

MARCELO DE PAULA NEVES LELIS

**TRATAMENTO ANAERÓBIO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS COMO ESTRATÉGIA PARA PROTEÇÃO DE MANANCIAS
HÍDRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Especialização em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal de Recursos Hídricos do Instituto Federal do Ceará como requisito para obtenção do título de Especialista em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. MSc. Reinaldo Fontes Cavalcante

BRASÍLIA (DF)

2016

MARCELO DE PAULA NEVES LELIS

**TRATAMENTO ANAERÓBIO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS COMO ESTRATÉGIA PARA PROTEÇÃO DE MANANCIAS
HÍDRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Especialização em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal de Recursos Hídricos do Instituto Federal do Ceará como requisito para obtenção do título de Especialista em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal de Recursos Hídricos.

Aprovada em 24/11/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Reinaldo Fontes Cavalcante (Orientador)
IFCE

Prof. MSc. Lucas da Silva
IFCE

Prof. Dr. Michael Barbosa Viana
IFCE

RESUMO

O Brasil já vivencia situações de escassez de recursos hídricos em algumas regiões. Esse cenário aponta para a necessidade de adoção de medidas preventivas que busquem garantir que os atuais mananciais estejam disponíveis às futuras gerações. Entende-se que a adoção de soluções adequadas para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) seja parte indissociável do cenário desejado. Entretanto, mesmo contando com uma legislação atual e mais restritiva, a destinação inadequada dos RSU ainda é prática recorrente no País, o que aumenta o risco de contaminação da água e do solo, em razão da significativa presença de matéria orgânica nesses resíduos. Visando contribuir para a busca de soluções para esse quadro este trabalho se propôs a investigar, a partir de dados e informações disponíveis na literatura, a adoção de tecnologias anaeróbias para o tratamento da fração orgânica dos RSU. Esta solução, cujo emprego ainda é insipiente no Brasil, tem como atrativo adicional a geração de biogás, um subproduto desse processo. O biogás é rico em metano, gás combustível com potencial de aproveitamento energético. Após a remoção das principais impurezas o biogás pode ser utilizado, por exemplo, para a produção de energia elétrica. A partir dos dados levantados pode-se inferir que a adoção da tecnologia de digestão anaeróbia para o tratamento dos resíduos orgânicos nos municípios brasileiros de maior porte possibilitaria, após a conversão do biogás, a geração de 167.514 MWh/mês de energia elétrica. Essa quantidade de energia seria suficiente para abastecer mais de um milhão de residências, alcançando cerca de 8% da população residente nesses municípios. A investigação realizada induz à conclusão de que o fomento à adoção de sistemas de tratamento anaeróbio para a fração orgânica dos RSU alinha-se às ações voltadas para o planejamento e o manejo integrado dos recursos hídricos, visando à preservação e à manutenção da qualidade dos mananciais. A proposição dessa alternativa, que apresenta grande potencial de aplicação no Brasil, se reveste de relevância estratégica, tanto sob a ótica da proteção ambiental como pela possibilidade de contribuir para a diversificação da matriz energética.

Palavras-chave: Proteção de mananciais. Tratamento de resíduos orgânicos. Biogás.

ABSTRACT

Brazil already experiences situations of water scarcity in some regions. This scenario points to the need to adopt preventive measures that seek to ensure that the current sources are available to future generations. It is understood that the adoption of suitable solutions for the treatment of urban solid waste (MSW) is an inseparable part of the desired scenario. However, even with current and more restrictive legislation, the inadequate disposal of MSW is still a recurrent practice in Brazil, which increases the risk of contamination of water and soil, due to the significant presence of organic matter in these wastes. Aiming to contribute to the search for solutions to this situation, this work aims to investigate, from data and information available in the literature, the adoption of anaerobic technologies for the treatment of the organic fraction of MSW. This solution, whose employment is still unsustainable in Brazil, has as an additional attraction the generation of biogas, a byproduct of this process. Biogas is rich in methane, fuel gas with potential for energy use. After the removal of the main impurities, the biogas can be used, for example, for the production of electric energy. From the data collected, it can be inferred that the adoption of anaerobic digestion technology for the treatment of organic waste in the larger Brazilian municipalities would allow the generation of 167,514 MWh/month of electricity after the conversion of the biogas. This amount of energy would be sufficient to supply more than one million homes, reaching about 8% of the population residing in these municipalities. The research carried out led to the conclusion that the promotion of the adoption of anaerobic treatment systems for the organic fraction of MSW is in line with the actions aimed at the planning and integrated management of water resources, aiming at the preservation and maintenance of the quality of the water sources. The proposition of this alternative, which presents great potential of application in Brazil, is of strategic relevance, both from the point of view of environmental protection and the possibility of contributing to the diversification of the energy matrix.

Keywords: Protection of water resources. Treatment of organic waste. Biogas

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Destino final dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil	19
FIGURA 2	Localização do “lixão da estrutural” - Brasília (DF)	27
FIGURA 3	Sequência metabólica, produtos e subprodutos do processo de digestão anaeróbia	29
FIGURA 4	Evolução da capacidade instalada das plantas de metanização de resíduos orgânicos na Europa	36
FIGURA 5	Utilização do biogás	39
FIGURA 6	Representação esquemática simplificada do processo de tratamento anaeróbio com geração de energia	40

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Índice de qualidade da água para mananciais superficiais no Brasil	14
TABELA 2	Atendimento e déficit em serviços de saneamento básico no Brasil	16
TABELA 3	Critérios utilizados para a caracterização do atendimento e do déficit no Plansab	17
TABELA 4	Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil	24
TABELA 5	Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios frente aos aeróbios	31
TABELA 6	Tecnologias de digestão anaeróbia aplicadas ao tratamento de resíduos sólidos	33
TABELA 7	Composição média do biogás	37
TABELA 8	Estimativa da quantidade mínima de RSU e geração de energia elétrica para tecnologias usuais de aproveitamento energético	45
TABELA 9	Estimativa do potencial energético resultante da digestão anaeróbia da fração orgânica dos RSU (para o conjunto dos municípios mais populosos do País)	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abrelpe	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANA	Agência Nacional de Águas
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
GEE	Gases de efeito estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IQA	Índice de Qualidade da Água
KWh	Quilowatt-hora (equivalente a 1.000 watt-hora)
MCidades	Ministério das Cidades
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MRE	Ministério das Relações Exteriores
MWh	Megawatt-hora (equivalente a 1.000.000 watt-hora)
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
Plansab	Plano Nacional de Saneamento Básico
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
TMB	Tratamento Mecânico Biológico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 OBJETIVOS.....	10
2.1 Objetivo Geral.....	10
2.2 Objetivos Específicos	10
3 METODOLOGIA.....	11
4 REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
4.1 Recursos Hídricos no Brasil e a Importância da Proteção de Mananciais.....	12
4.2 Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.....	15
4.2.1 Breve Panorama do Quadro Atual	15
4.2.2 Principais Normativos	20
4.2.3 Riscos de Contaminação dos Recursos Hídricos pela Degradação de Resíduos Orgânicos	23
4.3 Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos.....	28
4.3.1 Fundamentos da Digestão Anaeróbia.....	28
4.3.2 Tecnologias de Digestão Anaeróbia para Tratamento de Resíduos Orgânicos	30
4.3.3 Utilização do Biogás	37
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO	42
5.1 Relevância Estratégica da Conservação dos Recursos Hídricos e da Proteção de Mananciais	42
5.2 Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil e Viabilidade da Adoção de Tecnologias Anaeróbias.....	43
5.3 Estimativa do Potencial Energético Associado ao Tratamento da Fração Orgânica dos RSU.....	44
5.4 Comentários Adicionais.....	48
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

As mudanças das características do país, com acelerado grau de urbanização e intensa migração do campo para as cidades, tem levado cada vez mais pessoas a fixarem residência nas áreas urbanas. Esta característica, que se configura como uma tendência de difícil reversão, traz consigo a necessidade de ampliar a provisão de serviços públicos, dentre os quais a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos. Soma-se ao quadro exposto o crescimento demográfico, que contribui para o gradual acréscimo do volume de resíduos gerados, resultando em maior pressão sobre os serviços de coleta, tratamento e disposição final. A busca por soluções para esse crescente problema tem se configurado, portanto, como um dos grandes desafios enfrentados nos municípios brasileiros

É de se esperar que os resíduos sólidos coletados nas cidades apresentem uma composição diversificada, resultante das diversas atividades que compõem o cotidiano da população. Essa diversificação pode levar à necessidade de busca de soluções apropriadas para as distintas frações, e que possibilitem o aproveitamento máximo dos resíduos. Isso pode se dar por diferentes sistemas, visando, em suma, a reincorporação de substâncias e produtos ao processo produtivo, minimizando, assim, a necessidade de adoção de alternativas de disposição final.

Como resultado das atividades rotineiras e cotidianas de uma cidade é previsível que sejam descartados, pela população, uma expressiva quantidade de resíduos de natureza orgânica, formados, basicamente, por sobras de alimentos e outros elementos facilmente degradáveis. Quando não são submetidos a um manejo adequado, que resultaria no seu encaminhamento para sistemas de tratamento e/ou de disposição final seguros, esses resíduos podem ocasionar impactos negativos ao patrimônio ambiental, com potencial de poluir o solo a água e o ar.

No caso dos recursos hídricos em especial, sejam estes subterrâneos ou superficiais, a contaminação por resíduos orgânicos pode resultar na perda de qualidade dos mananciais. Em casos mais graves a contaminação pode até mesmo inviabilizar a utilização do manancial comprometido.

Visando minimizar o risco de causar impactos ambientais e danos à saúde da população existe a alternativa de se encaminhar os resíduos orgânicos para sistemas adequados de tratamento, o que tem se constituído em uma maneira eficaz de proteção ambiental. Tais sistemas devem ser ambientalmente adequados e sanitariamente seguros, a fim de que cumpram com o seu propósito. Existem hoje diversas soluções com essa finalidade, as quais apresentam variação em termos da natureza do processo empregado, complexidade tecnológica do sistema, custo de implantação e operação e diversas outras características que interferem na tomada de decisão.

Os sistemas de tratamento de resíduos orgânicos se dividem, basicamente, entre processos aeróbios (que demandam oxigênio) e anaeróbios (que ocorrem na ausência de oxigênio). Os sistemas anaeróbios podem apresentar, como atrativo adicional, a possibilidade de aproveitamento do gás que é gerado como subproduto da decomposição dos resíduos, denominado biogás. O biogás, em razão de seus constituintes químicos, apresenta potencial para uso combustível, podendo ser adotado como fonte de energia para diversas aplicações.

O estudo de alternativas para o tratamento de resíduos orgânicos traz uma relevância estratégica, tanto sob a ótica da proteção de mananciais como pela possibilidade do seu aproveitamento energético. Neste sentido, este trabalho se propõe a investigar a adoção de tecnologias anaeróbias para o tratamento da fração orgânica dos RSU, fornecendo elementos que auxiliem na disseminação desses processos, cujo emprego ainda é insipiente no Brasil. Tal medida busca trazer, para a ótica da elaboração e do gerenciamento de projetos para a gestão de recursos hídricos, elementos que contribuam para o aprimoramento da gestão dos RSU.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho se propõe a investigar, por meio da revisão de literatura, o potencial associado à adoção da digestão anaeróbia como alternativa a ser empregada no tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, com foco na realidade brasileira, visando, sobretudo, a proteção de mananciais hídricos. Tem-se, com isso, a expectativa de difundir alternativas para o tratamento adequado desses resíduos, com vistas a minimizar o risco de contaminação de mananciais hídricos.

2.2 Objetivos Específicos

- Construir um breve quadro acerca da situação do manejo dos resíduos sólidos urbanos no Brasil;
- Avaliar os recentes avanços da legislação brasileira no tocante à gestão dos RSU;
- Discorrer sobre a importância da proteção de mananciais e os riscos de contaminação de recursos hídricos pela ausência de tratamento de resíduos orgânicos;
- Investigar as tecnologias usualmente adotadas para o tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos;
- Identificar o potencial de geração de biogás nesses sistemas;
- Inferir, à luz das informações colhidas na literatura, quanto à aplicabilidade de processos anaeróbios para o tratamento de resíduos orgânicos em municípios brasileiros, visando à redução de impactos ambientais, sobretudo a contaminação de mananciais hídricos;
- Estimar o potencial energético associado à adoção da digestão anaeróbia como alternativa para o tratamento da fração orgânica dos RSU em municípios brasileiros.

3 METODOLOGIA

A construção desse trabalho se pautou na revisão bibliográfica sobre tópicos diretamente associados à temática central objeto do texto. Neste sentido buscou-se identificar, em fontes de pesquisa disponíveis em diferentes formatos, informações atualizadas sobre a situação atual dos recursos hídricos e a importância da proteção de mananciais para assegurar os múltiplos usos previstos. A gestão de resíduos sólidos no Brasil foi outro tema investigado na literatura consultada, com especial enfoque nas soluções usualmente adotadas para a disposição final e aos riscos de contaminação de mananciais decorrentes destas práticas.

A revisão realizada também se destinou a colher informações acerca da viabilidade da adoção de tecnologias anaeróbias para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, além da possibilidade de aproveitamento energético do biogás gerado nesses processos. Nesse aspecto em particular buscou-se identificar, nas fontes consultadas, dados acerca da viabilidade técnica e econômica das soluções empregadas com essa finalidade.

Para se alcançar o nível de informação desejado foram realizadas consultas a resultados de pesquisas setoriais e a bancos de dados de sistemas de informações. Também foram consultadas publicações e periódicos impressos, monografias, dissertações e teses acadêmicas, além de sítios eletrônicos disponíveis na rede mundial de computadores. Não se almejou, contudo, esgotar o assunto, dada a sua complexidade e a natureza desse trabalho.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Recursos Hídricos no Brasil e a Importância da Proteção de Mananciais

Por se tratar de um recurso essencial à vida, os debates acerca de temas relacionados à água tem sido cada vez mais frequentes e intensos. Da mesma forma, a adoção de ações voltadas para o planejamento e o manejo integrado dos recursos hídricos, visando à preservação e à manutenção da qualidade dos mananciais, tem se revestido de uma importância cada vez maior.

A preservação dos mananciais hídricos é uma medida que demanda ações em escala mundial. Isso já tem sido objeto de discussão em vários fóruns, como é o caso da Conferência Internacional sobre Água Doce, ocorrida em Bonn, em dezembro de 2001, com o tema central “Água: chave para o desenvolvimento Sustentado”. Segundo Petrella (2002 *apud* GOMES; BARBIERI, 2004), diagnóstico apresentado na mencionada Conferência aponta que “cerca de 1,2 bilhão de pessoas vivem sem acesso à água em quantidade e qualidade necessárias para uma vida saudável e digna; 2,5 bilhões carecem de saneamento adequado e 4 milhões morrem todos os anos de disenteria, amebíase e outras doenças associadas à água de má qualidade”. O autor considera que se for mantido o padrão atual de uso e degradação da água, esse quadro tende a se agravar, “pois estima-se que por volta de 2030 a Terra contará com 2 bilhões de pessoas a mais, a maioria vivendo nas grandes cidades situadas em países pobres, principalmente, na Ásia, na África, no Oriente Médio e na América Latina”.

É de se esperar que o maior contingente populacional resulte em reflexos diretos na demanda por recursos hídricos, o que também poderá ensejar disputas e conflitos pela água. Neste sentido o Portal Brasil (2016) cita que estimativas do Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas apontam que “até o ano de 2025, o número de pessoas que vivem em países submetidos a grande pressão sobre os recursos hídricos passará dos cerca de 700 milhões atuais para mais de 3 bilhões”. Trata-se de um grande salto populacional em um curto período de tempo, o que denota a gravidade dessa questão.

O Brasil é mundialmente conhecido pela abundância em recursos hídricos. Entretanto, a conhecida riqueza em fontes de água, distribuídas em rios, córregos, lagos e outros

mananciais, pode camuflar graves problemas verificados no país. Conforme aponta o Portal Brasil (2016), “apesar de ocupar quase metade da área da América do Sul e de ter em torno de 60% da Bacia Amazônica, que escoia um quinto do volume de água doce do mundo, há áreas críticas, onde a escassez deixou de ser apenas uma ameaça”.

De fato, nos últimos anos essa ameaça se tornou real. Vários municípios brasileiros, de diferentes regiões do País, vem sofrendo com a escassez hídrica. Conforme aponta a Câmara dos Deputados (2016), “a crise hídrica alcançou grandes áreas das Regiões Sudeste e Centro-Oeste em 2014 e início de 2015 afetando o abastecimento de água e o suprimento de energia elétrica”.

Esta situação tem levado à busca e ao desenvolvimento de mecanismos e ações voltadas para garantir a disponibilidade de água de boa qualidade para as gerações atuais e futuras. Tem-se procurado, também, diminuir os conflitos do uso da água e ampliar a percepção da importância da sua conservação, tendo em vista o seu valor ambiental, social e econômico. Neste sentido o Portal Brasil (2016) destaca o relevante papel da Lei 9.433/1997, conhecida como “Lei das Águas”. Trata-se de normativo que estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh). A Lei 9.433/1997 estabelece, em seu Art. 1º, os fundamentos em que se baseia a Política Nacional de Recursos Hídricos, conforme reproduzido a seguir:

[...] Art. 1º A Política Nacional de Recursos Hídricos baseia-se nos seguintes fundamentos:

I - a água é um bem de domínio público;

II - a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;

III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;

IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;

V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;

VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades [...] (Brasil, 1997).

A Lei 9.433/1997 também estabelece, em seu Art. 5º, instrumentos voltados à implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Dentre estes, destaca-se:

- [...] Planos de recursos hídricos: os planos nacional e estaduais são estratégicos, pois estabelecem diretrizes gerais sobre os recursos hídricos do País ou do estado. É o instrumento de planejamento nacional ou local, pelo qual se define como conservar, recuperar e utilizar a água em suas referidas bacias. O Plano Nacional

está em vigor desde janeiro de 2006, tendo sido aprovado pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos e estando em revisão após esses primeiros quatro anos. Estados estão na fase de desenvolvimento de seus próprios planos.

- Cobrança pelo uso da água: mecanismo educador que reconhece a água como bem econômico e dá ao usuário uma indicação de seu real valor, incentivando a racionalização do uso da água e obtendo recursos para o financiamento de programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos [...] (Portal Brasil, 2016).

Embora o Brasil seja considerado um país privilegiado em termos de recursos hídricos, pode-se dizer que estes não estão distribuídos uniformemente no território nacional. No tocante à água doce superficial, correspondente a córregos, rios e lagos, dentre outros, a Agência Nacional de Águas registra que “apesar de o Brasil possuir 13% da água doce disponível do planeta, a distribuição é desigual, pois 81% estão concentrados na Região Hidrográfica Amazônica, onde está o menor contingente populacional, cerca de 5% da população brasileira e a menor demanda” (ANA, 2016). A Agência também cita que “nas regiões hidrográficas banhadas pelo Oceano Atlântico, que concentram 45,5% da população do País, estão disponíveis apenas 2,7% dos recursos hídricos do Brasil”. São informações que demonstram bem a citada desigualdade na distribuição dos recursos hídricos no País, e fazem parte do relatório denominado Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil – Informe 2014. Este relatório é elaborado a cada quatro anos pela ANA, com a publicação anual de informes que atualizam o seu conteúdo.

O Informe 2014 também faz uma análise do Índice de Qualidade da Água (IQA), considerando o monitoramento no campo (1.039 pontos) e nas cidades (530 pontos). O IQA “considera nove parâmetros físico-químicos e biológicos das águas, como: Oxigênio dissolvido, Nitrogênio total, Fósforo total e temperatura da água, entre outros” (ANA, 2016). De acordo com a Agência “quanto pior a qualidade, maior deve ser o tratamento para que a água possa ser usada para finalidades mais exigentes, como o abastecimento humano”. A Tabela 1 aponta os resultados encontrados para o País em 2014.

Tabela 1 - Índice de Qualidade da Água para mananciais superficiais no Brasil

IQA	Ótima	Boa	Regular	Ruim	Péssima
Rural	-	82%	3%	6%	-
Urbano	4%	48%	23%	21%	4%

Fonte: adaptado de ANA (2016)

Pelos resultados apresentados depreende-se que há uma grande necessidade em buscar medidas e ações práticas que possam contribuir para minimizar os impactos negativos nos recursos hídricos. Neste sentido, a adoção de medidas preventivas, como é o caso da ampliação da oferta de serviços de saneamento básico, tem um destaque especial.

Outro ponto prioritário para o Brasil, no campo dos recursos hídricos, são as águas subterrâneas. De acordo com o Portal Brasil (2016), “a reserva estimada para o País é de 112 mil km³ e a maior parte deste volume se encontra no Aquífero Guarani, o maior manancial de água doce transfronteiriça do mundo”. Diversas cidades fazem uso exclusivamente desses mananciais para o abastecimento público, chegando a 16% dos municípios, segundo o Portal Brasil (2016). Ainda segundo a citada fonte, um dos riscos para os mananciais subterrâneos “é a contaminação provocada por fossas, esgotos domésticos e industriais, lixões e agroquímicos”. Avalia-se que reverter a contaminação de um manancial subterrâneo por poluentes dessa natureza, como é o caso dos resíduos depositados em lixões, pode-se configurar em tarefa de elevada complexidade e significativo custo.

Não obstante a sua reconhecida riqueza em mananciais o Brasil já apresenta diversas situações preocupantes de escassez hídrica em algumas regiões. A qualidade de água também deixa a desejar em alguns casos, conforme mencionado anteriormente. Esse cenário aponta para a necessidade de adoção de medidas preventivas que busquem garantir que esses mananciais estejam disponíveis, em quantidade e qualidade, para a atual e as futuras gerações. Com este enfoque, entende-se que a adoção de soluções adequadas para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos é parte indissociável do cenário desejado.

4.2 Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

4.2.1 Breve Panorama do Quadro Atual

Embora considerados como essenciais à qualidade de vida da população, a disponibilidade de serviços como abastecimento de água, esgotamento sanitário e manejo de resíduos sólidos ainda está longe de ser uma realidade no cotidiano de uma parcela expressiva da população brasileira. Essa constatação pode ser ilustrada pelos dados apresentados na Tabela 2, que

resume a situação em que se encontra o nível de atendimento desses serviços, conforme identificado no Plano Nacional de Saneamento Básico – Plansab. Para chegar ao resultado apontado no Plano, tendo por base o ano de 2010, foram consultadas fontes de pesquisa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, como o Censo Demográfico e a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB, e do Ministério das Cidades, que é o caso do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS.

Na concepção do Plansab, que conta com um amplo diagnóstico do setor, a ausência de serviços de saneamento ou situações de atendimento precário à população foram considerados como déficit. Como atendimento precário entenda-se os casos em que o serviço é ofertado em condições insatisfatórias ou provisórias. Somada à situação da ausência do serviço, o déficit identificado ilustra a parcela da população que se encontra exposta a riscos decorrentes da falta de atendimento, situação que também contribui para comprometer a qualidade do ambiente, com possíveis impactos nos corpos hídricos.

Tabela 2 - Atendimento e déficit em serviços de saneamento básico no Brasil

Componente	Atendimento Adequado		Déficit			
			Atendimento precário		Sem atendimento	
	(x1.000 hab)	%	(x1.000 hab)	%	(x1.000 hab)	%
Abastecimento de água	118.616	62,4	62.699	33,0	8.638	4,5
Esgotamento sanitário	88.930	46,8	83.797	44,1	17.226	9,1
Manejo de resíduos sólidos	113.166	59,6	51.903	27,3	24.883	13,1

Fonte: adaptado de Ministério das Cidades (2013)

Pelos dados apresentados pode-se observar que, somados aqueles sem atendimento aos que são atendidos de forma precária, o resultado final (déficit) ainda é bastante significativo no saneamento. Tal quadro resulta em milhões de pessoas vivendo em ambientes insalubres e expostos a diversos riscos que podem comprometer a sua saúde e impactar negativamente o meio ambiente.

É importante esclarecer a metodologia adotada para a classificação que resultou no quadro apresentado. Para isso é possível observar, na Tabela 3, os critérios utilizados na

caracterização do atendimento e do déficit de acesso aos serviços de manejo de resíduos sólidos, componente do saneamento básico em que se concentra o foco desse trabalho.

Tabela 3 - Critérios utilizados para a caracterização do atendimento e do déficit no Plansab

Atendimento Adequado	Déficit	
	Atendimento Precário	Sem atendimento
- Coleta direta, na área urbana, com frequência diária ou em dias alternados e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos;	Domicílios com coleta que se encontram em alguma das seguintes situações: - área urbana, com coleta direta ou indireta, cuja frequência não seja pelo menos em dias alternados;	Todas as situações não enquadradas nas definições de atendimento e que se constituem em práticas inadequadas (coleta indireta de resíduos em área urbana; ausência de coleta, resíduos queimados ou enterrados, jogados em terreno baldio, rio, lago ou mar).
- Coleta direta ou indireta, na área rural, e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos.	- destinação final ambientalmente inadequada.	

Fonte: adaptado de Ministério das Cidades (2013)

Pode-se verificar, nos requisitos e critérios adotados para qualificar o nível dos serviços prestados que, além da coleta, a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos foi considerada uma condição *sine qua non* para considerar o atendimento como adequado.

Reverter esse quadro, que demonstra que o país ainda tem que investir muito na melhoria dos serviços de saneamento básico é, de fato, um grande desafio. No caso dos resíduos sólidos urbanos isso se torna ainda mais relevante quando se constata que a taxa de geração continua crescente, conforme aponta o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2014. O documento, resultante de pesquisa de informações relativas à gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU), abrangeu um universo de 400 municípios. De acordo com a publicação “a geração total de RSU no Brasil em 2014 foi de aproximadamente 78,6 milhões de toneladas, o que representa um aumento de 2,9% quando comparado com 2013, índice superior à taxa de crescimento populacional no país no período, que foi de 0,9%” (ABRELPE, 2014).

Situação similar foi identificada no Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2014. O Diagnóstico, em sua décima terceira edição, divulga anualmente a base de dados do

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, em seu componente "Resíduos Sólidos" (SNIS-RS). De acordo com os dados levantados a quantidade de resíduos domiciliares e públicos coletada, quando relacionada à respectiva população urbana, resultou em valores de massa coletada *per capita* para o País da ordem de 1,05 kg/hab./dia (indicador médio). Segundo o Diagnóstico esse resultado significa “aproximadamente, 4% a mais do que o de 2013, retomando, dessa forma, um comportamento de alta verificado dos anos 2010 a 2012” (Ministério das Cidades, 2014). De acordo com os autores, o Diagnóstico ainda aponta que este indicador médio “sofre expressiva alta de 12,9% de 2010 até 2014”.

Vale destacar que, embora não alcance a totalidade dos municípios brasileiros, o SNIS-RS tem abrangência expressiva do território nacional, permitindo assim a obtenção de um bom “retrato” da realidade brasileira. Em 2014, 3.765 municípios participaram do referido Diagnóstico, o que corresponde a 67,6% do total de municípios do País. Em termos de população urbana o alcance do SNIS-RS chega a 86,1% do total de habitantes. Isso significa que os resultados do Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2014 retratam a realidade de 147,4 milhões de pessoas que habitam áreas urbanas do território nacional.

O aumento de volume de resíduos coletados pode estar associado, em parte, pela ampliação dos serviços. Segundo aponta o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2014 o país atingiu, em 2014, um índice de cobertura de coleta de 90,6% dos resíduos gerados, levando à constatação de que “pouco mais de 7 milhões de toneladas deixaram de ser coletadas no país neste ano e, conseqüentemente, tiveram destino impróprio” (ABRELPE, 2014).

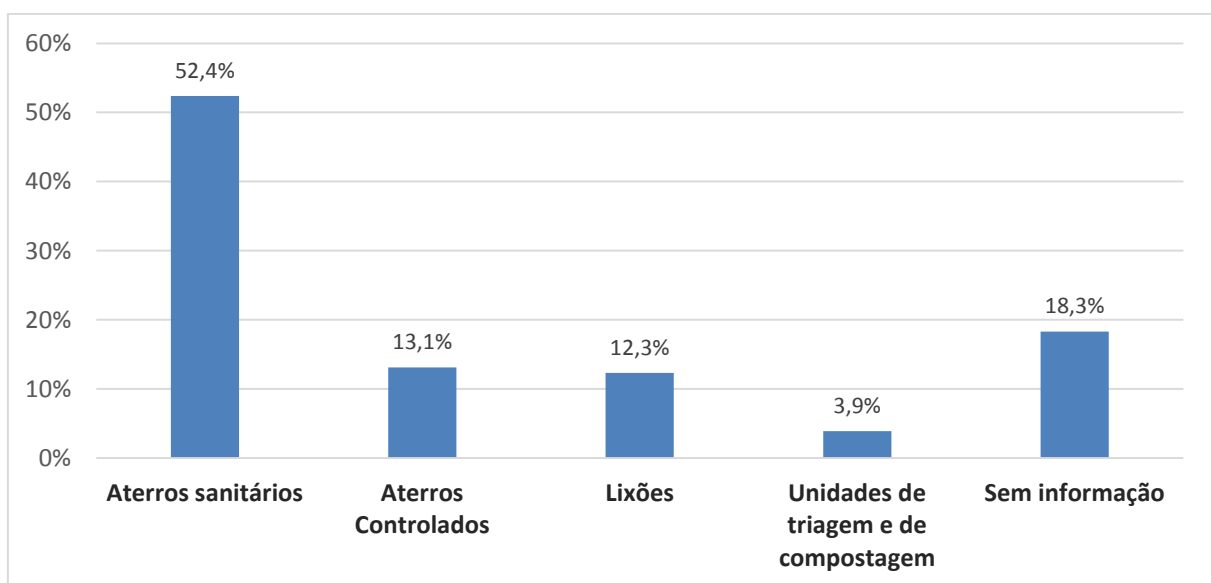
Quanto à destinação final dados levantados pelo citado Panorama revelaram que “58,4% dos resíduos coletados tiveram destinação adequada e seguiram para aterros sanitários em 2014” (ABRELPE, 2014). Isso significa, de acordo com os dados apresentados, que praticamente não houve alteração do cenário registrado no ano anterior. A partir dos números apontados na pesquisa pode-se deduzir que 81 mil toneladas diárias de resíduos (correspondente a 41,6% do total coletado) não são encaminhadas para soluções adequadas de tratamento e/ou disposição final, o que contribui para a formação de um quadro bastante negativo.

Essa percepção de um quadro negativo quanto à disposição final dos RSU no País é endossada no Panorama, que menciona que “mesmo com uma legislação mais restritiva e apesar dos esforços empreendidos em todas as esferas governamentais, a destinação

inadequada de RSU se faz presente em todas as regiões e estados brasileiros” (ABRELPE, 2014). A pesquisa ainda destaca que 3.334 municípios, correspondentes a 59,8% do total, ainda fazem uso de locais impróprios para destinação final dos resíduos coletados. Trata-se de uma constatação alarmante, visto que, usualmente, o descarte de resíduos em locais impróprios contribui diretamente para a degradação do meio ambiente, com a consequente poluição do solo, dos recursos hídricos e, por vezes, do ar, em razão da queima ainda ser adotada como uma prática comum.

O baixo índice de adoção de soluções adequadas para a disposição final de resíduos sólidos, no Brasil, também é corroborado pelos dados divulgados no Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2014. Os dados apurados, segundo a classificação efetivada pelos próprios órgãos gestores municipais que responderam o SNIS-2014, resultou em um quadro que demonstra a necessidade premente de se aprimorar o manejo dos resíduos, sobretudo no que se refere às soluções adotadas para a destinação final. A Figura 1 agrupa os resultados colhidos pelos SNIS-2014, que apresentou, como alternativas para a destinação final para os municípios informantes, as categorias “aterros sanitários”, “aterros controlados”, “lixões” ou “unidades de compostagem”. Aqueles que não identificaram a solução adotada foram agrupadas na categoria “sem informação”, cujo percentual, ainda expressivo, tem-se buscado minimizar à medida que o trabalho vem sendo aprimorado.

Figura 1 - Destino final dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil



Fonte: Ministério das Cidades, 2014

De acordo com o Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2014 o montante de 18,3% considerado “sem informação” se refere, sobretudo, a pequenos municípios, com até 30 mil habitantes. Os autores do Diagnóstico, cientes das restrições impostas por tal lacuna, julgam pertinente, a título de exercício, se admitir que dois terços desta “massa sem informação” seja encaminhada para a lixões (Ministério das Cidades, 2014). Isso resulta na constatação de que mais de 18% dos resíduos coletados no país ainda seguem para lixões, o que contribui para tornar o quadro ainda mais crítico, visto o já comentado risco de degradação ambiental associado a essa perversa e arcaica prática.

4.2.2 Principais Normativos

A legislação brasileira referente ao saneamento básico tem tido avanços significativos, sobretudo no passado recente, como foi o caso da promulgação da Lei nº 11.445, em 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e seu decreto regulamentador (Decreto 7.217, em 21 de junho de 2010). Importante registrar que a Lei 11.445/2007 passou a considerar a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos como um dos componentes efetivos do saneamento básico. Isso fica claro na redação do Art. 3º da referida Lei, que define o saneamento básico como:

- [...] conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de:
- a) abastecimento de água potável: constituído pelas atividades, infraestruturas e instalações ...;
 - b) esgotamento sanitário: constituído pelas atividades, infraestruturas e instalações ...;
 - c) limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destino final do lixo doméstico e do lixo originário da varrição e limpeza de logradouros e vias públicas;
 - d) drenagem e manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização... (texto original alterado pela Lei nº 13.308, de 2016) [...]. (BRASIL, 2010)

Pode-se presumir que essa configuração desenhada pela Lei 11.445/2007 poderá trazer reflexos no estabelecimento de prioridades quanto à proposição de políticas públicas e definição de linhas de crédito para o setor, pois entende-se que foi dada maior relevância à gestão de resíduos, muitas vezes relegada a segundo plano no contexto do saneamento. Nesse sentido vale também mencionar que a universalização do acesso ao saneamento básico, ou seja, levar esses serviços, em quantidade e qualidade, a toda a população, é um dos princípios fundamentais estabelecidos na referida Lei.

Aos avanços no campo legislativo trazidos pela Lei 11.445/2007 somam-se aqueles resultantes da promulgação da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Trata-se de uma legislação há muito tempo aguardada pelo setor, devido à complexidade do tema e da necessidade de um regramento mínimo para as questões afetas aos resíduos sólidos.

Dada a diversidade de tipologias de resíduos classificadas na Lei 12.305/2010 torna-se importante destacar, para efeito de se estabelecer o “recorte” de alcance desse trabalho, que este se restringe aos resíduos sólidos urbanos, definidos pela sigla RSU. Esta classificação, segundo o Artigo 13 da citada Lei, englobam os resíduos domiciliares (originários de atividades domésticas em residências urbanas) e os resíduos de limpeza urbana (originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana).

Dentro da temática a que se propõe investigar nesse trabalho, que é o aproveitamento energético da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU), a Lei 12.305/2010 trouxe significativa contribuição. Regulamentada pelo Decreto nº. 7.404, de 23 de dezembro de 2010, a Lei 12.305/2010 abre perspectivas para a adoção e a ampliação dessa prática no país, ao classificar o o aproveitamento energético como uma das formas de destinação final ambientalmente adequada para os resíduos. Cabe destacar que tal classificação inclui, na mesma categoria, soluções já amplamente adotadas, como pode-se verificar a partir da transcrição do Art. 3º da mencionada Lei, parcialmente reproduzido a seguir:

[...] Art. 3º Para os efeitos desta Lei, entende-se por:

I - ...;

...

VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

[...]. (BRASIL, 2010)

Verifica-se que a legislação trouxe, portanto, uma clara abertura à possibilidade de adoção de sistemas de tratamento de resíduos orgânicos com foco no seu aproveitamento energético. A Lei 12.305/2010 reforça essa perspectiva ao mencionar, em seu Artigo 7º, que são objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, dentre outros, o incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos

e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético (BRASIL, 2010).

Outro significativo avanço que decorre da promulgação da Lei 12.305/2010 foi o estabelecimento do conceito conhecido como “hierarquização” na gestão dos resíduos sólidos. Isto está expresso no caput do Art. 9º da Lei, que conta com a seguinte redação:

[...] Art. 9 Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos [...]. (BRASIL, 2010)

Dessa forma, o normativo estabelece que somente poderá ser encaminhado para a disposição final aquele resíduo que não puder ser encaminhado para a reutilização, a reciclagem ou o tratamento, passando a ser classificado como rejeito.

Cabe destacar que a Lei 12.305/2010 traz algumas ressalvas quanto à adoção de alternativas voltadas ao reaproveitamento dos resíduos sólidos que incluam a recuperação e o aproveitamento energético, conforme registrado no Parágrafo 1º do Art. 9º:

[...] § 1º Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.[...]. (BRASIL, 2010)

A segregação dos resíduos, segundo sua tipologia, pode favorecer a adoção de alguns processos subsequentes, que visem ao seu aproveitamento ou reciclagem. Neste sentido, um dos instrumentos para atendimento da meta de disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, prevista na Lei, consiste na implantação de sistemas de coleta seletiva que propiciem o recolhimento dos resíduos, no mínimo, em duas frações: secos e úmidos. Tais sistemas deveriam estar disponíveis e em funcionamento em todo o país, porém não é essa a situação que se verifica a partir dos dados no Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2014, os quais concluem que “menos de 65% dos municípios contam com iniciativas de coleta seletiva” (ABRELPE, 2014).

Avalia-se, portanto, que à medida que sejam implementadas ações e programas efetivos visando ampliar os índices da coleta seletiva, tanto os materiais recicláveis como os resíduos orgânicos passarão a contar com uma qualidade superior. Isso se deve, sobretudo, ao menor grau de contaminação, resultante da separação entre essas frações e os rejeitos eventualmente descartados.

4.2.3 Riscos de Contaminação dos Recursos Hídricos pela Degradação de Resíduos Orgânicos

Quando não são submetidos ao manejo adequado os resíduos sólidos urbanos podem representar significativo e potencial risco de contaminação do meio ambiente e, conseqüentemente, dos recursos hídricos. Isso se deve à significativa presença de matéria orgânica na massa desses resíduos, situação que se verifica, de forma generalizada, nos municípios brasileiros.

Tal situação pode ser constatada a partir dos dados disponíveis no Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Versão Preliminar para Consulta Pública (MMA, 2011), que identificou o expressivo percentual da fração orgânica presente na composição dos resíduos sólidos no Brasil. De acordo com o documento, para estimar a quantidade dos diferentes tipos de resíduos gerados no Brasil foram utilizados dados de composição gravimétrica provenientes da média de 93 estudos de caracterização física, realizados no país entre os anos de 1995 e 2008. No documento os autores chamam atenção para o fato de esses estudos nem sempre utilizarem a mesma metodologia (frequência, escolha da amostra e divisão das categorias), o que resulta, portanto, em uma estimativa do comportamento real da situação.

A estimativa da composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil é apresentada na Tabela 4. Para se chegar ao resultado apresentado considerou-se como base a quantidade de resíduos coletada no ano de 2008. Como pode-se constatar, a matéria orgânica representa um percentual significativo da massa de resíduos coletada, respondendo por 51,4% do total. Trata-se, portanto, do componente observado em maior proporção, o que, aliado às suas características, reforçam a necessidade de olhar especial para esse tipo de resíduo.

Tabela 4: Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil

Tipo de Resíduo	Participação (%)	Quantidade (t/dia)
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: Adaptado de “Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Versão Preliminar para Consulta Pública” (2011)

Como já mencionado a fração orgânica dos RSU se compõe, basicamente, de sobras de alimentos. De acordo com CHAN, KRIEG & PELCZAR (1996), alimentos são facilmente contaminados com micro-organismos na natureza, durante manipulação e processamento. Segundo os autores, após ter sido contaminado, o alimento serve como meio para o crescimento de micro-organismos, podendo até mesmo mudar as suas características físicas, químicas e organolépticas, levando-o à deterioração.

E é justamente esse tipo de resíduo, a fração orgânica, a principal fonte de contaminação da água e do solo pelos RSU. Neste sentido vale ressaltar que:

[...] Dentre os diversos resíduos sólidos gerados nas atividades antrópicas, têm-se aqueles de natureza orgânica como um dos mais importantes, face ao grande volume gerado e à sua característica de biodegradabilidade. Quando não são adequadamente gerenciados esses resíduos podem formar fontes poluidoras que podem ocasionar desde contaminações pontuais de baixa intensidade até degradações irreversíveis ao meio ambiente. Além do risco de contaminação direta do solo e dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos...

...

O material orgânico constitui-se, também, em habitat propício à proliferação de micro (bactérias, vírus, fungos, protozoários etc.) e macrovetores (moscas, mosquitos, baratas, ratos etc.), que podem disseminar uma série de doenças [...]. (LELIS, 2011).

Tal constatação traz sérios riscos aos mananciais hídricos. Segundo Abreu (1999) “um dos inimigos da água potável é o resíduo sólido urbano – RSU”. De acordo com o autor, quando dispersa no ambiente, a contaminação superficial decorrente da disposição inadequada de resíduos sólidos conflui, mais cedo ou mais tarde, para um corpo d’água e, inexoravelmente, chega a algum ponto de coleta para consumo humano. O autor ainda destaca que “mais perigosa é a contaminação do lençol freático, traiçoeira, invisível”. Tal situação pode levar, por exemplo, à necessidade de adoção de sistemas de tratamento mais complexos, o que, via de regra, se reflete em maior custo de implantação e operação. Conforme destaca Abreu (1999) “o que poderia ser uma simples captação de água passa a ser necessariamente uma estação de tratamento, aumentando o custo dos serviços de suprimento de água potável, quando não inviabiliza totalmente o uso do manancial”.

Tem-se ainda, como agravante, o fato de que a disposição inadequada dos RSU pode resultar em contaminações que extrapolam fronteiras municipais, levando à necessidade de se adotar soluções também de alcance regionais. Foi o que se observou na região das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ), onde a disposição final inadequada dos resíduos sólidos resultou na consequente deterioração da qualidade da água dos mananciais e na contaminação do solo. Tal situação motivou o Consórcio PCJ a implantar o Programa de Resíduos Sólidos. O Programa tem como objetivo geral “fomentar a conscientização e o planejamento de políticas públicas municipais e regionais de resíduos sólidos, visando o estabelecimento de um sistema integrado e participativo de gerenciamento nas bacias PCJ” (Consórcio PCJ, 2016).

Outro exemplo emblemático de risco de contaminação de recursos hídricos pela degradação de resíduos é a situação que se verifica em Brasília, no Distrito Federal (DF). A cidade tem enfrentado diversos desafios relacionados à gestão e ao manejo dos resíduos sólidos, dentre eles o funcionamento de um depósito a céu aberto. Conhecido como “lixão da estrutural” o local é considerado o “maior depósito de resíduos a céu aberto da América Latina” (AGÊNCIA BRASIL, 2015). Segundo a mencionada agência o lixão da estrutural abrange uma área total de 124 hectares e recebe, diariamente, 2.700 toneladas de RSU, resultando em uma massa de resíduos depositada que já alcança 40 metros de altura. A Agência ainda contabiliza que cerca de 1500 catadores trabalham no lixão, refletindo também um quadro social alarmante. Trata-se de uma situação que, via de regra, contribui para toda a sorte de

problemas e inconvenientes do ponto de vista ambiental, social, econômico e de saúde pública.

Cabe destacar que a Lei 12.305/2010 estabeleceu, no Art. 47, a proibição do lançamento *in natura*, a céu aberto, como forma de destinação ou disposição final de resíduos ou rejeitos:

[...] Art. 47. São proibidas as seguintes formas de destinação ou disposição final de resíduos sólidos ou rejeitos:

- I - lançamento em praias, no mar ou em quaisquer corpos hídricos;
- II - lançamento *in natura* a céu aberto, excetuados os resíduos de mineração;
- III - queima a céu aberto ou em recipientes, instalações e equipamentos não licenciados para essa finalidade;
- IV - outras formas vedadas pelo poder público. [...]

A legislação também dispõe, no Art. 54, que a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos deveria ser implantada em até 4 (quatro) anos após a data de publicação desta Lei. Como pode-se avaliar, os dois dispositivos citados, sem prejuízo de outros que também poderiam ser comentados, estão sendo desrespeitados no caso de Brasília. Em que pese o fato do lixão da Estrutural estar situado na capital do país, fazendo com que a adoção de uma solução adequada para esse problema sirva de exemplo para o restante do País, até o momento o quadro relatado ainda persiste.

Visando ilustrar a dimensão crítica que esse quadro representa no DF destaca-se, na Figura 2, a locação da atual área de disposição final dos resíduos. Pode-se verificar, na imagem, que o lixão é vizinho ao Parque Nacional de Brasília (área de proteção ambiental). De acordo com o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio, o Parque, além de proteger ecossistemas típicos do Cerrado, abriga as bacias dos córregos formadores da represa Santa Maria, responsável pelo fornecimento de 25% da água potável que abastece a Capital (ICMBio, 2016). A imagem também deixa clara a proximidade do “Lixão da Estrutural” com a malha urbana e com o Lago Paranoá, importante manancial do DF. Este último, por sua vez, tem seu uso previsto como futuro manancial de captação de água para abastecimento da população. Trata-se de uma opção estratégica dado o significativo crescimento demográfico no Distrito Federal, o elevado volume de água que pode ser armazenado no lago e a sua localização geográfica.

Figura 2: Localização do “Lixão da Estrutural” - Brasília (DF)



Fonte: Adaptado de Google Maps

Segundo a Agência Brasil, a disposição dos resíduos no “Lixão da Estrutural” ocorre há mais de 50 anos. Isso faz com que exista, também, o grave risco de haver a contaminação dos mananciais subterrâneos que se encontram sob a área do lixão, situação que pode se agravar com o passar do tempo. A solução para esse grave problema ambiental, com impacto em diversos outros setores, passa, necessariamente, pela adoção de soluções ambientalmente adequadas e sanitariamente seguras para o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final dos rejeitos. O elevado quantitativo de matéria orgânica presente na massa desses resíduos reforça a relevância que a adoção de sistemas voltados ao tratamento dessa fração representa. E dentre as alternativas disponíveis destaca-se, como foco desse trabalho, a digestão anaeróbia.

Percebe-se, portanto, a importância do manejo e do tratamento adequado dos resíduos orgânicos, evitando que a sua decomposição possa trazer prejuízos aos mananciais hídricos e ao solo. Além de se configurar como uma importante medida de saneamento ambiental, o tratamento desses resíduos pode viabilizar o seu aproveitamento energético, bem como permitir a sua utilização como fonte de nutrientes e condicionador de solos.

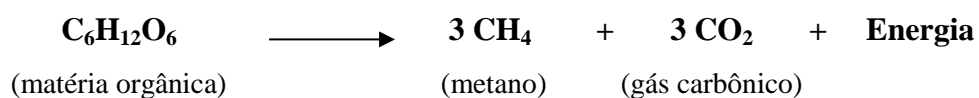
Soma-se ao exposto o fato de que as restrições trazidas pela legislação fazem com que os municípios tenham que buscar soluções adequadas de tratamento, tecnicamente viáveis e a custos acessíveis.

4.3 Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos

4.3.1 Fundamentos da Digestão Anaeróbia

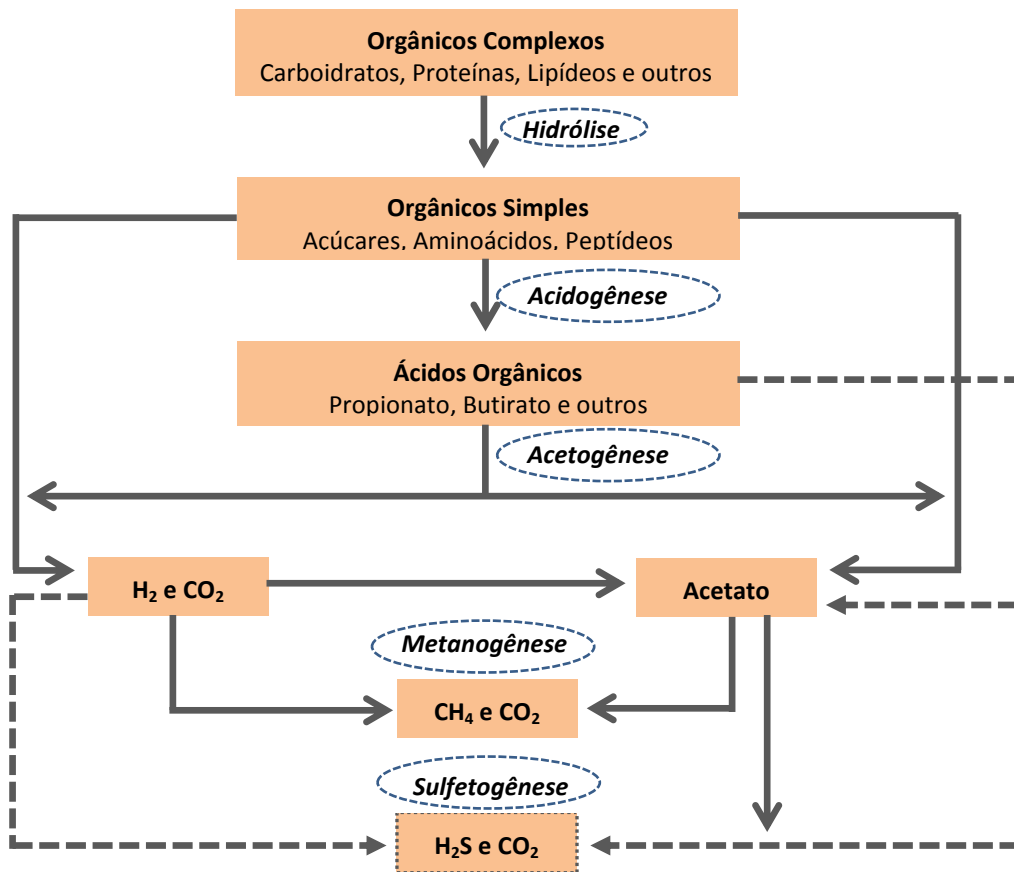
Conforme mencionado anteriormente a massa de RSU coletada no Brasil apresenta, em média, 51,4% de resíduos orgânicos. Esta fração, por sua vez, pode estar colonizada por uma grande diversidade de microrganismos, caracterizando assim um ambiente propício à decomposição natural desses resíduos. Nessas situações, segundo van Haandel e Lettinga (1994, p. I-22), a grande variedade de microrganismos interage com o material orgânico, usando-o como fonte de energia (catabolismo) ou como material para sintetizar novas células (anabolismo). O catabolismo e o anabolismo são processos interdependentes e que sempre ocorrem simultaneamente, configurando assim o chamado metabolismo bacteriano, que, de acordo com van Haandel e Lettinga (1994, p. I-22), “é o mecanismo mais importante para a remoção de material orgânico em sistemas de tratamento biológico”.

A matéria orgânica, quando decomposta em meio anaeróbio (ausência de oxigênio), origina uma mistura gasosa chamada biogás. Esse processo é muito comum na natureza e ocorre, por exemplo, em pântanos, fundos de lagos, esterqueiras e no rúmen de animais, conforme registrado por FNR (2013, p. 20). De acordo com os autores, por meio da ação de diversos microrganismos, a matéria orgânica é convertida em biogás quase por completo, havendo também a produção de certas quantidades de energia (calor) e nova biomassa. Segundo von Sperling (1996, p. 98), de forma geral e simplificada a conversão da matéria carbonácea em condições anaeróbias se processa da seguinte forma:



Esta equação representa apenas o produto final de etapas intermediárias do processo. Tais etapas podem ser visualizadas na Figura 3, em que se destaca as fases características da decomposição anaeróbia.

Figura 3 - Sequência metabólica, produtos e subprodutos do processo de digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Chernicharo, 2007.

O processo de digestão anaeróbia, como visto na Figura 3, envolve diversos estágios que devem estar coordenados entre si para que todo o processo se realize adequadamente, conforme aponta a FNR (2013, p. 20/21):

O primeiro estágio é a **hidrólise**, em que compostos orgânicos complexos, tais como carboidratos, proteínas e lipídios, são decompostos em substâncias menos complexas como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos. No processo atuam bactérias hidrolíticas, cujas enzimas liberadas decompõem o material por meio de reações bioquímicas.

Por meio de bactérias fermentativas acidogênicas, os compostos intermediários formados são então decompostos em ácidos graxos de cadeia curta (ácidos acético,

propiónico e butírico), dióxido de carbono e hidrogênio na chamada **fase acidogênica (acidogênese)**. Adicionalmente, formam-se também pequenas quantidades de ácido láctico e álcoois. Os tipos de compostos formados nesse estágio dependem da concentração do hidrogênio intermediário.

Na **acetogênese**, o processo de formação de ácido acético, esses compostos são convertidos por bactérias acetogênicas em precursores do biogás (ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono). Nesse ponto, a pressão parcial do hidrogênio é decisiva. Por razões de cunho energético, uma concentração de hidrogênio muito elevada impede a conversão dos compostos intermediários da acidogênese. A consequência é o acúmulo de ácidos orgânicos que inibem a metanogênese. Por essa razão, as bactérias acetogênicas (produtoras de hidrogênio) têm de estar estreitamente associadas a arqueas metanogênicas. Durante a formação do metano, as arqueas consomem hidrogênio e dióxido de carbono, garantindo o meio propício para as bactérias acetogênicas.

No último estágio da formação do biogás, a **metanogênese**, as arqueas metanogênicas estritamente anaeróbias convertem principalmente o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano. Os metanógenos hidrogenotróficos produzem metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono, e os metanógenos acetoclásticos a partir da redução de ácido acético.

Existe também a possibilidade de ocorrência de sulfetogênese, fase que, de acordo com Chernicharo (2007) só ocorrerá de forma significativa “se houver grande quantidade de sulfato presente no meio”. O autor destaca que, nesse caso, “a produção de metano tende a diminuir e a de gás sulfídrico a aumentar, o que é indesejável do ponto de vista do balanço energético do aproveitamento do biogás”.

De modo geral, de acordo com FNR (2013, p. 21) “as fases da decomposição anaeróbia ocorrem paralelamente em um processo de um único estágio”. No entanto, segundo os autores, “uma vez que as bactérias têm exigências diferentes quanto ao seu habitat, tais como o pH e a temperatura, deve ser definido um meio termo em relação à tecnologia do processo”.

4.3.2 Tecnologias de Digestão Anaeróbia para Tratamento de Resíduos Orgânicos

O elevado percentual de matéria orgânica presente na massa de RSU credencia esses resíduos ao tratamento por meio de sistemas anaeróbios, visando o seu aproveitamento energético. O aterramento desses resíduos, solução comumente adotada no país, é um procedimento que

resulta, portanto, em desperdício de matéria-prima e de energia, além de significar riscos à contaminação do solo e de mananciais hídricos.

Do ponto de vista técnico o material orgânico pode ser submetido a tratamento por meio de processos aeróbios ou anaeróbios. De forma comparativa os processos anaeróbios podem apresentar vantagens e desvantagens em relação aos procedimentos aeróbios, conforme ilustrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios frente aos aeróbios

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baixa produção de sólidos, que é cerca de 5 a 10 vezes menor que a verificada nos processos aeróbios; ✓ Baixo consumo de energia, com consequente redução de custos operacionais; ✓ Baixa demanda de área; ✓ Produção de metano (que pode ser convertido em energia); ✓ Tolerância a elevadas cargas orgânicas; ✓ Aplicável em pequena e grande escala. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Suscetibilidade das bactérias anaeróbicas à inibição por um grande número de compostos; ✓ Na ausência de lodo de semeadura adaptado, a partida do processo é lenta; ✓ Pré-tratamento usualmente necessário; ✓ Possibilidade da geração de maus odores, porém, controláveis; ✓ Remoção de nitrogênio, fósforo e patogênicos insatisfatória.

Fonte: SENAI, 2016

Apesar de pouco difundidas no Brasil existem diversas tecnologias de digestão anaeróbia que se aplicam ao tratamento da fração orgânica dos RSU, tendo como característica a potencial geração de biogás. Para Jende *et. al* (2015, p. 48) esses processos “oferecem vantagens sociais, ambientais e econômicas, pois reduzem e/ou estabilizam o volume de resíduos a ser destinado a aterros, reduzem a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e geram energia”. Da mesma forma, Colturato (2015, p. 11) menciona que “a metanização, conversão de resíduos orgânicos em metano, vem se destacando mundialmente como alternativa tecnológica para valorização energética da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos”.

As tecnologias anaeróbias usualmente empregadas no tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos são classificadas de acordo com a concentração de sólidos totais, podendo se diferenciar, segundo Jende *et. al* (2015, p. 48), em “reatores de digestão anaeróbia seca (ST > 20%) e úmida (ST < 15%)”. Já a FNR (2013, p. 21) considera-se que, na prática, “se o teor de

matéria seca no biodigestor for igual ou inferior a 12%, a digestão é classificada como úmida, pois tal teor de umidade permite o bombeamento do conteúdo do biodigestor”. Teores mais elevados de matéria seca, portanto, inviabilizariam o bombeamento do material, o que, segundo a fonte anteriormente citada, ocorre acima de 15% a 16%, quando o processo passa a ser denominado digestão seca.

Independentemente da classificação cabe lembrar que trata-se de um processo biológico, que envolve uma ampla gama de microrganismos. Vale ressaltar, portanto, que:

[...] do ponto de vista biológico, não é adequado classificar estritamente os processos em digestão úmida ou seca, pois os microrganismos sempre necessitam de um meio líquido para o seu crescimento e sobrevivência. A determinação do teor de matéria seca a partir da matéria fresca a ser digerida também tem gerado dúvidas, uma vez que não raro são utilizados diversos substratos com diferentes teores de matéria seca. O operador da usina tem de estar ciente de que o teor de matéria seca dos substratos separadamente não é o fator determinante para a classificação do processo, mas sim o teor de matéria seca da mistura de substratos com a qual o biodigestor é alimentado. Por essa razão, a classificação do processo em digestão úmida ou seca deve se dar com base no conteúdo da massa seca no biodigestor. Vale lembrar que, em ambos os casos, os microrganismos necessitam estar em contato direto com a água em seu ambiente [...]. FNR (2013, p. 21).

De acordo com Jende *et. al* (2015, p. 48) “para o tratamento anaeróbio da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos se empregam, usualmente, três processos: digestão anaeróbia seca descontínua, seca contínua e úmida”. Conforme mencionado a tecnologia selecionada deve levar em conta as características do substrato (principalmente a carga de sólidos totais – ST).

Vale lembrar que, diferentemente de outros substratos, como aqueles provenientes da agropecuária e da indústria de alimentos, os resíduos sólidos urbanos se caracterizam por ter uma composição variada e complexa, conforme já comentado. Essa característica pode variar com fatores como existência, qualidade e frequência da coleta seletiva e nível econômico e educacional da sociedade. Neste sentido Jende *et. al* (2015, p. 48) afirmam que, “no Brasil, devido a quase inexistência de coleta seletiva dos resíduos urbanos, as tecnologias de digestão seca são mais apropriadas, pois são menos sensíveis à presença de impurezas”. Tal situação, entretanto, poderá ser revertida à medida que se ampliem os programas de coleta seletiva no País. Para os casos em que haja segregação na fonte dos resíduos orgânicos ou coleta

exclusiva de grandes geradores, Jende *et. al* (2015, p. 48) afirmam que “pode-se utilizar a digestão úmida termofílica, que já promove a higienização do material digerido”. Na Tabela 6 pode-se observar um comparativo entre as tecnologias de digestão anaeróbia que podem ser aplicadas visando ao tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos.

Tabela 6 - Tecnologias de digestão anaeróbia aplicadas ao tratamento de resíduos sólidos.

	DIGESTÃO ANAERÓBIA SECA DESCONTÍNUA - GARAGEM	DIGESTÃO ANAERÓBIA SECA CONTÍNUA	DIGESTÃO ANAERÓBIA ÚMIDA CONTÍNUA CSTR
Requisitos	Sólidos totais ST > 35%	Sólidos totais ST > 25%	Sólidos totais ST < 15% (bombeável)
	Substratos mistos relativamente secos, pouco selecionados, com grande quantidade de impurezas.	Substrato misto separado com trituração e, eventualmente, umidificação com água.	Substratos com teor de umidade mais alto, bem separados, nível aceitável de impurezas < 5%.
	Amplamente aplicáveis para RSU		Aplicação limitada
Vantagens	Eficiente forma de tratamento de resíduos com a oportunidade de aproveitamento de biogás. Utilizável como processo termofílico com a higienização do material digerido.		
	Em comparação com a digestão contínua:	Em comparação com a digestão descontínua:	Em geral:
	Pouca preparação do substrato. Baixa utilização de energia e equipamentos. Tecnologia modular.	Maior eficiência energética. Alta estabilidade do processo. Controle das emissões de metano.	Alta taxa de produção de gás. Alta estabilidade de processo. Controle das emissões de metano. Material digerido utilizável na agricultura.
Desvantagens	Demanda de área relativamente alta. Maiores emissões de metano, com conseqüente menor aproveitamento energético. Grande quantidade de resíduo gerado e transporte caro.	Desgaste dos equipamentos mecânicos. Necessidade de alimentação contínua, de armazenagem dos resíduos e, conseqüentemente, custos e logísticas exigentes.	Separação e preparação do substrato muito exigente. Desgaste dos equipamentos mecânicos. O fluxo homogeneizado exige volume de armazenamento. O desaguamento do material digerido cria grande quantidade de efluente líquido que exige tratamento.
	Material digerido não aplicável na agricultura, em alguns países.		

Fonte: Adaptado de Jende *et. al* (2015).

No caso dos RSU as unidades de tratamento integrado têm sido comumente denominadas Plantas de Tratamento Mecânico Biológico ou Plantas TMB. Colturato (2015, p. 21) menciona que, de modo geral, o TMB “engloba um conjunto de processos mecânicos e biológicos combinados, de forma a possibilitar a valorização das distintas frações que

constituem o RSU, sendo, portanto, aplicáveis a resíduos não segregados na fonte”. Essa última característica pode ser particularmente interessante para a realidade brasileira, onde os índices de coleta seletiva ainda são pouco significativos.

As plantas de TBM destinadas ao tratamento dos resíduos sólidos urbanos geralmente apresentam uma configuração padrão que envolve as seguintes etapas:

- ✓ Sistema de pré-tratamento;
- ✓ Reator(es) de metanização;
- ✓ Unidade de compostagem, armazenamento e refino do composto;
- ✓ Condicionamento e aproveitamento energético do biogás;
- ✓ Tratamento/disposição final da fração sólida residual;
- ✓ Instalações de correção da contaminação.

Essas etapas visam atingir objetivos específicos no processo de tratamento dos resíduos, e podem ser descritas da seguinte forma:

[...] Sistema de pré-tratamento

O sistema de pré-tratamento diz respeito à segregação manual-mecânica dos resíduos sólidos. A classificação manual é realizada por meio do fluxo contínuo dos materiais em esteira, com separação de algumas frações...

Esta etapa tem como objetivo promover uma classificação do RSU de forma a se obter três fluxos de materiais:

- O material orgânico, do qual foram removidos a maior quantidade de inertes possível, e que passa por uniformização de tamanho para ser direcionado ao reator;
- Os materiais recicláveis, que são classificados em função de sua composição e acondicionados para seu direcionamento à reciclagem;
- O material residual, ... destinados ao acondicionamento para disposição final em aterros sanitários ou utilizados como CDR.

Reator de Metanização

A matéria orgânica proveniente do sistema de pré-tratamento é submetida ao tratamento via digestão anaeróbia, que resulta na estabilização parcial desse material e geração dos subprodutos biogás e lodo digerido. O processo de metanização pode utilizar distintas tecnologias e configurações...

O biogás é captado por uma tubulação específica e direcionado ao sistema de condicionamento e valorização energética...

O lodo digerido, por sua vez, passa por um sistema de desaguamento que objetiva promover a separação sólido-líquido. A fração sólida é encaminhada a uma unidade de compostagem, e a fração líquida a estações de tratamento de efluentes (ETE).

Unidade de Compostagem, armazenamento e refino do composto

A fração sólida proveniente da etapa de desaguamento encontra-se parcialmente degradada, sendo necessário apenas um processo final de maturação para que ocorra sua completa estabilização e refino para possibilitar seu uso como condicionante de solos.

Condicionamento e aproveitamento energético do biogás

O biogás gerado durante o processo de metanização é captado e direcionado a um sistema de condicionamento, de forma a tornar o biogás apto para utilização energética. A aplicação efetiva do tratamento anaeróbio visando a geração de energia depende diretamente da eficiência dos processos de limpeza do biogás...

Na maior parte das plantas de TMB o biogás é transformado em energia elétrica e térmica por um sistema de cogeração de eletricidade e calor. Uma parcela da energia elétrica é utilizada para operação da própria planta, enquanto o excedente de energia pode ser fornecido para rede elétrica da concessionária local ou comercializado... Parte da energia térmica gerada pelo sistema de cogeração é utilizada para a manutenção da temperatura do processo de metanização (em torno de 37°C ou 55°C).

Tratamento/disposição final da fração sólida residual

A fração sólida residual é composta por materiais inorgânicos em geral, geralmente fragmentados, cuja reciclagem não é viável. A taxa de geração de materiais residuais nas plantas de TBM varia em função da qualidade do RSU coletado...

Na Europa, o condicionamento mais adequado dado a estes materiais é denominado empacotamento de “bala”... Após o enfardamento, as balas são direcionadas a um aterro específico...

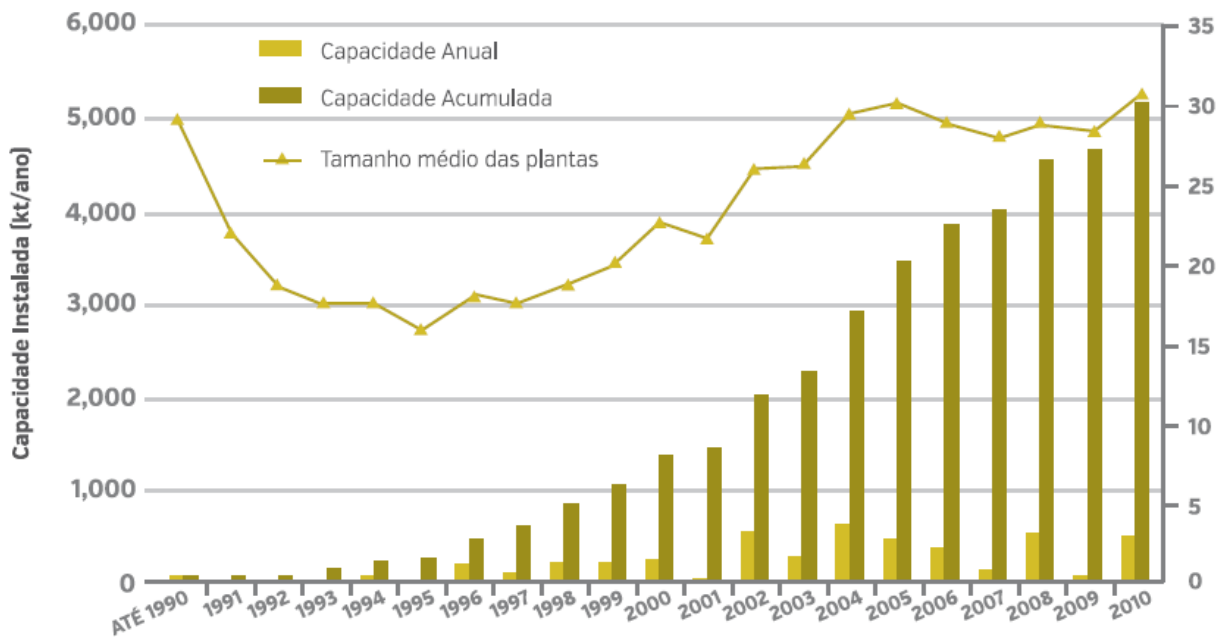
Instalações de Correção da Contaminação

As instalações de correção da contaminação são constituídas principalmente por uma estação de tratamento de efluente (ETE) para tratamento dos lixiviados gerados no processo de desaguamento do lodo e de sistemas de tratamento de odores por meio de biofiltros destinados à desodorização do ar em distintos setores das instalações da planta [...]. (COLTURATO, 2015, p 22 a 24)

Cabe destacar que a adoção de sistemas com a configuração anteriormente exposta não é usual no Brasil, onde a solução comumente empregada para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos tem sido os aterros sanitários. Quando bem projetados e adequadamente operados os aterros sanitários também podem ser fonte de geração de biogás, ensejando, portanto, o aproveitamento energético. Entretanto, o SENAI (2016, p. 41) alega que, “como apenas cerca de 50% do biogás produzido nos aterros é recuperado, a biodigestão anaeróbia destaca-se como tecnologia mais eficiente e, ainda incipiente, para a obtenção desse biocombustível a partir de RSU”.

Já em países europeus tem-se verificado uma tendência na adoção de processos de metanização como alternativa para o tratamento de resíduos orgânicos. Conforme pode ser observado na Figura 4, houve um forte incremento na capacidade instalada dessas plantas naquele continente, reforçando, portanto, a confirmação dessa tendência. De acordo com Colturato (2015, p. 41) as tecnologias de metanização “vêm dominando uma significativa parcela do mercado europeu na área de tratamento e valorização de resíduos, principalmente em países como Alemanha, Suécia, França, Espanha e Itália”. O autor registra que as duas últimas décadas representaram a consolidação da metanização na Europa, sendo que em 2010 já se contabilizava 171 plantas, atingindo a capacidade total instalada de 5.204.000 t/ano (acréscimo de quase 6.000% em um período de 20 anos).

Figura 4 - Evolução da capacidade instalada das plantas de metanização de resíduos orgânicos na Europa



Fonte: Colturato, 2015

Do ponto de vista comercial existem várias “tecnologias” voltadas para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. Tais tecnologias adotam processos de digestão anaeróbia seca ou extra-seca que, segundo Colturato (2015, p. 25) são referenciadas como os processos biológicos mais adequados para esta finalidade por serem “mais estáveis e constituídos por sistemas mais robustos, que possuem menor consumo energético, geram menos efluente líquido e possuem menor demanda de água em comparação com os processos úmidos”. De acordo com o autor algumas das principais tecnologias comerciais de metanização seca disponíveis no mercado europeu são:

- Processo Dranco;
- Processo Axpo Kompogas;
- Processo Valorga;
- Processo Laran (Ex-Linde-BRV);
- Sistema de Garagem (túneis de metanização).

4.3.3 Utilização do Biogás

Como ilustrado na Figura 3 a digestão anaeróbia ocorre em etapas sequenciais, resultantes das atividades de grupos específicos de microrganismos. Somente na última etapa, denominada metanogênese, é que se forma o biogás. A composição do biogás, por sua vez, depende principalmente da matéria-prima (substrato) utilizada no processo de tratamento, conforme cita a FNR (2013, p. 29). Além disso, os autores destacam que “o teor de metano é influenciado por parâmetros do processo tais como a temperatura de fermentação, nível de carga do reator e tempo de retenção hidráulica, bem como pela biodessulfurização e por distúrbios no processo”. O biogás resultante da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos é uma mistura composta principalmente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Também estão presentes vapor d'água e outros gases em concentração reduzida, conforme ilustrado na Tabela 7.

Além de se configurar como a fração que representa o maior percentual na composição do biogás, o metano é o componente de maior interesse, dado seu potencial de utilização. Segundo FNR (2013, p. 29) o CH_4 representa a parte combustível do biogás e, portanto, seu teor influencia diretamente o poder calorífico. Já a concentração de sulfeto de hidrogênio, segundo os autores, não pode ser elevada demais, pois já em reduzidas concentrações o H_2S é capaz de inibir o processo de digestão.

Tabela 7 - Composição média do biogás.

Componente	Concentração
Metano (CH_4)	50% - 75% em vol.
Dióxido de Carbono (CO_2)	25% - 45% em vol.
Água (H_2O)	2% - 7% em vol. (20 – 40°C)
Sulfeto de Hidrogênio (H_2S)	20 – 20.000 ppm
Nitrogênio (H_2)	< 2% em vol.
Oxigênio (O_2)	< 2% em vol.
Hidrogênio (H_2)	< 1% em vol.

Fonte: FNR (2013).

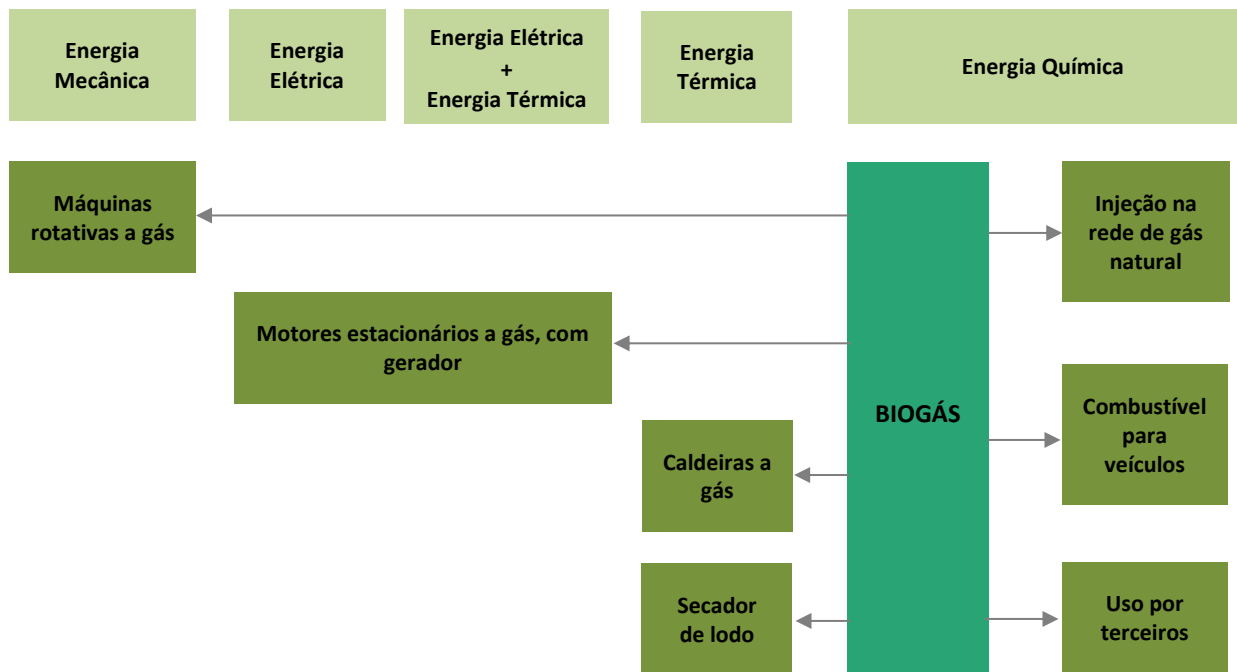
Por se tratar de uma substância combustível o biogás pode ser aproveitado do ponto de vista energético, o que pode resultar em benefícios ambientais e econômicos. Segundo Silveira, B. *et al.* (2015, p. 113) “o poder calorífico inferior (PCI) de um biogás típico é de 21,5 MJ/Nm³, próximo ao do gás natural, que apresenta PCI de 37,5 MJ/Nm³”. Segundo os autores “a perda de biogás, sua não utilização, ou sua simples queima, portanto, deve ser a exceção, caso não haja uma alternativa de uso mais nobre”.

São variadas as possibilidades de aproveitamento energético do biogás. Silveira, B. *et al.* (2015, p. 113) afirmam que, “resumidamente, a energia química do biogás pode ser utilizada, após o tratamento adequado, diretamente como combustível em veículos ou, em hipótese, injetado na rede”. Os autores alertam que não se considera, nessa abordagem, “o aproveitamento energético de biogás por meio de células de combustível, uma vez que, mesmo fora do Brasil, esse aproveitamento ainda é muito raro”.

Nesta mesma linha Lobato (2011, p. 56) afirma que o biogás pode ser recuperado para diversos fins. Entre as possibilidades conhecidas a autora cita alternativas como o uso como combustível em caldeiras, fornos e estufas, geração de eletricidade para uso local ou venda para a rede concessionária, cogeração de eletricidade e calor e combustível alternativo (podendo ser injetado na linha de gás natural ou aproveitado como combustível veicular).

O aproveitamento ou a utilização do biogás está sujeito às suas características, e poderá exigir algum nível de tratamento complementar. De acordo com Silveira, B. *et al.* (2015, p. 88) “o biogás, depois da remoção das principais impurezas como umidade, siloxanos e, principalmente, H₂S, pode ser utilizado para a produção de energia elétrica e energia térmica”. Já o biometano, resultado de uma purificação muito mais exigente do biogás, pode ser utilizado como substituto do gás natural veicular (GNV), segundo os autores.

Algumas das possibilidades de uso e aplicação do biogás são exemplificadas na Figura 5, em que se pode destacar a conversão em energia elétrica, uma excelente alternativa, dada a larga aplicação e possibilidades de uso desta. De acordo com a FNR (2013, p. 115) “a utilização do biogás na Alemanha se caracteriza pela conversão descentralizada do gás bruto em eletricidade no local de origem”. Os autores ainda destacam que, nos últimos anos, vem se popularizando a opção de tratamento do biogás e a consequente injeção na rede de gás natural.

Figura 5: Utilização do biogás

Fonte: Adaptado de Silveira *et al*, 2015

A adoção do biogás como fonte energética ainda é insipiente no Brasil, sendo poucas as iniciativas conhecidas, notadamente aquelas relacionadas ao tratamento da fração orgânica dos RSU. No que tange ao aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários o Brasil conta com iniciativas já realizadas, algumas destas destacadas a seguir:

No município de Belo Horizonte foi instalada uma central de aproveitamento energético de biogás no antigo aterro sanitário da BR 040, sendo a energia gerada comprada e distribuída na rede da Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. Desativado desde 2007, o antigo aterro recebia cerca de 4 mil toneladas de resíduos por dia, tendo sido fechado com 25 milhões de toneladas aterradas. O biogás coletado é utilizado como combustível em três motores com capacidade de geração de 1,426 MW cada, totalizando 4,278 MW, suficiente para abastecer cerca de 20 mil residências de baixo consumo (inferior a 100 kWh/mês).

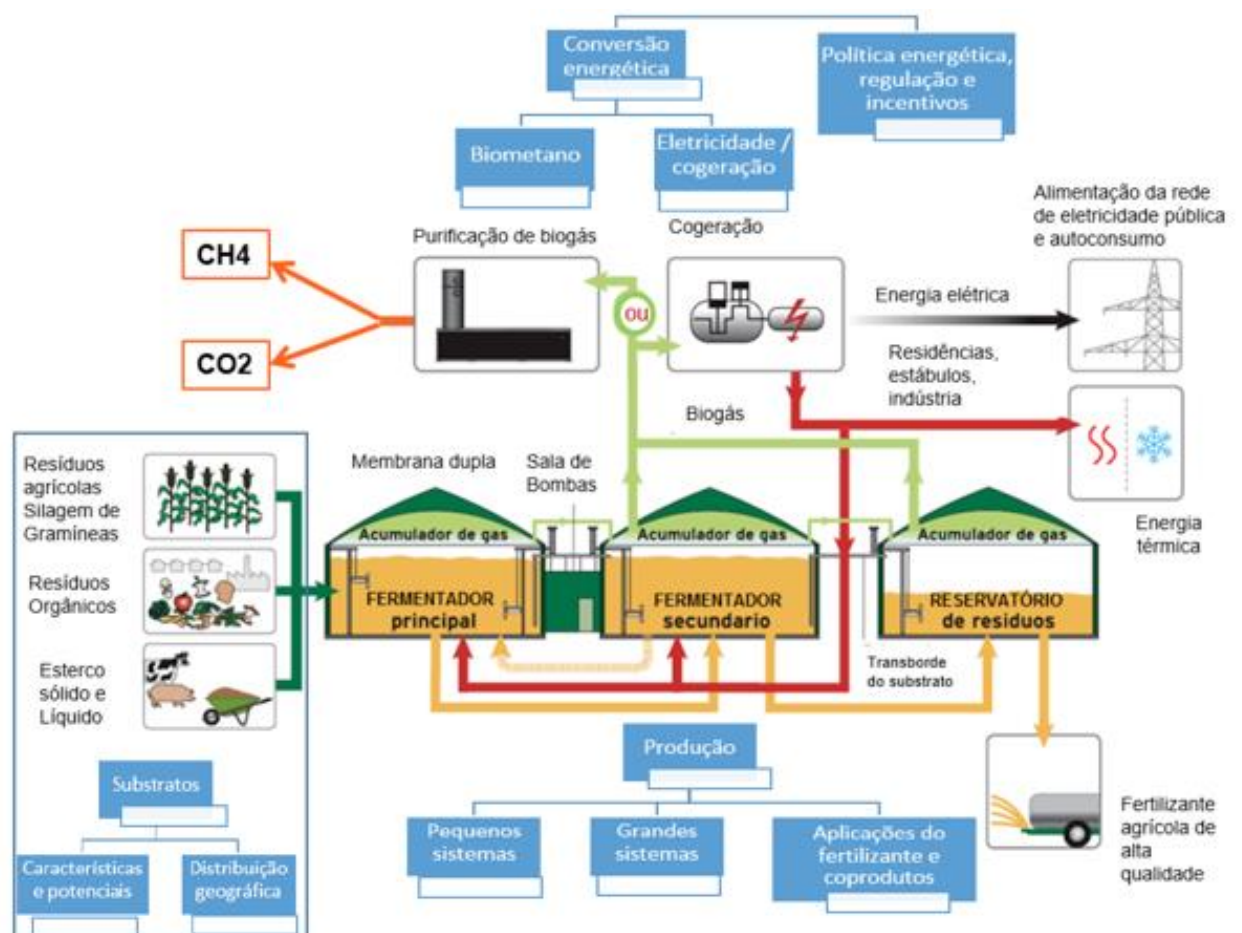
...

No município de São Paulo, o biogás gerado nos aterros sanitários São João e Bandeirantes é utilizado por duas usinas termelétricas, com potências instaladas de 24 MW e 22 MW, respectivamente. Em Salvador/BA, o biogás gerado em seu aterro municipal é aproveitado para a geração de energia elétrica, na termelétrica

Termoverde Salvador, do Grupo Solvi, com potência instalada de 19,73 MW.
FEAM (2012, p. 70)

Um exemplo de configuração de uma unidade de tratamento de resíduos orgânicos, com suas diversas etapas e componentes, encontra-se ilustrada na Figura 6. Na imagem, uma representação esquemática simplificada do processo, pode-se visualizar, a partir da digestão da biomassa, a geração de energia elétrica e térmica, algumas das potencialidades apresentadas em razão da tecnologia empregada. Cabe lembrar que para adotar esse tipo de sistema para o tratamento de RSU, torna-se necessário a segregação prévia da fração orgânica. É importante também destacar que a utilização do biogás gerado nesse processo depende do seu tratamento e acondicionamento, conforme atestam SOUZA, J. & SCHAEFFER (2015).

Figura 6: Representação esquemática simplificada do processo de tratamento anaeróbico com geração de energia



Fonte: Souza, J. & Schaeffer, 2015.

Vale enfatizar, ainda, que a solução aqui apontada não se restringe apenas à digestão anaeróbia da fração orgânica proveniente dos resíduos sólidos urbanos. Estes sistemas também podem processar diversos outros resíduos orgânicos, a exemplo de restos da produção agrícola e da indústria de alimentos e do lodo proveniente de estações de tratamento de efluentes. Estes processos, além da potencial geração de energia, já comentada, podem, ainda, resultar na produção de fertilizantes para a agricultura, conforme aponta a ClimateWorks Foundation (2012, p. 17).

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO

5.1 Relevância Estratégica da Conservação dos Recursos Hídricos e da Proteção de Mananciais

A preservação dos mananciais hídricos deve ser tratada com a devida prioridade, haja vista a água ser um recurso imprescindível à manutenção da vida. A situação atualmente vivenciada no Brasil demanda atenção, pois muitos dos mananciais superficiais se encontram em condições insatisfatórias, segundo os parâmetros estabelecidos no Índice de Qualidade da Água, conforme monitoramento realizado pela Agência Nacional de Águas.

O País também tem vivenciado situações de escassez e estresse hídrico, o que tem levado alguns municípios a adotarem ações emergenciais e medidas como o racionamento de água no abastecimento público. Esta situação também corrobora para afetar a produção de energia elétrica, tendo em conta que boa parte desta é proveniente de usinas hidrelétricas, cujos reservatórios são diretamente afetados nessas situações.

A busca por um desenvolvimento sustentável, que minimize o risco de ocorrência de situações extremas como as vivenciada recentemente no Brasil, no tocante aos recursos hídricos, é um objetivo universal. Neste sentido a Organização das Nações Unidas – ONU concluiu, em agosto de 2015, as negociações que culminaram na adoção dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). De acordo com o Ministério das Relações Exteriores - MRE (2016) os ODS deverão orientar as políticas nacionais e as atividades de cooperação internacional nos próximos quinze anos, sucedendo e atualizando os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM).

Os ODS se compõem de 17 objetivos, dentre os quais se destaca o ODS 6, que almeja “assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e o saneamento para todos”. O cumprimento desse objetivo, compromisso também assumido pelo Brasil, passa pela adoção de soluções ambientalmente adequadas para o tratamento e a disposição final dos RSU. Isso se justifica pelo risco de contaminação e comprometimento de mananciais hídricos quando não se dá a devida atenção à gestão desses resíduos, que podem vir a se tornar um foco de

contaminação da água em razão do elevado percentual de matéria orgânica usualmente presente na massa dos RSU.

5.2 Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil e Viabilidade da Adoção de Tecnologias Anaeróbias

A grandiosidade da geração anual de resíduos sólidos urbanos no Brasil, da ordem de 78,6 milhões de toneladas (ABRELPE, 2014), dá a dimensão do problema a ser enfrentado pelas municipalidades. A julgar pela composição média das frações que compõem os RSU, conforme divulgado no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (MMA, 2011), pode-se admitir que pelo menos metade dessa massa de resíduos é composta por matéria orgânica. Isso resulta, portanto, em valores da ordem de 39 milhões de toneladas de resíduos orgânicos sendo gerados, anualmente, nos municípios brasileiros.

A ausência de uma gestão eficiente dos RSU tem contribuído para a degradação ambiental, sobretudo em razão das soluções usualmente adotadas para a disposição final. Neste aspecto chama atenção o potencial impacto, nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, decorrente dessa prática. O risco desses impactos é significativo, principalmente quando os resíduos coletados são encaminhados para lixões ou “aterros controlados”, que respondem por mais de 25% do destino dos RSU no Brasil, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (Ministério das Cidades, 2014). Ainda que o SNIS aponte que 52,4% dos resíduos sejam encaminhados para aterros sanitários, sabe-se que este tipo de solução, mesmo quando projetada e operada dentro de critérios técnicos, pode trazer riscos de contaminação aos mananciais hídricos, em razão dos subprodutos resultantes da decomposição da matéria orgânica.

Conforme aponta o Plansab (Ministério das Cidades, 2013), somente cerca de 60% da população brasileira conta com atendimento adequado no que se refere a serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos. Isso demonstra a gravidade da situação e a necessidade de se buscar soluções adequadas à realidade do País, e que tenham em seu perfil características que contribuam para a sustentabilidade dos sistemas. Tal situação é ainda mais preocupante onde a solução adotada para a disposição final dos RSU são os lixões ou vazadouros, locais em que não há qualquer preparação do terreno para receber a massa de

resíduos, contribuindo, assim, diretamente, para ampliar os riscos de contaminação dos recursos hídricos.

Nesse cenário o tratamento anaeróbio da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos surge como uma interessante alternativa. Conforme registrado nesse trabalho tal opção alia a segurança de digestão anaeróbia ao potencial de aproveitamento energético do biogás resultante desses processos. O biogás, em razão de sua característica de combustibilidade, apresenta possibilidade de aplicação como fonte energética para diversos usos e finalidades, o que traz um atrativo adicional a esse tipo de tecnologia. Esta característica permite, ainda, a redução de custos de energia em plantas de tratamento, tendo em vista a possibilidade de uso do biogás nas próprias instalações.

Do exposto neste trabalho pode-se inferir que a ampliação do emprego de tecnologias anaeróbias destinadas ao tratamento da fração orgânica dos RSU resultaria em diversos impactos positivos, entre os quais podem ser destacados:

- ✓ Redução de percolados (chorume) e odores devido à degradação não controlada dos resíduos no meio ambiente;
- ✓ Redução da atração de vetores de doenças transmissíveis, que se proliferam na massa de resíduos quando estes não são submetidos a tratamento adequado;
- ✓ Preservação do meio ambiente;
- ✓ Redução do risco de contaminação de mananciais hídricos;
- ✓ Redução da emissão de gases causadores de efeito estufa;
- ✓ Possibilidade de aproveitamento energético do biogás gerado no processo de tratamento, contribuindo, assim, para diversificar a matriz energética.

5.3 Estimativa do Potencial Energético Associado ao Tratamento da Fração Orgânica dos RSU

Um dos possíveis usos do biogás, que apresenta grande aplicabilidade na realidade brasileira, é sua conversão em energia elétrica. Esta opção foi a adotada para exemplificar, nesse trabalho, o potencial associado ao tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU.

Esta alternativa, entretanto, não se aplica em qualquer situação, visto que existe uma capacidade mínima de processamento para tornar viável um projeto que apresente potencial de geração de energia elétrica. Neste sentido a FEAM (2012, p.66) destaca que para viabilizar empreendimentos dessa natureza há necessidade de um aporte diário de, no mínimo, 150 t/dia, sendo mais conveniente uma quantidade superior a 250 t/dia. O mesmo ocorre com outras alternativas que visem ao aproveitamento energético dos RSU, que também devem apresentar uma escala mínima. Na Tabela 8 são relacionadas a quantidade mínima de RSU recomendada, de acordo com a tecnologia empregada (incineração, digestão anaeróbia e aterro sanitário), visando ao aproveitamento energético, assumindo-se uma viabilidade de projeto equiparada a de uma termelétrica a gás natural. Importante destacar que o potencial de geração de energia elétrica associado aos RSU (MWh/t) também varia com a tecnologia empregada.

Tabela 8 - Estimativa da quantidade mínima de RSU e geração de energia elétrica para tecnologias usuais de aproveitamento energético.

Tecnologia	Quantidade de RSU (t/dia)	Potencial Energético (MWh /tRSU)
Incineração	500	0,4 a 0,6
Digestão anaeróbia	200	0,1 a 0,3
Aterro sanitário	300	0,1 a 0,2

Fonte: adaptado de FEAM (2012)

Segundo os dados apresentados o potencial de recuperação energética da incineração é superior ao da digestão anaeróbia e do aterro sanitário. Quanto a estas duas últimas tecnologias verifica-se uma ligeira vantagem da digestão anaeróbia sobre os aterros sanitários. De acordo com a FEAM (2012, p. 66) “a menor geração pelo gás do aterro em relação ao gás de digestores se deve ao baixo índice de recuperação do gás de aterros sanitários, em geral da ordem de 50% do total produzido”.

Partindo da premissa de que o aporte mínimo de resíduos para a viabilizar a adoção da tecnologia de digestão anaeróbia é de 250 t/dia e, ainda, admitindo-se que cerca de 50% dos RSU gerados nos municípios é matéria orgânica, conclui-se que essa solução se aplicaria a municípios que gerem, em média, 500 t/dia (500.000 kg/dia) de RSU. Levando-se em conta que a massa de resíduos coletada *per capita* no Brasil é da ordem de 1,05 kg/hab./dia,

conforme aponta o SNIS (Ministério das Cidades, 2014), pode-se admitir que, em termos populacionais, os municípios que apresentam maior potencial para aplicar esse tipo de tecnologia são aqueles que contam com população superior a 500.000 habitantes, que é a população correspondente à geração média diária de 500 t de RSU.

Segundo o Censo 2010 (IBGE, 2016) o Brasil conta com 38 municípios com população superior a 500.000 habitantes, distribuídos em diversas unidades da federação. Esse conjunto de municípios resulta em uma população de 55.838.476 hab., bastante expressiva tendo-se em vista que isso corresponde a aproximadamente um quarto da população brasileira.

Cabe destacar que não foi levada em conta, nessa análise, a possibilidade de agrupamento de municípios em consórcios, prática já bastante difundida no País e que tem sido uma forma largamente empregada na busca de soluções conjuntas para uma melhor gestão dos resíduos sólidos urbanos. No caso de consórcios que atinjam o porte populacional de 500.000 hab, portanto, também poderia ser adotada a tecnologia da digestão anaeróbia para o tratamento da fração orgânica dos RSU.

Também não se considerou, nessa estimativa, a possibilidade de encaminhamento de resíduos orgânicos provenientes de centros de distribuição (a exemplo dos Ceasa), feiras e sacolões. Tais fontes geram, via de regra, significativos volumes de resíduos orgânicos, contribuindo para ampliar o potencial de adoção da tecnologia de tratamento anaeróbio com vistas ao aproveitamento energético, sobretudo nos municípios de maior porte.

Partindo dessas premissas pode-se estimar o potencial energético resultante da adoção da digestão anaeróbia como alternativa para o tratamento da fração orgânica dos RSU para os 38 municípios brasileiros com população superior a 500.000 habitantes. Nesse caso deve-se, inicialmente, estimar a geração diária de resíduos orgânicos nesses municípios:

- ✓ População residente: 55.838.476 hab.
- ✓ Estimativa de geração de RSU (*per capita* de 1,0 kg/hab./dia): 55.838.476 kg/dia
- ✓ Estimativa de geração de resíduos orgânicos (50% dos RSU): 27.919.238 kg/dia

Admite-se, portanto, que o conjunto formado pelos 38 municípios mais populosos do País gerem o montante diário de 27.919.238 kg/dia (27.919 t/dia) de resíduos orgânicos. A partir das informações até aqui apresentadas sintetiza-se, na Tabela 9, por meio de um cálculo

simplificado para o cenário apontado, o potencial energético decorrente do biogás gerado a partir do tratamento da fração orgânica dos RSU nesses municípios.

Tabela 9 - Estimativa do potencial energético resultante da digestão anaeróbia da fração orgânica dos RSU (para o conjunto dos municípios mais populosos do País)

Resíduos Orgânicos (t/dia)	Potencial Médio de Geração de Biogás (m ³ /t)	Potencial Energético (MWh /dia)
(1)	(2)	(1x2)
27.919	0,2	5.583,8

Uma boa comparação para se avaliar o impacto do potencial energético disponibilizado a partir do aproveitamento energético do biogás gerado no tratamento da fração orgânica dos RSU pode ser obtida por analogia ao consumo residencial de energia elétrica. O consumo médio de energia elétrica nas residências brasileiras é da ordem de 152 kWh/mês, havendo, entretanto, grande variação entre as regiões do país (UFSC, 2016). Tendo esse dado como parâmetro pode-se chegar a uma estimativa do número de residências que poderiam ser abastecidas com essa energia:

- a) Potencial energético estimado: 5.583,8 MWh/dia (167.514 MWh/mês)
- b) Consumo médio residencial: 152 kWh/mês (0,152 MWh/mês)
- c) Estimativa da quantidade de residências que poderiam ser atendidas (a/b): 1.102.066

Teoricamente, segundo a estimativa apresentada, a adoção da tecnologia de digestão anaeróbia para o tratamento da fração orgânica dos RSU gerados nos 38 municípios brasileiros de maior porte possibilitaria, após a conversão do biogás, a geração de 167.514 MWh/mês de energia elétrica. Essa quantidade de energia seria suficiente para atender, mensalmente, 1.102.066 residências. Admitindo-se que cada residência seja ocupada, em média, por 4 moradores, é possível estimar que mais de quatro milhões de pessoas poderiam ser atendidas, com fornecimento de energia elétrica, a partir do emprego dessa tecnologia. Trata-se de um contingente expressivo, que corresponde a cerca de 8% da população total residente nos 38 municípios brasileiros mais populosos, adotados como referencial nessa estimativa.

Cumprir mencionar que este trabalho não se aprofundará em questões relacionadas a aspectos econômicos associados à implantação de sistemas anaeróbios de tratamento de resíduos. Vale

lembrar, entretanto, que toda solução adequada para essa finalidade tem custos significativos, o que não pode ser utilizado como argumento para não se adotar nenhuma medida.

No caso da solução investigada nesse trabalho há que se considerar a possibilidade de geração de receita com a comercialização da energia elétrica que poderá vir a ser gerada a partir do biogás produzido no processo. A ClimateWorks Foundation (2012, p. 3) estima ser viável a “venda da eletricidade produzida ao preço atual de mercado R\$ 140 por kWh em “ambiente de contratação livre”. Do ponto de vista econômico-financeiro os autores (p. 23) afirmam que os biodigestores são viáveis com valor cobrado na recepção do RSU (*Gate Fee*) de R\$ 80,00, e destacam que “os empreendimentos baseados nessa rota tecnológica são viáveis nas condições econômicas vigentes no contexto brasileiro, incluindo as de financiamento ditas pelo BNDES”.

5.4 Comentários Adicionais

Dentro do contexto da presente análise é oportuno destacar a relevância da coleta seletiva para a melhoria da qualidade dos resíduos. Quando a separação dos resíduos é feita na “fonte”, e a coleta é feita de forma seletiva, há uma grande probabilidade desses materiais apresentarem maior potencial para a reciclagem. Isso se deve à menor presença de contaminantes (resíduos orgânicos, inertes) em meio aos materiais recicláveis, o que aumenta o potencial do seu reaproveitamento, em razão da melhor qualidade destes.

Essa lógica é válida não somente para os resíduos que reconhecidamente apresentam potencial para reciclagem, como papéis, plásticos, vidros e metais. A qualidade dos resíduos orgânicos também é favorecida pela coleta seletiva, que contribui para que não sejam misturados resíduos inertes e/ou não degradáveis aos orgânicos. Quanto coletados de forma seletiva, portanto, os resíduos orgânicos apresentam maior potencial para o tratamento anaeróbio, resultando em melhor estabilidade e eficiência do processo e redução de subprodutos ao final do tratamento.

Esta visão é corroborada pela ClimateWorks Foundation (2012, p. 24), que cita que os biodigestores tem grande complementaridade com a coleta seletiva. Segundo a mencionada fundação “a recuperação de materiais secos nas etapas anteriores à destinação e, se necessário,

na própria instalação, constitui atividade desejável uma vez que a biodigestão se aplica apenas à parcela úmida do RSU”.

Verifica-se, portanto, a importância da coleta seletiva para a qualidade dos resíduos orgânicos. Isso reforça, também, a necessidade da adoção de sistemas específicos para o tratamento dessa fração, a exemplo das tecnologias de digestão anaeróbia, que, como mencionado, podem ser beneficiadas com a coleta seletiva. Da mesma forma, a adoção da coleta diferenciada em restaurantes, feiras, sacolões e centros de distribuição pode resultar na obtenção de matéria-prima de excelente qualidade, o que favorece o seu encaminhamento para sistemas anaeróbios de tratamento.

A coleta seletiva dos resíduos orgânicos contribui, portanto, para reduzir a disposição inadequada desses resíduos, visto que favorece a adoção de etapas subsequentes de tratamento. Com isso, minimiza-se o risco de haver a geração de odores, percolados (chorume) e atração de vetores, tão comuns quando essa situação é verificada. Pode-se inferir, portanto, que a coleta seletiva dos resíduos orgânicos é uma grande aliada na proteção ambiental, resultando diretamente na redução de impactos aos mananciais hídricos.

Cabe enfatizar que a alternativa tecnológica apontada nesse trabalho também contribui para reduzir impactos ambientais associados às emissões de gases de efeito estufa. Segundo a ClimateWorks Foundation (2012, p. 2) “a Política Nacional sobre Mudanças do Clima explicita a obrigatoriedade de redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), dos quais os resíduos orgânicos são grandes geradores. Ainda segundo a citada fonte a referida Política deixa claro “a necessidade de estimular processos e tecnologias que propiciem maior economia de energia e conduz à necessidade de respeito ao compromisso internacional com a redução de emissões brasileiras”.

Cumprido destacar, por fim, que para enfrentar a questão da gestão dos RSU de forma efetiva entende-se que seja necessária a adoção de medidas qualificadas que resultem em sistemas eficientes, que decorram de projetos bem elaborados e adequados à realidade local. Além da adoção de soluções técnicas apropriadas, o sucesso dessas medidas depende de uma gestão competente à frente dessas iniciativas. Todo esse arcabouço demanda, conseqüentemente, investimentos financeiros apropriados.

Avalia-se que a disseminação de alternativas tecnológicas modernas e que apresentem atrativos adicionais, como é o caso da geração do biogás, pode se configurar em uma boa estratégia para avançar rumo à ampliação do índice de tratamento de resíduos sólidos no País. Essa evolução, por sua vez, poderá resultar em reflexos positivos quanto à preservação e manutenção da qualidade dos mananciais hídricos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A manutenção da qualidade dos mananciais hídricos é premente, e deve ser tratada como prioridade no âmbito da gestão municipal. Da mesma forma, a adoção de soluções seguras e eficientes para o tratamento dos RSU deve ser uma meta a ser perseguida pelos municípios brasileiros. A ausência de tratamento ou o emprego de soluções inapropriadas na gestão desses resíduos pode resultar em diversos impactos ao ambiente, trazendo potencial risco à qualidade de mananciais hídricos, sejam superficiais ou subterrâneos. Além da questão ambiental a não observância a essa questão poderá também resultar em prejuízos econômicos e sociais.

O Brasil apresenta grande potencial para ampliar o emprego de tecnologias anaeróbias para o tratamento da fração orgânica dos RSU. Isso se deve a fatores como o significativo déficit ainda existente nesse serviço, o elevado percentual de resíduos orgânicos presentes na massa de RSU e a necessária preservação ambiental. A depender da configuração adotada pode-se vislumbrar a possibilidade de aproveitamento energético do biogás, subproduto resultante desse processo. Avalia-se que à medida que o emprego dessa tecnologia avance no país, o que é perfeitamente possível visto a vasta gama de resíduos que podem ser submetidos a esse processo, o biogás proveniente de sistemas de tratamento de resíduos orgânicos poderá vir a ser consolidar como mais uma alternativa na matriz energética brasileira.

É importante destacar que a quantidade de resíduos orgânicos gerados em todo o País é imensa, e uma gestão ineficiente desses resíduos traz grande risco aos recursos hídricos, podendo resultar em contaminação direta de mananciais. O tratamento desses resíduos, por meio de sistemas seguros e eficientes, se configura em uma estratégia que contribui diretamente para a qualidade ambiental, com reflexos positivos na manutenção da qualidade das águas. A ampliação do tratamento dessa fração dos RSU contribui, assim, para a preservação e a conservação dos mananciais hídricos, algo indispensável nos tempos atuais.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Ricardo Cherem de. Um inimigo da água potável. SANARE. Revista Eletrônica da Sanepar. Curitiba (PR), 1999/v 11 n.º. 11. Disponível em: <<http://www.sanepar.com.br/sanepar/sanare/v11/Inimigo/inimigo.html>>. Acesso em 17/07/2016.
- AGÊNCIA BRASIL. Disponível em <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2014-07/no-df-lixao-da-estrutural-continua-em-funcionamento>>. Acesso em 12 de maio de 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil – Informe 2014. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=12683>. Acesso em 27/08/2016
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2014. São Paulo: Abrelpe, 2015. 120 pág. Disponível em <<http://www.abrelpe.org.br/>>. Acesso em 25/06/2016.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em 03/09/2016
- BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>. Acesso em 02/06/2016.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 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. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em 10/05/2015.
- BRASIL. Lei nº 13.308, de 06 de julho de 2016. Altera a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, determinando a manutenção preventiva das redes de drenagem pluvial. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2016/Lei/L13308.htm>. Acesso em 02/06/2016.
- Câmara dos Deputados. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/fiquePorDentro/temas/crise-hidrica>>. Acesso em 04/09/2016
- CHAN, E.C.S.; KRIEG, N.R.; PELCZAR Júnior, M. J. Microbiologia: Conceitos e Aplicações. São Paulo: Makron books, 1996.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).

CLIMATEWORKS FOUNDATION. Estudo de alternativas de tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos - Incinerador *mass burn* e Biodigestor anaeróbio.2012. 40p. Disponível em <<http://www.no-burn.org/downloads/BIODIGESTAO%20e%20INCINERACAO.pdf>> Acesso em 02/10/2016.

COLTURATO, L. F. D. B. O estado da arte da tecnologia de metanização seca / Probiogás. Brasília: Ministério das Cidades, 2015. 97 p.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DAS BACIAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ – PCJ. Disponível em: <<http://www.agua.org.br/residuos-solidos/conteudos/75/o-programa.aspx>>. Acesso em 23/07/2016.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: Guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: FEAM, 2012. 163p. Disponível em: <http://www.em.ufop.br/ceamb/petamb/cariboost_files/aproveitamento_20energ3a9tico.pdf> Acesso em 16/07/2016.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e. V. – FNR. Guia Prático do Biogás – Geração e utilização (versão traduzida). Probiogás. Brasília: Ministério das Cidades, 2013. 233 p.

GOMES, J. L.; BARBIERI, J. C. Gerenciamento de recursos hídricos no Brasil e no Estado de São Paulo: um novo modelo de política pública. Cadernos EBAPE.BR vol.2 n.3.Rio de Janeiro. 2004. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-39512004000300002>. Acesso em 22/11/2016.

GOOGLE MAPS. Disponível em <<https://www.google.com.br/maps/@-15.7217622,-47.9373579,11z>>. Acesso em 10/05/2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Censo 2010. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>> Acesso em 03/09/2016

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - ICMBio. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em <<http://www.icmbio.gov.br/portal/visitacao1/unidades-abertas-a-visitacao/213-parque-nacional-de-brasilia.html>>. Acesso em 27/07/2016.

JENDE, O. *et al.* Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás / Probiogás. Brasília: Ministério das Cidades, 2015. 83 p.

LELIS. M. P. N. Compostagem de Resíduos Orgânicos. Especialização em Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos e Líquidos. Universidade Federal de Goiás. Goiânia: UFG, 2011. 34 p.

LOBATO, L. C. S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgotos domésticos. Tese de Doutorado. UFMG – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MINISTÉRIO DAS CIDADES - MCidades. Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB. Brasília, dezembro de 2013. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/index.php/textos-do-plansab.html>>. Acesso em 22/05/2016

MINISTÉRIO DAS CIDADES - MCidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2014. Disponível em <<http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2014/DiagRS2014.zip>>. Acesso em 23/07/2016.

MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES - MRE. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Disponível em <http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/134-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods>. Acesso em 20/10/2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Versão Preliminar para Consulta Pública (2011). Disponível em <http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf>. Acesso em 18 de junho de 2016.

Portal Brasil. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2010/11/recursos-hidricos>>. Acesso em 27/08/2016.

SENAI. Oportunidades da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná. Curitiba: Senai, 2016. 143 p.

SILVEIRA, B. et al. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás. Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Brasília: Ministério das Cidades, 2015. 183 p.

SOUZA, J. & SCHAEFFER, L. Construção de plantas de biogás: Dimensionamento de biorreatores. Revista Espacios, Vol. 36 (Nº 06) Ano 2015. Pág. 1. Disponível em <<http://www.revistaespacios.com/a15v36n06/15360601.html>>. Acesso em 20/09/2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Disponível em <<http://www.labeee.ufsc.br/node/480>>. Acesso em 01/10/2016.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. Tratamento Anaeróbio de Esgotos – Um manual para regiões de clima quente. 1994.

VON SPERLING, M. Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos, v.2. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 1996. 211 p.