uma mistura de vapor e combustível. Atualmente, o motor ciclo Otto é o mais utilizado em sistemas de biogás, devido ao maior rendimento elétrico e menor custo (ICLEI, 2009). Segundo Pecora (2006), a combustão ocorre pela explosão do combustível através de uma fagulha na câmara de combustão, como o funcionamento ocorre em quatro etapas sequenciais os motores ciclo Otto são chamados de quatro tempos (Tabela 9).

Tabela 9: Etapas de funcionamento de um motor ciclo Otto

Admissão	Compressão	Combustão	Exaustão
Abertura da válvula de admissão para entrada da mistura ar-combustível	Fechamento da válvula de admissão e compressão da mistura	Explosão da mistura e expansão dos gases quentes formados na explosão	Abertura da válvula de escape
Pistão é empurrado para baixo com o movimento do virabrequim	Conforme o pistão sobe (antes de chegar à parte superior) a vela gera uma faísca	A expansão permite que o pistão volte a descer	Expulsão dos gases pelo pistão

Fonte: adaptado de Figueiredo, 2011

De acordo com ICLEI (2009), no estado de São Paulo há duas centrais térmicas que geram energia elétrica através do biogás com o uso de motores ciclo Otto importados, uma no Aterro Sanitário Municipal Bandeirantes, na cidade de Perus, e outra no Aterro Sanitário São João, na zona leste da capital.

ii) Turbinas a gás

As turbinas a gás foram desenvolvidas a partir das turbinas usadas em aviação, em que o fluido é o gás da câmara de combustão (PECORA, 2006). O sistema é composto por compressor de ar, câmara de combustão e turbina (a turbina aciona o compressor). Os gases de exaustão da turbina devem sair em baixa velocidade para otimizar a geração de energia. Segundo Figueiredo (2011), existem dois ciclos de operação, fechado e aberto. No primeiro, os gases que deixam a turbina passam por um trocador de calor, onde resfriam para voltar ao compressor, o que indica um melhor aproveitamento do calor e possibilidade de operação em alta pressão. Já no ciclo aberto não há adição de calor, isto é, o compressor opera em regime adiabático, sendo o próprio trabalho de compressão responsável pelo aumento da temperatura do ar. A Figura 13 ilustra as duas configurações de turbinas a gás.

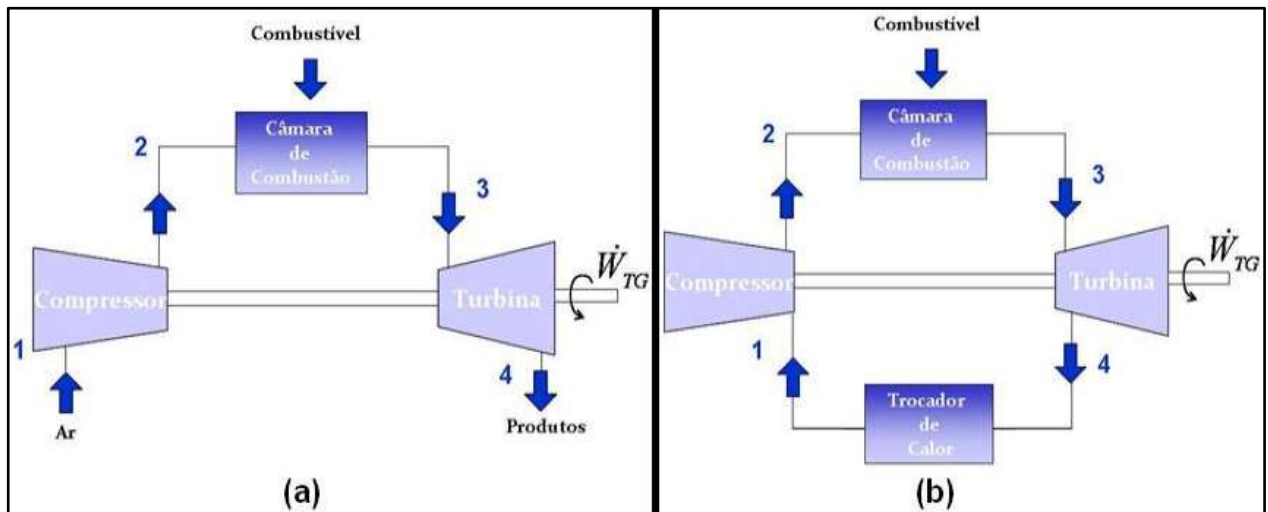


Figura 13: Turbina a gás: (a) circuito aberto – processo real de combustão interna; (b) circuito fechado – aproximação por um processo ideal de transferência de calor

Fonte: Figueiredo, 2011

iii) Turbinas de ciclo Brayton

Nas turbinas de ciclo Brayton há sucção constante do ar atmosférico pelo compressor, onde é comprimido para alta pressão (PECORA, 2006). O ar comprimido entra na câmara de combustão mistura-se com o ar combustível e ocorre a combustão, gerando gases com alta temperatura. Estes gases se expandem através da turbina e se descarregam na atmosfera. Há duas configurações do ciclo Brayton, aberto e simples e com cogeração, em que há adição de uma caldeira de recuperação de calor (Figura 14). Em ambos, parte do trabalho desenvolvido é usado para acionar o compressor e parte para acionar um gerador elétrico ou dispositivo mecânico.

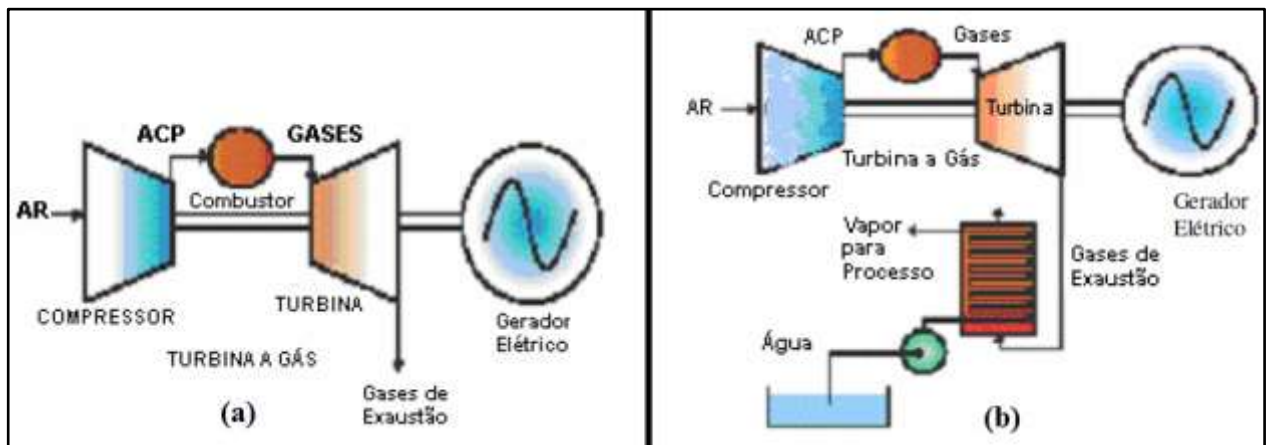


Figura 14: Esquemas de turbinas Ciclo Brayton: (a) aberto e simples; (b) com cogeração

Fonte: Pecora, 2006

iv) Microturbinas a gás

As microturbinas de combustão (Figura 15) operam na faixa de 20 a 250 kW, com alta velocidade de rotação e variados tipos de combustível, sendo o biogás um deles (PECORA, 2006). O ar é aspirado e forçado para o interior da turbina em altas velocidade e pressão, é misturado ao combustível e queimado na câmara de combustão. A expansão dos gases ocorre nas palhetas da turbina, o que produz trabalho. O processo de combustão é controlado para que seja atingida máxima eficiência e mínima emissão, e o calor remanescente dos gases de exaustão pode ser aproveitado para o aquecimento do ar de combustão (ICLEI, 2009).

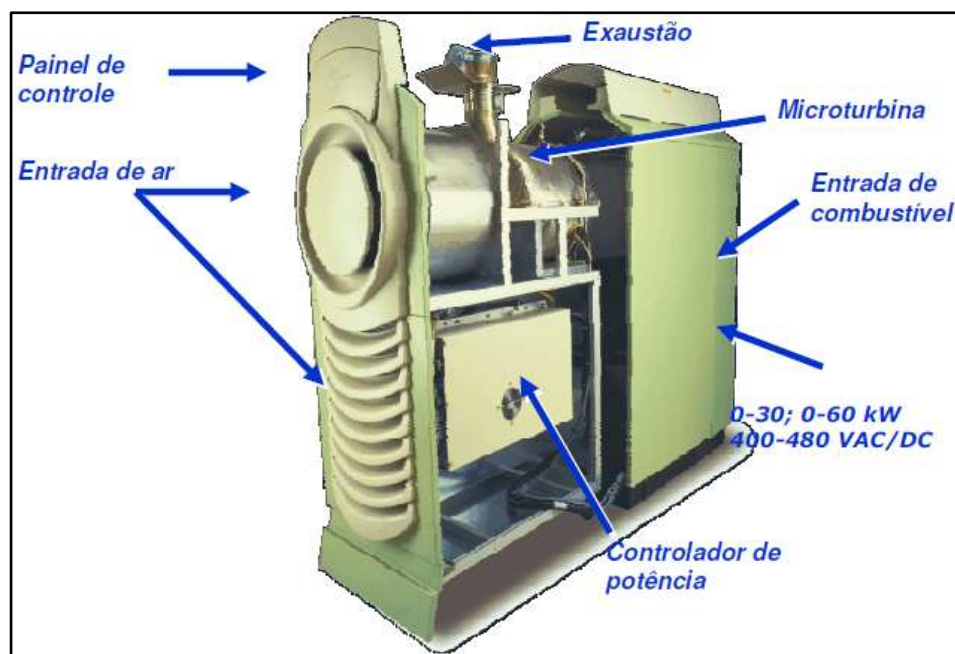


Figura 15: Componentes do sistema da microturbina
Fonte: Pecora (2006)

A maior instalação de microturbinas do mundo está em Los Angeles no aterro de Lopez Canyon, aonde o gás gerado pela digestão anaeróbia dos resíduos é tratado e alimenta 50 microturbinas de 30 kW (ICLEI, 2009).

3.7 Biometanização

Com a restrição ao aterramento de resíduos sólidos orgânicos provida pela PNRS, é necessário o desenvolvimento e a implantação de outras formas de reaproveitamento destes materiais. A biometanização é o processo de digestão anaeróbia controlada e os estudos de aplicação no tratamento da fração orgânica de RSU são relativamente recentes (GOMES, 2010). Inicialmente as unidades de biometanização eram usadas para o tratamento de efluentes líquidos

e então houve adaptação da tecnologia para o recebimento de resíduos sólidos. A maior dificuldade encontrada para a operação dos biodigestores é a heterogeneidade dos resíduos, o acúmulo de plásticos, pedras e outros materiais impróprios que dificultam a mistura e podem obstruir vias de entrada e saída.

Geralmente, a biometanização pode ser dividida em quatro etapas: pré-tratamento, digestão dos resíduos, recuperação do biogás e tratamento dos resíduos (REICHERT, 2005). A primeira etapa é exclusivamente para criar uma massa homogênea dos resíduos a partir da separação ou triagem dos materiais não biodegradáveis e trituração do restante reaproveitável. Para a realização da digestão anaeróbia a massa obtida deve ser diluída dentro do próprio reator com água, lodo de esgoto, esgoto doméstico ou com recirculação do efluente obtido do reator. É comum também a presença de um trocador de calor para que a temperatura ideal seja mantida durante o processo. O biogás obtido é então purificado (remoção da umidade, gás sulfídrico e dióxido de carbono) e armazenado em gasômetros, o efluente líquido deve ser utilizado para recirculação ou encaminhado para tratamento e o biossólido deve ser curado para obter composto de qualidade através de processo aeróbio.

A utilização da digestão anaeróbia controlada em biodigestores apresenta diversas vantagens em relação ao reaproveitamento em aterros sanitários, como cita Barcelos (2009):

- Aumento da vida útil dos aterros sanitários;
- Redução de odores desagradáveis em aterros sanitários, resultantes do processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica;
- Redução da formação de lixiviados de alta carga nos aterros sanitários;
- Possibilidade de coleta de todo o biogás gerado, enquanto que em aterros o reaproveitamento fica entre 30 e 40%;
- Implantação do projeto não necessita de grandes áreas.

Diversos fatores podem determinar o tipo de tratamento anaeróbio aplicado aos resíduos, como o tipo de substrato, o inóculo empregado, a umidade do meio de reação, a temperatura operacional, número de estágios do processo, grau de mistura, tipo de escoamento e forma de alimentação do reator, tempo de detenção hidráulica (TDH), taxa de carregamento aplicado, dentre outros (BARCELOS, 2009). Cada sistema apresenta suas próprias características e limitações, e a adoção de um deles depende das características do resíduo, da área disponível,

do capital e dos custos de operação. A Tabela 10 indica alguns parâmetros que influenciam na classificação das tecnologias para digestão anaeróbia e biometanização.

Tabela 10: Classificação de tecnologias de digestão anaeróbia e biometanização da matéria orgânica conforme parâmetros específicos

Parâmetro	Classificação da tecnologia	Características
Número de estágios (Barcelos, 2009)	Estágio único	Digestão ocorre em um único reator
	Múltiplo estágio	Digestão ocorre em mais de um reator
Teor de sólidos totais (Barcelos, 2009)	Baixo teor de sólidos	$ST < 15\%$
	Médio teor de sólidos	$15\% < ST < 20\%$
	Alto teor de sólidos	$22\% < ST < 40\%$
Umidade (Barcelos, 2009)	Úmido	10 a 15% de matéria seca
	Seco	24 a 40% de matéria seca
Sistema de introdução / extração (Gomes, 2010)	Batelada	Introdução e extração não contínuas
	Fluxo contínuo	Introdução de resíduos e extração de material digerido contínuas
Temperatura do processo (Gomes, 2010)	Mesofílica	Bactérias com taxa máxima de crescimento por volta de 37°C
	Termofílica	Bactérias com taxa máxima de crescimento por volta de 55°C
Grau de Mistura (Gomes, 2010)	Mistura completa	Elevado grau de mistura do material
	Fluxo pistão	Fluxo similar a um êmbolo, sem mistura longitudinal

3.7.1 Tecnologias para biometanização da matéria orgânica

Cada configuração de biodigestores para o processo de digestão anaeróbia apresenta vantagens e desvantagens em sua utilização, além da escolha de qual tecnologia utilizar depender de fatores como as características dos resíduos, capital de investimento, área de implantação, entre outros. Portanto, é necessário analisar qual tecnologia se adequa melhor a cada caso de aplicação.

i) Número de estágios

Segundo Gomes (2010), todas as etapas da digestão anaeróbia (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) ocorrem em apenas um tanque de reação no caso de digestores de estágio único. Contudo, as bactérias responsáveis por cada conversão química durante o processo apresentam necessidades e comportamentos distintos. Os microrganismos metanogênicos são mais sensíveis às mudanças de ambiente, portanto o reator deve apresentar condições favoráveis

ao crescimento deste grupo. Os outros grupos de bactérias apresentam taxa de crescimento maior que a taxa das metanogênicas, o que ocasiona em um acúmulo de ácidos no interior do tanque de reação e, conseqüentemente, inibição por substrato e prejuízo no desenvolvimento das metanogênicas.

Assim, foram elaborados sistemas de operação em dois tanques diferentes, chamados de multiestágios, os quais geralmente caracterizam-se pela ocorrência das fases de hidrólise, acidogênese e acetogênese em um primeiro tanque e a metanogênese em outro. Dessa forma, o processo de digestão anaeróbia é otimizado pelo maior controle de suas fases e aumenta-se a produção de biogás (GOMES, 2010). Contudo, como o processo de biometanização ocorre em série e seu bom desempenho depende de todas as suas instalações, caso haja falha em uma delas há desestabilização de todo o sistema. Além disso, sistemas de múltiplo estágio exigem maior área de implantação, apresentam operação mais complexa, necessitam de mais equipamentos e acabam implicando em maiores custos de investimento.

Reichert (2005), além de indicar as vantagens e desvantagens dos sistemas de múltiplo estágio (Tabela 11) aponta ainda as vantagens e desvantagens de reatores de estágio único para sistemas úmidos e sistemas secos, como mostra a Tabela 11.

Os sistemas de estágio único ainda representam a maioria das unidades de biometanização de RSU, 93% do total, de acordo com Gomes (2010).

Tabela 11: Vantagens e desvantagens de sistemas multi-estágio

Sistemas de estágio múltiplo		
Critério	Vantagens	Desvantagens
Técnico	Flexibilidade de projeto	São complexos
Biológico	Mais viável para resíduos com baixo teor de celulose, como resíduo de cozinha	Menor produção de biogás
Econômico e Ambiental	Menor quantidade de metais pesados no composto	Maior investimento

Fonte: Reichert, 2005

Tabela 12: Vantagens e desvantagens de sistemas secos e sistemas úmidos de estágio único

Sistemas úmidos de estágio único		
Critério	Vantagens	Desvantagens
Técnico	Inspirado em processos conhecidos	Curto-circuito, formação de espumas, abrasão devido à areia, pré-tratamento mais complicado
Biológico	Diluição de substâncias inibidoras com água fresca	Sensibilidade a cargas de choque e inibição, perda de SV com os plásticos e inertes
Econômico e Ambiental	Equipamento para lidar com lodos é mais barato (compensado pelo volume maior dos reatores)	Alto consumo de água, maior consumo de energia para aquecer um volume maior
Sistemas secos de estágio único		
Critério	Vantagens	Desvantagens
Técnico	Sem partes móveis no interior do reator, robusto (não necessita remoção de plásticos e inertes), não tem curto-circuito	Resíduos muito úmidos ($TS < 20\%$) não podem ser tratados sozinhos
Biológico	Menor perda de SV no pré-tratamento, maior TCO (mais biomassa), menos suscetível à inibição	Pequena capacidade de diluição com água de substâncias inibidoras
Econômico e Ambiental	Pré-tratamento mais barato e reatores menores, completa higienização, utilização de pequeno volume de água, requer menos aquecimento	Necessidade de equipamentos mais robustos e caros para o manejo da massa em digestão (compensado por reatores menores e mais simples)

Fonte: adaptado de Reichert, 2005

ii) Teor de sólidos totais

Independentemente do número de estágios em que atua o sistema, segundo Barcelos (2009), os reatores de alto teor de sólidos totais (ATS) têm apresentado mais vantagens que os de baixo teor (BTS). A dificuldade em relação ao reator que opera com baixa concentração de sólidos totais está na adição de água para diluição do substrato, o que prejudica a reutilização do material bioestabilizado, na necessidade de grandes volumes e no custo elevado do tratamento de lixiviado.

A contribuição de sistemas ATS na Europa é de 54% do total da capacidade instalada, e 46% são representados pelos sistemas BTS (REICHERT, 2005).

iii) Umidade

Barcelos (2009) explica que se atinge o teor de umidade esperado em um reator com ou sem o acréscimo de água no sistema, para os reatores úmidos o teor de massa seca deve estar entre 10 e 15%, já para os reatores secos o teor deve estar entre 24 e 40%. O teor de umidade da massa de RSU que passará por biometanização determina o tratamento preliminar que deverá ser dado aos resíduos e também do modelo de digestor a ser utilizado (GOMES, 2010).

Segundo Picanço (2004), a produção de gás é praticamente a mesma em ambos os sistemas, contudo os reatores úmidos produzem também mais lixiviado. Em relação às suas vantagens, os sistemas úmidos exigem menor volume e geram menor quantidade de resíduos para disposição final. É comum a formação de espuma em digestores via úmida, composta por plásticos e outros materiais de baixa densidade presentes no tanque, consequentemente há problemas operacionais e possibilidade de danos de outros componentes do sistema, como agitadores mecânicos (GOMES, 2010).

Já a operação por via seca produz menos efluentes líquidos, apesar de exigir uma unidade de pré-acondicionamento do resíduo para sua homogeneização e inoculação e equipamentos mais robustos e potentes, devido à maior densidade dos resíduos introduzidos (GOMES, 2010). As unidades secas também permitem uma aplicação de maior carga orgânica, o que reduz o volume do interior do digestor.

iv) Sistema de introdução/extração

Nos digestores de batelada os resíduos introduzidos são submetidos à digestão anaeróbia e então são esvaziados e carregados novamente (REICHERT, 2005). Podem operar tanto em estágio simples quanto em estado múltiplo e não há diluição do material, isto é, opera por via seca (GOMES, 2010). Em geral, o design dos digestores de batelada é simples e barato e em unidades de pequeno porte, em que a recuperação energética não é prioridade, empregam-se os sistemas de batelada de um único estágio. Embora a alimentação do reator não seja contínua, é comum a presença de mais de um tanque em série para que haja continuidade do sistema e da produção de biogás, introduzindo e extraindo material dos próprios digestores.

Por outro lado, em sistemas de fluxo contínuo, há possibilidade de operação tanto em via seca quanto em via úmida e a introdução de resíduos é contínua, assim como a extração do

material digerido (GOMES, 2010). Portanto, o fluxo de produção do biogás é mais constante, geralmente otimizando os sistemas de geração de energia.

De acordo com Reichert (2005), os reatores em batelada são tecnicamente mais simples, baratos e robustos, mas requerem maior área de implantação. A sedimentação de material no fundo do reator compromete o processo de recirculação do lixiviado, além de criação de caminhos preferenciais e consequente formação de zonas mortas (GOMES, 2010). Entretanto, com o esvaziamento completo da unidade, é evitado o acúmulo de inertes em seu interior, um dos principais problemas enfrentados em plantas de biometanização de RSU.

v) Temperatura do processo

A taxa de reprodução das bactérias termofílicas, cuja máxima taxa de crescimento é em torno de 55°C, é maior que a taxa de reprodução das bactérias mesofílicas (taxa máxima de crescimento por volta de 37°C), portanto os sistemas que adotam a faixa termofílica aprensetam maior rendimento e produção de biogás (GOMES, 2010). Entretanto, para que seja mantida a elevada temperatura há uma maior demanda energética, o que justifica a utilização da tecnologia em faixa mesofílica em alguns casos.

A digestão em tanques termofílicos ocorre mais aceleradamente reduzindo, portanto, o tempo de detenção hidráulica (TDH) e produzindo mais biogás em um menor espaço de tempo (GOMES, 2010). Assim, estes reatores podem possuir menores dimensões, contudo a economia com área de implantação é descompensada com o gasto com energia, especialmente em período de inverno.

As unidades mesofílicas ainda superam as unidades termofílicas na Europa, contribuindo com 60% do total de unidades implantadas, devido aos altos custos com de aquecimento e à operação mais instável dos sistemas termofílicos, como explica Reichert (2005).

vi) Grau de mistura

Os reatores de mistura completa são recomendados para o tratamento de efluentes com alta concentração de sólidos, uma vez que mantém a biomassa estável dentro do reator, são caracterizados pela alimentação e extração contínua e pela presença de agitadores mecânicos que proporcionam elevado grau de mistura (GOMES, 2010). A mistura pode também ser obtida através da injeção de biogás comprimido ou da recirculação de material.

Por sua vez, os digestores de fluxo pistão não apresentam mistura longitudinal, sendo o fluxo similar a um êmbolo. Assemelha-se aos digestores de mistura completa pelo sistema de

alimentação e extração de material, o qual também ocorre de maneira contínua, a alimentação ocorre em uma extremidade e a extração ocorre na extremidade oposta. Para que isso seja possível os tanques são projetados com comprimento significativamente maior que largura, isto é, possuem uma forma alongada. Devido a este fluxo o acúmulo de ácidos é reduzido, o que aumenta a eficiência da digestão anaeróbia em relação aos tanques de mistura completa (GOMES, 2010).

4. METODOLOGIA

A partir do levantamento teórico realizado sobre as opções de tratamento de resíduos sólidos orgânicos, foi realizada uma avaliação da viabilidade de implantação de cada um deles para a geração de energia elétrica no Brasil.

Para tanto foi necessário identificar a legislação vigente ao caso, o histórico de pesquisas e projetos implementados mundialmente, suas vantagens, desvantagens, seu viés econômico, social e ambiental. A Figura 16 ilustra aspectos relevantes para determinar se o desenvolvimento das tecnologias de uso do biogás gerado em digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos como combustível para geração de energia elétrica é viável.

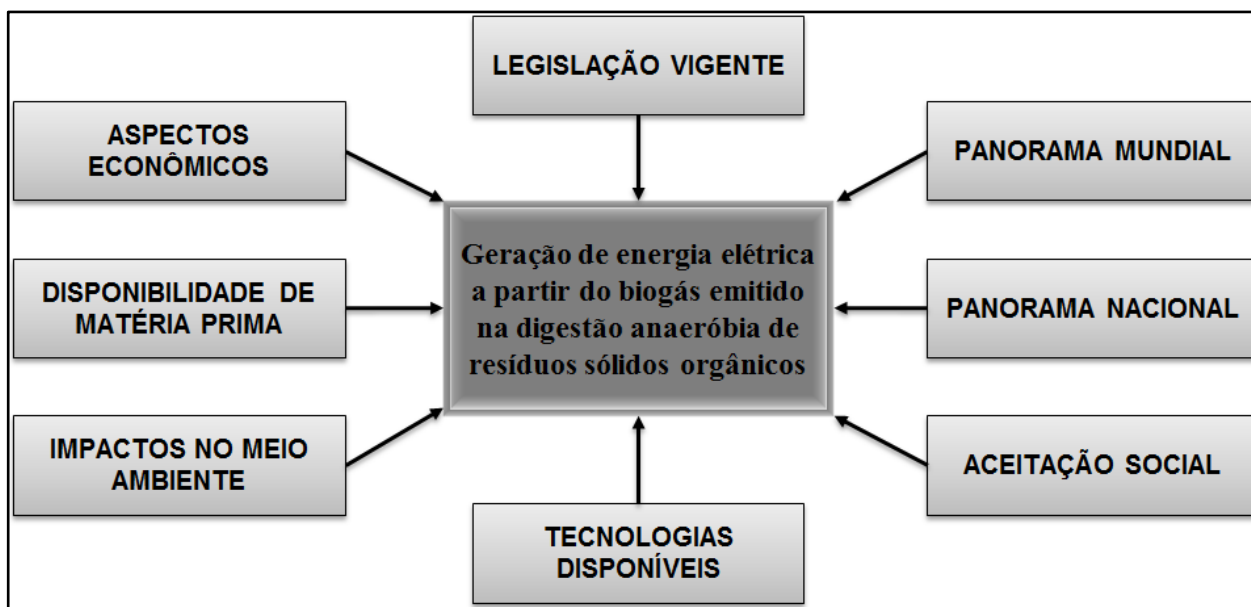


Figura 16: Aspectos para análise de viabilidade do uso de biogás para geração de energia elétrica

A pesquisa teórica visa aprofundar conhecimentos a fim de levantar debates e discussões a respeito de determinado assunto e, assim, questionar temas intrigantes da realidade (VILAÇA, 2010). No caso do presente trabalho, é importante observar com cautela as controvérsias encontradas em diferentes documentos elaborados por órgãos públicos que traçam diretrizes, propostas e metas para a gestão dos resíduos sólidos orgânicos e o seu reaproveitamento. O debate deve também ser inserido no âmbito das pesquisas que propõem o desenvolvimento de tecnologias e a implantação de projetos de geração de energia elétrica através do biogás de aterros sanitários, assim como a venda de créditos de carbono, tema de importância relevância ambiental, social e econômica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do levantamento realizado de dados secundários, através da leitura de trabalhos consagrados, da análise de legislações pertinentes ao tema e de sua influência sobre a economia e meio ambiente, é possível debater sobre a viabilidade de aplicação de tecnologias desenvolvidas para a geração de energia elétrica utilizando o biogás gerado na digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos diante de diversos aspectos, listados a seguir.

5.1 Panorama Mundial

De acordo com Ensinas (2003), o primeiro projeto de geração de energia elétrica a partir de gás de aterro sanitário foi em 1975 na Califórnia (EUA) e foram desenvolvidos mais dois projetos na mesma década no país. Em 1995 a Europa já contava com 208 plantas de aproveitamento energético em aterro sanitário distribuídas pela Alemanha, Suécia, Holanda, Noruega e Dinamarca. No Reino Unido, em 1993, havia 13 projetos com uso direto do biogás e 42 instalações com capacidade de 72 MW.

Segundo Espírito Santo Filho (2013), em 2003 havia mais de 1.100 plantas de aproveitamento energético de gás de aterro distribuídas pelo mundo (Gráfico 2) e desde então não houve outros estudos para atualizar esta informação, mas acredita-se que o número de usinas em operação atualmente esteja entre 1.800 e 2.000.

Todas estas usinas juntas apresentam capacidade instalada de 3.923 MW, produção anual de lixo 4.548×10^6 toneladas e vazão de gás de $1.615.545 \text{ m}^3/\text{h}$. Os países que apresentam grande número de centrais de aproveitamento energético em aterros sanitários possuem políticas e programas de apoio à geração de energia a partir de fontes renováveis com incentivos econômicos, como é o caso da Alemanha, Reino Unido e Estados Unidos.

Em 2011 na Alemanha foram gerados 5 TWh de energia elétrica a partir da fração orgânica de resíduos: 0,6 TWh gás de aterro, 1,1 TWh decomposição de lodos em ETE e 3,3 TWh em áreas agrícolas (ESPÍRITO SANTO FILHO, 2013). No Reino Unido em 2009 foram gerados 18 TWh de energia elétrica a partir do gás de aterros sanitários e o potencial estimado é de 42 TWh.

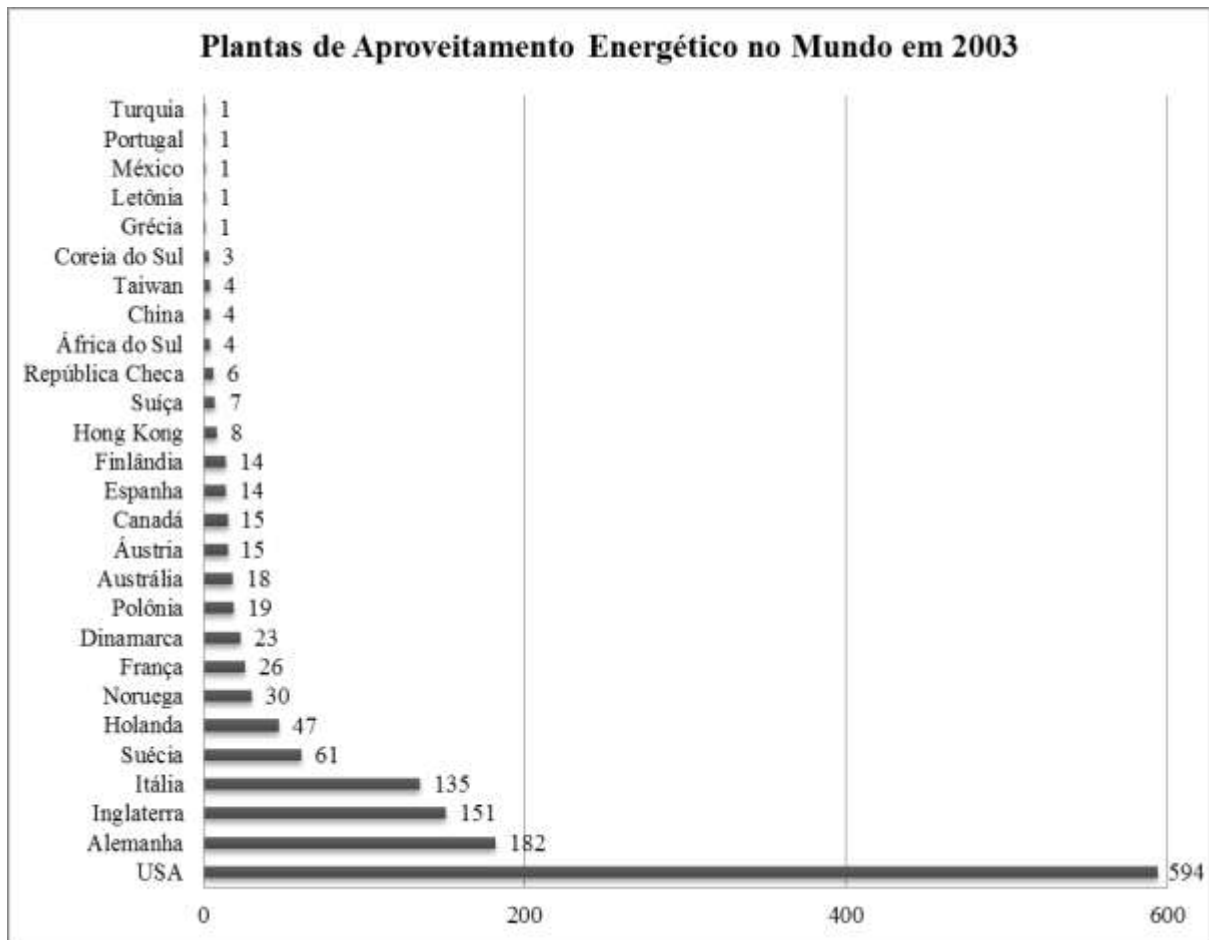


Gráfico 2: Plantas de aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário no mundo em 2003

Fonte: adaptado de Espírito Santo Filho, 2013

5.1.1 Biometanização de RSU no mundo

Gomes (2010) cita um biodigestor que operou nos EUA de 1939 a 1974 como a primeira tecnologia de biometanização de RSU no mundo. Em Ruanda, na África, foi implantada a primeira planta de biometanização, composta de três digestores do tipo batelada de 20 m³ cada de tecnologia suíça, para tratamento de resíduos agrícolas em 1930. As primeiras plantas de biometanização de RSU surgiram em 1984 e 1988 na Europa.

Uma unidade-piloto de biometanização da matéria orgânica de RSU foi construída em 1978 na Flórida (EUA), composta por sistema de tratamento prévio e dois digestores BTS de 1.300 m³ cada. Contudo, foram constatados diversos problemas operacionais que resultaram na desativação da unidade dois anos depois (GOMES, 2010). Na Suécia, 7% da energia elétrica para aquecimento provêm de resíduos sólidos (REICHERT E SILVEIRA, 2005).

As primeiras plantas de biometanização na Europa utilizavam basicamente resíduos verdes, de jardinagem, por outro lado, as mais atuais processam RSU e contam com etapa de triagem para separação do material não degradável (REICHERT, 2005). A Espanha é o país que mais vem implantando a tecnologia de digestão anaeróbia, Forster-Carneiro et al (2007) relatam a existência de 19 unidades de grande escala no país, cada uma com capacidade de tratamento de 1,1 milhões de toneladas de RSU por ano.

Segundo Reichert e Silveira (2005), algumas plantas de biometanização em operação em 2005 utilizam lodo de esgoto e papel além de RSU como material de introdução, pode variar também o uso final do biogás que, além de eletricidade, pode ser utilizado para produção de calor, vapor de alta pressão, ser injetado na rede de gás e outros fins. A Tabela 13 resume as principais plantas em operação na época, conforme o tipo de tecnologia adotada.

Tabela 13: Principais plantas de biometanização de resíduos em operação em 2005

Planta / Local	Ano de início	Tipo de resíduo	Capacidade (t/ano)
Principais plantas com tecnologia Valorga			
Amiens, França	1998 1996	RSU RSU	85.000
Tilburg, Holanda	1994	Res. Orgânico + papel	52.000
Hannover, Alemanha	2002	RSU + lodo de esgoto	100.000 + 25.000
Varennes-Jarcy, França	2001	RSU + res. Orgânico	100.000
Cadiz, Espanha	2000	RSU	215.000
Bassano, Itália	2002	RSU + Res. Orgânicos + lodo de esgoto	44.200 + 8.200 + 3.000
Barcelona (Eco II), Espanha	2003	RSU	120.000
La Coruña, Espanha	2001	RSU	182.500
Principais plantas com tecnologia DRANCO			
Brecht, Bélgica	1992 1998	RSU + papel Res. Orgânicos	12.000 35.000
Salzburg, Áustria	1993	RSU + lodo de esgoto	13.500
Kaiserslautern, Alemanha	1998	Res. Orgânicos	20.000
Principais plantas com tecnologia BTA			
Villacidro, Itália	2002	RSU + lodo de esgoto	45.000
Newmarket, Canadá	2000	RSU + lodo de esgoto	150.000
Toronto, Canadá	2002	RSU	40.000
Munique, Alemanha	1997	Res. Orgânicos	20.000
Elsinore, Dinamarca	1991	Res. Orgânicos	20.000
Principais plantas com tecnologia WAASA			
Vagron/Groningen, Holanda	2000	RSU	92.000
Vaasa, Finlândia	-	RSU	15.000

Fonte: adaptado de Reichert e Silveira, 2005

Além da proibição da disposição final de matéria orgânica em aterros sanitários, outro fator que impulsiona a Europa na construção de plantas de biometanização é o alto preço da energia e a dificuldade de implantação ou expansão de novos aterros sanitários (REICHERT, 2005).

5.2 Panorama Nacional

No Brasil o uso da biomassa como combustível para geração de energia elétrica aparece em terceiro lugar com 8,45% do total, sendo o primeiro ocupado por usinas hidrelétricas com 63,44% e o segundo o gás com 10,40% (ANEEL, 2014). Existem quatro fontes de biomassa no Banco de Informações de Geração da ANEEL: bagaço de cana, licor negro, madeira, biogás e casca de arroz.

Atualmente estão em operação 24 UTE de biogás em território nacional e outras nove já adquiriram outorga, mas ainda não foram iniciadas as obras de construção. Os gráficos 3 a 5 ilustram como é a composição dos empreendimentos de aproveitamento energético de biogás em operação no Brasil, conforme a fonte utilizada, a região de implantação e o tipo de proprietário.

Os empreendimentos em frigoríficos ainda representam a maioria dos geradores de energia elétrica a partir do biogás, atualmente existem nove unidades, a maioria na região sul especialmente no estado do Paraná. O tipo mais comum é a introdução de dejetos suínos em biodigestores, a usina Granja São Roque em Videira, estado de Santa Catarina, apresenta a maior potência instalada, 424 kW.

Entretanto, a potência total de todas as unidades em frigoríficos representam apenas 1,16% do total outorgado no Brasil, as unidades em ETE representam 9,44% e em aterros sanitários 87,50%.

O aterro sanitário São João na capital São Paulo tem potência outorgada de 24.640 kW e o aterro sanitário de Salvador, no estado da Bahia, 19.730 kW. A região Sudeste compreende quase todos os aproveitamentos elétricos em aterros, apenas um encontra-se na região Sul, em Curitiba, capital do Paraná.

Empreendimentos em operação conforme fonte de biogás

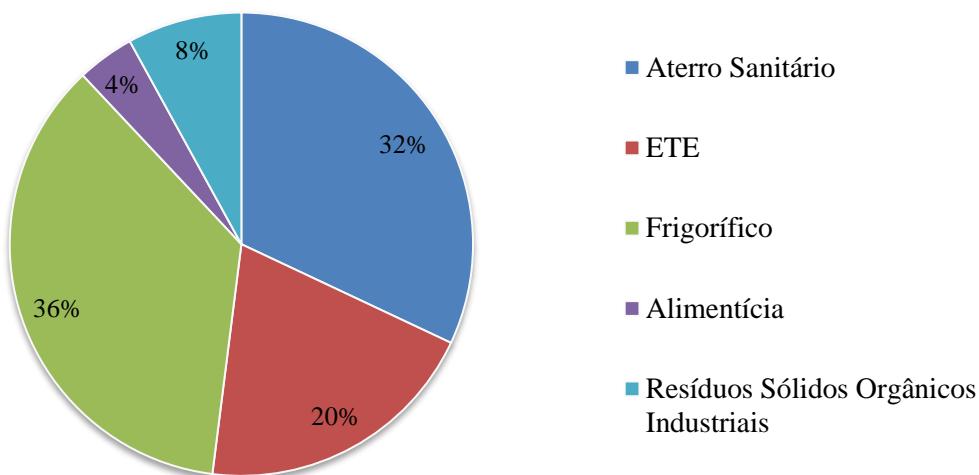


Gráfico 3: UTE de biogás em operação no Brasil conforme a fonte do combustível

Empreendimentos em operação conforme região do Brasil

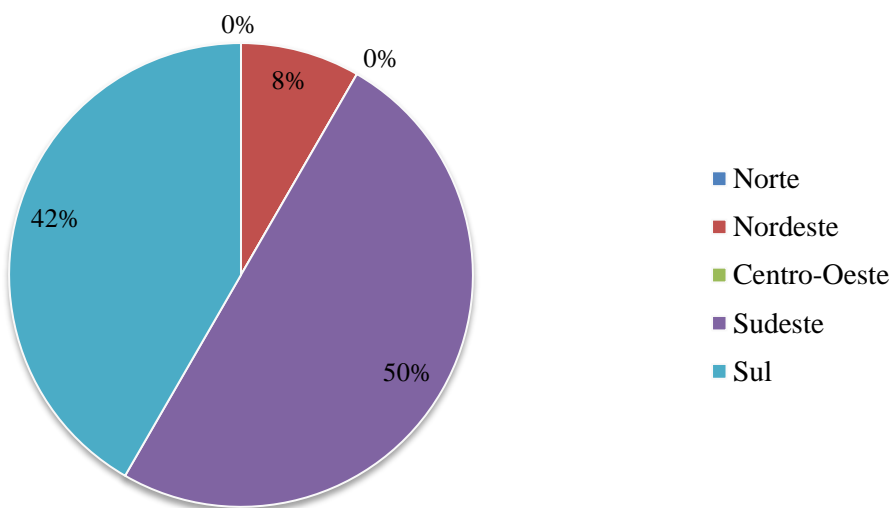


Gráfico 4: UTE de biogás em operação no Brasil conforme a região de implantação

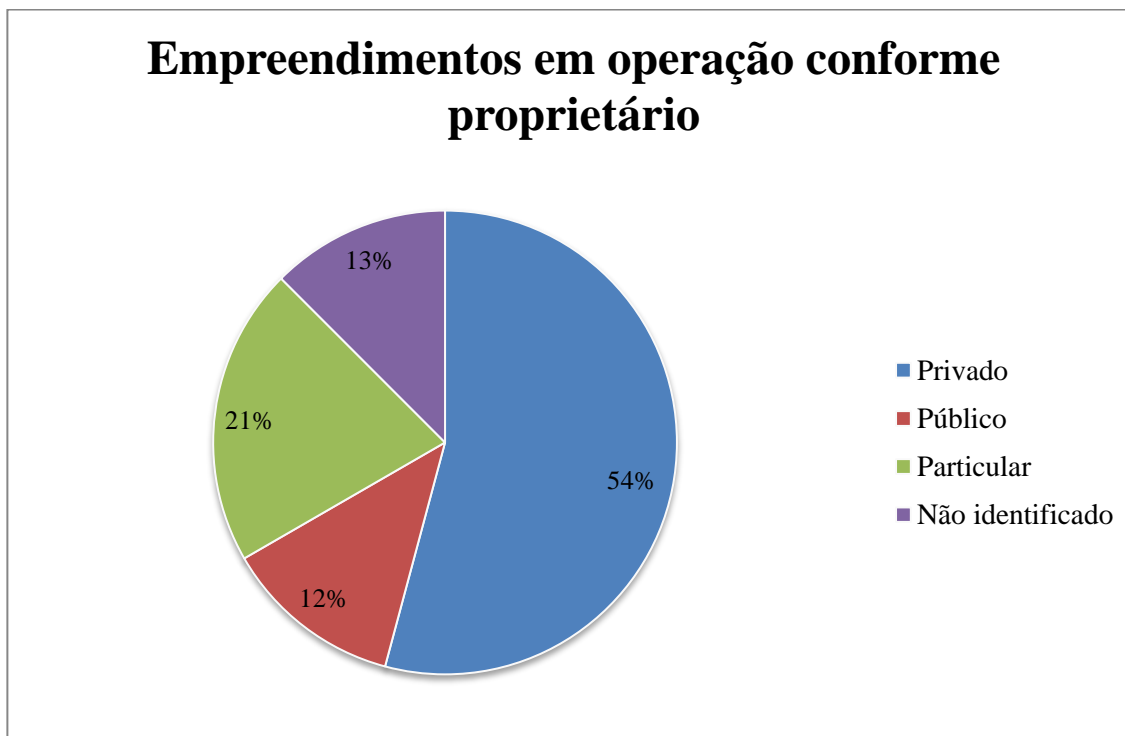


Gráfico 5: UTE de biogás em operação no Brasil conforme o tipo de proprietário

A Companhia de Saneamento Básico do Paraná assim como a Companhia de Saneamento Básico de Minas Gerais são sociedades mistas cujos principais acionistas são o Estado do Paraná e o Estado de Minas Gerais, respectivamente. Dessa forma, os proprietários das usinas ETE Ouro Verde, em Foz do Iguaçu/PR, e Arrudas, em Belo Horizonte/MG, foram definidos como públicos e em ambas o empreendimento está presente em ETE. A Prefeitura Municipal de Marechal Cândido Rondon/PR é proprietária da energia gerada na usina Ajuricaba, na qual o biogás provém de um abatedouro de aves. Todos os proprietários privados possuem aproveitamento em frigoríficos, a grande maioria na região sul do Brasil e dois em MG.

Já os gráficos 6 a 8 ilustram, de acordo com as mesmas categorias, os empreendimentos em outorga, são nove no total, seis serão implantados em aterros sanitários, um em ETE, um em frigorífico e outro utilizará resíduos da cana de açúcar. Quatro aterros que receberão a tecnologia estão na região Sudeste, nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, um em Pernambuco e outro no Rio Grande do Sul. O frigorífico está localizado em Santa Catarina, a ETE em São Paulo e a indústria de cana no Paraná. Portanto, a região Sudeste continua sendo a maior provedora de usinas termelétricas de biogás, e não há nenhum projeto de expansão desta tecnologia para as regiões Norte e Centro-Oeste.

Empreendimentos em outorga conforme fonte de biogás

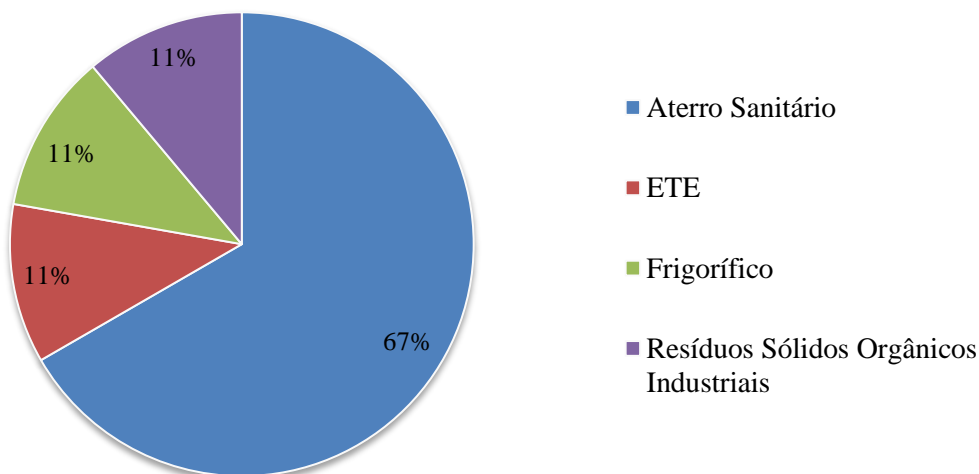


Gráfico 6: UTE de biogás em outorga no Brasil conforme a fonte de combustível

Empreendimentos em outorga conforme região do Brasil

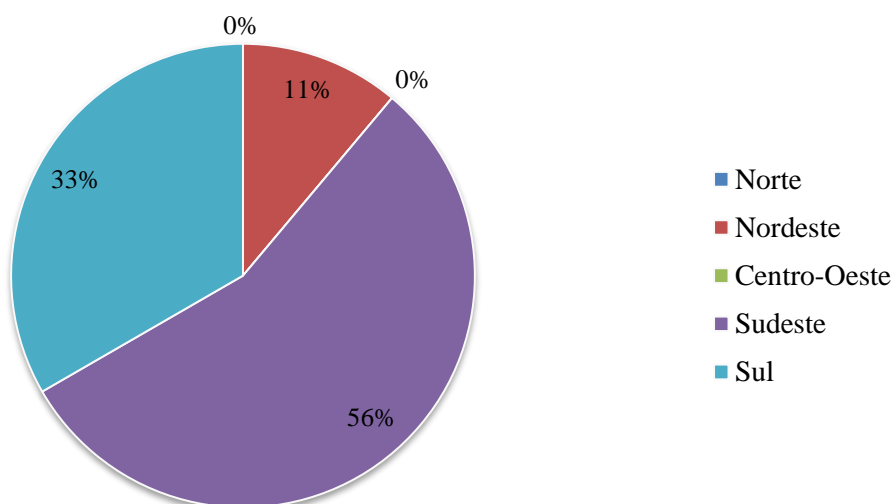


Gráfico 7: UTE de biogás em outorga no Brasil conforme a região de implantação

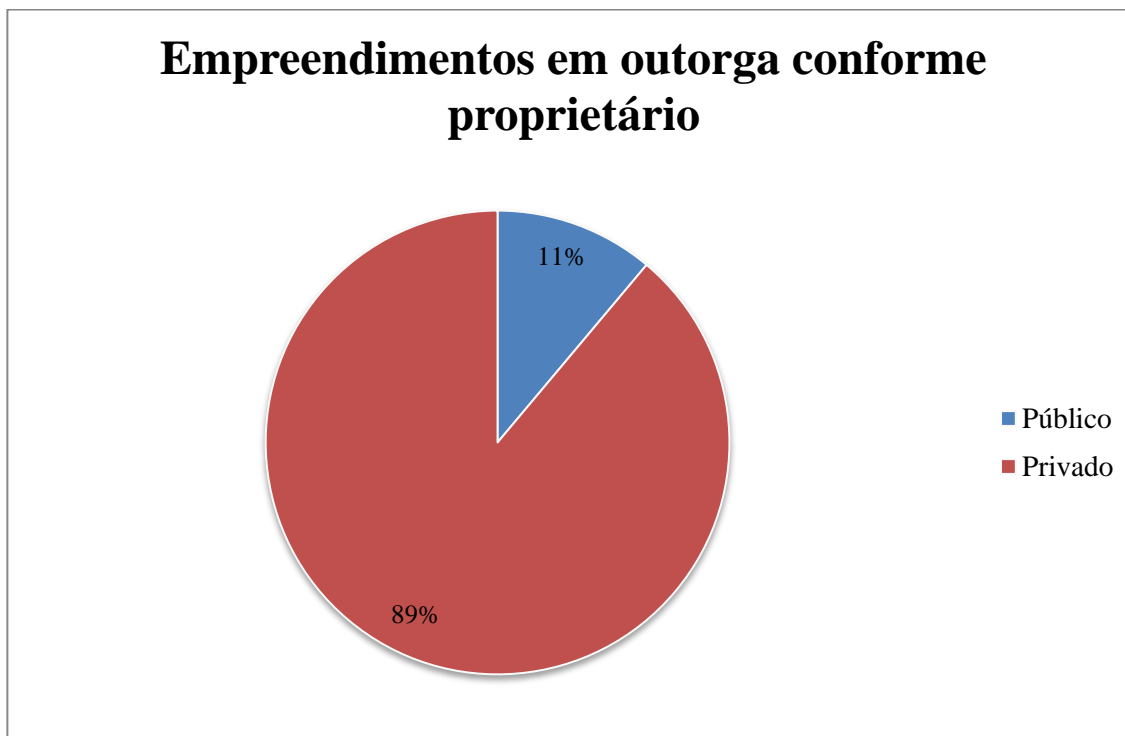


Gráfico 8: UTE de biogás em outorga no Brasil conforme o tipo de proprietário

5.2.1 Biometanização de RSU no Brasil

No Banco de Informações de Geração da ANEEL não consta nenhum empreendimento em operação, em construção ou outorgado de biometanização de RSU para geração de energia elétrica. Os empreendimentos presentes no cadastro que utilizam resíduos estão implantados em aterros sanitários ou em indústrias (cana de açúcar, alimentícias).

Os primeiros biodigestores apareceram no Brasil nas décadas de 70 e 80 quando foi lançado um programa do governo para que a tecnologia fosse utilizada em fazendas, de modo a incentivar a autonomia de pequenas comunidades rurais ao produzir adubos químicos e energia térmica, assim como os impactos ambientais decorrentes da gestão inadequada de resíduos (GOMES, 2010). O programa não teve sucesso diante da dificuldade de construção e operação dos biodigestores, dos custos de manutenção e da dificuldade no uso do biofertilizante.

Em escala industrial, operou uma planta de biometanização de RSU em Uberaba/MG na década de 80, onde havia também unidades de triagem e compostagem. Assim como nas comunidades rurais, a unidade foi desativada devido a diversas dificuldades operacionais, principalmente o acúmulo de material impróprio no biodigestor (GOMES, 2010).

Geralmente, as plantas de biometanização incluem processos manuais e mecanizados de triagem para separação de resíduos recicláveis e de tratamento da fração orgânica, e são denominadas Plantas de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB) (GOMES ET AL, 2012).

Em 2004 foram realizados estudos de viabilidade para implantação de uma planta de biometanização em Porto Alegre, a partir dos aspectos para construção, mecanização, comercialização dos subprodutos, tipo de tecnologia, aspectos ambientais e econômicos. A unidade foi adotada como viável, contudo o projeto foi deixado de lado quando houve mudança de governo (GOMES, 2010). Além desta, no Rio de Janeiro também há um projeto que pretende aproveitar ao máximo os RSU, com tecnologias de biometanização, incineração, produção de biodiesel e reciclagem, bem como no Recife, em que o consórcio “Recife é Energia” visa incineração e biometanização dos resíduos.

Reichert e Silveira (2005) realizaram um estudo de viabilidade e sustentabilidade do tratamento de RSU a partir de diversas tecnologias de reaproveitamento e produção de biogás por digestão anaeróbia e geração de energia elétrica. Para tanto utilizaram dados da literatura, análise dos retornos aos termos de referencia e observações feitas *in loco* em plantas europeias e concluiu que é viável a aplicação de projetos de biometanização em Porto Alegre – Rio Grande do Sul, econômica e ambientalmente. Entretanto, é ressaltada a importância de que as operações sejam realizadas de forma correta, especialmente a segregação de resíduos para que apenas matéria orgânica esteja presente no interior dos biodigestores. Reichert e Silveira (2005) também concluíram que o custo do tratamento com o uso dessa tecnologia varia entre R\$ 35,77 e R\$ 79,94 por tonelada, enquanto que em Porto Alegre se gasta aproximadamente R\$ 40,00 por tonelada de resíduos disposto em aterro sanitário. Como as condições e preços variam conforme os municípios devem ser realizados novos estudos de viabilidade quando for iniciado algum projeto de implantação de planta de biometanização de RSU.

5.3 Disponibilidade de Matéria-Prima

A composição gravimétrica de uma localidade é determinada por diversos fatores, como características socioeconômicas, clima, estações do ano, hábitos e costumes (FRÉSCA, 2007). Uma média de 51,4% dos RSU coletados no Brasil é matéria orgânica, segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2012). No município de São Carlos/SP, por exemplo, em 1989 a

matéria orgânica correspondia a 56,7% do total de RSU coletados e em 2007 este número aumentou para 59,08% (FRÉSCA, 2007), como mostram os gráficos 9 e 10.

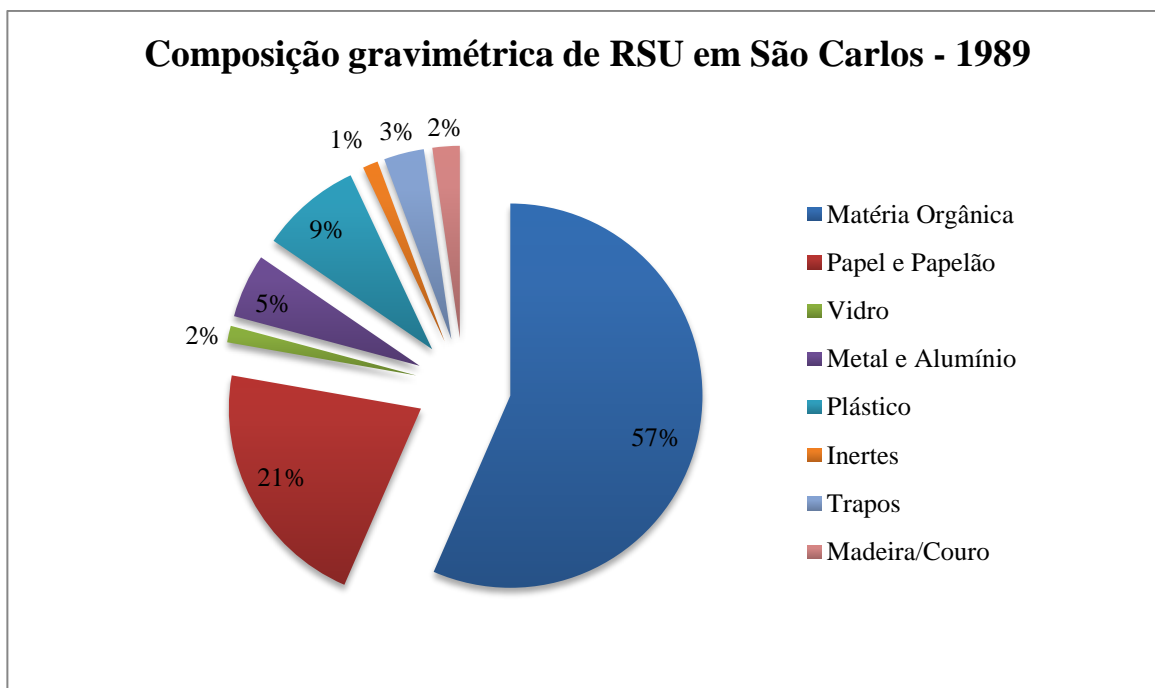


Gráfico 9: Composição gravimétrica de RSU em São Carlos/SP em 1989
Fonte: Frésca, 2007

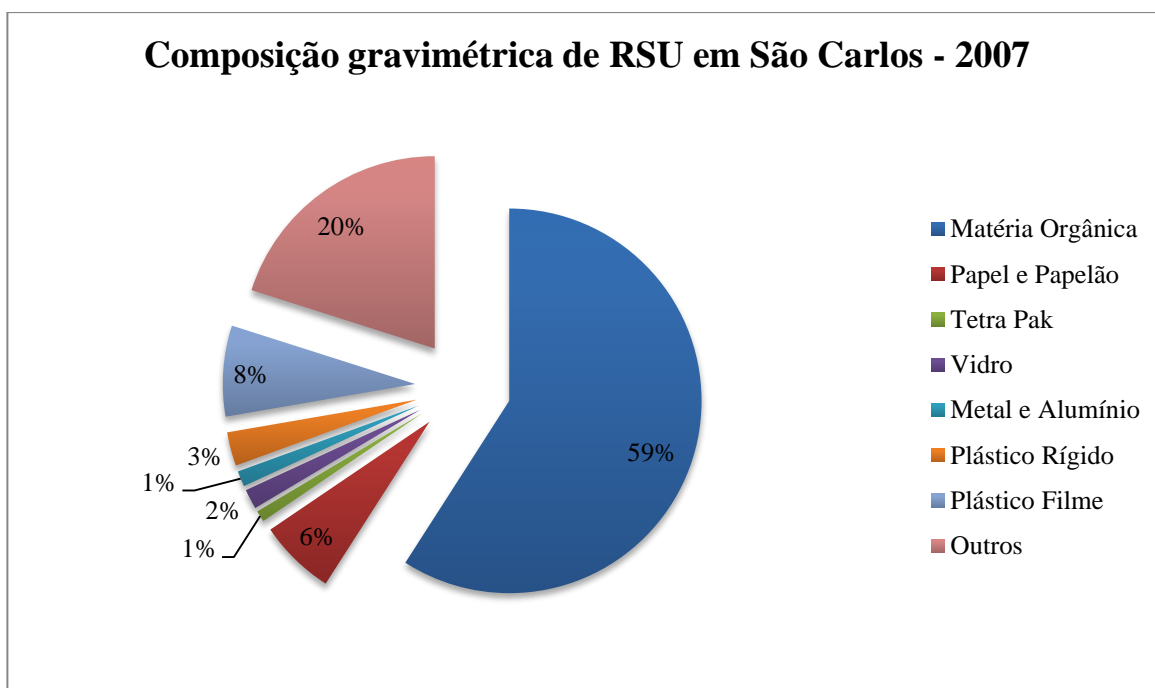


Gráfico 10: Composição gravimétrica de RSU em São Carlos/SP em 2007
Fonte: Frésca, 2007

Na Espanha, país em que atualmente a tecnologia de biometanização mais tem sido difundida, são geradas aproximadamente 24 milhões de toneladas de RSU por ano, em que a fração de matéria orgânica varia entre 40 e 45% (FORSTER-CARNEIRO ET AL, 2007).

Dessa forma, é clara não só a disponibilidade de matéria-prima, mas também como é significativa a contribuição que a fração orgânica sobre o total de resíduos gerados no Brasil. Entretanto, apesar de estar em constante aumento a implantação de programas de coleta seletiva de materiais recicláveis nos municípios brasileiros, a coleta seletiva de material orgânico ainda não apresenta avanços. Para que a tecnologia de biometanização seja eficiente, a segregação do material não aproveitável da fração orgânica é fundamental, uma vez que diversos projetos foram desativados devido à problemas operacionais oriundos principalmente da presença de materiais inadequados no interior de digestores.

A Prefeitura Municipal de São Paulo/SP lançou recentemente o primeiro projeto de incentivo à compostagem doméstica, em que serão distribuídas 2.000 composteiras em toda a cidade, mediante inscrição dos participantes (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2014). O objetivo do projeto é reduzir em 20 anos 80% do resíduo disposto em aterro, e inclui também uma central mecanizada de triagem para os resíduos secos. O sucesso do projeto acarretará em grande evolução nas políticas ambientais brasileiras, contudo é necessário também investir em programas de educação ambiental que disseminem a importância da separação dos resíduos orgânicos dos demais que instrua de maneira adequada como deve ser o manejo das composteiras domésticas e que integre comunidade, comerciantes e compradores para que os produtos formados sejam de fato utilizados.

O projeto deve servir de exemplo a todos os municípios brasileiros, contudo enquanto não atingir toda a população nacional, devem ser incentivados também programas de coleta seletiva dos resíduos sólidos orgânicos, de modo a permitir os avanços no desenvolvimento de tecnologias de biometanização para aproveitamento e valorização dos resíduos. Dessa forma, a administração pública amplia os modelos, estratégias e cenários de gestão da matéria orgânica presente no RSU gerado, além de prover alternativas de destinação ambientalmente adequada dos resíduos sólidos orgânicos para a população.

5.4 Tecnologias Disponíveis

Segundo Figueiredo (2011), no Brasil não há desenvolvimento de tecnologias para a geração de energia elétrica a partir do biogás, bem como há falta de mão de obra qualificada para operação e manutenção dos sistemas, o que dificulta a implantação dos projetos.

As tecnologias de grande porte utilizadas em aterros sanitários são importadas principalmente da Europa, além do preço das máquinas e peças de reposição em si também devem ser considerados os gastos com transporte, impostos e taxas alfandegárias (FIGUEIREDO, 2011). Os custos em longo prazo são difíceis de estimar devido à instabilidade do real frente ao dólar e ao euro.

Não há também em âmbito nacional o desenvolvimento de equipamentos e sistemas de biometanização de RSU, as tecnologias mais utilizadas são a Valorga (francesa e alemã), DRANCO (belga), BTA e Linde-KCA (alemãs), WAASA (finlandesa) e Kompogas (suíça). Portanto, as mesmas dificuldades para implantação das tecnologias de aproveitamento energético de biogás de aterro sanitário são pertinentes à biometanização.

5.5 Legislação Vigente e Programas Governamentais de Incentivo

A normativa europeia Diretiva 1999/31/EC, de 29 de abril de 1999, é um marco para o desenvolvimento de tecnologias de biometanização, uma vez que restringe a disposição de resíduos biodegradáveis em aterros sanitários em Artigo 5º. Neste, é determinado que no prazo máximo de 15 anos a contar dois anos após a diretiva entrar em vigor a disposição de resíduos biodegradáveis em aterros deve ser reduzida para 35% da quantidade total (em peso) de resíduos biodegradáveis produzidos no ano mais recente em que houve dados normalizados do Gabinete de Estatísticas da União Europeia (Eurostat).

Dessa forma, foram criadas diversas leis e programas na Europa para incentivar a valoração dos resíduos sólidos orgânicos, sendo o aproveitamento a partir do biogás uma das alternativas exploradas. Além de reduzir a disposição final em aterros sanitários, esta medida promove também redução no uso de combustíveis fósseis e uso de fontes renováveis para geração de energia (Tabela 14).

Tabela 14: Leis e programas de incentivo à utilização de fontes renováveis para geração de energia no mundo

País	Lei/Programa	Características
Alemanha	Erneuenbare Energien Gesetz (EEG) – 2000	Todo cidadão tem direito de instalar uma pequena central de geração de energia renovável e as empresas do país são obrigadas a comprar toda a quantidade produzida e garantir um preço mínimo por 20 anos.
Reino Unido	Non-Fossil Fuel Obligation (NFFO) – 1990 a 1998	O regime das empresas de eletricidade celebrava contratos com empresas produtoras de energia renovável; A diferença nos custos de produção da eletricidade produzida a partir de fontes renováveis e não renováveis era compensada por um subsídio proveniente de uma taxa cobrada nas faturas de eletricidade.
	Renewables Obligation (RO) – 2002	As empresas fornecedoras de eletricidade são obrigadas a aumentar a porcentagem de energia renovável de 3% em 2003 para 15,4% em 2016.
EUA	Landfill Methane Outreach Program (LMOP) – 1994	Objetivo de reduzir as emissões de metano em locais de disposição de resíduos sólidos; Recuperação e utilização do gás de aterro como recurso energético; Programa de assistência voluntária que forma parcerias com as comunidades locais, proprietários de aterros, instituições de serviços públicos, geradores de energia.
	Converting Landfill Gas to Energy	Objetivo de estimular a recuperação energética do RSU; Ser tratado e distribuído para uso direto ou veicular.

Fonte: adaptado de Gomes, 2010

Segundo ABRELPE (2013), o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), regulamentado em 2004, é um importante marco no incentivo e geração de energia renovável no Brasil. Os principais objetivos do programa são diversificar a matriz energética nacional, aumentar a segurança no abastecimento de eletricidade e valorizar as características e potenciais energéticos presentes em cada região brasileira. Para tanto, deve ser aumentada a participação da energia elétrica derivada de fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas produzidas por Produtores Independente Autônomos (PIA) no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Uma das metas do programa é que em até 20 anos após sua implementação, 10% da energia elétrica consumida no Brasil anualmente proviesse dessas fontes. Foram determinados

valores diferentes para o pagamento da energia conforme sua fonte, para o gás de aterro o valor foi de R\$ 191,47/MWh (ABRELPE, 2013). Contudo, o programa também exigiu que 60% da tecnologia utilizada para a produção de energia fosse nacional, o que, junto ao baixo valor estabelecido para a biomassa, prejudicou o aproveitamento energético de biogás de aterro.

Assim, em agosto de 2004 a ANEEL reviu e reduziu as tarifas de distribuição e transmissão de empreendimentos que utilizam biomassa com potência inferior ou igual a 30.000 kW, estabelecendo também que para tanto é necessário utilizar como insumo energético no mínimo 50% de RSU, biogás de aterro, biodigestores de resíduos vegetais e animais ou lodos de ETE (ABRELPE, 2013).

Em 2008 foi apresentado o Plano Nacional Sobre Mudança do Clima, com objetivo de orientar, estruturar e coordenar as ações do governo e de diversos setores da sociedade na redução da emissão de gases do efeito estufa (GEE) (ABRELPE, 2013). Neste documento foram contempladas medidas para recuperação do metano emitido em aterros sanitários e incineração com recuperação energética e reciclagem.

O Fundo Clima, instrumento da Política Nacional sobre Mudança do Clima, Lei nº 12.187/09, foi criado em 2010 e visa garantir recursos e apoio a projetos cujo objetivo seja a mitigação e adaptação das mudanças climáticas. Dentro dele há o subprograma Resíduos com Aproveitamento Energético, que “consiste em apoiar projetos de racionalização da limpeza urbana e destinação de resíduos com aproveitamento para geração de energia localizada em uma das cidades sede da Copa do Mundo ou em suas respectivas regiões metropolitanas” (ABRELPE, 2013). O apoio é oferecido para implantação, modernização e ampliação de empreendimentos de aproveitamento energético de RSU.

Também em 2010 foi instituída a PNRS, em que uma das principais proibições é de disposição final de resíduos sólidos orgânicos em aterros sanitários, unidades que devem receber apenas rejeitos. A PNRS incentiva tecnologias de aproveitamento energético de resíduos, e determina que os planos regionais de gerenciamento de resíduos sólidos devem incluir metas para tanto em unidades de disposição final de resíduos sólidos. Ou seja, os sistemas, equipamentos e serviços de aproveitamento energético do biogás proveniente de resíduos não devem estar implantados em aterros sanitários, que são unidades de disposição final apenas de rejeitos.

Já no Plano Nacional de Resíduos Sólidos, criado em 2012, constam diversas estratégias para aproveitamento energético em aterros sanitários. Contudo, como está vedada a disposição de

matéria orgânica nestas unidades, o processo de digestão anaeróbia e consequente geração de metano estão comprometidos. Isto, aliado a outros fatores de dificuldade de uso da tecnologia, pode não atrair mais investimentos na implantação de projetos, apesar do provável aproveitamento a partir da matéria orgânica aterrada há bastante tempo.

A Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, da ANEEL foi instituída a fim de reduzir as barreiras para instalação de centrais de micro e minigeração distribuída de energia elétrica. O Sistema de Compensação de Energia cede ao proprietário do gerador a oportunidade de injetar no sistema da distribuidora a energia produzida que não foi consumida em sua unidade (ANEEL, 2012). As fontes utilizadas que recebem apoio da Resolução são: hidráulica, solar, eólica ou cogeração qualificada.

5.6 Impactos no Meio Ambiente

Os aterros sanitários, com suas normas e obras de engenharia, foram criados de modo a minimizar os impactos ambientais decorrentes da disposição final irregular de resíduos sólidos em vazadouros a céu aberto, lixões e até mesmo em aterros controlados. Portanto, são classificados como unidade de disposição final ambientalmente adequada de rejeitos. Entretanto, os locais onde há implantação de aterros sanitários não estão isentos dos impactos oriundos da disposição, como contaminação de solo, lençol freático e aquífero devido à percolação de lixiviados, atração de moscas, insetos e outros animais transmissores de doenças, emissão de gás metano e dióxido de carbono (GEE) e gás sulfídrico, responsável pelos maus odores. São também gerados impactos de vizinhança, como poluição atmosférica e sonora, danificação de vias devido ao tráfego intenso de veículos pesados, e até mesmo riscos de acidentes graves com catadores e funcionários da unidade.

É relevante exaltar que as tecnologias de aproveitamento energético do biogás de aterro apresentam objetivo de melhorar as condições ambientais, através da redução do consumo de combustíveis fósseis e também políticos e estratégicos, com a ampliação da matriz energética brasileira. Contudo, o aproveitamento energético em aterros sanitários depende da contínua disposição de matéria orgânica, portanto o impacto mitigado pela adoção dessa tecnologia é apenas o de emissão do biogás gerado na degradação anaeróbia e a recuperação de biogás de aterro apresenta índice que varia entre 30 e 40%.

Por sua vez, os sistemas de biometanização exigem a retirada da fração orgânica dos RSU para que esta seja introduzida nos biometanizadores, de forma a reduzir a disposição em aterros e consequente redução na geração de lixiviados, de maus odores, de incidência de animais, de risco de contaminação do solo e lençol freático, bem como da emissão de GEE. Além disso, a baixa disposição de resíduos sólidos orgânicos aumenta a vida útil do aterro, implicando em redução de custos com manutenção, ampliação e implantação de novas unidades.

5.7 Aspectos Econômicos

O volume de gás gerado em aterros sanitários e seu uso para geração de energia elétrica pode garantir a autossuficiência das unidades de disposição, além da possibilidade de comercialização da energia excedente (PECORA ET AL, 2008). Contudo, além da ausência de tecnologia brasileira para a geração de energia elétrica a partir do biogás, o mercado não consolidado restringe os investimentos neste tipo de energia (FIGUEIREDO, 2011).

Um importante marco no incentivo ao uso de fontes renováveis de energia foi a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima em 1992, cujo objetivo foi a estabilização da concentração de GEE na atmosfera. Foi determinado que os países desenvolvidos fossem os primeiros a atingir as metas de redução de emissão, apesar do princípio da responsabilidade comum. Em 1997, portanto, foi estabelecido um acordo internacional que continha as diretrizes básicas para que as metas fossem atingidas e para o tratamento de áreas afetadas, conhecido como Protocolo de Quioto, que entrou em vigo em 2005 (FIGUEIREDO, 2011).

Foram então definidos três mecanismos de viés tecnológico e econômico:

i) Implementação conjunta

Países definidos como desenvolvidos pela Convenção fazem um acordo entre si, em que um financia o desenvolvimento de tecnologias e projetos de redução em outro, que possui custos menores.

ii) Comercialização de emissões

Países definidos como desenvolvidos pela Convenção possuem permissão para comercializar volume de redução excedente para países que não conseguirem atingir as metas.

iii) Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

Países definidos como desenvolvidos pela Convenção devem financiar o desenvolvimento e implantação de projetos de redução de emissão de GEE em países em desenvolvimento.

Para que os projetos se enquadrem no MDL é necessária a participação voluntária das partes envolvidas, benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo com relação às mudanças climáticas e redução de emissão adicional àquela que ocorreria em sua ausência (FIGUEIREDO, 2011). O mercado de créditos de carbono viabilizou os empreendimentos de aproveitamento energético de biogás no Brasil (PECORA ET AL, 2008).

ABRELPE (2013) indica que até 03 de junho de 2012 havia 10.266 de projetos de MDL no mundo, registrados, em fase de registro, em fase de validação, retidos pelos proponentes do projeto, reprovados pelo Conselho Executivo do MDL, que receberam relatório de validação negativo ou tiveram validação cancelada. Em relação ao total de projetos registrados existentes, 48,9% estão instalados na China, enquanto que no Brasil este índice é de 4,74%.

Foi levantado pela ABRELPE (2013) 46 projetos de MDL no Brasil que se enquadram na categoria “manejo e destinação de resíduos sólidos” e subcategoria “aterros sanitários” (Gráfico 11).

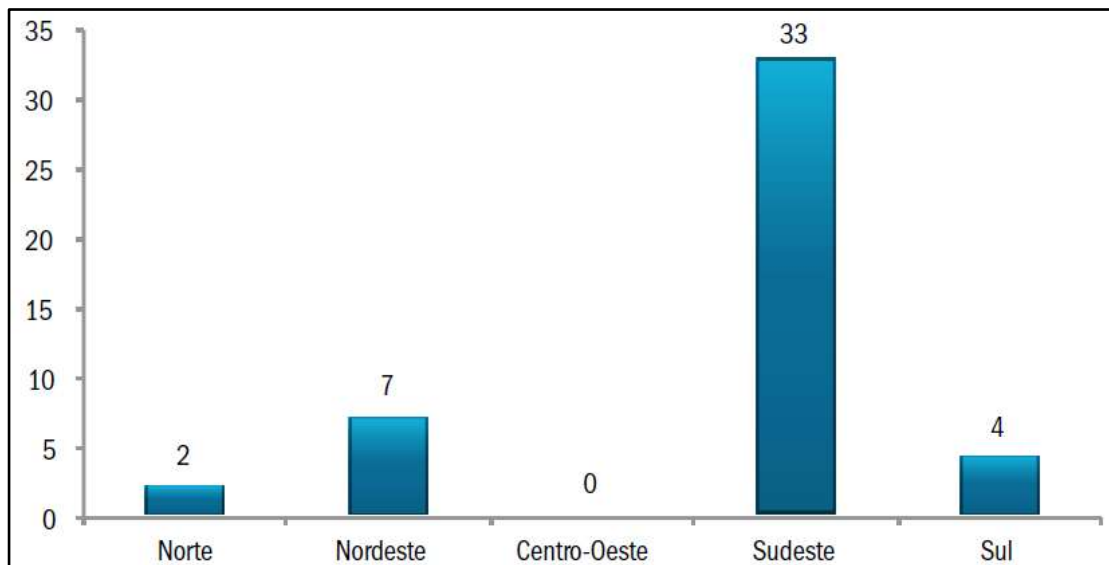


Gráfico 11: Projetos MDL em aterros sanitários por região
Fonte: ABRELPE (2013)

Com estes projetos é previsto um potencial de redução de 12,1 milhões de toneladas de CO₂ equivalentes por ano.

Segundo Pecora et al (2008), em 2007 ocorreu o primeiro leilão de créditos de carbono em bolsa de valores regulada em âmbito mundial. A Prefeitura de São Paulo conquistou os créditos através do projeto de geração de energia elétrica a partir do biogás emitido no Aterro Bandeirantes, onde 80% do biogás captado é aproveitado e 20% queimado em *flare*.

Dessa forma, o MDL e o mercado de crédito de carbono se apresenta como um mecanismo fundamental para o desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento energético do biogás no Brasil, embora haja diversas críticas quanto à sua real eficiência na mitigação de impactos ambientais.

5.8 Aceitação Social

O investimento em saneamento básico, o que inclui o manejo adequado de RSU, é grande responsável pela melhora na saúde pública e qualidade de vida de uma população. Além disso, projetos de valoração de resíduos sólidos sempre apresentam criação de postos de trabalho fixos, geração de emprego e renda, formalização de cooperativas de catadores entre outros mecanismos de sustentabilidade social.

A participação social nas tomadas de decisão do planejamento e implantação de projetos como os de aproveitamento energético do biogás de RSU é fundamental para o adequado desenvolvimento dos mesmos. Para tanto existem instrumentos como as audiências e consultas públicas, em que a sociedade civil tem o direito e o dever de manifestar suas opiniões, críticas e sugestões, as quais devem ser levadas em conta na implantação dos projetos.

Além disso, é relevante ressaltar a importância da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, definida na PNRS como

conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, nos termos desta Lei

Deste modo, é destacada a necessidade da contribuição de toda sociedade, administração pública, setor econômico e sociedade civil, para que as metas determinadas na PNRS de não geração, redução e reutilização de resíduos sejam atingidas.

6. CONCLUSÃO

Diante dos aspectos estudados para análise de implantação de plantas de aproveitamento energético da fração orgânica de RSU, conclui-se que é viável o desenvolvimento destes projetos no Brasil. Há no país uma série de incentivos, políticos e econômicos, para que a matriz energética seja ampliada e especialmente através do uso de biomassa. O aproveitamento energético do biogás reduz impactos ambientais, além de valorizar os resíduos e gerar empregos durante a construção, operação e manutenção dos projetos.

A digestão anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos ocorre de maneira lenta, sendo que o pico da produção de metano ocorre aproximadamente um ano após a disposição dos resíduos, conforme a Figura 9 apresentada anteriormente. Dessa forma, é importante que continue havendo investimento nos projetos implantados de aproveitamento energético do biogás gerado em aterro sanitário. As regiões Norte e Centro-Oeste brasileiras não contam com nenhum destes projetos, e são regiões onde há alta produção de resíduos sólidos orgânicos, domésticos e de agricultura. Contudo, essas regiões ainda apresentam grave deficiência na implantação de aterros sanitários, sendo predominante a presença de vazadouros a céu aberto, é necessário que o poder público invista nestas áreas.

Entretanto, com a meta de não disposição de matéria orgânica em aterros sanitários, estas tecnologias estão comprometidas. Para que seja efetiva esta regulamentação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, ainda é necessário muito investimento em programas de educação ambiental que visem a difusão da importância na gestão de resíduos sólidos para toda a população, assim como a implantação de medidas estruturais efetivas que assegurem o recolhimento de todo o material orgânico gerado, ou que contribua com a compostagem doméstica. Mas, foi claramente estabelecido na política que o aterro sanitário já não é a unidade final receptora dos resíduos orgânicos.

Portanto é necessário investir em tecnologias de biometanização, que se apresentam como uma alternativa ambientalmente sustentável de geração de energia elétrica a partir da degradação anaeróbia de RSU, provendo a redução da carga orgânica sobre aterros sanitários e da formação de lixiviados. Como os custos e condições variam conforme a localidade é preciso realizar estudo aprofundado em cada município em que houver planejamento de implantação de plantas de biometanização. A falta de tecnologias nacionais de geração de energia elétrica a partir do biogás e de biometanização é uma grande barreira a ser superada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Atlas brasileiro de emissões de GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos**. 2013.

ALVES, J.W.S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. 142 p. São Paulo, 2000.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração**. Disponível em <www.aneel.gov.br>. Acesso em 19/06/2014.

_____. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 19 abril 2012. Seção 1, p. 53.

ARAB, P. B. **Transporte de Cu^{2+} em liners compostos de solo argiloso compactado (CCL) e geocomposto bentonítico (GCL)**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

BARCELOS, B.R. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2009.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1999. 120p.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo. Oficina de Textos, 2008.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 08 jan. 2007. Seção 1, p. 3.

_____. 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Seção 1, p. 3.

_____. 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 dez. 2010. Seção 1, Edição Extra, p. 1.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2012. Disponível em <<http://www.sinir.gov.br/web/guest/plano-nacional-de-residuos-solidos>>. Acesso em 09 de junho de 2014.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Diretoria de Pesquisas. Coordenação de População e Indicadores Sociais. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010b.

CAMPOS, J.R. (coordenador). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464 p. Projeto PROSAB.

CASTILHOS JÚNIOR, A.B (coordenador). **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 294 p. Projeto PROSAB.

Directiva 1999/31/CE do Conselho, de 26 de abril de 1999, relativa à deposição de resíduos em aterros. **Jornal Oficial nº L 182**, de 16/07/1999, p. 0001-0019. Disponível em < http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/ALL/;ELX_SESSIONID=16YDTpyGbcryX6qwvhLLRYFRmNhXMgwHw8PPLLv13rJDDgGTjmCK!1663296880?uri=CELEX:31999L0031>. Acesso em 24/06/2014.

ENSINAS, A.V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 2003.

ERENO, D. Eletricidade do lixo. Aterro paulista produz biogás para iluminação e funcionamento de motores. **Revista Pesquisa FAPESP**. São Paulo, Edição 165 – Novembro de 2009.

ESPIRITO SANTO FILHO, F. **Estimativa do aproveitamento energético do biogás gerado por resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Energia – EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

FORSTER-CARNEIRO, T.; PÉREZ, M.; ROMERO, L.I. **Biometanización de residuo sólido urbano: escala de laboratorio y planta piloto**. HOLOS Environment, v.7, n.1, 2007.

FIGUEIREDO, N.J.V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – Estudo de caso**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Energia – EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo. 147 f. São Paulo, 2011.

FRÉSCA, F.R.C. **Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física**. Dissertação (mestrado) – Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

GOMES, F.C.S.P. **Biometanização seca de RSU – Estado da arte e análise crítica das principais tecnologias**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

GOMES, F.C.S.P.; AQUINO, S.F.; COLTURATO, L.F.D.B. **Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos: estado da arte e análise crítica das principais tecnologias.** Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v.17, n. 3, Sept. 2012. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522012000300006&lng=en&nrm=iso&tlng=pt> . Acesso em 20 de junho de 2014.

ICLEI – Brasil – Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários.** ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.

MATOS, A.R.V. **Contribuição para o estudo da influência da recirculação de lixiviados no comportamento de aterros de resíduos sólidos urbanos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal. 2008.

NÚCLEO DE ESTUDO E PESQUISA EM RESÍDUOS SÓLIDOS – NEPER. In: SCHALCH, V. Org.. **Material de ensino da disciplina SHS 0170 – Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos,** São Carlos, SP: SHS/EESC/USP, 2014.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto residencial da USP – Estudo de Caso.** Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N.J.V.; COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G. **Biogás e o mercado de crédito de carbono.** Nota Técnica VIII, Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO. São Paulo, 2008.

PICANÇO, A.P. **Influência da recirculação de percolado em sistemas de batelada de uma fase e híbrido na digestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.** Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

POHLAND, F.G.; GOULD, J.P. **Co-disposal of municipal refuse and industrial waste sludge in landfills**. Water Science Technology. V. 18, n. 12, p. 177 – 192. 1986.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. SECRETARIA EXECUTIVA DE COMUNICAÇÃO. **Prefeitura lança projeto inédito de compostagem doméstica**. Notícia publicada em 16/06/2014. Disponível em < <http://www.capital.sp.gov.br/portal/noticia/3351#ad-image-0>>. Acesso em 16 de junho de 2014.

REGATTIERI, C.R. **Quantificação da emissão de biogás em aterro sanitário – estudo de caso do aterro sanitário de São Carlos**. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Térmica e Fluidos) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

REICHERT, G.A. **Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande/MS, setembro de 2005.

REICHERT, G.A.; SILVEIRA, D.A. **Estudo da viabilidade da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos com geração de energia**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande/MS, setembro de 2005.

RUSSO, M.A.T. **Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário**. Doutorado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2005.

SCHALCH, V. **Análise comparativa do comportamento de dois aterros sanitários semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia**. 1992. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

VILAÇA, M.L.C. **Pesquisa e ensino: considerações e reflexões**. Revista do Curso de Letras da UNIABEU. Nilópolis/RJ, v.1, número 2, Maio-Agosto. 2010.

YESILLER, N.; HANSON, J.L. **Analysis of temperatures at a municipal solid waste landfill.** In: International Waste Management and Landfill Symposium, IX, 2003, Cagliari, Italy. Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy, p. 1-10.

8. APÊNDICES

APÊNDICE A – Empreendimentos de aproveitamento energético do biogás em operação no Brasil

APÊNDICE B – Empreendimentos de aproveitamento energético em outorga no Brasil

Granja São Pedro	80	80	REG	100% para José Carlos Colombari	São Miguel do Iguaçu/PR	Dejetos suínos - Biodigestor
Ambient	1.500	1.500	REG	100% para Ambient Serviços Ambientais de Ribeirão Preto S.A	Ribeirão Preto/SP	ETE
Granja Makena	80	80	REG	100% para Altair Olimpio de Oliveira	Patrocínio/MG	Dejetos suínos - Biodigestor
Ajuricaba	80	80	REG	100% para Prefeitura Municipal de Marechal Cândido Rondon	Marechal Cândido Rondon/PR	Abatedouro de aves - Biodigestor
Fazenda Nossa Senhora do Carmo	80	80	REG	100% para Sérgio Elias Saraiva	Ituiutaba/MG	Frigorífico
Uberlândia	2.852	8.852	REG	100% para Energias Geração de Energia Ltda	Uberlândia/MG	Aterro Sanitário
Granja São Roque	424	424	Não identificado	Não identificado	Videira/SC	Dejetos Suínos - Biodigestor
Cetrel Bioenergia JB	874	874	REG	100% para UTE Cetrel Bioenergia JB	Cachoeirinha/PE	Resíduos Sólidos Orgânicos Industriais
Fazenda da Luz	90	90	REG	100% para Da Luz Energia Ltda	Abelardo Luz/SC	Frigorífico
Cogeração Bio Springer	848	848	REG	100% para Bio Springer do Brasil Indústria de Alimentos S.A.	Valinhos/SP	Resíduos Sólidos Orgânicos Industriais
CTR Juiz de Fora	4.278	4.278	REG	100% para VALORGAS – Energia e Biogas Ltda	Juiz de Fora/MG	Aterro Sanitário
José Carlos Colombari	80	80	REG-RN482	100% para José Carlos Colombari	São Miguel do Iguaçu/PR	Dejetos suínos - Biodigestor
Itajaí Biogás	1.065	1.065	REG	100% para Itajaí Biogás e Energia S.A.	Curitiba/PR	Aterro Sanitário
Guataporá	4.278	4.278	REG	100% para Guataporá Energia S.A.	Guataporá/SP	Aterro Sanitário

APÊNDICE B - Empreendimentos de aproveitamento energético de biogás em outorga

Usina	Potência Outorgada (kW)	Destino da Energia	Proprietário	Município	Fonte
PCT Barueri Biogás	2.601	REG	100% para Companhia de Saneamento Básico de São Paulo	Carapicuíba/SP	ETE
Novagerar	4.000	REG	100% para Novagerar Eco-Energia Ltda	Nova Iguaçu/RJ	Aterro Sanitário
Energia Ambiental 2	3.775	PIE	100% para Energia Ambiental Ltda	Joaquim Nabuco/PE	Aterro Sanitário
Frigorífico D'talia	42	REG	100% para D'talia Agroindústria Ltda	Pedras Grandes/SC	Frigorífico
Biotérmica Recreio	8.556	PIE	100% para Bio Térmica Energia S.A.	Minas do Leão/RJ	Aterro Sanitário
Sapopemba	25.600	APE	100% para Ecourbis Ambiental S.A.	São Paulo/SP	Aterro Sanitário
Geo Elétrica Tamboara	11.940	PIE	100% para Geo Elétrica Tamboara Bioenergia SPE Ltda	Tamboara/PR	Resíduos Sólidos Orgânicos Industriais
Barueri	20.000	PIE	100% para FOXX URE – BA Ambiental Ltda	Barueri/SP	Aterro Sanitário
Termoverde	29.547	PIE	100% para Termoverde Caieiras Ltda	Caieiras/SP	Aterro Sanitário

