



RSU

O ESTADO DA ARTE
DA TECNOLOGIA DE
METANIZAÇÃO SECA



RSU

O ESTADO DA ARTE
DA TECNOLOGIA DE
METANIZAÇÃO SECA

Coletânea de publicações do PROBIOGÁS
Série Aproveitamento Energético de Biogás
de Resíduos Sólidos Urbanos

1ª Edição
Ministério das Cidades
Brasília, 2015

República Federativa do Brasil

Presidenta da República

Dilma Vana Rousseff

Ministro das Cidades

Gilberto Kassab

Secretário Executivo do Ministério das Cidades

Elton Santa Fé Zacarias

Secretário Nacional de Saneamento Ambiental

Paulo Ferreira

Chefe de Gabinete

Gustavo Zarif Frayha

Diretor de Articulação Institucional

Ernani Ciríaco de Miranda

Diretor de Desenvolvimento e Cooperação Técnica

Manoel Renato Machado Filho

Diretor de Águas e Esgotos

Johnny Ferreira dos Santos

Apoio Técnico

Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ).

Diretor Nacional: Wolf Michael Dio

Coordenador do Projeto: Wolfgang Roller

Informações legais

As idéias e opiniões expressas neste livro são dos autores e não refletem necessariamente a posição do Ministério das Cidades, da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental ou da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

A duplicação ou reprodução de todo ou partes (incluindo a transferência de dados para sistemas de armazenamento de mídia) e distribuição para fins não comerciais é permitida, desde que o projeto PROBIOGÁS seja citado como fonte da informação. Para outros usos comerciais, incluindo duplicação, reprodução ou distribuição de todo ou partes deste estudo, é necessário o consentimento por escrito do Ministério das Cidades e da GIZ.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação [CIP]

Bibliotecário Responsável: Illy Guimarães B. Batista [CRB/DF 2498]

Brasil. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás.

O estado da arte da tecnologia de metanização seca / Probiogás ; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH [GIZ] ; autor, Luis Felipe de Dornfeld Braga Colturato. – Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2015.

97 p. : il. – (Aproveitamento energético de biogás de resíduos sólidos urbanos; 1)

ISBN 978-85-7958-040-6

1. Metanização seca – aspectos tecnológicos. 2. Digestão anaeróbia – aspectos tecnológicos. 3. Biogás – aspectos tecnológicos. 4. Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos urbanos. 5. Biogás - saneamento ambiental. 6. Biogás – produção e utilização. 7. Energia – fontes alternativas. I. Ministério das Cidades. II. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH [GIZ]. III. Colturato, Luis Felipe de Dornfeld Braga. IV. Título. V. Série.

CDD 665.776

CDU 662.767.2



Projeto Brasil – Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil

www.cidades.gov.br/probiogas

O Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS – é um projeto inovador, fruto da cooperação técnica entre o Governo Brasileiro, por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, e o Governo Alemão, por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Com o objetivo de contribuir para a ampliação do uso energético eficiente do biogás e, por conseguinte, para a redução de emissões de gases indutores do efeito estufa, o projeto conta com uma rede de parcerias nas esferas governamental, acadêmica e empresarial e possui vigência entre os anos de 2013 e 2017.

Para alcançar tais objetivos, o PROBIOGÁS desenvolve atividades em três linhas: (1) *condições-quadro*, atuando junto a órgãos governamentais em prol da melhoria das condições regulatórias relacionadas à produção de energia a partir do biogás; (2) *cooperação científica*, aproximando instituições de ensino e de pesquisa brasileiras entre si e das alemãs; e, (3) *cadeia de valor*, com o intuito de fomentar a indústria brasileira para produção nacional de tecnologia e de aproximar empresas brasileiras e alemãs para o intercâmbio de conhecimento. Além dessas atividades, o PROBIOGÁS busca capacitar profissionais brasileiros em diversos níveis, contemplando os atores que integram a cadeia de biogás e objetivando fortalecer o mercado de biogás no Brasil.

A realização da parceria Brasil-Alemanha possibilita a transferência do conhecimento e da experiência alemã sobre o aproveitamento do biogás gerado a partir do tratamento de efluentes e de resíduos, cuja expertise é reconhecida mundialmente. Neste contexto, o PROBIOGÁS assume papel relevante, indutor do desenvolvimento de tecnologias nacionais para o aproveitamento do biogás, possibilitando um retorno positivo para o setor saneamento básico no Brasil, em função do potencial de incremento na viabilidade técnica e econômica das plantas e instalações de tratamento de esgotos e de resíduos sólidos, a partir da geração de energia proveniente dos processos de biodegradação da fração orgânica.

Para melhor inserir o Projeto nas políticas nacionais foi criado um Comitê Gestor interministerial com a função de assegurar a integração entre as diversas áreas do Governo Federal com atuação no tema. O Comitê é formado pelos seguintes órgãos: Ministérios das Cidades, do Meio Ambiente, da Ciência, Tecnologia e Inovação, das Minas e Energia, da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, assim como a GIZ.

Gilberto Kassab
Ministro das Cidades



Por meio da: **giz** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Ministério das Cidades



Coordenação do projeto PROBIOGÁS

Ernani Ciríaco de Miranda (Ministério das Cidades) e Wolfgang Roller (GIZ)

Publicado por

Projeto Brasil–Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS (Projeto de Cooperação Técnica Bilateral entre a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades – SNSA/MCidades e a Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável – GIZ)

Contatos

SNSA/MCidades

Setor de Autarquias Sul, Quadra 01, Lote 01/06, Bloco H, Ed. Telemundi II
CEP: 70070-010, Brasília – DF, Brasil. Telefone: +55 (61) 2108-1000
www.cidades.gov.br

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

SCN Quadra 1 Bloco C Sala 1501 – 15º andar Ed. Brasília Trade Center,
CEP: 70711-902, Brasília-DF, Brasil. Telefone: +55 (61) 2101-2170
www.giz.de/brasil

Expediente

Autores

Luis Felipe de Dornfeld Braga Colturato (Methanum), Felipe Correia de Souza Pereira Gomes (Methanum), Tathiana Almeida Seraval (Methanum), Thiago Dornfeld Braga Colturato (Methanum)

Revisão

Hélinah Cardoso Moreira (GIZ), Luis Costa Jr. (GIZ), Roberta Knopki (GIZ)

Capa, projeto gráfico e diagramação

Estúdio Marujo

PREFÁCIO

A Lei de diretrizes nacionais para o saneamento básico – Lei 11.445/2007 – estabelece que a prestação dos serviços terá a sustentabilidade econômico-financeira assegurada e, sob os aspectos técnicos, atenderá a requisitos que garantam a qualidade adequada. Por sua vez, a Lei que institui a política nacional de resíduos sólidos – Lei 12.305/2010 – estabelece a obrigatoriedade da coleta seletiva e determina que apenas os rejeitos devem ser encaminhados a aterros sanitários (regra que ficou conhecida no país como o “fim dos lixões”). Tais elementos reforçam o grande desafio, enfrentado pelo Brasil, de ampliar os níveis de tratamento dos esgotos sanitários e dos resíduos sólidos urbanos.

O Plano Nacional de Saneamento Básico – Plansab –, aprovado em dezembro de 2013, com um horizonte de 20 anos, destaca que um dos princípios fundamentais da política de saneamento diz respeito à matriz tecnológica que orienta o planejamento e a política setorial. Segundo o Plansab, planejar o saneamento básico no país, com um olhar de longo prazo, necessariamente envolve a prospecção dos rumos tecnológicos que o setor pode e deve trilhar. Cabe à política de saneamento básico identificar tendências, nacionais e internacionais, segundo as quais a matriz tecnológica do saneamento vem se moldando, o que supõe também procurar enxergar novos conceitos, ainda que sejam antigas formulações em novas roupagens, ou novos desafios que pressionam no sentido de mudanças paradigmáticas. Neste sentido, temas como a sustentabilidade, a gestão integrada das águas urbanas, o saneamento ecológico e o combate às mudanças climáticas globais podem ser evocados como exemplos.

Neste contexto, o PROBIOGÁS é um instrumento de grande importância para a implementação do Plansab. O aproveitamento energético do biogás nos processos de tratamento dos esgotos sanitários e dos resíduos sólidos urbanos, consagrado em diversos países, representa um pequeno esforço de modernização das instalações dos sistemas brasileiros com impactos altamente positivos na sustentabilidade econômico-financeira, na qualidade dos processos de tratamento e na melhoria do meio ambiente, contribuindo de forma efetiva para a redução dos gases de efeito estufa.

Espera-se que os resultados do PROBIOGÁS possibilitem a inserção do aproveitamento energético do biogás na pauta dos governos e prestadores de serviços de saneamento, de modo a fazer com que esta fonte renovável de energia seja utilizada em toda a sua potencialidade, dentro da realidade brasileira, contribuindo também para a geração distribuída de energia e a maior diversificação da matriz energética nacional.

Paulo Ferreira
**Secretário Nacional de
Saneamento Ambiental**

Wolfgang Roller
Coordenador PROBIOGÁS

APRESENTAÇÃO DA COLETÂNEA

A Coletânea de Publicações do PROBIOGÁS é uma relevante contribuição governamental aos profissionais brasileiros que atuam em diferentes setores da infraestrutura, energia renovável, inovação tecnológica e, em especial, no setor de saneamento. Essa coletânea é composta por cadernos técnicos que tratam do biogás como tema central.

A coletânea é dividida em quatro séries, cada uma agrupando um conjunto de publicações que contribuem para uma determinada área do conhecimento e/ou de atuação no tema.

BIOGÁS

A primeira série é intitulada **Desenvolvimento do Mercado de Biogás**, abreviada como **BIOGÁS**, composta por publicações que tratam de aspectos tecnológicos da geração e utilização do biogás, do processo de licenciamento ambiental de plantas e instalações, da comercialização de co-produtos de plantas de biogás, entre outros tópicos pertinentes à estruturação da cadeia produtiva e à consolidação de um mercado nacional.

RSU

A segunda série aborda a utilização energética do biogás gerado a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, questão extremamente atual no contexto técnico e institucional do saneamento ambiental brasileiro. Denominada **Aproveitamento Energético do Biogás de Resíduos Sólidos Urbanos** e abreviada simplesmente como **RSU**, esta série abordará, entre outros tópicos, a metodologia e tecnologia da metanização seca e estudos de viabilidade técnica e econômica.

ETE

A terceira série é chamada **Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto**, simbolizada pela sigla **ETE**, composta por publicações que tratam de aspectos técnicos, desde o projeto à operação, de estudos de viabilidade técnica e econômica, e de orientações para a licitação de sistemas de tratamento que contemplem o biogás.

RA

Finalmente, a quarta série abordará a utilização do biogás oriundo dos resíduos das atividades agrícolas, pecuárias e da agroindústria, que possuem um elevado potencial de aproveitamento no país. Intitulada **Aproveitamento Energético do Biogás de Resíduos Agrosilvopastoris**, abreviada simplesmente como **RA**, as publicações versarão sobre os resíduos da suinocultura, comercialização de biofertilizante, entre outros tópicos.

Por oportuno, informamos que todas as Publicações da Coletânea estão disponíveis para download na página do Projeto PROBIOGÁS, hospedado no site da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades: www.cidades.gov.br/probiogas

SUMÁRIO

11	1 APRESENTAÇÃO
----	----------------

13	2 INTRODUÇÃO
----	--------------

13	2.1 O processo de metanização
----	-------------------------------

16	2.2 A metanização aplicada ao tratamento da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU)
----	--

21	2.3 Características Operacionais de uma Planta Industrial de Metanização da FORSU
----	---

25	3 TECNOLOGIAS SECAS DE METANIZAÇÃO DA FORSU
----	---

25	3.1 O Processo Dranco
----	-----------------------

28	3.2 O Processo Axpo Kompogas
----	------------------------------

30	3.3 O Processo Valorga
----	------------------------

32	3.4 O Processo Laran [Ex-Linde-BRV]
----	-------------------------------------

34	3.5 O sistema de garagem [Túneis de Metanização]
----	--

38	3.6 Análise comparativa das tecnologias de metanização seca e extrasseca
----	--

41	4 O ESTADO DA ARTE DO TRATAMENTO DA FORSU VIA METANIZAÇÃO NA EUROPA
----	---

48	5 ANÁLISE CRÍTICA DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE METANIZAÇÃO SECA
----	--

49	5.1 Ecoparc 2
----	---------------

53	5.2 Ecoparque de La Rioja
----	---------------------------

59	5.3 Centro de Tratamento de Resíduos de Valladolid
----	--

61	5.4 Biocompost – Planta de Tratamento de RSU de Vitória-Gasteiz
----	---

65	5.5 Planta de Metanização Extrasseca AWM – Entsorgungspark Freimann [Bekon]
----	---

69	5.6 Análise comparativa das tecnologias com base nos Estudos de Caso
----	--

71	6 PROPOSTA DE MODELO TECNOLÓGICO PARA O CENÁRIO BRASILEIRO
----	--

71	6.1 Cenário brasileiro: contexto político e institucional
----	---

76	6.2 Caracterização dos resíduos sólidos urbanos no Brasil
----	---

82	6.3 Tecnologias para valorização da fração orgânicos resíduos sólidos urbano
----	--

88	7 CONSIDERAÇÕES FINAIS
----	------------------------

90	8 REFERÊNCIAS
----	---------------

LISTA DE FIGURAS

- 14 **1:** Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos no processo de digestão anaeróbia com redução de sulfato
- 17 **2:** Características básicas de processo das diferentes tecnologias de metanização
- 20 **3:** Produção de biogás em sistemas de metanização extrasseca em túneis
- 25 **4:** Modelos esquemáticos de um reator com a tecnologia Dranco
- 26 **5:** Reator Dranco, Container para motor de cogeração e gasômetro [A] e detalhe do sistema de extração [B]
- 26 **6:** Sistema de agitação do material em digestão
- 28 **7:** Na figura [A] um detalhe do sistema de agitação de um dos reatores construídos no Ecoparque de La Rioja e na figura [B] é apresentado um modelo esquemático de um reator com tecnologia Kompogas
- 29 **8:** Detalhe dos motores do sistema de agitação longitudinal
- 30 **9:** Modelo esquemático de um reator com tecnologia Valorga
- 31 **10:** Reatores Valorga [1] e detalhe do sistema de agitação posicionado na parte inferior dos reatores [2]
- 32 **11:** Modelo esquemático de um reator com tecnologia Laran
- 32 **12:** Detalhes de reatores com tecnologia Laran. Imagem dos agitadores mecânicos do reator da cidade de Baar, Suíça [A], e detalhe do sistema de aquecimento de um reator, via serpentinas instaladas nas paredes [B]
- 33 **13:** Detalhe do sistema extração tecnologia Laran a vácuo [A] e sistema de agitação por eixos transversais [B]
- 35 **14:** Modelo esquemático de uma unidade de metanização com tecnologia Kompoferm Plus
- 35 **15:** Detalhe da porta dos reatores e sua forma de abertura lateral [A] e imagem do interior do reator, onde pode ser vista a grade e o sistema de injeção de ar [B]
- 36 **16:** Modelo esquemático de uma unidade de metanização com tecnologia Bekon Dry Cicle Fermenter
- 36 **17:** Detalhe da porta dos reatores e a forma de abertura [A] e tanque de recirculação de lixiviado [B]
- 37 **18:** Modelo esquemático de uma unidade de metanização com tecnologia BIOferm System
- 38 **19:** Detalhe da porta dos túneis e forma de abertura lateral
- 42 **20:** Evolução da capacidade instalada das plantas de metanização de resíduos orgânicos na Europa
- 43 **21:** Capacidade Instalada de metanização da FORSU na Europa

- 43 **22:** Capacidade por milhões de habitantes e percentual sobre a capacidade teórica potencial
- 44 **23:** Evolução das plantas europeias de metanização de resíduos que operam na faixa mesofílica (35° a 40°C) e na faixa termofílica (50° a 55°C)
- 52 **24:** Imagem de satélite do Ecoparc 2
- 52 **25:** Layout do Ecoparc 2
- 58 **26:** Imagem de satélite do Ecoparque de La Rioja
- 58 **27:** Layout do Ecoparque de La Rioja
- 61 **28:** Imagem de satélite do CTR Valladolid
- 64 **29:** Fluxograma das Plantas de TMB de Vitória-Gasteiz
- 64 **30:** Imagem de satélite do CTR Valladolid
- 65 **31:** Imagem de satélite da AWM – Entsorgungspark Freimann
- 66 **32:** Planta de Metanização AWM – Entsorgungspark Freimann
- 66 **33:** FORSU recebida na planta AWM-Bekon
- 67 **34:** Vistas dos túneis de metanização
- 67 **35:** Tanque de armazenamento e recirculação de lixiviado
- 68 **36:** Área de compostagem (esq.) e detalhe da FORSU após remoção dos túneis (dir.)
- 68 **37:** Área de dessulfurização do biogás e cogeração
- 77 **38:** Geração de RSU per capita por região brasileira em 2012
- 77 **39:** Volume de recursos movimentados por atividades relacionadas à limpeza urbana em 2012
- 78 **40:** Empregos diretos gerados pelo serviço de limpeza urbana em 2011 e 2012
- 78 **41:** Porcentagem em peso de cada tipo de RSU coletado
- 79 **42:** Participação de cada região na quantidade de RSU coletados
- 80 **43:** Coleta de resíduos per capita por região brasileira em 2012
- 80 **44:** Quantidade de municípios por destinação final de RSU em 2012
- 83 **45:** Fluxograma do processo de valorização integral do RSU, ilustrando as etapas de tratamento das distintas frações dos resíduos
- 86 **46:** Esquema de preenchimento de um dos túneis e túnel já após o preenchimento pronto para ser selado
- 87 **47:** Unidade de produção de Inóculo [UPI], Sistema de Captação, Sedimentação e Bombeamento de Lixiviado [SCSBL] e tubulações para condução do biogás

LISTA DE TABELAS

15	1: Composição média do biogás gerado na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos
16	2: Composição esperada do biogás em função do substrato digerido
27	3: Produção e consumo energético de plantas de metanização com tecnologia Dranco
27	4: Custos de construção e de operação, requerimento de área e geração e consumo de energia elétrica e calor de plantas em diferentes escalas com tecnologia Dranco
29	5: Dados de consumo e geração de energia em plantas com tecnologia Kompogas
31	6: Balanço Energético de plantas de metanização com tecnologia Valorga
33	7: Produção de biogás e energia em plantas com tecnologia Laran
38	8: Condicionantes operacionais das tecnologia de metanização seca e extrasseca da FORSU
45	9: Comparativo da evolução de diferentes aspectos das tecnologias de metanização de resíduos
46	10: Plantas de metanização extrasseca em operação na Europa
51	11: Dados de entrada e saída do Ecoparc 2
54	12: Dados de entrada e saída do Ecoparque de La Rioja
57	13: Resumo dos equipamentos e estruturas do Ecoparque de La Rioja
60	14: Dados de entrada de resíduos e produção de energia elétrica do CTR Valladolid
63	15: Dados de entrada de resíduos e produção de energia e biogás da Planta Biocompost (tecnologia Dranco)
69	16: Análise comparativa entre as tecnologias, com base nos estudos de caso apresentados
75	17: Redução do percentual de resíduos úmidos dispostos em aterros sanitários, com base na caracterização nacional de 2013
81	18: Destinação dos resíduos domiciliares e/ou públicos coletados nos anos de 2000 e 2008
82	19: Quantidade de municípios que contam com serviço de coleta seletiva
85	20: Comparação dos atributos relevantes entre as rotas: (i) Compostagem; (ii) Túneis de Metanização Europeus (ii) Tecnologia Extrasseca Nacional em Desenvolvimento

1

APRESENTAÇÃO

A crescente prosperidade e urbanização vivenciada pela sociedade moderna tende a dobrar o volume anual de resíduos sólidos urbanos em 2025 – passando de 1,3 bilhões de toneladas para 2,6 bilhões de toneladas por ano – desafiando a gestão da saúde pública e ambiental em cidades do mundo (<http://www.worldwatch.org>).

Compreender as dimensões que envolvem a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) requer a compreensão dos fundamentos legais e pressupostos que permeiam todas as atividades relacionadas ao seu manejo, desde a sua geração até a disposição final dos resíduos.

É importante salientar 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 (FORSU), tendo obtido sucesso com a sua aplicação em distintos tipos de resíduos e efluentes em todo o mundo. Especialmente nos países europeus, a consolidação desta tecnologia foi necessariamente acompanhada da regulamentação dos mercados associados à geração de energia e renda a partir dos resíduos orgânicos e seus subprodutos – biogás e biossólido (agrícola ou energético) – o que é fundamental para que esta tecnologia estabeleça também no Brasil.

Baseado nesses fatos, no âmbito do PROBIOGÁS, projeto de fomento ao aproveitamento energético de biogás coordenado pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA) do Ministério das Cidades (MCidades) com apoio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, ambas as instituições têm fomentado e apoiado o detalhamento e realização de estudos que venham a contribuir com o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias de metanização, aplicada aos resíduos sólidos urbanos.

Por outro lado, a instituição de apoio Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP) juntamente com a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e tendo como empresa interveniente a Methanum Resíduo e Energia, está desenvolvendo um projeto financiado pelo Fundo Tecnológico (FUNTEC) do BNDES, a ser instalado na cidade do Rio de Janeiro, na Usina de Triagem e Compostagem do Caju, operada pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB). Este projeto tem por objetivo o desenvolvimento de uma tecnologia nacional de metanização da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU), denominada “Túneis de Metanização de Batelada Sequenciais” (TMBS). Essa tecnologia, primeira a nível nacional, além dos benefícios da estabilização da fração orgânica, tem como objetivo o tratamento de resíduos com baixo índice de segregação de impróprios, o que é uma realidade brasileira. Dentre outros benefícios, ela visa solucionar os problemas relativos à acumulação dos materiais sedimentáveis, reduzir os custos relacionados aos sistemas de introdução e extração do material a ser tratado, propiciar a introdução de materiais com percentual elevado de impróprios, minimizar o tempo de pós-tratamento do material digerido (compostagem) e otimizar a produção de biogás.

O objetivo desse estudo é apresentar e discutir o panorama tecnológico aplicado à metanização seca da FORSU na Europa, através da compilação de informações, conhecimentos e referenciais legais e tecnológicas que embasaram a elaboração do referido projeto. Serão apresentadas as principais configurações técnicas e operacionais dos sistemas e a descrição das principais tecnologias secas comerciais, bem como as tecnologias de metanização em túneis, atualmente denominadas como extrasseca em termos operacionais e de processo. Este estudo apresenta uma análise crítica das tecnologias em questão tendo como base cinco estudos de caso de plantas de metanização seca e extrasseca que operam com distintas tecnologias.

Além disso, o estudo visa contextualizar a situação da regulamentação e manejo do RSU no Brasil, a fim de justificar a escolha dos Túneis de Metanização em Bateladas Seqüenciais (TMBS) como tecnologia promissora para o cenário nacional em função das condições legais e também das características do substrato disponível. Espera-se que a discussão e os referenciais tecnológicos apresentados possam subsidiar futuras ações voltadas para a valorização da FORSU no Brasil via metanização, em consonância com as novas diretrizes da Política Nacional de Resíduos (PNRS) e com a realidade dos resíduos sólidos urbanos e contexto local de operação destas propostas.

Além do motivador legal, é consenso que o simples aterramento do RSU é um procedimento que acarreta perda de matéria-prima e energia e resulta em contaminações futuras, sendo urgente a necessidade de viabilizar alternativas tecnológicas que possibilitem o seu aproveitamento energético, a exemplo do que ocorre em diferentes países do mundo. Esta demanda é particularmente importante no que tange a fração orgânica dos resíduos urbanos, que representa cerca de 50% em peso do total de RSU gerado em cidades brasileiras e ainda carece de soluções definitivas para seu manejo e aproveitamento.

2

INTRODUÇÃO

2.1 O processo de metanização

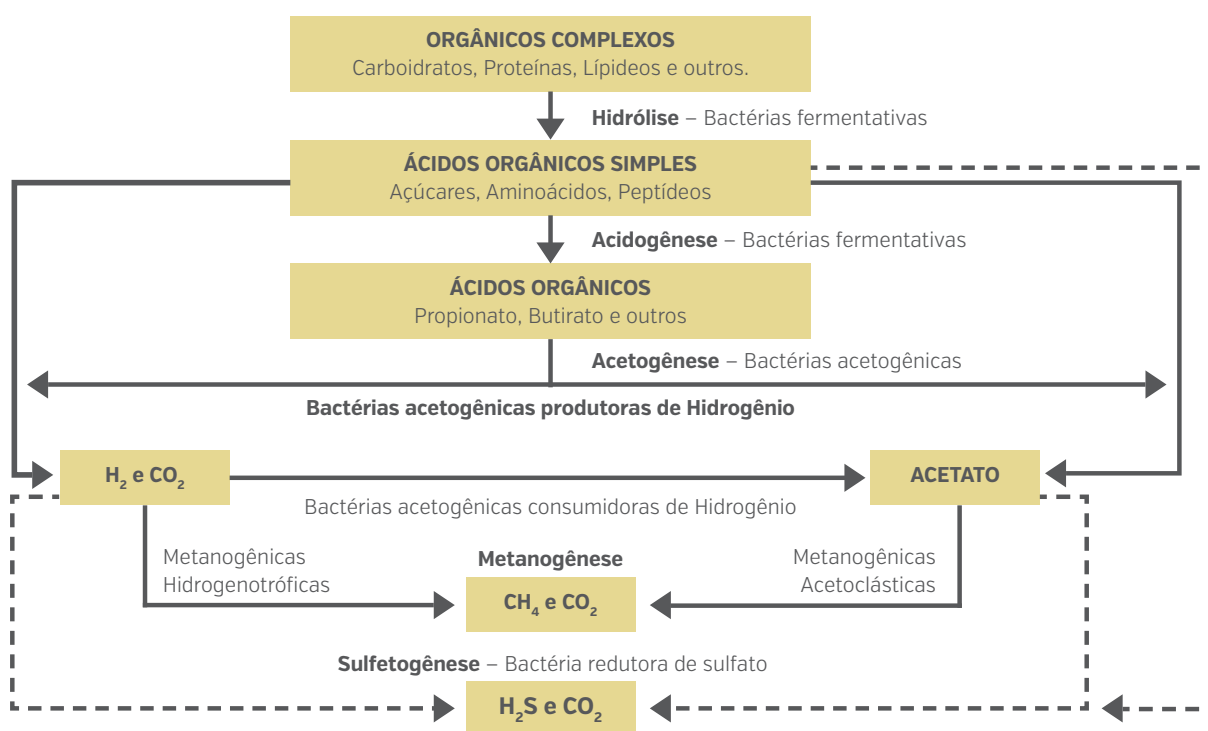
A metanização, ou digestão anaeróbia, é o processo de mineralização da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio livre (CHERNICHARO, 1997). O principal subproduto da degradação anaeróbia da matéria orgânica é o biogás, gás energético constituído principalmente por metano (CH_4 - 50 a 75%), dióxido de carbono (CO_2 - 25 a 45%) e sulfeto de hidrogênio (H_2S - 1.000 a 40.000 ppmV), geralmente saturado em vapor d'água (H_2O) e com presença de traços de nitrogênio (N_2) e outros compostos (RISE-AT, 1998).

A produção do biogás ocorre naturalmente em ambientes úmidos sem a presença de oxigênio, tais como pântanos, sedimentos de rios, lagos e mares, minas de carvão e no trato digestivo de animais (ENERGAIA, 2006), inclusive nas camadas inferiores de aterros sanitários e quaisquer outras áreas onde ocorre acúmulo de matéria orgânica. Segundo Chernicharo (1997), estima-se que a digestão anaeróbia com formação de metano seja responsável pela completa mineralização de 5 a 10% de toda a matéria orgânica disponível no planeta.

O processo de digestão anaeróbia, ou metanização, pode ser resumido em cinco etapas, sendo elas (CHERNICHARO, 1997):

- >> **Hidrólise:** É a etapa inicial do processo. Os materiais particulados complexos (polímeros) são convertidos em compostos solúveis mais simples (menor massa molar), possibilitando que as bactérias fermentativas os absorvam através de suas paredes celulares. Essa dissolução ocorre por meio de enzimas extracelulares expelidas pelas bactérias. Com esse processo de hidrólise, as proteínas são convertidas em aminoácidos, os lipídeos solúveis em ácidos graxos e os carboidratos em açúcares simples.
- >> **Acidogênese:** Os compostos solúveis gerados na fase de hidrólise são assimilados pelas bactérias e metabolizados, sendo convertidos, principalmente, em ácidos graxos voláteis (AGV). Em menores quantidades são gerados álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio e novas células bacterianas.
- >> **Acetogênese:** Os compostos gerados na acidogênese são oxidados e convertidos a hidrogênio, dióxido de carbono e acetato, o que forma o substrato adequado ao desenvolvimento das bactérias metanogênicas.
- >> **Metanogênese:** É nessa fase que os compostos orgânicos são convertidos em biogás pelas bactérias metanogênicas. As bactérias envolvidas nesse processo são divididas em dois grupos: as acetoclásticas, que produzem o metano a partir do ácido acético e de outros compostos que contêm um átomo de carbono; e as hidrogenotróficas, que metabolizam o hidrogênio e o dióxido de carbono, gerando o gás metano.

Figura 1: Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos no processo de digestão anaeróbia com redução de sulfato.



Fonte: Adaptada de Chernicharo (1997).

>> **Sulfetogênese:** Fase onde as bactérias sulforetadoras reduzem os sulfatos e outros compostos sulfurados em sulfetos. Essas bactérias se alimentam de uma gama de substratos, podendo competir com as demais bactérias. Essa fase pode ou não ocorrer no processo de digestão anaeróbia, e só ocorrerá de forma significativa se houver grande quantidade de sulfato presente no meio. Nesse caso, a produção de metano tende a diminuir e a de gás sulfídrico a aumentar, o que é indesejável do ponto de vista balanço energético do aproveitamento do biogás.

A sequência metabólica e os grupos envolvidos no processo de digestão anaeróbia são apresentados na Figura 1.

De maneira geral, o processo pode ser resumido em duas etapas principais: na primeira, os compostos orgânicos complexos são convertidos em materiais mais simples como ácidos voláteis, hidrogênio e outros; na segunda, ocorre a conversão desses compostos nos produtos finais gasosos do processo de digestão anaeróbia, em especial os gases metano e carbônico, principais componentes do biogás.

Nos sistemas anaeróbios, a maior parte da demanda química de oxigênio¹ (DQO) é convertida em metano (cerca de 50 a 70%), sendo removida do material em digestão e extraída do reator na forma gasosa. Entre 5 a 15% do material orgânico é convertido em lodo ou biomassa microbiana e cerca de 10 a 30% não é convertida em biogás ou biomassa, permanecendo como material não degradado (CHERNICHARO, 1997).

1: A DQO é um parâmetro indispensável nos estudos de caracterização de esgotos sanitários e de efluentes orgânicos em geral, pois ela avalia a quantidade de oxigênio dissolvido [OD] consumido em meio ácido que leva à degradação de matéria orgânica, permitindo a quantificação da matéria orgânica em compostos aquosos.

O lodo digerido, ou digestado – material final resultante do processo anaeróbio – encontra-se parcialmente estabilizado, necessitando de uma etapa de desidratação seguida de processos para a estabilização final de suas frações sólida e líquida. A fração sólida geralmente é destinada a uma etapa de compostagem aeróbia. A fração líquida, dada sua elevada concentração de amônia, caso não seja destinada diretamente à fertirrigação deve ser submetida a processos de nitrificação-desnitrificação e remoção da DQO por via física e biológica.

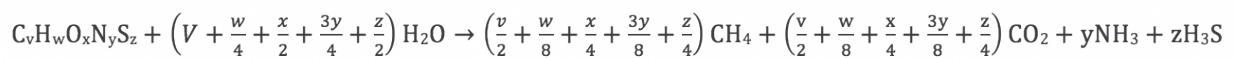
Com relação ao biogás gerado no processo, a sua composição média é abordada na Tabela 1. Todavia, vale ressaltar que a composição depende diretamente das características da matéria orgânica degradada.

Tabela 1: Composição média do biogás gerado na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos

COMPONENTE	CONCENTRAÇÃO
CH ₄	40 - 75%
CO ₂	25 - 40%
N	0,5 - 2,5%
H ₂ S	0,1 - 0,5%
O ₂	0,1 - 1%
NH ₃	0,1 - 0,5%
H	1 - 3%

Fonte: Adaptada de Salomon e Lora (2009)

Desconsiderando os constituintes utilizados para a síntese celular, a equação a seguir, primeiramente proposta por Buswell e Boruff (1932) e estendida por Sykes (2001), pode ser utilizada para estimar a quantidade de metano, dióxido de carbono, amônia e gás sulfídrico que serão produzidos em condições de anaerobiose.



Segundo Tchobanoglous et al. (2002), as frações molares esperadas para o CH₄, CO₂ e H₂S são definidas pelas equações abaixo:

$$f_{CO_2} = \frac{v-w+2x-5y+2z}{8(v-y+z)}$$

$$f_{CH_4} = \frac{4v+w-2x-5y-2z}{8(v-y+z)}$$

$$f_{H_2S} = \frac{z}{8(v-y+z)}$$

A composição do biogás varia em função do substrato digerido, entretanto, existem composições esperadas para determinados substratos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Composição esperada do biogás em função do substrato digerido

SUBSTRATO	CH ₄	CO ₂	NH ₃	H ₂ S
Carboidratos (Glicerina)	50%	50%	-	-
Gorduras (Tripalmitina)	71%	29%	-	-
Proteínas	38%	38%	18%	6%

Fonte: Adaptada de Tchobanoglous et al. (2002).

2: O uso como gás natural requer a remoção do dióxido de carbono com o objetivo de atingir concentrações de metano acima de 90%, por meio da aplicação de processos denominados como purificação ou upgrading.

Uma vez que o metano (CH₄) é o constituinte energético do biogás, o poder calorífico do biogás é diretamente proporcional à quantidade de CH₄ presente nesse mesmo gás. O poder calorífico inferior (PCI) do CH₄ é 35.800 kJ/m³ (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2002). Dessa forma, um biogás com uma concentração de 60% de CH₄ possui um PCI de 21.480 kJ/m³.

A utilização do biogás é variada, podendo ser direcionada para a geração de eletricidade e/ou eletricidade e calor (Combined Heat and Power – CHP); produção de calor ou vapor; fonte de energia para a indústria para aquecimento, vapor, eletricidade e resfriamento; utilização como gás natural para injeção na rede ou uso como combustível veicular²; gás para uso industrial na produção de químicos, entre outros (AEBIOM, 2009).

2.2 A metanização aplicada ao tratamento da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU)

Atualmente no mundo, a metanização tem sido empregada com sucesso como tratamento biológico de diferentes tipos de resíduos e efluentes urbanos, industriais e agrícolas, com inúmeras vantagens frente a processos aeróbios, como baixos custos operacionais, baixa taxa de geração de lodo, redução de emissão de gases do efeito estufa e geração de biogás, caracterizando-se como um processo com balanço energético positivo (MCCARTY, 1964; LETTINGA *et al.*, 1980; BECCARI *et al.*, 1996; CHERNICHARO, 2007). Apesar dos inúmeros benefícios, a aplicação da metanização para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) ocorreu mais recentemente, tendo sofrido uma expansão expressiva na última década, principalmente na Europa (DE BAERE E MATTHEEUWS, 2008).

Pelo fato dos sistemas de metanização terem sido desenvolvidos inicialmente para o tratamento de efluentes líquidos e operarem, portanto, como processo úmido, inúmeras variantes técnicas e operacionais foram sendo introduzidas com o intuito de que a metanização se tornasse um processo aplicável a resíduos e efluentes com diferentes características e que obtivesse cada vez maior eficiência.

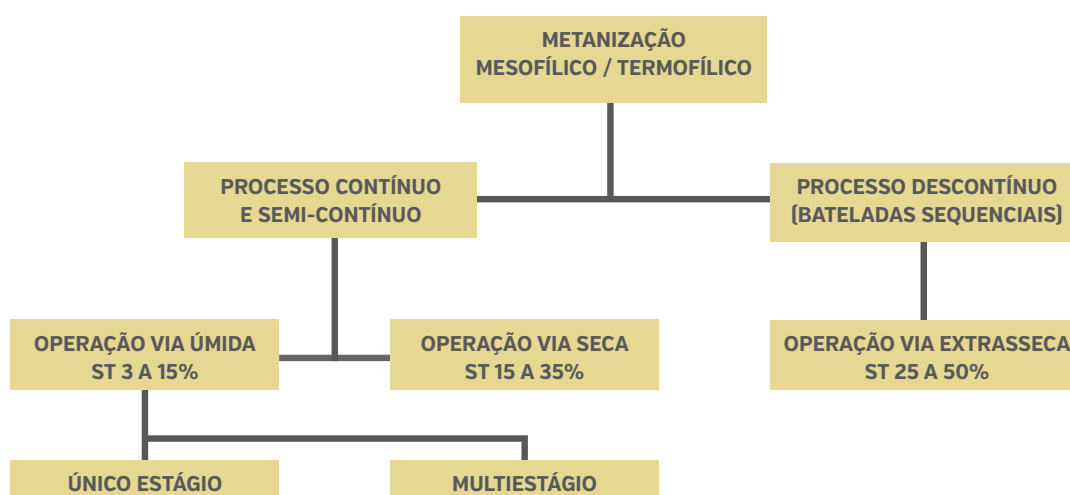
O tratamento da FORSU, em particular, introduziu condicionantes antes não experimentadas com outros resíduos e efluentes, principalmente em função das particularidades destes resíduos (heterogeneidade, teor de sólidos, alto teor de materiais impróprios, etc), o que acarretou no desenvolvimento e evolução de uma linha tecnológica focada exclusivamente nestes materiais.

Segundo Austermann et al. (2007), as tecnologias de metanização dos RSU podem ser diferenciadas conforme algumas características básicas de processo;

- > Temperatura do processo, sendo mesofílico (37° - 42°C) ou termofílico (50° - 60°C);
- > Sistema de operação, basicamente relacionado aos processos de introdução/extração do substrato, podendo ser por processo contínuo, semicontínuo ou descontínuo (bateladas sequenciais);
- > Concentração de sólidos totais (ST), operando via úmida, via seca ou extrasseca;
- > Divisão das etapas de digestão, em um estágio único ou multiestágio;

Figura 2: Características básicas de processo das diferentes tecnologias de metanização

A Figura 2 apresenta a inter-relação entre as características básicas de processo, que serão discutidas separadamente na sequência.



Fonte: Adaptada de Fricke & Pereira, 2013

2.2.1 Faixa Mesofílica vs. Faixa Termofílica

Existem basicamente duas faixas de temperatura utilizadas no processo de metanização - mesofílica e termofílica. No processo mesofílico, os microrganismos apresentam uma taxa máxima de crescimento a temperaturas em torno de 37°C, enquanto que no termofílico, a temperatura ideal é de aproximadamente 55°C.

Os microrganismos termofílicos possuem uma taxa de reprodução maior que os mesofílicos, resultando em um maior rendimento do sistema e, conseqüentemente, maior produção de biogás em um menor intervalo de tempo. Estudos indicam que o processo termofílico resulta em uma produção de biogás significativamente mais elevada que os sistemas mesofílicos (em média 15%) e com maior concentração de metano, considerando um mesmo tempo de detenção hidráulica (BMU, 2013; Fricke & Pereira, 2013).

Por outro lado, os sistemas termofílicos requerem uma maior carga energética já que demandam uma quantidade extra de vapor ou energia para aquecimento dos reatores, principalmente durante o inverno, para promover a manutenção de sua temperatura. Além disso, possuem maior dificuldade operacional face a maior sensibilidade, o que tem resultado em preferência pela operação em faixa mesofílica na maior parte das plantas na Alemanha (AUSTERMANN et al., 2007; BMU, 2013).

Devido ao processo de digestão mais acelerado, os reatores que operam em temperatura termofílica requerem um menor tempo de detenção hidráulica (TDH), possibilitando assim a construção de reatores de menores dimensões. Isso implica em menor requisito de área e, conseqüentemente, acarreta um menor investimento com aquisição de terrenos e construção do sistema.

2.2.2 Sistemas Contínuos, Semicontínuos e Descontínuos

Os reatores que operam em regime de fluxo contínuo e semicontínuo são aqueles nos quais a introdução do substrato a ser tratado acontece de maneira contínua ou em semicontínua, de forma que o material digerido seja removido constante ou periodicamente. Esses processos produzem um fluxo de biogás mais homogêneo, permitindo a otimização dos sistemas de geração de energia (AUSTERMANN et al, 2007). Os sistemas contínuos são aptos para operar com distintos teores de sólidos totais, podendo operar tanto em via seca quanto em via úmida.

Os processos descontínuos são aqueles que operam em batelada, ou seja, operam com a introdução de certo montante de substrato por vez. Estes sistemas possuem um design simples e operam com maiores teores de sólidos, sendo aplicados para operação seca ou extrasseca, sem diluição do material. Entretanto, pelo fato destes reatores não possuírem um processo contínuo de introdução e extração de substrato, a produção de biogás também não ocorre de forma contínua.

Os sistemas de bateladas sequenciais são tecnologicamente mais simples, robustos e baratos, tendo como principais desvantagens a necessidade de uma maior área e uma menor produtividade de biogás. Entretanto, devido aos reatores serem completamente esvaziados ao final de cada processo, torna-se possível eliminar um dos principais problemas operacionais enfrentados em plantas de metanização da FORSU – o acúmulo de inertes no interior do reator (DE BAERE e MATTHEEUWS, 2008).

2.2.3 Metanização Úmida, Seca ou Extrasseca

A concentração média de umidade presente nos RSU varia de, aproximadamente, 50 a 80%. De maneira geral, os processos via úmida diluem o material a ser digerido até que o mesmo apresente uma concentração máxima de sólidos totais (ST) da ordem 15%, muito embora a maioria desses sistemas operem com concentrações de ST variando entre 3 a 7%. Os processos via seca operam com teores de ST superiores a 15%, chegando a 35%, enquanto os processos via extrasseca operam com teor de ST na faixa de 25 a 50%.

Os processos de via úmida são caracterizados pela adição de água ou efluente líquido proveniente do lodo digerido no sistema ao resíduo até a

obtenção do percentual de ST requerido pela tecnologia. Geralmente, utilizam reatores do tipo mistura completa, sendo a agitação do material realizada por agitadores mecânicos internos, recirculação via bombeamento do material em digestão ou pela injeção de biogás comprimido na base do reator. Um problema comum observado em reatores via úmida é a formação de uma capa flotante, denominada espuma, composta por plásticos e outros materiais de baixa densidade, que se acumulam no interior do reator, formando uma dura crosta acima do material em digestão. Essa crosta acarreta problemas operacionais, uma vez que pode danificar os agitadores mecânicos e comprometer a extração do biogás.

Outro problema observado em reatores via úmida é a sedimentação no seu interior de materiais inorgânicos com densidade superior ao lodo em digestão, tais como pedras, vidros, areias (AUSTERMANN et al., 2007), resultando em redução do volume útil do reator. Outro complicador nos sistemas em que há adição de efluente líquido proveniente da secagem do lodo digerido, é a elevação dos níveis de amônia, atingindo concentrações que podem inibir ou intoxicar o meio biológico. A adição de água nova ao resíduo a ser alimentado promove uma diluição na concentração de compostos tóxicos ou inibidores do processo biológico, porém acarreta custos, além de incrementar o volume de efluente líquido a ser tratado (VANDEVIVERE, 2002; OSTREM, 2004).

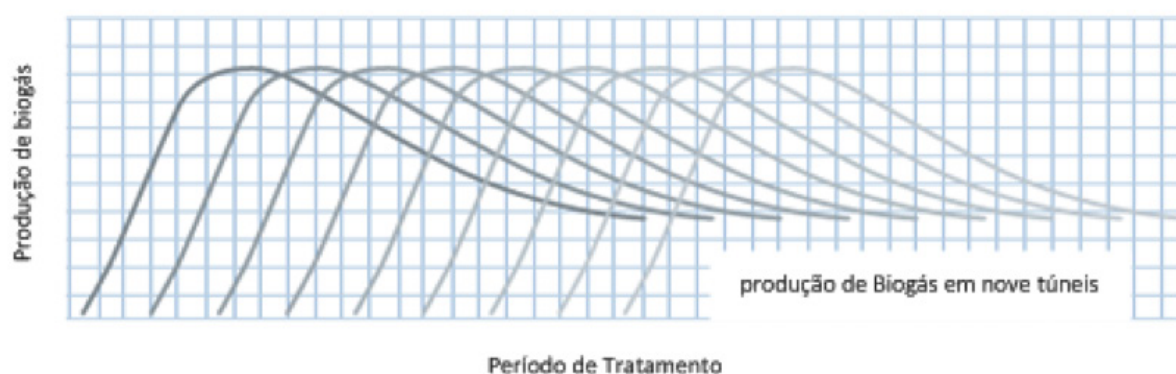
Segundo Kelleher (2007), os processos de pré-tratamento dos resíduos requeridos nos sistemas via úmida ocasionam uma maior perda de sólidos voláteis, o que diminui a produtividade de biogás no sistema. Devido à maior complexidade dos sistemas via úmida e da maior quantidade de equipamentos utilizados, seja no pré-tratamento ou no desaguamento do material digerido, esses sistemas tendem a necessitar de uma maior demanda interna da energia elétrica do que os sistemas via seca. Estudos indicam que os sistemas de desaguamento do material digerido podem ser responsáveis por até 30% do consumo energético total da planta (Frick & Pereira, 2013).

Processos via seca não diluem o material de entrada, mas comumente utilizam uma unidade para o condicionamento do resíduo, visando a sua inoculação, homogeneização e fluidificação antes de sua introdução no reator (AUSTERMANN et al., 2007), adicionando lodo da recirculação. Dada às características do material, geralmente utilizam bombas axiais a pistão com cilindros gêmeos de deslocamento, similares às utilizadas no bombeamento de concreto. Os sistemas via seca utilizam reatores do tipo mistura completa, fluxo pistão ou uma mescla dos dois, e geralmente produzem um menor volume de efluentes líquidos, requerendo, assim, instalações de menor porte e menos complexas para o desaguamento do material digerido e tratamento dos efluentes líquidos gerados, além de possuírem menor consumo energético.

Devido à possibilidade de aplicação de uma maior carga orgânica, os reatores via seca requerem menor volume do que os via úmida; entretanto, devido à maior densidade do material em digestão, o processo requer a utilização de equipamentos mais potentes e robustos (VANDEVIVERE et al., 2002).

Apesar das vantagens frente aos reatores via úmida, algumas plantas apresentam problemas operacionais devido, principalmente, à sedimentação de materiais impróprios no interior do reator, tais como pedras, vidros e areia. O principal problema apresentado neste tipo de tecnologia decorre do acúmulo de inertes no reator, que resulta em deficiências na homogeneização do material e criação de zonas mortas, acarretando em perda de capacidade de digestão, entupimento e problemas operacionais diversos.

Figura 3: Produção de biogás em sistemas de metanização extrasseca em túneis



Fonte: Adaptada de www.kompotec.de.

Já os sistemas extrassecos são reatores que operam com elevado teor de sólidos (35 a 50%) mas em operação descontínua, em regime de bateladas sequenciais, sendo a FORSU introduzida por pás carregadeiras em reatores do tipo túneis de metanização, também conhecido como sistemas garagem. Visando a continuidade de operação e, conseqüentemente, de produção de biogás, as plantas têm sido projetadas com quatro ou mais reatores, possibilitando a introdução e remoção de substrato de maneira sequencial e uma operação em estágios distintos de metanização. A figura a seguir permite visualizar a taxa de geração de biogás em um sistema operando com nove túneis.

A FORSU é geralmente misturada com composto orgânico antes de ser introduzida no túnel de metanização. O líquido gerado nos túneis é coletado e enviado a um tanque de estabilização. Uma vez introduzido o material, inicia-se uma aspersão de líquido proveniente do tanque de estabilização pela parte superior do túnel, de forma a ocorrer uma lixiviação do material em digestão e prover microrganismos metanogênicos ao mesmo, acelerando o processo de estabilização do material. A geração de líquido excedente não é reportada na literatura, mas verifica-se que esta geração varia de acordo com a tecnologia, sendo de 20 a 40% do total de entrada.

2.2.4 Sistemas de Único Estágio e Multiestágio

Nos reatores de único estágio, todas as etapas do processo de digestão anaeróbia (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) ocorrem simultaneamente em um único tanque de reação, de mistura completa. Entretanto, devido aos microrganismos metanogênicos serem mais sensíveis a mudanças no meio e possuem requerimentos metabólicos específicos, bem como uma taxa de crescimento menor do que os demais, os reatores devem ser gerenciados de forma a prover as condições ótimas a este grupo de microrganismos. Devido à taxa de crescimento mais acelerada dos demais microrganismos envolvidos no processo e à elevada produção de ácidos, pode ocorrer o processo denominado inibição por substrato, prejudicando o desenvolvimento dos microrganismos metanogênicos. De forma a otimizar cada uma das etapas do processo de metanização, foram desenvolvidas tecnologias que operam em processos multiestágio (AUSTERMANN et al., 2007).

Os sistemas multiestágio geralmente possuem dois reatores: no primeiro tanque de reação, as etapas hidrolíticas, acidogênica e acetogênica

são otimizadas; no segundo reator, otimiza-se a etapa metanogênica. Devido à possibilidade de um controle mais acurado nas distintas fases do processo biológico, os reatores multiestágio tendem a ter um ganho na produtividade de biogás e um melhor desempenho do processo de digestão anaeróbia como um todo.

Por outro lado, a operação de dois ou mais reatores em série acarreta uma maior complexidade operacional para manutenção das condições ótimas em todos os reatores. Essa operação mais complexa implica em custos de investimentos mais elevados, pela necessidade de equipamentos adicionais (bombas, reatores, etc.) e o requerimento de uma maior área para a instalação da unidade. Um ponto crítico é em relação à interdependência dos reatores, pois falhas em um deles podem acarretar desestabilização de todo o sistema de metanização (AUSTERMANN et al., 2007).

Os processos multiestágio são especialmente interessantes no tratamento de resíduos com elevado teor de fibras de celulose ou de outros compostos de difícil degradabilidade (VANDEVIVERE et al., 2002). Atualmente, a maioria dos sistemas contínuos e semicontínuos utilizam tecnologias de estágio único. Segundo De Baere e Mattheeuws (2008), a capacidade instalada de unidades de estágio único representa 93% da capacidade instalada total para tratamento de resíduos orgânicos. Segundo Vande vivere et al. (2002), a preferência por tecnologias de único estágio ocorre em função do seu design mais simplificado, maior robustez operacional e menores custos de investimentos.

2.3 Características Operacionais de uma Planta Industrial de Metanização da FORSU

Independente das configurações da tecnologia ou configuração do sistema de metanização empregado, uma planta industrial direcionada ao tratamento da FORSU deve ser constituída por inúmeros processos sequenciais, sejam eles manuais, mecânicos e biológicos, de forma a possibilitar a recuperação das principais frações que compõem o RSU – orgânica e inorgânica; contemplar processos específicos para tratamento e/ou condicionamento destas frações; promover a correta destinação dos materiais residuais da planta, que não são passíveis de tratamento e/ou reciclagem; além de dispor de processos para estabilização dos materiais resultantes do processo anaeróbio, em suas frações sólida e líquida; e por fim, instalações de controle ambiental para tratamento das emissões e odores decorrentes dos processos.

Estas unidades de tratamento integrado dos RSU são denominadas Plantas de Tratamento Mecânico Biológico ou Plantas TMB. De modo geral, o TMB não é considerado como uma tecnologia individual, mas 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.

Os processos de natureza mecânica dizem respeito a mecanismos de separação/triagem e redução de dimensão que, dispostos em diversas configurações, possibilitam a separação das frações orgânica e inorgânica (recicláveis, metais ferrosos, materiais caloríficos e rejeitos).

A fração orgânica será destinada, por sua vez, ao processo biológico subsequente, representado pelo sistema de tratamento anaeróbio que promoverá a degradação e estabilização da matéria orgânica com consequente geração de biogás.

O principal objetivo da utilização do TMB como um instrumento de gestão de resíduos consiste em minimizar o impacto ambiental associado à disposição final dos resíduos orgânicos, e obter valor adicional através da recuperação dos materiais recicláveis, bem como da obtenção de composto e de biogás. Atualmente, as metas estratégicas direcionadas às plantas de TMB dizem respeito à maximização do valor dos “subprodutos” obtidos nestas unidades por meio da otimização dos processos mecânicos-biológicos, visando a qualidade do composto orgânico final, dos materiais recicláveis e das frações recuperáveis para combustíveis (Combustível Derivado do Resíduo - CDR). Atenção tem sido dada, simultaneamente, na regulamentação aplicável à comercialização destes produtos, visando a consolidação de novos mercados e a ampliação da viabilidade econômica de plantas desta natureza, o que inclui a geração de energia a partir do biogás gerado no processo.

As plantas de TMB que utilizam de tecnologias de metanização podem ser divididas nas seguintes seções principais:

- » 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.

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 principais, sendo alocadas em cabines de triagem.

A classificação mecânica ou automática é realizada por meio de equipamentos de separação magnética, separadores por correntes de Foucault, separadores balísticos, mesas densimétricas, tromels, separadores ópticos, aspiradores de plástico, entre outras tecnologias, conforme estrutura da planta em questão.

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 (inorgânicos em geral), e que passa por uniformização de tamanho (trituração) para ser direcionado ao reator de metanização;
- » Os materiais recicláveis, que são classificados em função de sua composição (PET, PEAD, PEBD, plásticos mistos, aço, alumínio e papelão) e acondicionados para seu direcionamento à reciclagem e utilização como matéria-prima;
- » O material residual, composto pelos resíduos que não podem ser valorizados e são destinados ao acondicionamento para disposição final em aterros sanitários ou utilizados como CDR.

Esses sistemas ocorrem geralmente em galpões em que pressões negativas são mantidas de forma a minimizar impactos oriundos da geração de maus odores. Esses galpões possuem sistemas de coleta e direcionamento do ar ambiente a sistemas de desodorização, que integram as instalações de correção da contaminação ou enviados à compostagem.

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 (seco, úmido, estágio simples ou múltiplo, etc), conforme exemplificado anteriormente.

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, geralmente por prensas, centrífugas e desarenadores. A fração sólida é encaminhada a uma unidade de compostagem, e a fração líquida a estações de tratamento de efluentes (ETE) que integram as instalações de correção da contaminação.

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.

Este processo é realizado em uma instalação de compostagem em túneis ou galpões condicionados. A compostagem geralmente é forçada por meio de injeção de oxigênio, e o ar utilizado no processo geralmente vem das zonas de recepção e pré-tratamento de resíduos. Existem variações quanto aos sistemas de compostagem (disposição em trincheiras ou canaletas, revolvimento mecânico ou manual) que pode variar de acordo com a unidade em questão.

Após término do processo de compostagem controlada, o material resultante é colocado ao ar livre para maturação e posteriormente submetido a um processo de peneiramento e refino para remoção de eventuais materiais impróprios e inertes, de maneira a aumentar a qualidade do composto gerado, adequando sua utilização como condicionante e estabilizante 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, de forma a reduzir e/ou eliminar compostos indesejáveis ao sistema de recuperação energética. Entre as principais impurezas que demandam remoção estão o sulfeto de hidrogênio (H_2S), água (H_2O_{vapor}), siloxanos e partículas sólidas (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

A remoção do dióxido de carbono somente se faz necessária para utilização do biogás como gás veicular ou para injeção na linha de gás natural, com o objetivo de ampliar a concentração de metano próxima a 100% e, desta forma, aumentar o poder calorífico do biogás, equiparando-o ao gás natural.

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 (Combined Heat and Power – CHP). 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 diretamente a consumidores locais. 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) e o excedente está disponível para comercialização ou outros usos.

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, que pode ainda conter frações segregadas na fonte e pode representar até 60% do volume total do RSU introduzido no processo.

Na Europa, o condicionamento mais adequado dado a estes materiais é denominado empacotamento de “bala”, no qual os materiais são compactados e envolvidos com filme plástico em fardos de cerca de 1 x 1 x 1,50 metros. Após o enfardamento, as balas são direcionadas a um aterro específico, e tendem a resultar em um impacto ambiental mínimo uma vez que contém menos de 15% de material biodegradável (orgânico). Isso significa que as balas praticamente não emitem metano ou liberam chorume, dois dos principais efeitos negativos dos aterros tradicionais. Quando as áreas de disposição de balas são preenchidas, o local passa por uma revitalização da paisagem, e geralmente passa a se destinar ao uso recreativo.

Algumas alternativas em se utilizar este material como CDR estão sendo realizadas, sendo que sua viabilidade depende diretamente da qualidade do resíduo e do sistema de separação prévia. Geralmente, a remoção incompleta de vidros e metais prejudica a utilização destes rejeitos como CDR.

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.

As ETES de plantas de TMB são utilizadas para a remoção da carga poluidora dos efluentes líquidos gerados no processo de desaguamento do lodo digerido, que costuma apresentar elevadas concentrações de matéria orgânica e amônia. Geralmente essas unidades utilizam processos de nitrificação-desnitrificação seguidos por sedimentadores ou sistemas de ultrafiltração seguidos por osmose reversa. Algumas plantas conseguem destinar este material para utilização na agricultura, porém, nos casos em que as plantas estão longe das zonas rurais, os custos com o transporte do material inviabiliza essa operação.

Os sistemas de tratamento de odores são geralmente constituídos por uma etapa de tratamento químico via lavadores de gases (scrubbers), seguido de sistemas de tratamento biológico via biofiltros. Nessas unidades ocorre a remoção de elementos como o gás amônia e compostos orgânicos voláteis.

3

TECNOLOGIAS SECAS DE METANIZAÇÃO DA FORSU

Nesse estudo, serão avaliados as tecnologias via seco e via extrasseco, pois são referenciadas como os processos biológicos mais adequados para o tratamento da FORSU por serem mais estáveis e constituídos por sistemas mais robustos, que possuem menor consumo energético, geram menos efluente líquido e possuem um menor demanda de água em comparação com os processos úmidos. Nesse capítulo serão analisadas as principais tecnologias comerciais de metanização seca disponíveis no mercado europeu.

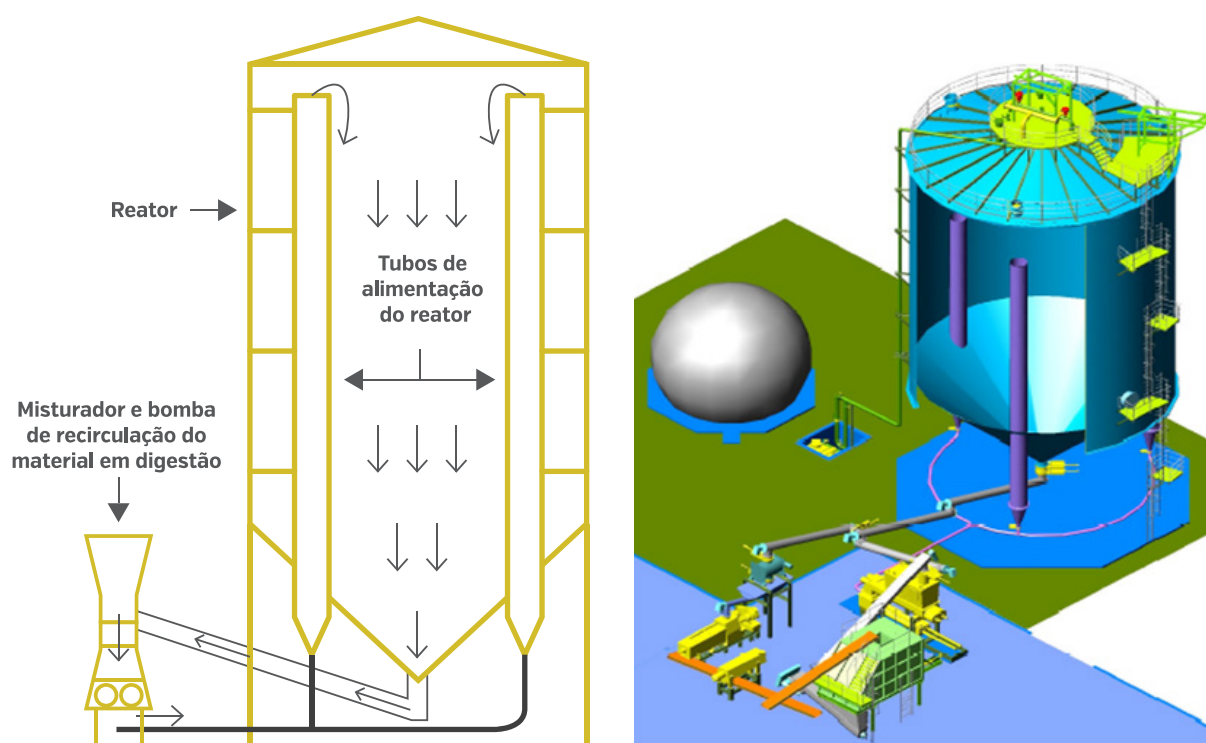
3.1 O Processo Dranco

A tecnologia Dranco é de propriedade da empresa belga fundada em 1988, Organic Waste Systems (OWS), que teve seu primeiro reator em escala-piloto construído em 1984, em Gent na Bélgica, e em 1992, em Brecht, também na Bélgica, foi construído o primeiro em escala industrial.

O sistema Dranco é um processo de digestão anaeróbia termofílico via seca. O reator é de único estágio, fluxo contínuo, vertical, de formato cilíndrico e fundo cônico, tendo seu design similar a um silo de armazenamento, conforme pode ser observado na Figura 4. Tal reator pode ser construído em concreto armado ou aço, aceita uma grande variedade de resíduos orgânicos e trabalha com teores de ST variando entre 15% e 40% na introdução.

Os resíduos de entrada são aquecidos via injeção de vapor, o que eleva sua temperatura a aproximadamente 50°C (INTERNATIONAL, 2005).

Figura 4: Modelos esquemáticos de um reator com a tecnologia Dranco



O processo de alimentação ocorre uma vez ao dia, via bombas similares às utilizadas no bombeamento de concreto, introduzindo o material na parte superior do reator e a extração pela base, promovendo um fluxo descendente do material. O sistema de mistura dispensa agitadores mecânicos, sendo realizado por recirculação do material em digestão, processo esse que ocorre geralmente de forma contínua. Durante esse processo, o resíduo a ser alimentado é misturado ao material em digestão em proporções de até de 6:1 (material digerido: resíduo fresco).

O tempo de detenção hidráulica varia de 20 a 30 dias e a produtividade de biogás entre 80 e 120 Nm³/t. O material extraído é desaguado via prensas a um teor de 50% de ST, sendo posteriormente estabilizado aerobicamente, por aproximadamente duas semanas e o líquido, com elevadas concentrações de matéria orgânica e amônia, necessita de tratamento posterior (INTERNATIONAL, 2005).

A Figura 5 e Figura 6 a seguir apresentam detalhes da tecnologia Dranco.

Figura 5: Reator Dranco, Container para motor de cogeração e gasômetro (A) e detalhe do sistema de extração (B).



Figura 6: Sistema de agitação do material em digestão



Fonte: Acervo Methanum.

Fonte: Acervo Methanum.

Na Tabela 3 são apresentados dados referentes à produção e consumo energético de duas plantas com tecnologia Dranco.

Na Tabela 4 é apresentado um resumo dos custos de construção e operação, requerimento de área, geração e consumo de energia elétrica e calor em diferentes escalas de plantas com tecnologia Dranco.

De acordo com informações obtidas na página web da empresa³, a capacidade média das plantas é de 53.522 t/ano, sendo Alicante, na Espanha, a de maior capacidade instalada (180.000 t/ano). Atualmente existem 31 plantas construídas ou em construção com esta tecnologia.

3: www.ows.be.

Tabela 3: Produção e consumo energético de plantas de metanização com tecnologia Dranco

PLANTA	CAPACIDADE	PRODUÇÃO DE BIOGÁS	GERAÇÃO DE ENERGIA	ENERGIA CONSUMIDA PELA PLANTA	ENERGIA EXCEDENTE	% ENERGIA EXCEDENTE
Kaiserslautern, Alemanha	20.000 t/ano FORM	158 m ³ /t	5,2 GWh/ano	0,7 GWh/ano	4,5 GWh/ano	86,6%
Aaberg, Suíça	11.000 t/ano Resíduo Orgânico	-	-	0,52 GWh/ano [elétrica] 0,72 GWh/ano [calor]	2,4 GWh/ano [elétrica] 0,4GWh/ano [calor]	78,3% 35,7%

FORM: Fração Orgânica de Resíduos Municipais, previamente separados na fonte geradora

Fonte: GOMES, 2010 [adaptado de INTERNATIONAL, 2005].

Tabela 4: Custos de construção e de operação, requerimento de área e geração e consumo de energia elétrica e calor de plantas em diferentes escalas com tecnologia Dranco

PARÂMETRO	UNIDADE	CAPACIDADE (T/ANO)				
		5.000	10.000	25.000	50.000	100.000
Investimento	Milhões de €	9	12	15	20	30
	€ / kg	657	438	219	146	110
Custos operacionais	€ / t	40	20	17	13	10
Requerimento de área	m ²	3.000	4.000	7.000	10.000	15.000
Produção de eletricidade	kWh/t	225	225	225	225	225
Eletricidade excedente	kWh/t	140	140	145	150	150
% Eletricidade excedente	%	62%	62%	64%	67%	67%
Produção de calor	kWh/t	300	300	300	300	300
Calor excedente	kWh/t	270	270	270	270	270
% Calor excedente	%	90%	90%	90%	90%	90%

Fonte: GOMES, 2010 [adaptado de AUSTERMANN et al., 2007].

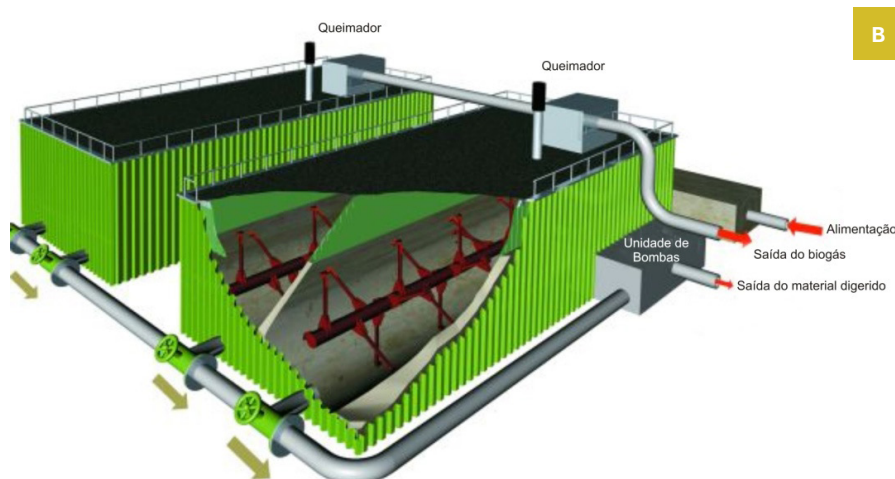
3.2 O Processo Axpo Kompogas

O processo Kompogas atualmente é de propriedade da Axpo, da Suíça. A tecnologia é licenciada em diversas partes do mundo, inclusive no Brasil, pela empresa alemã Kuttner. Teve seu primeiro reator em escala-piloto construído em 1989, em Rümlang, Suíça, e em 1994, em Bachenbülach, também na Suíça, foi construído o primeiro em escala industrial (SCHMID, 2008).

O sistema Kompogas é um processo de digestão anaeróbia via seca, majoritariamente operado na faixa termofílica (55–60°C). O reator é de único estágio, fluxo pistão com alimentação semicontínua, horizontal de formato retangular e fundo cilíndrico ou totalmente cilíndrico, construído em concreto armado ou aço (Figura 7).

O resíduo que alimenta o reator, após ser triado e triturado, é armazenado em um tanque intermediário por dois dias, no qual é aquecido e o teor de matéria seca ajustado a 28% com a adição do efluente líquido do processo de desaguamento do lodo digerido. Desse tanque, o material é direcionado ao reator com o auxílio de uma bomba de pistão. O material digerido é desaguado via prensas ou centrífugas até atingir um teor de matéria seca de 50%, sendo que o sólido resultante necessita ser estabilizado aerobicamente, por aproximadamente duas semanas e o líquido, com elevadas concentrações de matéria orgânica e amônia, necessita de tratamento posterior. A gestão do material digerido e do efluente do processo de desaguamento varia de unidade para unidade (INTERNATIONAL, 2005).

Figura 7: Na figura [A] um detalhe do sistema de agitação de um dos reatores construídos no Ecoparque de La Rioja e na figura [B] é apresentado um modelo esquemático de um reator com tecnologia Kompogas.



Fonte: [A] BARCO [2007]; [B] adaptada de <http://www.technischweekblad.nl/nog-enorm-potentieel-voor-energie-uit-78305.lynkx>.

Em plantas de menor escala são utilizados reatores pré-fabricados em aço, com dimensões padrão de 25 m de comprimento e 4m de diâmetro. Para unidades de maior capacidade, os reatores são construídos em concreto armado. A agitação do material em digestão é realizada pela rotação de pás fixadas transversalmente a um único eixo longitudinal ao reator (Figura 8).

Figura 8: Detalhe dos motores do sistema de agitação longitudinal



Fonte: Acervo Methanum.

Projetado especificamente para FORSU, os reatores com tecnologia Kompogas podem trabalhar também com resíduos de poda, de indústrias processadoras de alimentos, entre outros. Em termos de área, uma planta de 50.000t/ano necessita de aproximadamente 12.000m² (INTERNATIONAL, 2005).

A produção média esperada de biogás para plantas com tecnologia Kompogas é de 100 Nm³/t de resíduos orgânicos e 150 Nm³/t de resíduos com elevado teor de restos alimentares. A utilização do biogás varia de acordo com a unidade. Na planta de Otelfingen, na Suíça, o biogás é purificado – o processo de purificação foi desenvolvido pela Kompogas (INTERNATIONAL, 2005) – e utilizado como GNV em carros e caminhões.

Na Tabela 5 são apresentados dados sobre o consumo e geração de energia em duas plantas com tecnologia Kompogas.

De acordo com informações da empresa⁴, a capacidade média das plantas com tecnologia Kompogas é de 27.885 t/ano, sendo a planta de Doha, no Qatar, a de maior capacidade (274.000 t/ano). Atualmente, existem 74 plantas construídas com a tecnologia Kompogas.

A tecnologia Kompogas é a única que possui representante comercial no Brasil, sendo representada desde 2009 pela Küttner Brasil.

4: www.kompogas.ch

Tabela 5: Dados de consumo e geração de energia em plantas com tecnologia Kompogas

PLANTA	CAPACIDADE	PRODUÇÃO DE BIOGÁS	GERAÇÃO DE ENERGIA	ENERGIA CONSUMIDA PELA PLANTA	ENERGIA EXCEDENTE	% ENERGIA EXCEDENTE
Passau Hellersberg	39.000 t/ano	115 m ³ /t	9,1 GWh/ano	1,6 GWh/ano	7,5 GWh/ano	78,7%
Unidade modelo	10.000 t/ano	105 m ³ /t	2,1 GWh/ano	0,3 GWh/ano	1,8 GWh/ano [elétrica]	83,3%

Fonte: GOMES, 2010 [adaptado de INTERNATIONAL, 2005].

3.3 O Processo Valorga

O processo Valorga foi originalmente desenvolvido na França com base na patente registrada por Ducellier G. e Isman M., sendo, posteriormente, adquirido pela empresa Steinmuller Valorga Sarl, subsidiária da empresa alemã Steinmuller Rompf Wassertechnik GmbH. Recentemente, a tecnologia foi adquirida pela empresa espanhola Urbaser. O processo Valorga foi inicialmente projetado para tratar resíduos orgânicos, mas, posteriormente, foi adaptado para o tratamento da FORSU (BARCELOS *et al.*, 2004).

O sistema Valorga é um processo de digestão anaeróbia via seca, majoritariamente operado na faixa mesofílica, sendo o reator de único estágio, fluxo semicontínuo, vertical, de formato cilíndrico, construído em concreto armado. O sistema de alimentação é realizado de forma semicontínua com a introdução do material via bombas similares às utilizadas para bombeamento de concreto. A extração do lodo se dá por um processo de abertura e fechamento de válvulas que, em função da coluna de lodo, exerce uma pressão que propicia a extração do material sem a necessidade da utilização de bombas. Como sistema auxiliar, uma bomba de pistão pode ser utilizada nesse processo.

No interior do reator existe uma parede com um comprimento de aproximadamente 2/3 do diâmetro do reator, separando a região de introdução da região de extração do lodo (Figura 9). Isso propicia ao material ser digerido em um sistema de fluxo pistão (INTERNATIONAL, 2005). O material digerido é desaguado via prensas ou centrífugas até atingir um teor de matéria seca de 50%, sendo que o sólido resultante necessita ser estabilizado aerobicamente, por aproximadamente duas semanas e o líquido, com elevadas concentrações de matéria orgânica e amônia, necessita de tratamento posterior.

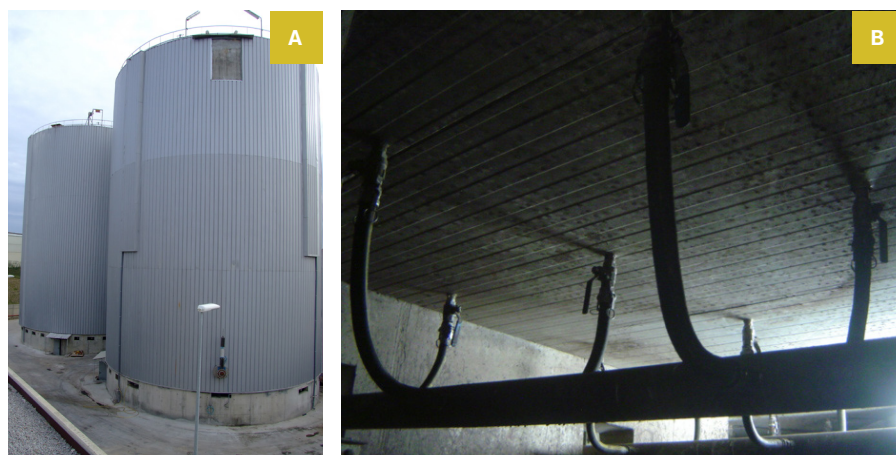
Figura 9: Modelo esquemático de um reator com tecnologia Valorga



Fonte: GOMES, 2010
[Adaptada de <http://www.valorgainternational.fr>]

A agitação do material em digestão é realizada pela injeção de biogás comprimido (6 a 8 bar) através de orifícios localizados na base do reator, não existindo elementos mecânicos em seu interior (Figura 10). A manutenção da temperatura ocorre via injeção de vapor d'água aquecido no material afluente. Esses reatores operam com um teor de ST da ordem de 20 a 30%, um tempo de detenção hidráulica variando entre 18 e 30 dias, com taxa de produção de biogás variando entre 82 e 106 m³ por tonelada de FORSU alimentada e consomem cerca de 25% da energia produzida (INTERNATIONAL, 2005).

Figura 10: Reatores Valorga [1] e detalhe do sistema de agitação posicionado na parte inferior dos reatores [2].



Fonte: Acervo Methanum

5: www.valorgainternational.fr

Tabela 6: Balanço Energético de plantas de metanização com tecnologia Valorga

De acordo com informações da empresa⁵, a capacidade média das plantas com tecnologia Valorga é de 127.652 t/ano, sendo a planta de Fos Sur Mer, na França, a de maior capacidade (497.600 t/ano). Atualmente existem 31 plantas construídas ou em construção, no mundo com tecnologia Valorga.

A Tabela 6 apresenta dados referentes à geração e consumo de energia de plantas com tecnologia Valorga.

PLANTA	CAPACIDADE	PRODUÇÃO DE BIOGÁS	GERAÇÃO DE ENERGIA	ENERGIA CONSUMIDA PELA PLANTA	ENERGIA EXCEDENTE	% ENERGIA EXCEDENTE
Geneva, Suíça (mesofílica)	13.200 t/ano Resíduo orgânico e de poda	100 e 120 m ³ /t	0,435 GWh/ano [elétrica]	0,275 GWh/ano [elétrica]	0,16 GWh/ano [elétrica]	36,8%
Tilburg, Holanda	52.000 t/ano FORM e poda	82 m ³ /t	18 GWh/ano	3,3 GWh/ano	14,7 GWh/ano [elétrica]	81,7%

Fonte: GOMES, 2010 [Adaptado de INTERNATIONAL, 2008].

Segundo Caddet (2001), a unidade de Tilburg foi instalada em 1991 para atender a 10 cidades do sul da Holanda e foi projetada para tratar 52.000 t/ano de FORSU e poda verde. Entre os anos de 1994 a 1999 tratou em média 40.000 t/ano, operando com cerca de 80% de sua capacidade de projeto. A produtividade média de biogás no período foi de 75 Nm³ por tonelada de resíduo processado, com uma concentração de metano da ordem de 56%.

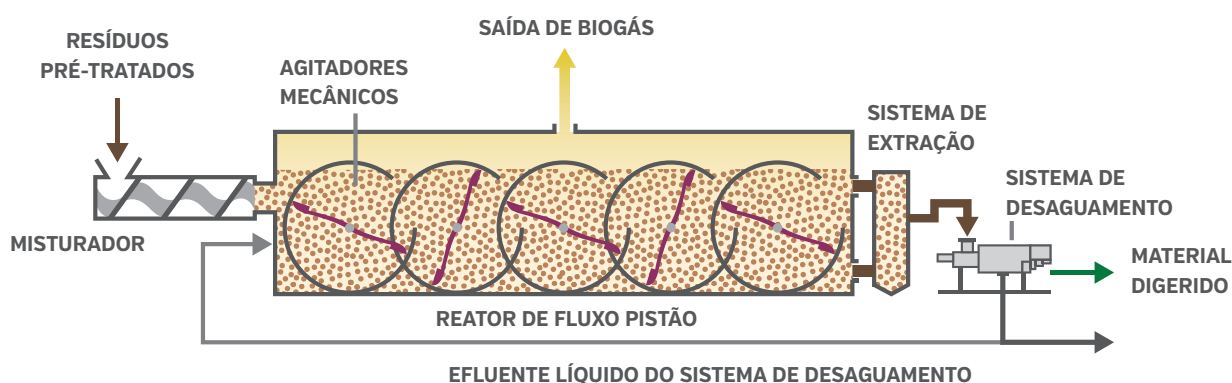
O biogás produzido na unidade é purificado a biometano e lançado na rede de gás natural (GN) da região. Do biogás produzido na unidade, são utilizados 14% para suprir suas necessidades internas de calor e 18% para suprir a demanda por energia elétrica. Com uma produção anual de biometano de 2.000.000 Nm³, a unidade lança na rede 1.360.000 Nm³/ano. A geração de resíduos de planta corresponde a 15% do total em peso de resíduos processados, sendo os tais resíduos dispostos em um aterro sanitário.

3.4 O Processo Laran (Ex-Linde-BRV)

O processo Laran foi originalmente desenvolvido pela empresa Linde BRV Biowaste Technologies, atualmente é propriedade da austríaca STRABAG Umwelanlagen GmbH. Segundo Strabag (2010a), a tecnologia Laran teve seu primeiro reator em escala-piloto construído em 1994, em Baar, na Suíça, e, em 1996, o primeiro em escala industrial, em Sagard, Alemanha.

O sistema Laran, originalmente conhecido como Linde-BRV, é um processo de digestão anaeróbia via seca, que pode operar nas faixas termofílica ou mesofílica, com reator de único estágio, fluxo pistão semicontínuo, horizontal de formato retangular, construído em concreto armado (Figura 11). Pode ser alimentado com diversos tipos de resíduos orgânicos, aceitando teores de matéria seca entre 15% a 45% (STRABAG, 2010b).

Figura 11: Modelo esquemático de um reator com tecnologia Laran



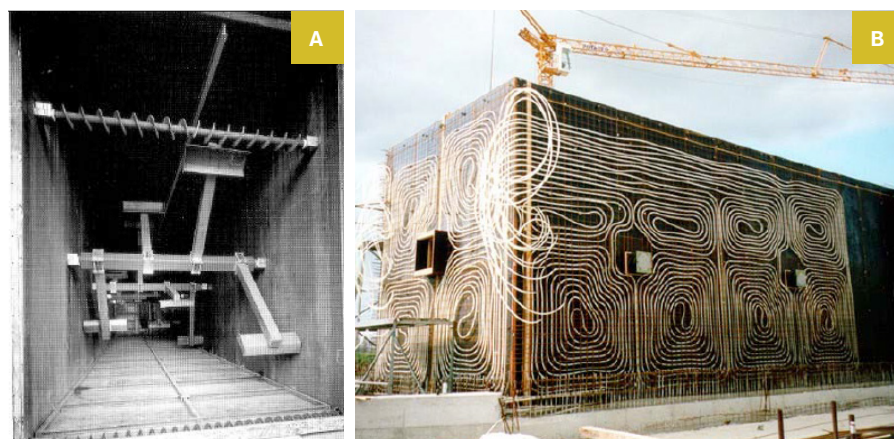
Fonte: GOMES, 2010
[Adaptado de STRABAG, 2010b].

O resíduo é introduzido no reator por uma unidade compacta de alimentação. O material digerido é extraído com o auxílio de uma bomba e tanque de vácuo, podendo ser recirculado ou desidratado por uma prensa, seguida por uma centrífuga, sendo geralmente estabilizado em túneis de compostagem aeróbia. A produção de biogás esperada no reator Laran é da ordem de 100 Nm³ por tonelada de FORSU alimentada.

Na Figura 12 são apresentados detalhes de reatores com tecnologia Laran. À esquerda podem ser observados os agitadores mecânicos do reator da cidade de Baar na Suíça; e a direita está em detalhe o sistema de aquecimento de um reator, via serpentinas instaladas nas paredes.

Figura 12: Detalhes de reatores com tecnologia Laran. Imagem dos agitadores mecânicos do reator da cidade de Baar, Suíça [A], e detalhe do sistema de aquecimento de um reator, via serpentinas instaladas nas paredes [B].

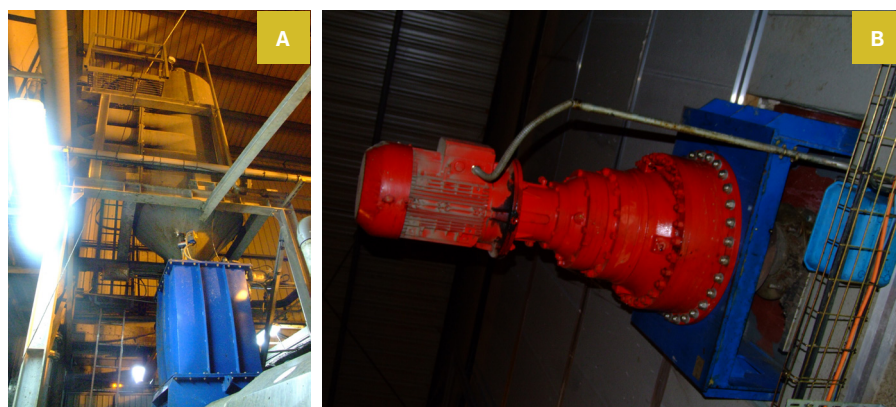
Fonte: EDELMANN e ENGELI, 2005 [A] e CHRZASTEK, 2009 [B]



O sistema Laran trata diversos tipos de resíduos com elevado teor de sólidos, aceitando resíduos orgânicos de poda, agrícolas, de indústrias, além de FOR-SU. O processo de agitação é realizado com o auxílio de pás rotatórias perpendiculares às paredes laterais do reator, fixados em eixos perpendiculares ao fluxo do material em digestão. Esse sistema evita a formação de espuma e sedimentação de inertes. Um mecanismo de piso móvel auxilia no transporte e retirada da massa digerida (STRABAG2, 2010). Devido ao registro de patente do reator cilíndrico da Kompogas, esse sistema foi desenvolvido com o formato retangular, o que impossibilitou a utilização do eixo longitudinal para fixação dos agitadores mecânicos (EDELMANNE ENGELI, 2005).

A Figura 13 detalha o complexo sistema de extração da tecnologia, bem como o sistema de agitação por eixos transversais.

Figura 13: Detalhe do sistema extração tecnologia Laran a vácuo (A) e sistema de agitação por eixos transversais (B)



Fonte: Acervo Methanum

Na Tabela 7 são apresentados dados sobre o consumo energético e produção de biogás de algumas plantas com tecnologia Laran.

De acordo com informações de Strabag⁶ (2010), a capacidade média das plantas com tecnologia Laran é de 49.132 t/ano, sendo a planta de Valladolid, na Espanha, a de maior capacidade (200.000 t/ano). Em 2008 existiam 21 plantas construídas ou em construção com essa tecnologia no mundo.

Tabela 7: Produção de biogás e energia em plantas com tecnologia Laran

PLANTA	CAPACIDADE	PRODUÇÃO DE BIOGÁS	GERAÇÃO DE ENERGIA	ENERGIA CONSUMIDA PELA PLANTA	ENERGIA EXCEDENTE	% ENERGIA EXCEDENTE
Baar, Suíça	18.000 t/ano Resíduo orgânico e de poda	85 m ³ /t	0,64 GWh/ano [elétrica]	-	-	-
Heppenheim, Alemanha	33.000 t/ano FORM, poda e industrial	-	5,7 GWh/ano [elétrica] 8,8 GWh/ano [elétrica]	1,7 GWh/ano	4,0 GWh/ano [elétrica]	70,2%
Lemgo, Alemanha	40.000 t/ano Resíduo orgânico [termofílica]	102 m ³ /t	6 GWh/ano	-	-	-

Fonte: GOMES, 2010.

6: Os dados apresentados se referem ao ano de 2008, por ausência de informação mais atualizada disponibilizada pela empresa.

3.5 O sistema de garagem [Túneis de Metanização]

O sistema de metanização tipo garagem se caracteriza pela sua construção em forma de túneis, ou garagens, operando em bateladas sequenciais, ou seja, os túneis são sequencialmente abertos, esvaziados e alimentados com FORSU. Trata-se de um processo de digestão anaeróbia via extrasseca, operado na faixa mesofílica, sendo o reator disposto na horizontal, de formato retangular, construído geralmente em concreto armado.

O sistema de alimentação e extração é realizado via pá carregadeira. O resíduo permanece no interior do reator pelo período total de metanização. Como sistema auxiliar, realiza-se a recirculação do lixiviado, que é direcionado a um reator de líquido para posterior reintrodução no processo, via aspersão no material em digestão. No interior dos túneis de metanização não existe sistema de agitação, sendo o processo otimizado com a recirculação do lixiviado.

Terminado o processo de metanização, ar ambiente é injetado no túnel reator de forma a eliminar o metano presente, minimizando riscos de explosão durante a abertura do reator para a retirada do material digerido. Após a extração, o material digerido é encaminhado para compostagem, onde o processo de estabilização é finalizado.

O grande diferencial deste sistema é a possibilidade de utilização de resíduo com elevado teor de impróprios (plásticos, vidros, madeira pedras e outras). Devido ao fato do reator ser continuamente aberto para remoção do material digerido, não há possibilidade de acúmulo de impróprios no seu interior, fato que ocorre com frequência nas tecnologias de fluxo pistão e prejudica o funcionamento.

Existem três tecnologias de metanização extrasseca em estágio comercial na Europa, sendo todas elas bastante similares, com pequenas modificações, as quais serão apresentadas nos itens a seguir.

3.5.1 O processo Kompoferm Plus

O processo Kompoferm Plus (EGGERSMANN, 2013) foi desenvolvido na Alemanha pela empresa Eggersmann Anlagenbau GmbH & Co. KG. e foi inicialmente projetado para tratar resíduos agroindustriais, sendo, atualmente, comercializado para o tratamento da FORSU. A primeira planta da tecnologia foi instalada em 2007.

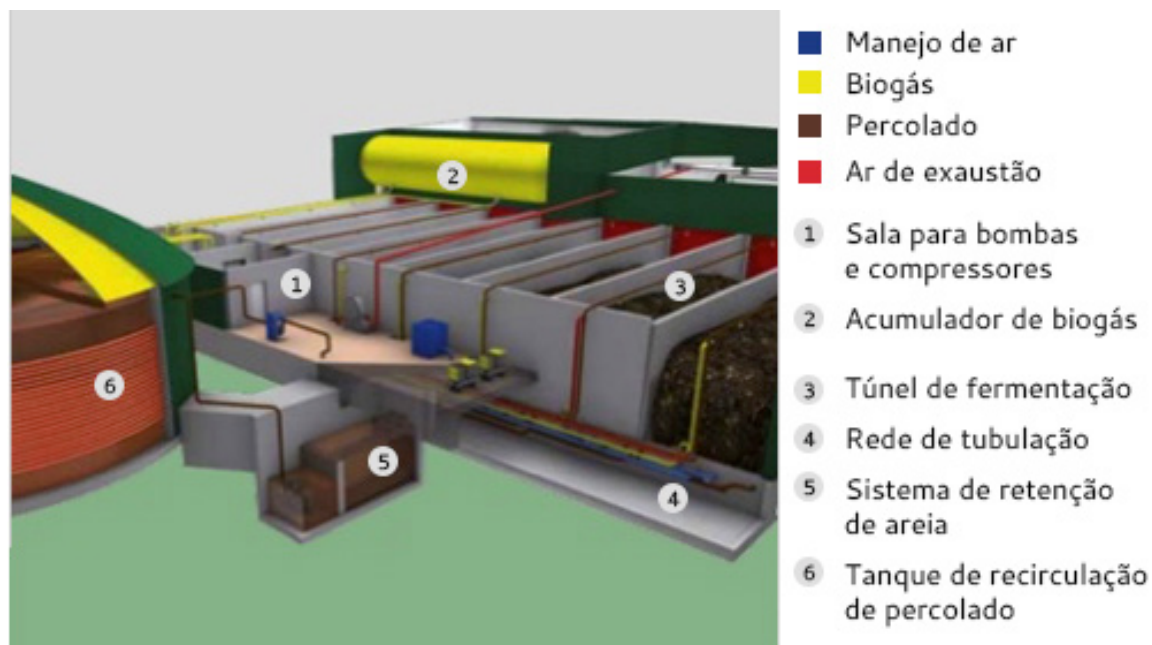
A Eggersmann estabeleceu parceria com a empresa espanhola Masias Recycling S.L. para a comercialização da tecnologia. A Masias por sua vez esteve presente no Brasil por meio de uma parceria estabelecida com a empresa Envirotec – Environmental Technology, porém esta parceria foi desfeita.

As diferenças do processo Kompoferm Plus são as seguintes (EGGERSMANN, 2013):

- >> Utilização de grade lateral para auxiliar na drenagem do lixiviado;
- >> Canaletas ao longo de todo o perímetro do reator para coleta do lixiviado;
- >> Introdução de ar pela base do reator ao final do processo de degradação anaeróbia, a fim de promover uma secagem prévia do material antes de sua remoção;

Os túneis possuem porta inteiriça, com abertura lateral.

Figura 14: Modelo esquemático de uma unidade de metanização com tecnologia Kompoferm Plus



Fonte: Adaptado de EGGERSMANN, 2013.

Figura 15: Detalhe da porta dos reatores e sua forma de abertura lateral [A] e imagem do interior do reator, onde pode ser vista a grade e o sistema de injeção de ar [B].



Fonte: Acervo Methanum

3.5.2 O Processo Bekon Dry Cycle Fermenter

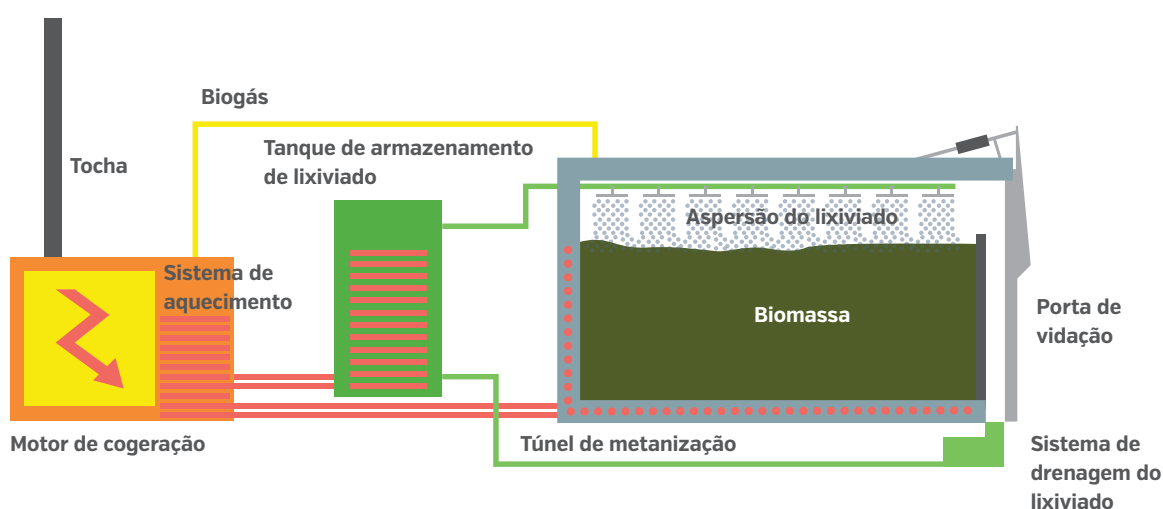
O processo Bekon Dry Cycle Fermenter foi desenvolvido na Alemanha pela empresa Bekon Energy Technologies GmbH & Co. KG e também foi inicialmente projetado para tratar resíduos agroindustriais, sendo, atualmente, comercializado para o tratamento da FORSU (BEKON, 2012). A primeira planta foi instalada em 2007.

As diferenças dos reatores em túneis desenvolvidos com processo Bekon são as seguintes:

Figura 16: Modelo esquemático de uma unidade de metanização com tecnologia Bekon Dry Cycle Fermenter

- >> Canaletas frontais, transversal ao túnel de metanização, para coleta do lixiviado;
- >> Introdução de ar pelas laterais;
- >> Aquecimento do piso;
- >> Não utiliza gasômetro para acumulação do biogás;
- >> Os túneis possuem porta inteiriça, com abertura para cima.

A Figura 16 e Figura 17 apresentam detalhes dos reatores em túneis com tecnologia Bekon (BEKON, 2012).



Fonte: <http://www.bekon.eu/>

Figura 17: Detalhe da porta dos reatores e a forma de abertura [A] e tanque de recirculação de lixiviado [B]



Fonte: <http://www.bekon.eu/> [a esq.] | Acervo Methanum [a dir.]

3.5.3 O Processo BIOferm System

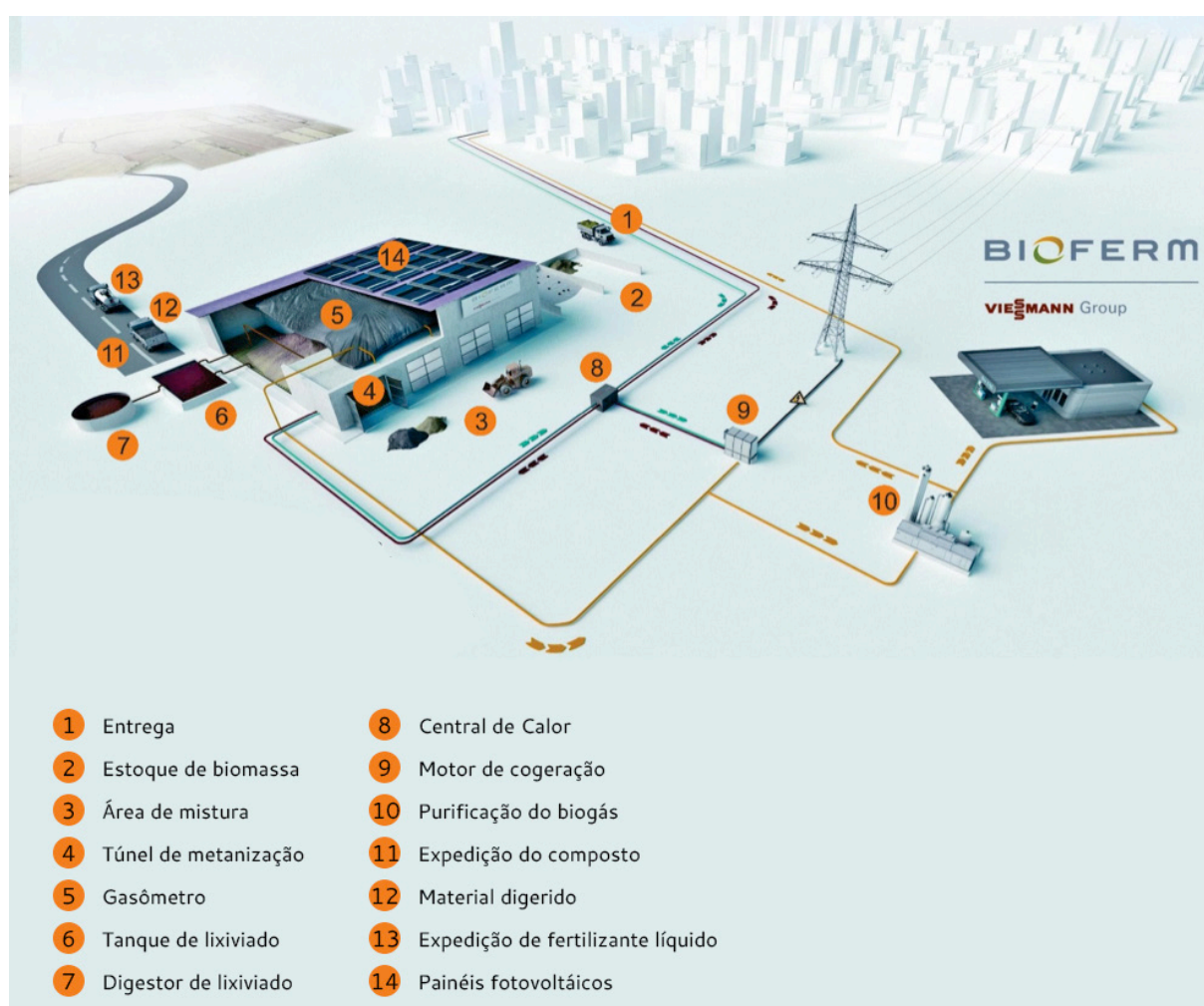
O processo BIOferm System foi desenvolvido na Alemanha pela empresa Viessmann Werke GmbH & Co. KG e, assim como os supracitados, foi inicialmente projetado para tratar resíduos agroindustriais, sendo, atualmente, comercializado para o tratamento da FORSU (BIOFERM, 2013). A primeira planta foi instalada em 2006.

As diferenças do processo de metanização em túneis desenvolvido pela BIOferm são as seguintes:

- >> Canaletas frontal, transversal ao reator, para coleta do líquido;
- >> Introdução de ar pelas laterais;
- >> Utiliza gasômetro para acumulação do biogás;
- >> Os reatores possuem porta bipartida, com abertura lateral.

Figura 18: Modelo esquemático de uma unidade de metanização com tecnologia BIOferm System

A Figura 18 e Figura 19 apresentam detalhes dos túneis com a tecnologia BIOferm System (BIOFERM, 2013).



Fonte: Adaptado de Bioferm – Viessmann Group

Figura 19: Detalhe da porta dos túneis e forma de abertura lateral.



Fonte: Acervo Methanum

3.6 Análise comparativa das tecnologias de metanização seca e extrasseca

A descrição das tecnologias de metanização seca e extrasseca apresentou as principais diferenças técnicas e condicionantes operacionais que prevalecem entre os principais fornecedores atualmente disponíveis no mercado europeu. A Tabela 8 apresentada na sequência sistematiza estas informações.

Tabela 8: Condicionantes operacionais das tecnologias de metanização seca e extrasseca da FORSU

PROCESSO / TECNOLOGIA	CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS
Processo Dranco	<p>Pontos Fortes</p> <ul style="list-style-type: none"> » Agitação via recirculação por bombas hidráulicas » Inexistência de elementos internos ao reator, reduzindo problemas e demanda de manutenção » Existência de departamento de pesquisa e desenvolvimento competente, ativo em publicações e melhorias de processo
	<p>Pontos Fracos</p> <ul style="list-style-type: none"> » Necessidade de correção do teor de matéria seca com adição de insumos que necessitam ser adquiridos (normalmente terras diatomáceas) » Necessidade de constante recirculação do material em digestão para impedir a sedimentação dos mesmos » Sistema de introdução do material via bombas do tipo pistão, que necessitam limpeza manual diária » Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento

PROCESSO / TECNOLOGIA	CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS
Processo Kompogas	<p>Pontos Fortes</p> <ul style="list-style-type: none"> » Sistema de agitação eficiente, apesar da presença de elementos mecânicos internos » Experiência no mercado » Experiência com diferentes tipos de substratos
	<p>Pontos Fracos</p> <ul style="list-style-type: none"> » Sistema de agitação mecânico e interno ao reator, sendo que a manutenção dos mesmos requerem a interrupção do processo » Possibilidades de falhas no sistema de extração, sendo necessário um procedimento manual de desobstrução da tubulação » Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento
Processo Valorga	<p>Pontos Fortes</p> <ul style="list-style-type: none"> » Engenharia do reator permite a instalação de plantas com elevada capacidade instalada » Agitação pneumática, sem elementos mecânicos » Maior simplicidade construtiva que as tecnologias secas tradicionais
	<p>Pontos Fracos</p> <ul style="list-style-type: none"> » Sistema de agitação via injeção de biogás comprimido na parte inferior, demandando limpeza manual diária para desobstrução dos canais de injeção » Necessidade de constante recirculação do material em digestão, para impedir a sedimentação dos mesmos » Sistema de introdução do material via bombas do tipo pistão, que necessitam limpeza manual diária » Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento
Processo Laran	<p>Pontos Fortes</p> <ul style="list-style-type: none"> » Sistema de extração eficiente » Experiência no mercado
	<p>Pontos Fracos</p> <ul style="list-style-type: none"> » Sistema de agitação mecânico e interno ao reator, sendo que a manutenção dos mesmos requerem interrupção do processo » Sistema de extração por bomba de vácuo, necessitando tanques e equipamentos adicionais » Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento
Processo Kompoferm Plus	<p>Pontos Fortes</p> <ul style="list-style-type: none"> » Índices de desempenho comprovados em escala real » Robustez do processo biológico » Suporta maiores teores de impróprios se comparada com outras tecnologias » Introdução de ar pela base do reator ao final do processo de degradação anaeróbia, a fim de promover uma secagem prévia do material antes de sua remoção » Possuem porta inteiriça facilitando a vedação » Utilização de grade lateral e canaletas ao longo dos túneis para auxiliar na drenagem do lixiviado
	<p>Pontos Fracos</p> <ul style="list-style-type: none"> » As grades laterais tendem a colmatar ao longo do tempo, prejudicando o fluxo do lixiviado, sendo necessário realizar a limpeza periódica das mesmas » Emissões fugitivas de metano

PROCESSO / TECNOLOGIA	CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS
Processo Bekon Dry Cicle Fermenter	Pontos Fortes <ul style="list-style-type: none"> » Índices de desempenho comprovados em escala real » Robustez do processo biológico » Suporta elevado índice de impróprios » Aquecimento do piso » Introdução de ar pelas laterais » Os túneis possuem porta inteiriça, com abertura para cima, evitando acidentes » Não utiliza gasômetro para acumulação do biogás, reduzindo custos da instalação
	Pontos Fracos <ul style="list-style-type: none"> » Deficiência no processo de aeração do material » Emissões fugitivas de metano
Processo BIOferm System	Pontos Fortes <ul style="list-style-type: none"> » Índices de desempenho comprovados em escala real » Robustez do processo biológico » Suporta elevado índice de impróprios » Canaletas, frontal e transversal ao reator, para coleta do lixiviado
	Pontos Fracos <ul style="list-style-type: none"> » Deficiência no processo de aeração do material » Emissões fugitivas de metano

Fonte: Methanum

4

O ESTADO DA ARTE DO TRATAMENTO DA FORSU VIA METANIZAÇÃO NA EUROPA

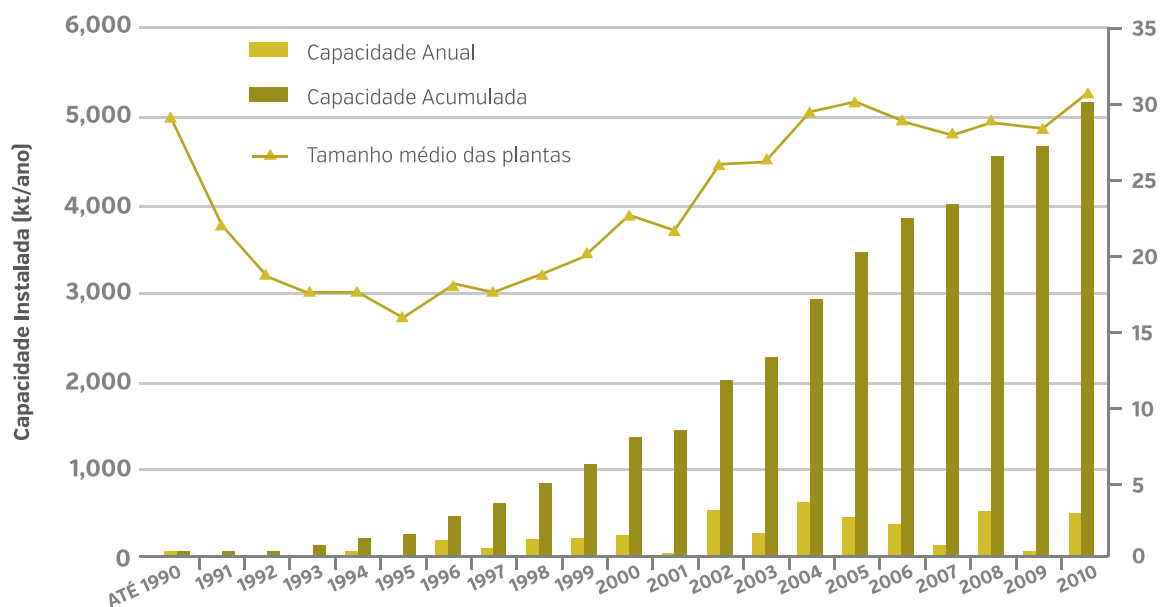
A utilização de processos de metanização para tratamento de resíduos orgânicos pode ser considerada como a maior evolução europeia na gestão de resíduos durante as duas últimas décadas, marcadas pela expansão da tecnologia para a valorização da FORSU, particularmente nos últimos 10 anos (DE BAERE e MATTHEEUWS, 2008). Atualmente, essas tecnologias 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.

Segundo Scuh (2008), as primeiras plantas demonstrativas das tecnologias de metanização seca atualmente disponíveis no mercado foram instaladas em 1984 – a primeira unidade foi construída na cidade de Gent, na Bélgica, em 1984, com tecnologia Dranco. Posteriormente, em 1988, na cidade de La Buisse, na França, foi construída a primeira planta com tecnologia Valorga.

Em 1990 a Europa dispunha de apenas três plantas industriais para a metanização de resíduos orgânicos, provendo uma capacidade instalada de 87.000t/ano (DE BAERE e MATTHEEUWS, 2008). Entretanto, seguiu-se duas décadas que representaram a consolidação da metanização na Europa, que em 2010 já contabilizava 171 plantas, atingindo a capacidade total instalada de 5.204.000 t/ano, o que representou um acréscimo de quase 6.000% em um período de 20 anos.

Entre os anos de 1991 e 1995, observou-se um incremento anual de 38.800 t/ano na capacidade instalada; entre 1996 a 2000 esse aumento foi de 223.500 t/ano; e entre 2001 a 2005 – quando ocorreu o pico no incremento anual da capacidade instalada – foi alcançada a marca de 415.590 t/ano.

No período entre 2006 e 2010, o incremento anual foi de 345.540 t/ano, sendo construídas 11 plantas a cada ano, com uma capacidade média de tratamento de 31.413 t/ano. Os autores ressaltam que, nesse estudo, foram consideradas apenas as plantas com capacidade de tratamento acima de 3.000 t/ano e com processamento mínimo de 10% de RSU (DE BAERE e MATTHEEUWS, 2008). A Figura 20 apresenta um gráfico com a evolução na capacidade instalada europeia entre os anos 1990 e 2010.

Figura 20: Evolução da capacidade instalada das plantas de metanização de resíduos orgânicos na Europa.

Fonte: Adaptada de DE BAERE e MATTHEEUWS (2008).

Segundo De Baere e Mattheeuws (2008), em 2008 a Alemanha liderava como país europeu com a maior capacidade instalada de metanização da FORSU, possuindo 69 unidades, que podem processar 1.531.555 t/ano com um porte médio de 22.196 t/ano. Em segundo lugar está a Espanha, com 21 plantas, perfazendo uma capacidade instalada é de 1.319.000 t/ano, com unidades cuja capacidade instalada média de 67.900 t/ano. A instalação de unidades de maior porte é observada em países como França, Inglaterra e Espanha, devido a uma menor eficiência no processo de segregação dos resíduos na fonte geradora (DE BAERE e MATTHEEUWS, 2008).

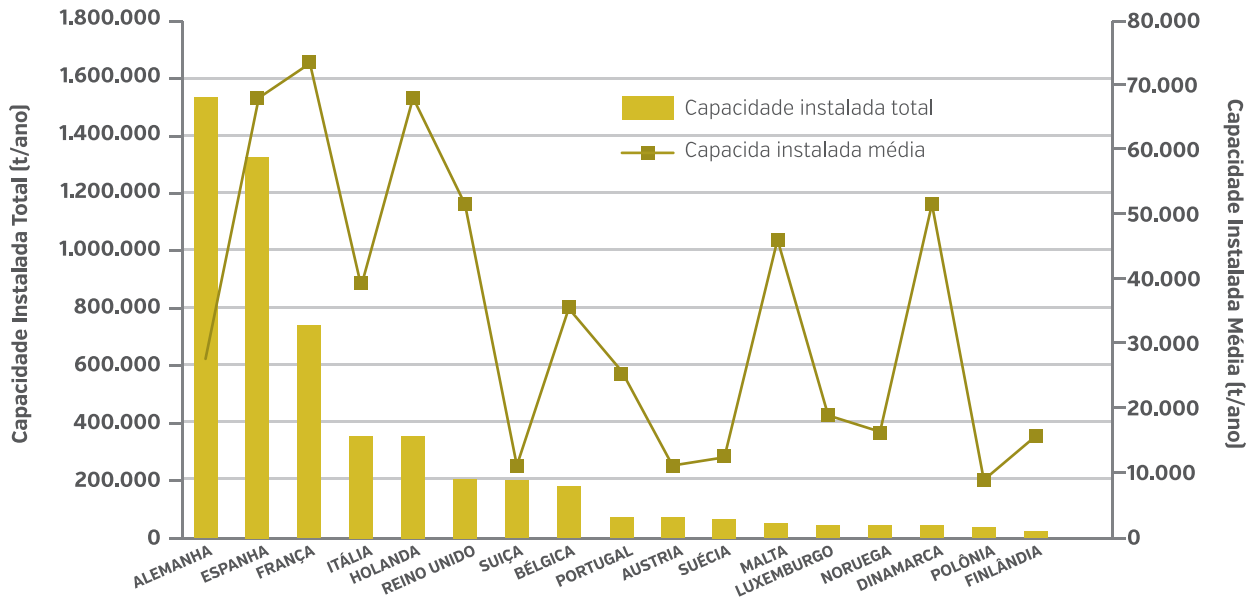
A Figura 21 apresenta a capacidade instalada de metanização da FORSU na Europa.

Dados atualizados (BMU, 2013) indicam que em 2012 o número de plantas de metanização da FORSU na Alemanha decresceu devido a desativação de algumas unidades, apesar do crescimento da capacidade total de tratamento. No total, estão ativas 63 instalações, com capacidade total de 1.359.000 t/ano. Adicionalmente, 10 plantas estavam em fase de construção neste ano.

Por outro lado, verifica-se que, dentre os países mais populosos da Europa, a Espanha é o que possui o maior percentual de tratamento da FORSU via metanização. Entretanto, considerando o total de RSU potencialmente passível de metanização, o país trata pouco mais de 10% deste total, demonstrando o grande potencial ainda por ser explorado.

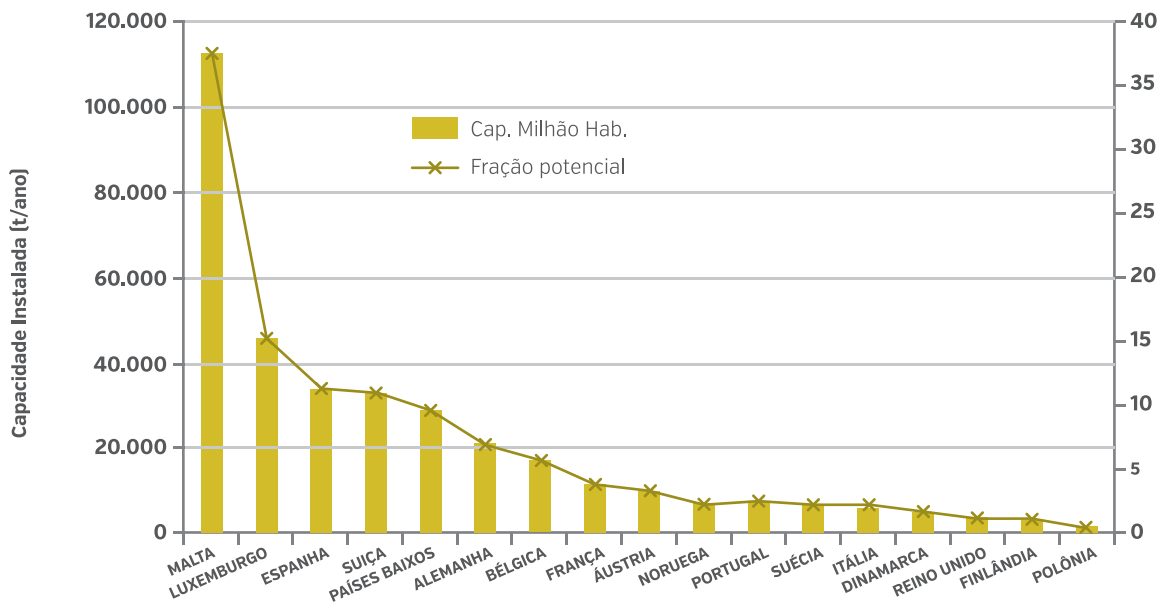
A Figura 22 apresenta a capacidade instalada de metanização da FORSU por milhões de habitantes, bem como o percentual que este valor representa sobre a capacidade teórica potencial.

Figura 21: Capacidade Instalada de metanização da FORSU na Europa.



Fonte: Adaptada de DE BAERE e MATTHEEUWS (2008).

Figura 22: Capacidade por milhões de habitantes e percentual sobre a capacidade teórica potencial.



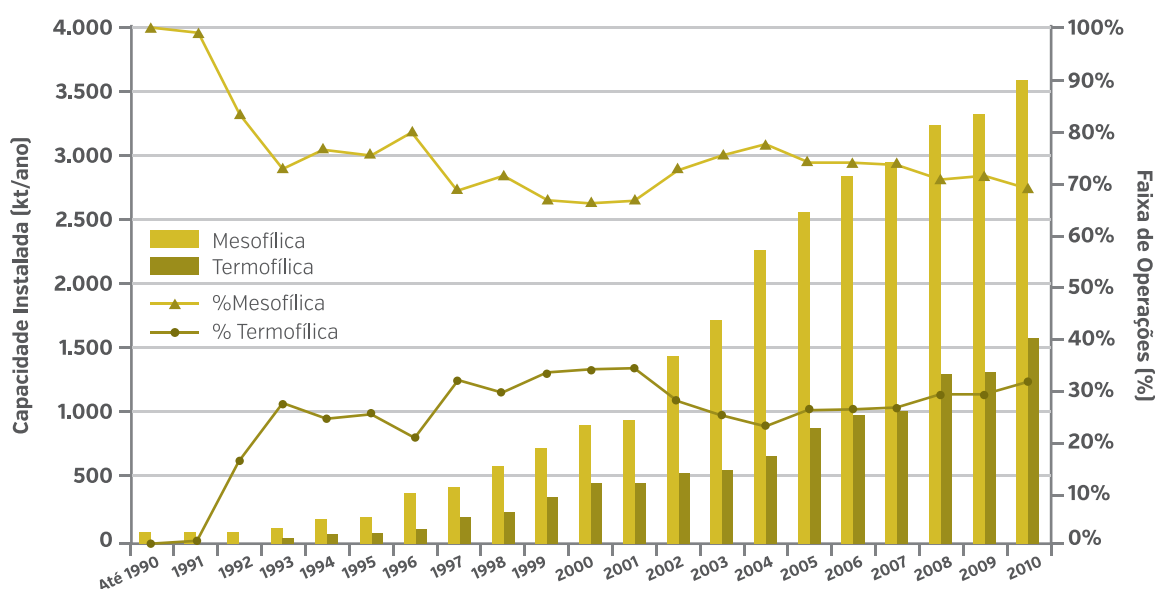
Fonte: Adaptada de DE BAERE e MATTHEEUWS (2008).

Até o começo dos anos 90, todas as plantas europeias de metanização de resíduos operavam na faixa mesofílica, opção essa realizada em função do menor consumo energético e do consenso de que o processo biológico era mais estável. As primeiras plantas termofílicas começaram a operar em 1992, mas ainda se observa uma predominância do processo mesofílico (DE BAERE e MATTHEEUWS, 2008). Entre os anos de 2005 e 2006, uma grande quantidade de plantas termofílicas foi construída e, devido às novas tecnologias, a tendência de aumento deve continuar.

Os autores projetaram, em 2008, que até o final de 2010, 31% da capacidade instalada de metanização deveria ser representada por plantas termofílicas, enquanto as plantas mesofílicas constituiriam 69% do total, com uma capacidade instalada de cerca de 3.300.000 t/ano (DE BAERE e MATTHEEUWS, 2008). Esses dados ainda não foram atualizados.

Na Figura 23 é apresentada uma comparação entre a evolução na capacidade instalada de plantas europeias de metanização de resíduos que operam nas faixas mesofílica e termofílica.

Figura 23: Evolução das plantas europeias de metanização de resíduos que operam na faixa mesofílica [35° a 40°C] e na faixa termofílica [50° a 55°C].



Fonte: Adaptada de DE BAERE e MATTHEEUWS (2008).

Quanto à evolução europeia dos sistemas via seca e via úmida, observa-se, desde o início dos anos 90, uma predominância dos processos via seca. Entre 2000 e 2005, devido à construção de grandes instalações via úmida, observou-se um aumento na capacidade desses sistemas. Entretanto, desde 2005, a maioria das unidades instaladas optou pela tecnologia via seca, e, atualmente, os sistemas via seca representam 54% da capacidade instalada (DE BAERE e MATTHEEUWS, 2008).

Quanto ao número de estágio dos sistemas europeus, a literatura indica que os processos multiestágio sempre possuíam uma menor penetração no mercado (DE BAERE e MATTHEEUWS, 2008). Segundo os autores, a projeção para o período 2006 a 2010 previa um incremento de apenas 2% na capacidade instalada dos sistemas multiestágio, com predominância

Tabela 9: Comparativo da evolução de diferentes aspectos das tecnologias de metanização de resíduos.

de tecnologias que operam reatores em batelada sequenciais (DE BAERE e MATTHEEUWS, 2008).

Na Tabela 9 são apresentados dados referentes à evolução de diversos aspectos envolvidos no processo de metanização de RSU.

SISTEMAS INSTALADOS	PERÍODO			
	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010
Sistemas mesofílicos	64%	64%	80%	59%
Sistemas termofílicos	36%	36%	20%	41%
Sistemas de estágio único	85%	91%	92%	98%
Sistemas multiestágio	15%	9%	8%	2%
Sistema via úmida	37%	38%	59%	29%
Sistemas via seca	63%	62%	41%	71%

Fonte: GOMES, 2010 [Adaptado de INTERNATIONAL, 2008].

7: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. INTERNATIONAL, 2008].

8: Informações disponíveis em: http://www.act-clean.eu/downloads/eggsmann_highlights.pdf

<http://www.bekon.eu/referenzen-biogasanlagen.html>

http://www.schematy.info/pliki/ROZWIAZANIA_DO_WIEKSZYCH_OBIKTOW/01_ROZWIAZANIA_DO_W_OBIKTOW_PDF/140_BIOGAZOWNIE/10_Technologia_Bioferm/100622_D_BIOFerm%20Referenzen_Auswahl_rev6x.pdf

Segundo dados recentes disponibilizados pelo Ministério Federal do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear da Alemanha, BMU⁷, do total de 63 plantas de metanização da FORSU em operação na Alemanha, 46 possuem operação via seca, sendo 23 em fluxo contínuo e 23 em fluxo descontínuo, enquanto apenas 17 atuam via úmida, sendo 8 operando em estágio simples e 9 em duplo estágio (BMU, 2013).

Com relação à metanização extrasseca, ou túneis de metanização, por se tratar de tecnologias recentes, pouca informação tem sido reportada com maior detalhe. Segundo dados das empresas fornecedoras da tecnologia⁸, existem na Europa atualmente, 47 plantas em operação, tendo como substrato FORSU, resíduos verdes e podas e resíduos agrícolas; tratados isoladamente ou em sistema de codigestão. Destas, 8 unidades possuem tecnologia Kompoferm, 18 representam a tecnologia BIOFerm e 21 operam com tecnologia BEKON.

A listagem das plantas de metanização extrasseca operando no ano de 2013 é apresentada na Tabela 10. Esses dados podem ser obtidos e atualizados nas páginas das empresas.

De modo geral, a ampliação na utilização de processos anaeróbios na Europa pode ser atribuída, basicamente, a fatores como os elevados preços da energia e incentivos governamentais para o setor; às restrições ambientais para a disposição de matéria orgânica em aterros sanitários; e às dificuldades na implantação de novos aterros ou na expansão das áreas existentes. De acordo com Kelleher (2007), uma parte significativa do interesse europeu na implantação de unidades de metanização da FORSU se deve em função da implementação da Diretiva Europeia 1999/31 relativa à deposição de resíduos em aterros sanitários. Essa diretiva, alterada pelo Regulamento (CE) 1882/2003 do Parlamento Europeu e do Conselho, estabeleceu que os Estados Membros da União Europeia reduzissem gradativamente a concen-

tração de RSU biodegradáveis a serem destinados aos aterros, sendo que a matéria orgânica remanescente deve sofrer algum processo de estabilização. A aplicação desta normativa nos países membros se dá através de decretos ou de leis locais. Por exemplo, em Portugal, através do Decreto de Lei183/2009, estabeleceu-se que até julho de 2013 os RSU biodegradáveis destinados a aterro sanitário devem ser reduzidos para 50% da quantidade total, em peso, dos RSU biodegradáveis produzidos em 1995 e que até julho de 2020, esse percentual seja de 35%.

Tabela 10: Plantas de metanização extrasseca em operação na Europa.

LOCAIS	CAPACIDADE	INÍCIO DE OPERAÇÃO
KOMPOFERM		
Nieheim, Alemanha	24.000 t/ano	2007
Rothmühle, Alemanha	17.000 t/ano	2007
Aiterhofen, Alemanha	15.000 t/ano	2008
Marburg-Cyriaxweimar, Alemanha	12.000 t/ano	2010
Aschaffenburg, Alemanha	15.000 t/ano	2010
Wargau, Alemanha	14.000 t/ano	2011
Gütersloh, Alemanha	65.000 t/ano	2011
Hamburgo, Alemanha	60.000 t/ano	Em construção
BEKON		
Munique, Alemanha	25.000 t/ano	2007
Saalfeld, Alemanha	20.000 t/ano	2007
Rendsburg, Alemanha	30.000 t/ano	2008
Vechta, Alemanha	10.000 t/ano	2012
Erfurt, Alemanha	20.000 t/ano	2008
Bassum, Alemanha	18.000 t/ano	2011
Pohlsche Heide, Alemanha	40.000 /ano	2011
Steinfurt, Alemanha	44.400 t/ano	2013
Iffezheim, Alemanha	18.400 t/ano	2013
Kusel, Alemanha	7.500 t/ano	2007
Göhren, Alemanha	14.000 t/ano	2006
Melzingen	13.000 t/ano	2006
Ostrhauderfehn, Alemanha	12.000 t/ano	2012
Schmölln, Alemanha	16.000 t/ano	2011
Cesena, Itália	30.000 t/ano	2012

LOCAIS	CAPACIDADE	INÍCIO DE OPERAÇÃO
BEKON		
Nápoles, Itália	30.000 t/ano	2011
Rimini, Itália	35.000 t/ano	2012
Voltana, Itália	35.000 t/ano	2012
Estrasburgo, França	30.000 t/ano	2006
Baar, Suíça	18.000 t/ano	2010
Thun, Suíça	20.000 t/ano	2010
BIOFERM		
Moosdorf, Áustria	13.000 t/ano	2007
Dannenberg, Alemanha	10.500 t/ano	2006
Dannenberg-Hitzacker, Alemanha	11.000 t/ano	2008
Neuenmarkt, Alemanha	14.000 t/ano	2006
Höpfingen, Alemanha	15.000 t/ano	2008
Sumperk, República Checa	12.000 t/ano	2009
Gerdau, Alemanha	13.000 t/ano	2006
Reichenbach, Alemanha	5,400 t/ano	2007
München	1.200 t/ano	2007
Allendorf (Eder), Alemanha	4.500 t/ano	2010
Fujikoh, Japão	2.700 t/ano	2004
San Canzian D'isonzo, Itália	28.000 t/ano	2010
Brake-Käseburg, Alemanha	12.000 t/ano	2010
Casavolone, Itália	50.000 t/ano	2010
Dublin, Irlanda	90.000 t/ano	2010
Zwönitz, Alemanha	16.900 t/ano	Em construção
Hennickendorf, Alemanha	18.000 t/ano	Em construção
Sogliano al Rubicone, Itália	50.000 t/ano	Em construção

Em um segundo momento, as forças motrizes para a expansão da metanização de resíduos e efluentes orgânicos e geração de energia a partir do biogás foram os incentivos para produção de energia renovável e as metas europeias para a redução de gases efeito estufa, além das vantagens inerentes ao tratamento da FORSU ao invés de sua disposição e aterramento (MATTHEEUWS, 2011).

5

ANÁLISE CRÍTICA DAS PRINCIPAIS
TECNOLOGIAS DE METANIZAÇÃO SECA

Este capítulo objetiva apresentar a realidade operacional de unidades de metanização seca no estágio inicial de sua disseminação a partir de estudos de casos. Os primeiros quatro estudos de caso são de plantas instaladas na Espanha e focam nas características destas instalações, em termos de operação e desempenho de processo, evidenciando as dificuldades operacionais verificadas em cada uma das unidades visitadas.

Parte-se da premissa de que os desafios vivenciados nestas unidades são resultantes da adoção e replicação de tecnologias em países distintos do qual se origina seu desenvolvimento, sem levar em consideração as particularidades do local de implantação e operação, como características dos resíduos sólidos urbanos e suas variações sazonais (em função de vocações produtivas locais, como cultivo da laranja, que pode alterar o pH do processo); hábitos locais; condições climáticas; condições de logística e mercados para os subprodutos gerados; entre outros fatores, que muito comumente diferem substancialmente entre provedor e receptor de tecnologias.

Cabe destacar, ainda, que todas as plantas estudadas possuem elevada capacidade instalada, evidenciando a ausência de validações técnicas e operacionais em unidades de menor porte.

O quinto e último estudo de caso apresenta uma planta de tecnologia de metanização em túneis, que representam uma evolução das tecnologias secas. A planta analisada está sediada na Alemanha, na região metropolitana de Munique e utiliza-se da tecnologia Bekon, tendo sido projetada, inicialmente, como unidade piloto e posteriormente ampliada frente ao desempenho operacional obtido.

Apesar de restrita em maior parte a plantas localizadas na Espanha, a análise dos estudos de caso objetiva abarcar a diversidade de tecnologias de metanização seca comerciais, apresentando um sistema extrasseco que atualmente se configura como uma evolução desta linha tecnológica aplicada ao RSU.

Por fim, espera-se que o referencial tecnológico ora apresentado dê subsídios para futuras ações voltadas para a valorização da FORSU no Brasil via metanização seca/extrasseca, de forma a fomentar melhorias operacionais e construtivas com base na realidade dos resíduos sólidos urbanos e contexto local de operação destes sistemas.

As visitas técnicas na Espanha apresentadas neste capítulo foram realizadas entre os anos de 2008 e 2009⁹ e tiveram como objetivo subsidiar a avaliação do desempenho operacional das plantas de metanização seca em estágio inicial de operação neste País, abordando praticamente a totalidade de configurações tecnológicas de metanização seca então existentes.

A visita técnica à planta de metanização em túneis na Alemanha ocorreu em 2011 e teve como objetivo avaliar a configuração técnica e operacional desta mais recente de tecnologia para o tratamento da FORSU, em ascensão neste país.

As plantas apresentadas como estudo de caso são:

- >> Ecoparc 2, Montcada i Reixac (Barcelona);
- >> Ecoparque de La Rioja, La Rioja;

9: As visitas técnicas que ocorreram neste período foram realizadas no âmbito da pesquisa de mestrado de Felipe Correia de Souza Pereira Gomes, Diretor de Operações da Methanum, como parte do Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental, apresentada como tese para o Mestrado em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto.

- >> Centro de Tratamento de Resíduos de Valladolid, Valladolid;
- >> Planta de Tratamento de RSU de Vitória-Gasteiz para el Territorio Historico de Álava, Vitoria-Gasteiz;
- >> Planta de Metanização Extrasseca AWM – Entsorgungspark Freimann (Bekon).

5.1 Ecoparc 2

O Ecoparc 2 – localizado no Polígono Industrial de Can Salvatella de Barberà del Valles, Montcada i Reixac, Espanha – possui uma capacidade instalada para tratamento de 287.500 t/ano de RSU, sendo 100.000 t/ano de fração orgânica de resíduos municipais previamente separados na fonte geradora (FORM); 160.000 t/ano de RSU não segregados na fonte e 27.500 t/ano de embalagens.

A unidade de metanização é composta por 3 reatores de 4.500 m³ cada e processa cerca de 13% dos RSU gerados na região metropolitana de Barcelona. A planta é operada pelo consórcio de empresas Ecoparc del Besòs S.A. (EBESA AS), o qual é composto por: FCC S.A.; URBASER S.A.; TIRSSA S.A e TERSA S.A.

De acordo com a Entidade Metropolitana de Serviços Hidráulicos e Tratamento de Resíduos (EMSHTR), a unidade está construída em uma área de 8 hectares, gera 130 postos de trabalho, produz aproximadamente 33.535 t/ano de material reciclável e 37.790 t/ano de composto orgânico, e gera em torno de 23.000 MWh/ano, dos quais 50% são destinados ao autoconsumo. A unidade começou a ser construída em 2000, sendo inaugurada em 2004. Em 2007 foram construídos os túneis de compostagem e a implantação de um novo sistema de desodorização. Em 2010 foi incorporada uma linha para recuperação de resíduos de embalagens. O custo total de implantação foi de € 51.000.000,00 (cinquenta e um milhões de euros).

De acordo com Hill et al. (2005), considerando valores de 2005¹⁰, o custo de tratamento do RSU era de € 35,59 (trinta e cinco euros e cinquenta e nove centavos) por tonelada de resíduos e o custo anual de operação e manutenção da unidade era de € 14.225.000,00 (quatorze milhões, duzentos e vinte e cinco euros), sendo que cerca de € 6.500.000,00 (seis milhões e quinhentos mil dólares), ou pouco mais de 45% do total, refere-se a custos de disposição final dos rejeitos de processo.

A unidade é dividida em quatro linhas, conforme elencado a seguir:

- >> Linha FORM: triagem da fração orgânica de resíduos municipais (FORM) segregada na fonte, sendo a matéria orgânica encaminhada à unidade de metanização;
- >> Linha Resto: triagem do RSU não segregados na fonte, sendo a FORSU (matéria orgânica recuperada) encaminhada aos túneis de compostagem;
- >> Linha Embalagens: triagem dos resíduos de embalagens provenientes da coleta seletiva;
- >> Linha Poda Verde: resíduos de poda são triturados e misturados com a matéria orgânica recuperada da Linha Resto para envio aos túneis de compostagem.

10: O valor indicado pela autora, como base o ano de 2005, foi apresentado em dólares. A conversão realizada no presente documento teve como objetivo possibilitar comparações e inferências sobre os valores apresentados.

A unidade opera 24 horas por dia e recebe resíduos todos os dias da semana. Os sistemas de pré-tratamento, alimentação e extração da unidade de metanização operam 6 dias por semana. A linha FORM tem uma capacidade instalada para triar 23 t/h e a Resto é composta por duas linhas com capacidade de 45 t/h cada. Para aproveitamento do biogás são utilizados 4 motores de cogeração de 1.048 kW cada.

Atualmente, os resíduos que são utilizados na linha de metanização são os pré selecionados na fonte (FORM). A FORM é descarregada em um fosso e uma garra eletro-hidráulica acoplada a uma ponte grua coleta o material e descarrega-o em uma esteira rolante. O material é encaminhado a uma peneira rotativa com rasgadores de sacolas. O material passante é triturado e enviado ao sistema de alimentação dos reatores, que por sua vez é composto por uma bomba Putzmeister em que, conjuntamente com lodo recirculado, o material é bombeado a um dos três reatores.

Os reatores são da tecnologia Valorga e operam a $35^{\circ}\text{C} \pm 2\%$, a um tempo de detenção variando entre 25 a 30 dias e teor de matéria seca de $30\% \pm 2\%$. O biogás produzido nos reatores é direcionado a um gasômetro para armazenamento temporário, sendo submetido a um tratamento biológico para remoção do gás sulfídrico, quando, então, é encaminhado aos motores para geração de eletricidade e calor.

O lodo digerido é removido por gravidade e enviado a um sistema de desaguamento, composto por dois filtros prensas e uma centrífuga. A fração sólida é enviada a um sistema de compostagem por trincheiras e/ou túneis e a fração líquida à ETE. A ETE utiliza um sistema de nitrificação e desnitrificação, seguido por um sistema de membranas para ultrafiltração do efluente.

Para controle das emissões atmosféricas, a unidade possui um sistema de desodorização do ar ambiente. Esse sistema tem uma capacidade para tratamento de 500.000 m³/h e todas as unidades do complexo que podem ocasionar geração de maus odores operam a pressão negativa; o ar ambiente é aspirado e encaminhado a um sistema de lavadores químicos, composto por um lavador ácido, seguido por um lavador alcalino, sendo então o fluxo de ar direcionado a biofiltros.

A Tabela 11 apresenta os dados de entrada e saída do Ecoparc 2. Conforme pode ser observado, o percentual de recuperação de recicláveis dos últimos 3 anos é inferior a 3% e a geração de rejeitos de planta superior a 50%, sendo que em 2007 foi de 70,1%. A geração de biogás por tonelada de FORM é de cerca de 120 Nm³ e a geração elétrica entre 101 e 263 kWh.

Tabela 11: Dados de entrada e saída do Ecoparc 2.

SISTEMAS INSTALADOS	UNIDADE	PERÍODO			
		2006****	2007***	2008**	2009*
RESÍDUOS RECEBIDOS NA PLANTA					
RSU não segregado	t	94.556	149.381	160.929	137.084
FORM	t	69.965	68.446	76.603	99.814
Outros	t	41	-	4.647	3.629
Resíduos de grandes volumes	t	-	-	4.047	-
MATERIAIS RECUPERADOS E RESÍDUOS DE PLANTAS					
Recicláveis recuperados	t	25.496	5.202	7.064	6.600
Resíduos de planta	t	84.918	152.779	149.752	135.028
Matéria Orgânica Tratada	t	69.592	68.446	20.597	25.242
GERAÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA					
Biogás	m ³	-	-	9.153.000	11.942.000
Energia elétrica gerada	MWh	9.028	6.911	20.180	23.281
RESUMO					
Total de resíduos recebidos	t	164.562	217.827	246.226	240.527
Recuperação de recicláveis	%	15,5%	2,4%	2,9%	2,7%
Geração de resíduos da planta	%	51,6%	70,1%	60,8%	56,1%
Utilização de capacidade instalada	%	68,6%	90,8%	102,6%	100,2%
Produção de biogás	Nm ³ /t total resíduos	-	-	38	50
Produção de biogás	Nm ³ /t FORM	-	-	119	120
Produção energia elétrica	kWh/t total resíduos	55	32	83	97
Produção energia elétrica	kWh/t FORM	129	101	263	233

Fonte: Adaptado de: *Entitat del Medi Ambient [2007], ** Entitat del Medi Ambient [2008], *** Entitat del Medi Ambient [2009], **** Entitat del Medi Ambient [2010].

A Figura 24 apresenta uma imagem de satélite da unidade. Em termos de área, o fosso e a unidade de triagem ocupam cerca de 16%, os reatores anaeróbios e sistema de alimentação 3%, compostagem, maturação e remoção de impróprios 9%, motores de cogeração 0,5% e a ETE e os biofiltros 8%. A Figura 25 apresenta um esquema da planta.

Figura 24: Imagem de satélite do Ecoparc 2.



Fonte: GoogleEarth.

Figura 25: Layout do Ecoparc 2.



Fonte: Adaptado de Entitat Del Medi Ambient (2004).

Não foram relatados ou verificados problemas relacionados ao sistema de introdução. Entretanto, os três reatores tiveram problemas de acumulação de inertes na câmara de digestão e passaram por modificações, sendo necessário abrir os reatores para remoção desse material. Além disso, a parede central do reator – cuja função é evitar a formação de caminhos preferenciais e impedir que material alimentado passe direto do tubo de alimentação para o tubo de extração – teve de ter seu comprimento reduzido tendo em vista o grande acúmulo de materiais inertes na passagem

entre as duas seções do reator. Devido ao projeto não contemplar um mecanismo de acesso ao interior desses reatores, foi necessária a abertura de orifícios no topo dos reatores para permitir a entrada de máquinas e retirada do material depositado.

Com relação ao sistema de agitação e homogeneização do substrato no interior do reator, foi identificado problemas de entupimento dos bicos injetores de biogás comprimido, localizados na base do reator. Frequentemente, os mangotes que injetam o biogás são desconectados, e, com o auxílio de uma haste de metal, desentopem-se os bicos de injeção. Nesse procedimento, ocorre a perda de uma parcela do biogás produzido.

No que diz respeito ao sistema de extração, foram relatadas ocorrências de rompimento dos anéis de vedação da bomba de extração. Durante esses eventos, ocorrem vazamentos de lodo no galpão do sistema de extração.

Apesar dos problemas operacionais vivenciados por esta planta, é importante salientar que a mesma opera com RSU não segregado na fonte e com elevada parcela de impróprios. Os problemas operacionais observados nessa planta servem para ressaltar a importância de se ter uma equipe técnica capacitada para propor e executar ações preventivas e corretivas de manutenção e limpeza, tais como limpeza regular dos bicos injetores de biogás e esvaziamento dos reatores, respectivamente. Salienta-se ainda que a equipe foi capaz de reverter o problemas de acúmulo de inertes no reator, e retomar a operação da planta, sem maiores imprevistos, atingindo rendimentos operacionais ainda mais significativos, conforme informações repassadas posteriormente.

Após o episódio de esvaziamento do reator, o Ecoparc 2 investiu em melhorias no pré-tratamento, e posteriormente, em ampliação da unidade de compostagem e refino do composto orgânico, o que tende a otimizar o desempenho da instalação. De maneira geral, o Ecoparc 2 pode ser mencionado como uma das principais plantas de tratamento mecânico-biológico da Espanha e uma das maiores em capacidade instalada, fato que pode ter contribuído para a intensificação e manifestação dos problemas de acúmulo de inertes, situação identificada também em outras tecnologias secas. Entretanto, a planta pode ser reconhecida por sua elevada eficiência quanto à produtividade de biogás e geração de energia, atendendo de forma satisfatória às expectativas de projeto do fornecedor da tecnologia, a Valorga (Anexo 1).

5.2 Ecoparque de La Rioja

O Ecoparque de La Rioja, localizado em Villamediana, La Rioja na Espanha, possui, segundo dados de projeto, uma capacidade instalada para tratamento de 148.000 t/ano de RSU não triados; 10.000 t/ano de resíduos de embalagens recicláveis segregados na fonte; 3.000 t/ano de resíduos eletroeletrônicos, móveis, entre outros, aqui denominados de resíduos de grande volume e 5.000t/ano de resíduos de poda. Com relação à FORSU, a planta tem capacidade instalada para tratar 75.000 t/ano, que representam os RSU gerados por cerca de 300.000 habitantes (BARCO, 2007).

A unidade de metanização é composta por 6 reatores Kompogas de 1.150 m³ cada, que operam a 55°C e com tempo de detenção de 20 a 23 dias e teor de matéria seca superior a 20%.

Tabela 12: Dados de entrada e saída do Ecoparque de La Rioja.

SISTEMAS INSTALADOS	LINHA DE TRATAMENTO	UNIDADE	ANO					
			2005	2006	2007	2008	2009	2010
RESÍDUOS RECEBIDOS NA PLANTA								
RSU não segregado	Cinza	kg	18.975.920	49.696.970	109.542.980	110.129.060	111.285.270	52.500.575
Resíduos de embalagens	Amarela	kg	2.620.380	4.447.610	4.005.730	4.660.010	4.849.562	2.329.630
Resíduos volumosos	Azul	kg	0	64.660	636.480	648.980	772.970	378.110
Resíduos de grandes volumes	Cinza	kg	-	-	41,45%	39,08%	38,54%	-
MATERIAIS RECUPERADOS E RESÍDUOS DE PLANTAS								
Recicláveis recuperados	Cinza/Azul	kg	262.440	1.295.180	4.756.660	7.687.750	8.100.055	3.526.070
Resíduos de planta	Cinza/Azul	kg	10.328.533	39.342.802	71.561.928	65.083.167	61.654.110	34.026.232
Composto	Cinza	kg	0	0	1.991.741	690.940	1.144.260	55.780
Matéria orgânica estabilizada	Cinza	kg	0	0	0	10.037.840	20.887.390	0
Matéria orgânica não estabilizada	Cinza	kg	0	0	0	28.311.370	0	0
Lodo da biometanização	Cinza	kg	0	0	0	2.096.400	11.422.845	6.498.200
Recicláveis recuperados	Amarela	kg	1.310.260	2.385.140	3.183.570	3.292.080	3.566.160	1.850.270
Resíduos de planta	Amarela	kg	1.038.398	1.784.144	1.198.546	1.405.820	1.175.868	609.058
GERAÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA								
Biogás	Cinza	Nm³	0	0	6.077.703	3.182.160	5.457.570	1.713.192
Energia elétrica gerada	Cinza	kWh	0	0	9.153.100	4.439.600	8.307.400	1.548.100
Energia elétrica exportada	Cinza	kWh	0	0	0	1.948.600	4.401.700	597.600

SISTEMAS INSTALADOS	LINHA DE TRATAMENTO	UNIDADE	ANO					
			2005	2006	2007	2008	2009	2010
RESUMO								
Total de resíduos recebidos	Todas	kg	21.596.300	54.209.240	114.185.190	115.438.050	116.907.802	55.208.315
Total de resíduos recicláveis recuperados	Todas	kg	1.572.700	3.680.320	7.940.230	10.979.830	11.666.215	5.376.340
Total de resíduos de planta enviados ao aterro	Todas	kg	11.366.931	41.126.946	72.760.474	66.488.987	62.829.978	34.635.290
Total de matéria orgânica tratada	Cinza	kg	0	0	1.991.741	41.136.550	33.454.495	6.553.980
Recuperação de resíduos recicláveis	Todas	%	7,3%	6,8%	7,0%	9,5%	10,0%	9,7%
Geração de resíduos de planta	Todas	%	52,6%	75,9%	63,7%	57,6%	53,7%	62,7%
Utilização da capacidade instalada	Todas	%	14,6%	36,6%	77,2%	78,0%	79,0%	74,6%
Produção de biogás	Cinza	Nm ³ /t RSU	0	0	55	29	49	33
Produção de biogás	Cinza	Nm ³ /t MOR	0	0	134	74	127	-
Produção energia elétrica	Cinza	kWh/t RSU	0	0	84	40	75	29
Produção energia elétrica	Cinza	kWh/t MOR	-	-	202	103	194	-
Demanda interna de energia elétrica	-	%	-	-	-	56,1%	47,0%	61,4%

Dados até 01/07/2010 | Fonte: GOMES(2010)

De acordo com informações comerciais da empresa¹¹, estabelecidas em projeto, a unidade produz 14.000.000 Nm³ de biogás por ano, gera em torno de 17.000 MWh/ano de energia elétrica, exporta para a rede 12.750 MWh/ano e possui autoconsumo de 25% do total de energia elétrica produzida. A unidade começou a ser construída em 2003, em 2005 foram iniciados os testes de startup e em 2007 a unidade foi inaugurada. O Ecoparque ocupa uma área de total de 8 ha e teve um custo de implantação de € 30.000.000,00 (trinta milhões de euros).

A unidade é dividida em três linhas, conforme elencado a seguir:

- >> Linha azul: triagem de resíduos de grandes volumes.
- >> Linha amarela: triagem dos resíduos de embalagens provenientes da coleta seletiva.
- >> Linha cinza: tratamento do RSU proveniente da coleta normal, não segregada. É dessa linha que se recupera a matéria orgânica para envio à unidade de metanização.

Como sistemas de controle das emissões, a unidade possui uma estação de tratamento de efluentes (ETE) e um sistema de biofiltros para tratamento do ar ambiente e remoção de maus odores e de compostos orgânicos voláteis. A unidade não possui gasômetro ou sistema de remoção de gás sulfídrico do biogás. Para controle do teor de gás sulfídrico é adicionado óxido de ferro ao substrato antes de sua alimentação nos reatores, que possuem volume útil de 70% e o restante funcionando como uma espécie de gasômetro, utilizado para armazenamento temporário do gás. Para o aproveitamento do biogás são utilizados dois motores de cogeração GE Jenbacher de 1.095 kWmec (1.065 kWelec).

A Tabela 12 apresenta os dados de entrada e saída da unidade, onde observa-se que o percentual de recuperação de recicláveis era inferior a 10% e a geração de resíduos da planta superior a 50%, enquanto a demanda interna de energia supera 45% do total gerado. A geração de biogás por tonelada de matéria orgânica variou entre 74 e 134 Nm³ e a geração elétrica entre 103 e 202 kWh, valores bem inferiores aos informados pela empresa que comercializa a tecnologia. A demanda interna de energia elétrica da unidade variou entre 47 e 61,7%.

A Tabela 13 apresenta um resumo dos principais equipamentos e dados das estruturas do Ecoparque de La Rioja.

Tabela 13: Resumo dos equipamentos e estruturas do Ecoparque de La Rioja.

EQUIPAMENTOS E ESTRUTURAS		
EQUIPAMENTOS E ESTRUTURAS	QUANTIDADE	UNIDADE
Volumes de escavação	185.183	m ³
Concreto estrutural	15.200	m ³
Área construída de galpões/prédios	20.300	m ²
Área de vias internas	17.300	m ²
Fosso de recepção de resíduos	2.800	m ³
Correias transportadoras	90	unidades
Peneiras rotatórias tipo trommel	4	unidades
Separador balístico	4	unidades
Outras peneiras	2	unidades
Mesa densimétrica	1	unidades
Separador ótico	7	unidades
Separador magnético	4	unidades
Separador focault	3	unidades
Aspiradores de plástico filme	2	unidades
Prensas	6	unidades
Digestores	6	unidades
Células de compostagem	6	unidades
Biofiltros	2 x 834	m ³
Motogeradores	2 x 1.065	kWh

Fonte: GOMES, 2010
[adaptado de Gobierno de La Rioja, 2005].

As Figuras 26 e 27 apresentam, respectivamente, uma imagem de satélite e o layout da planta. Em termos de área, o fosso e a unidade de triagem ocupam cerca de 20%; os reatores e sistema de alimentação, 5%; compostagem, maturação e remoção de impróprios, 12%; motores de cogeração, 0,5%; e a ETE e os biofiltros 3%.

Figura 26: Imagem de satélite do Ecoparque de La Rioja.



Fonte: GoogleEarth.

Figura 27: Layout do Ecoparque de La Rioja.



Tratamento dos resíduos de embalagens

- 10 - Área de recepção dos resíduos de embalagens
- 11 - Linha de triagem dos resíduos de embalagens
- 12 - Expedição dos materiais recuperados

Sistemas de tratamento de efluentes

- 13 - Biofiltro (tratamento ar ambiente)
- 14 - ETE

Instalações de apoio

- 15 - Escritório e serviços
- 16 - Controle de acessos
- 17 - Oficinas, almoxarifado e laboratórios

Tratamento dos RSU não segregados

- 1 - Fosso de recepção
- 2 - Linha de triagem do RSU não segregados
- 3 - Expedição de materiais recicláveis recuperados
- 4 - Alimentação dos digestores
- 5 - Digestores
- 6 - Motor de cogeração
- 7 - Compostagem
- 8 - Maturação e afino

Tratamento dos Resíduos Volumosos

- 9 - Desembalagem e trituração

Fonte: GOMES, 2010
[adaptado de www.ecoparquedelarioja.es].

Segundo relatos dos responsáveis pela operação da unidade, em 2008, dos 6 reatores 5 ficaram parados por quase um ano devido à demora na reposição de uma peça do sistema de introdução. O RSU da região possui um alto teor de vidro e, mesmo após a passagem pelo sistema de triagem, a matéria orgânica direcionada ao reator de metanização ainda possui um elevado grau de contaminação por este material, o qual se deposita no interior do reator, formando uma crosta na extremidade onde estão localizadas as tubulações de extração. Esse fato acarreta constantes entupimentos do sistema de extração.

Para desobstrução das tubulações de extração, remove-se um tampão da tubulação e, com auxílio de uma haste de ferro, realiza-se a desobstrução da linha. Entretanto, quando o sistema é desobstruído, geralmente ocorre vazamento de lodo

Com relação à agitação do material, foram relatadas dificuldades, o que tem acarretado na formação de caminhos preferenciais e zonas mortas.

De modo geral, a planta de TMB de La Rioja apresentou uma produtividade de biogás aquém ao desempenho projetado para a tecnologia, resultando em menor produção de eletricidade. Com relação ao autoconsumo, o valor real de consumo (56%) foi bem acima do projetado, de 25% (Anexo 1).

Apesar da baixa qualidade de segregação do substrato e presença considerável de vidro, segundo informações da unidade, a maior parte do composto produzido é comercializada, fato que pode estar ligado à maior vocação agrícola da região e disponibilidade de área para condicionamento do solo.

5.3 Centro de Tratamento de Resíduos de Valladolid

O Centro de Tratamento de Resíduos de Valladolid (CTR Valladolid), na Espanha, possui uma capacidade instalada para tratamento de 200.000 t/ano de RSU, sendo 15.000 t/ano de FORSU.

A unidade de metanização é composta por um reator Laran, cujo volume total é de 1.986 m³ e volume útil de 1.682,15 m³. O sistema é mesofílico, operando a 35°C, e possui um tempo de detenção hidráulico de 28 dias, com um material com teor de matéria seca entre 27% e 30%. O reator foi construído em concreto armado HA-35, com uma espessura de 0,45 m.

A unidade processa os RSU gerados na província de Valladolid, atendendo a uma população de cerca de 500.000 habitantes. A unidade é operada por um consórcio formado pelas empresas Isolux Cosán Servicios, FCC S.A. e Zarzuela S.A..

A unidade produz 1.700.000 Nm³ de biogás por ano, gerando em torno de 3.000 MWh/ano. O gasômetro da unidade possui 2.150 m³ de volume útil.

A unidade começou a ser construída em 1999 e foi inaugurada em 2002. O custo de implantação da planta foi € 21.874.369,00 (vinte e um milhões oitocentos e setenta e quatro mil e trezentos e sessenta e nove euros). Em 2008, conforme dados disponibilizados pelos responsáveis da planta, a taxa cobrada para o tratamento dos RSU não segregado era de € 27,00/t (vinte e sete euros por tonelada) e da FORSU de € 33,00/t (trinta e três euros por tonelada). A produção de rejeitos de planta é de cerca de 50% dos resíduos recebidos.

A unidade é dividida em quatro linhas, conforme elencado a seguir:

- >> Linha RSU não segregado: triagem do RSU não segregados na fonte, sendo que a FORSU é encaminhada diretamente aos túneis de compostagem;
- >> Linha Orgânico: recebe FORSU, lodos de ETE e resíduos de poda. Parte da fração orgânica recuperada é direcionada à unidade de metanização e parte ao sistema de compostagem;
- >> Linha Embalagens: triagem dos resíduos de embalagens provenientes da coleta seletiva;
- >> Linha Resto: triagem dos resíduos recicláveis provenientes da coleta seletiva de resíduos secos (diversos tipos de resíduos recicláveis coletados juntos).

A unidade opera em dois turnos de 8 horas, 7 dias por semana. O terreno onde está localizada a unidade possui cerca de 7 ha, sendo 3 ha de área construída. Para aproveitamento do biogás é utilizado um motor de cogeração de 720 kW.

Para remoção de maus odores gerados nos galpões de compostagem, a planta possui sistema de tratamento composto por um lavador de gases e um biofiltro preenchido com madeira triturada. Os efluentes líquidos são direcionados a um sistema fechado de recirculação, sendo utilizados para umidificar os resíduos a serem alimentados no reator, adequar o teor de umidade dos resíduos em compostagem e para a umidificação dos biofiltros.

O material extraído do reator é encaminhado aos túneis de compostagem aeróbia para pós-tratamento. O processo é dividido em duas etapas (fermentação e maturação) e dura cerca de quatro semanas. Nas duas primeiras semanas, o material permanece em um dos 12 túneis de fermentação, sendo então direcionado a um dos dez túneis de maturação, onde permanece por mais duas semanas.

A Tabela 14 apresenta os dados de entrada de resíduos, produção de energia elétrica e utilização da capacidade instalada do CTR Valladolid. Vale destacar que a unidade possui um elevado índice de utilização da capacidade instalada, sendo que no último ano de estatísticas publicadas atingiu 99%.

Tabela 14: Dados de entrada de resíduos e produção de energia elétrica do CTR Valladolid.

Fonte: GOMES, 2010 [adaptado de: *Junta de Castilla y León (2010). ** www.ctrvalladolid.com].

UNIDADE	ANOS		
	2006*	2008**	2011**
t	195.643	198.073	197.795
%	97,8%	99,0%	99%
MWh	1.750	-	-

A Figura 28 apresenta uma imagem de satélite da unidade. Em termos de área, o fosso ocupa cerca de 1%; a unidade de triagem, cerca de 10%; o reator, 1,5%; e a compostagem, maturação e remoção de impróprios 15% da área total da planta.

Segundo informações dos responsáveis pela operação da unidade, ocorreram problemas de obstrução do sistema de introdução devido ao acúmulo de sacos plásticos nas roscas desse sistema. São comuns entupimentos no sistema de alimentação e nas linhas de triagem.

Com relação à agitação do material, apesar do reator possuir um sistema de piso móvel para auxiliar no fluxo do material no interior da câmara de digestão, o mecanismo não suportou o peso do material em digestão e foi desativado, o que acarretou em constantes problemas de formação de zonas mortas nas laterais da câmara de digestão e acúmulo de inertes. Houve ainda o rompimento de uma das pás do sistema de agitação, que precisou ser substituída.

Figura 28: Imagem de satélite do CTR Valladolid.



- | | |
|----------------|----------------------------|
| 1: Escritórios | 4: Compostagem e maturação |
| 2: Triagem | 5: Afino |
| 3: Digeritor | 6: Estoque de composto |

Fonte: GoogleEarth.

Não foram relatados ou verificados problemas com o sistema de extração, constituído de uma bomba e um tanque de vácuo. Caso ocorra alguma obstrução do sistema, eleva-se a pressão de vácuo, o que promove o esvaziamento da tubulação.

De modo geral, esta planta de TMB foi a única que apresentou uma tecnologia seca na qual não foram identificados problemas na extração do material digerido.

Com relação à produtividade de biogás, a produção média foi acima da prevista em projeto, apesar da geração de eletricidade ser menor do que o esperado (Anexo 1). Esta situação pode ser decorrente de problemas no grupo gerador utilizado, devido à baixa eficiência elétrica do equipamento, ou ainda indicar vazamentos de biogás nos sistemas subsequentes ao gasômetro e/ou no sistema de medição de vazão instalado. Não foram disponibilizadas informações quanto ao autoconsumo de energia da planta.

5.4 Biocompost – Planta de Tratamento de RSU de Vitória-Gasteiz

A Planta Biocompost, localizada no distrito industrial de Jundiz, Espanha, possui uma capacidade instalada para tratamento de 120.750 t/ano de RSU não segregados na fonte e 13.500 t/ano de resíduos de poda.

A unidade de metanização é composta por 1reator Dranco de 1.770 m³, operando em temperatura termofílica, entre 50 e 55°C, com um tempo de detenção hidráulica de 26 dias. Possui uma capacidade instalada para tratar 20.000 t/ano de FORSU.

A unidade possui capacidade para produzir 6.000.000 Nm³ de biogás por ano e gerar cerca de 6.000 MWh/ano de energia elétrica. A unidade começou a ser construída em 2004, sendo que em 2006 foram iniciados os testes de startup. Ocupa uma área de total de cerca de 6 ha e o custo de implantação foi de

€ 23.289.292,75 (vinte e três milhões duzentos e oitenta e nove mil duzentos e noventa e dois euros e setenta e cinco centavos). A unidade é operada por um consórcio formado pelas empresas FCC S.A. e Cespa Conter S.A..

Os caminhões que chegam à unidade são pesados e então direcionados a área de descarga. Os RSU são então basculados dos caminhões em um dos fossos de recepção. A unidade possui dois fossos, com um volume total de acumulação de 3.516 m³, o suficiente para armazenar a quantidade RSU entregue a cada dois dias.

O RSU recebido, após passar por uma triagem manual para retirada dos materiais de grande volume, é direcionado a um trommel que segrega os materiais em três frações de diferentes diâmetros, sendo elas:

- » >100 mm: linha de materiais recicláveis. Essa fração é direcionada a sistemas de triagem manual e mecanizada para recuperação dos recicláveis. O rejeito dessa linha é encaminhado ao aterro sanitário.
- » 40 – 100 mm: linha de orgânicos com elevada quantidade de contaminantes (materiais impróprios ao processo de metanização). Essa fração é encaminhada diretamente ao sistema de compostagem.
- » <40 mm: linha de orgânicos com baixa quantidade de materiais contaminantes. Essa fração é direcionada ao reator para metanização.

O sistema de pré-tratamento foi dimensionado de forma a recuperar no mínimo 8% do RSU recebido na unidade. As linhas de pré-tratamento possuem elevado grau de automatização e possuem uma capacidade instalada de 30 t/h cada.

De forma a garantir um fluxo constante de matéria orgânica para alimentar o reator, a FORSU é armazenada em um tanque pulmão de 75 m³. Esse material é então direcionado a uma tolva de mistura, para mescla com parte do material extraído do reator. Nessa mesma câmara o material é aquecido até uma temperatura de 55 °C, via injeção de vapor. Além disso, adiciona-se cloreto ferroso para minimizar a produção de gás sulfídrico e terras diatomáceas para elevar o teor de matéria seca. A produtividade média de biogás é de 138 Nm³ por tonelada de FORSU alimentada e o sistema promove uma redução de cerca de 15% em peso da FORSU alimentada no reator. O material extraído do reator é misturado ao material extraído dos túneis de compostagem, sendo essa mistura então encaminhada ao galpão de maturação para produção do composto.

A planta possui três linhas de efluentes líquidos. Uma das linhas capta as águas pluviais limpas, provenientes dos telhados das unidades e das áreas sem risco de contaminação, e direciona a um tanque para armazenamento e reutilização. Outra linha capta as águas pluviais de áreas com risco de contaminação e os efluentes provenientes da lavagem de caminhões e dos recipientes de coleta de RSU. Esse efluente é direcionado aos túneis de compostagem e leiras de maturação para umidificação do material. Os efluentes do processo de tratamento dos resíduos são direcionados a um tanque de armazenamento de 172 m³ e posteriormente coletados por caminhões limpa-fossa e encaminhados a uma ETE. O consórcio pretende ainda construir uma ETE na planta de TMB.

Todos os galpões da unidade operam a pressão negativa, sendo o ar ambiente direcionado a um sistema de tratamento para remoção de maus odores e outros compostos que comprometam a qualidade do ar. O sistema de tratamento possui duas linhas, sendo uma para a área de pré-tratamento e o outro para a área de compostagem – fermentação e maturação. Cada uma das linhas possui um scrubber, para lavagem do ar, e um biofiltro de alto desempenho, possuindo uma eficiência mínima de 98% para remoção de compostos orgânicos voláteis.

A Tabela 15 apresenta os dados de entrada e saída da unidade, onde pode ser observado que o percentual de recuperação de recicláveis é de 3,1% e que a geração de resíduos da planta é superior a 62,8%. A geração de biogás por tonelada de resíduos recebidos foi de 14,4 Nm³ e a geração elétrica de 8,5 kWh. Cabe destacar o pequeno percentual de utilização da capacidade instalada, 48,8%.

Tabela 15: Dados de entrada de resíduos e produção de energia e biogás da Planta Biocompost (tecnologia Dranco).

TIPO DE RESÍDUO	UNIDADE	ANO
		2008
RESÍDUOS RECEBIDOS NA PLANTA		
97,8%	99,0%	99%
1.750	-	-
MATERIAIS RECUPERADOS E RESÍDUOS DE PLANTA		
Recicláveis recuperados	t	1.834
Resíduos de planta	t	36.982
Matéria Orgânica Estabilizada	t	670
GERAÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA		
Biogás ¹	Nm ³	499.862
Energia elétrica ²	MWh	850
RESUMO		
Total de resíduos recebidos	t	58.935
Recuperação de recicláveis	%	3,21%
Geração de resíduos de planta	%	62,8%
Utilização da capacidade instalada	%	48,8%
Produção de biogás	Nm ³ /t total resíduos	8,5
Produção energia elétrica	kWh/t total resíduos	14,4

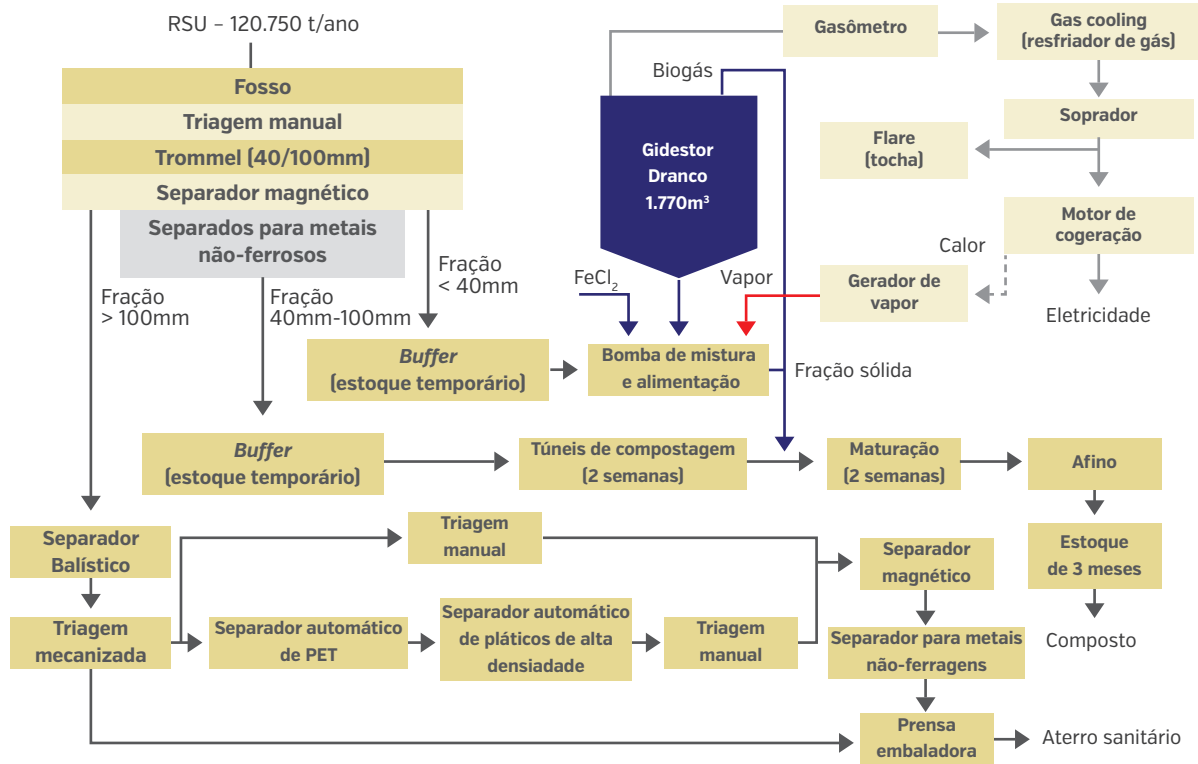
1 - Dado original: 450 t - convertido para Nm³ considerando 65% de metano e uma densidade 0,900248756218906 kg/m³.

2 - Calculado considerando 1Nm³ de biogás igual a 1,7 kWh de energia elétrica.

Fonte: GOMES, 2010 [adaptado de Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, 2010].

Figura 29: Fluxograma das Plantas de TMB de Vitória-Gasteiz.

A Figura 29 apresenta o fluxograma da unidade, no qual estão representadas as três linhas de tratamento dos resíduos, bem como os principais equipamentos utilizados em cada etapa do processo. A Figura 30 apresenta uma imagem da satélite da Planta Biocompost.



Fonte: GOMES, 2010 adaptado de http://www.ows.be/pages/foto_ref.php?foto=45_2414_flow_EN.gif.

Figura 30: Imagem de satélite do CTR Valladolid.



Fonte: GoogleEarth.

Segundo informações, o sistema de introdução sofre recorrentes problemas de entupimento, sendo necessário procedimentos para desobstrução do sistema de mistura do material que será introduzido no reator.

Segundo o operador do sistema, o processo de extração do reator não é realizado aos domingos, o que pode favorecer a sedimentação do material em digestão na base do reator, obstruindo a tubulação de extração.

Foram relatados problemas referentes à formação de zonas mortas, devido ao acúmulo de material em determinadas zonas do digestor, bem como problemas recorrentes da acumulação de inertes no interior da câmara de digestão, com perda de volume útil do reator.

O desempenho da tecnologia é inferior aos dados de projeto, que pode ser observado em relação à produtividade de biogás e geração de energia. Não foram fornecidos dados do autoconsumo de energia projetado e real para a unidade (Anexo 1).

5.5 Planta de Metanização Extrasseca AWM – Entsorgungspark Freimann (Bekon)

A Planta de Metanização AWM – Entsorgungspark Freimann está instalada na região metropolitana de Munique, Alemanha, na região de Werner-Heisenberg-Allee. Possui tecnologia de metanização em túneis da empresa Bekon e é administrada pela Companhia Municipal de Gestão de Resíduos de Munique – Abfallwirtschaftsbetrieb München – denominada AWM. A planta ocupa uma área total de 4 hectares e possui 5 funcionários, em turnos de 40 h/semana (Figura 31).

Esta unidade surgiu inicialmente como projeto piloto realizado em parceria pelas empresas BEKON Energy Technologies GmbH & Co. KG e AWM. A planta piloto foi construída em 2003 e contava com 4 túneis que operaram por 3 anos, demonstrando resultados satisfatórios que motivaram sua expansão. Em 2006 a planta recebeu mais 6 túneis, expansão financiada pela AWM no valor de € 5.000.000 (cinco milhões de euros).

Figura 31: Imagem de satélite da AWM – Entsorgungspark Freimann.



Fonte: GoogleEarth.

A Figura 32 apresenta os túneis de metanização da planta AWM – Entsorgungspark Freimann, com tecnologia Bekon.

Figura 32: Planta de Metanização AWM – Entsorgungspark Freimann.



Fonte: <http://www.awm-muenchen.de/>.

No final de 2007 a planta já tratava 25.000 t/ano, o que corresponde a dois terços dos resíduos orgânicos recolhidos via coleta seletiva em Munique pela AWM.

O volume total dos 10 túneis é de 7.500 m³ e operam em temperatura mesofílica. A planta processa FORSU (Figura 33) coletada separadamente em pontos da cidade de Munique, associada à resíduos de jardinagem, que são utilizados em sistema de codigestão como material estruturante para a matéria orgânica, evitando a compactação da pilha de resíduos no interior do túnel. A planta gera 3.780 MW/ano e um total de 22.500 t/ano de material final. Deste total, 9.000 t são composto orgânico final, e 17.000 t material para codigestão com os materiais frescos.

Figura 33: FORSU recebida na planta AWM-Bekon.



Fonte: Acervo Methanum.

Cada túnel de metanização possui capacidade para tratar 2.200 a 2.500 toneladas por ano. Dois dos reatores da planta são preenchidos a cada semana.

As portas do reator possuem fixação superior, de forma a não causar imprevistos durante as etapas de preenchimento e remoção do material nos

Figura 34: Vistas dos túneis de metanização.

túneis. Uma vez preenchidos, os túneis são fechados e selados hidráulica-mente, através de uma fita inflável de vedação nas portas, que proporcionam a estanqueidade e as condições anaeróbias requeridas no processo.



Fonte: Acervo Methanum.

O lixiviado gerado no processo de decomposição anaeróbia da matéria orgânica é recolhido por canaletas posicionadas na parte inferior do reator e temporariamente armazenado em um tanque de recirculação (Figura 35), onde é mantido aquecido. Deste tanque, o lixiviado é recirculado novamente nos túneis, sendo pulverizado sobre a biomassa em seu interior, a uma taxa de 15 m³ de lixiviado/ dia, em cada túnel. No início do ciclo a recirculação é maior, sendo reduzida gradativamente com a evolução do processo de fermentação, e por fim, é interrompido uma semana antes de completar o ciclo de 4 a 5 semanas do material no túnel. O controle do fluxo do spray depende diretamente do tipo do material introduzido (razão resíduo orgânico/ podas).

Figura 35: Tanque de armazenamento e recirculação de lixiviado.



Fonte: Acervo Methanum.

Após o tempo de detenção do material, de 4 a 5 semanas no interior dos túneis, dependendo das condições do substrato e da estação do ano, o reator é completamente esvaziado e novamente preenchido com novo substrato. A biomassa removida dos reatores é direcionada, então, a um processo de compostagem simples (sem adição de ar ou revolvimento), em uma área

coberta e com solo impermeabilizado (Figura 36). Após 6 a 8 semanas o material está completamente estabilizado e passa por uma etapa de refino e peneiramento para remoção de eventuais impróprios.

Figura 36: Área de compostagem (esq.) e detalhe da FORSU após remoção dos túneis (dir.).



Fonte: Acervo Methanum.

O biogás gerado no processo de metanização é acumulado sobre o substrato em fermentação, sendo armazenado temporariamente no interior dos túneis. A planta não possui gasômetro externo, e a qualidade do biogás é controlada de forma que este possa ser direcionado diretamente ao sistema de cogeração, quando atinge um conteúdo de metano de 50 a 60% em volume. Antes do sistema de cogeração, entretanto, o biogás passa por um filtro de carvão ativado para remoção do gás sulfídrico, encontrado em quantidades reduzidas (Figura 37). A planta produz anualmente 1.800.000 Nm³ de biogás.

Figura 37: Área de dessulfurização do biogás e cogeração.



Fonte: Acervo Methanum.

Segundo informações dos operadores a planta possui operação simplificada, sem maiores problemas nos processos de rotina de alimentação e extração, não sendo possível a ocorrência de acúmulo de material no reator. O único problema evidenciado na unidade foi o vazamento de lixiviado nas áreas de circulação de veículos e de realização das operações de rotina, além da inexistência de canaletas de coleta de lixiviado na área de compostagem.

De modo geral, a planta demonstrou bom desempenho na geração de eletricidade, que, segundo dados do responsável da planta, atinge 5.5 KWh/Nm³ biogás considerando uma eficiência elétrica de 38% para o sistema de cogeração.

5.6 Análise comparativa das tecnologias com base nos Estudos de Caso

As visitas técnicas apresentadas deram subsídios para avaliação in loco das diferentes tecnologias secas em operação com a FORSU na Europa, independente do país em questão, identificando as principais características operacionais de cada sistema. A Tabela 16 apresentada na sequência sistematiza estas informações.

Tabela 16: Análise comparativa entre as tecnologias, com base nos estudos de caso apresentados.

RESUMO DAS PLANTAS VISITADAS						
NOME DA UNIDADE		BIOCOMPOST DRANCO	ECOPARC 2 VALORGA	ECOPARQUE DE LA RIOJA KOMPOGAS	CTR VALLADOLID LARAN	AWM BEKON
Tecnologia de Metanização		Dranco	Valorga	Kompogas	Laran Plug Flow	Bekon
Custo de implantação	€	23.289.292	51.000.000	30.000.000	21.874.369	5.000.000 ****
Capacidade instalada da planta	t/ano	120.750	240.000	148.000	200.000	Não informado
Capacidade instalada de metanização	t/ano	20.000	120.000	75.000	15.000	Não informado
Quantidade média estimada de RSU recebidos na planta	t/ano	58.230	217.286	84.467	196.858	25.000
Quantidade média estimada de material enviado a metanização*	t/ano	9.645	108.643	42.804	14.764	25.000
População atendida	hab	Não informado	Não informado	300.000	500.000	Não informado
Resíduos processados		RSU não segregado, FORM, resíduos orgânicos, resíduos de poda e resíduos recicláveis	FORM, resíduos orgânicos, resíduos de poda, RSU não segregado, resíduos de embalagens	RSU não segregado, resíduos de embalagens, resíduos de grandes volumes, resíduos de poda	RSU não segregado, resíduos de embalagens, lodo de ETES, resíduos de poda, FORM, recicláveis misturados	FORSU, resíduos de poda

RESUMO DAS PLANTAS VISITADAS						
NOME DA UNIDADE		BIOCOMPOST DRANCO	ECOPARC 2 VALORGA	ECOPARQUE DE LA RIOJA KOMPOGAS	CTR VALLADOLID LARAN	AWM BEKON
Quantidade de reatores	unid.	1	3	6	1	10
Volume dos reatores	m ³	1.770	4.500	1.150	1.986	750
Temperatura de operação	°C	55	37	55	35	35
Produtividade de biogás esperada	m ³ /ano	2.760.000	13.760.000	14.000.000	1.700.000	Não informado
Produtividade média real de biogás	m ³ /ano	499.862	10.547.500	4.905.811	2.021.760	1.800.000
Geração de energia elétrica esperada	MWh/ano	6.000	26.400	12.750	3.000	Não informado
Geração média real de energia elétrica	MWh/ano	850**	14.850	7.300	1.750	3.780
Demanda interna de energia elétrica	%	Não informado	59	25	Não informado	Não informado
Demanda interna real de energia elétrica	%	Não informado	Não informado	56%	Não informado	Não informado
Geração real de resíduos de planta***	%	62,8	59,7	61,0	50,0	Não informado

* Para o cálculo da quantidade de resíduo alimentada no digestor, realizou-se o produto entre o quantidade média de resíduos processados na unidade pela porcentagem da capacidade instalada de biometanização em função da capacidade instalada total da unidade.

** Valor calculado considerado uma equivalência energética de 1,7 kWh de energia elétrica para cada 1 Nm³ de biogás.

*** Para o CTR Valladolid foi considerado o valor informado durante a visita.

**** Valor referente à expansão da Unidade, quando foram acrescentados 6 túneis.

6

PROPOSTA DE MODELO TECNOLÓGICO PARA O CENÁRIO BRASILEIRO

6.1 Cenário brasileiro: contexto político e institucional

A gestão dos resíduos sólidos no Brasil tem sido historicamente tratada como questão sanitária e de saúde pública. Apenas mais recentemente sua gestão tem sido entendida enquanto tema transversal, devido à sua relação potencial com projetos de biogás visando a redução de emissão de gases efeito estufa e geração de energia.

Primeiramente, esta percepção foi decorrente da existência de projetos voltados para a captação de biogás de aterros sanitários visando à geração de eletricidade. Apenas nos últimos anos, através da promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), o tema biogás de RSU passou a ser atrelado também a sistemas de tratamento anaeróbio, que através de plantas de tratamento mecânico biológico (TMB) tornaram possível a segregação e aproveitamento das frações inorgânicas e orgânicas, com geração de rejeitos passíveis de disposição final.

Além da diferenciação entre diversos setores que operam projetos de biogás – como agrícola, agropecuário e de saneamento (RSU e esgoto) – é fundamental diferenciar os projetos de biogás de aterro e biogás via TMB, devido às condições técnicas e financeiras completamente distintas as quais estão sujeitos tais empreendimentos. Um aspecto importante é compreender que a metanização corresponde a um tratamento da fração orgânica em detrimento de sua simples disposição final, sendo que o aterramento de resíduos orgânicos já sofre restrições na legislação federal. Por essa razão, a metanização deve ser entendida como uma alternativa tecnológica que possibilita o atendimento às novas diretrizes estabelecidas na PNRS. A interface entre a política e projetos de metanização será discutida na seqüência, atentando para os incentivos e barreiras existentes para a implantação destes tipos de projetos no país.

6.1.1 A Política Nacional de Resíduos Sólidos

Apesar da falta de políticas específicas para fomentar a disseminação de projetos de biogás no país, o setor de RSU tende a se beneficiar dos recentes marcos legais relacionados à sua gestão. Em 2010 foi publicada a Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos – PNRS (Lei nº 12.305/2010 e Decreto nº 7.404/2010) que se constitui no principal marco regulatório relacionado ao manejo dos resíduos sólidos urbanos.

A lei constitui-se na base central para a gestão de todo tipo de resíduo sólido urbano, seja este doméstico, industrial, da construção civil, agrosilvopastoril, da área de saúde e perigosos, com exceção de rejeitos radioativos. Apesar da abrangência da PNRS, ela introduziu uma distinção primordial entre o que se constitui como resíduo, sendo este todo material passível de recuperação ou reaproveitamento; e rejeito, material que já teve esgotadas as possibilidades técnicas e econômicas de reutilização, reciclagem ou tratamento, e deve ser descartado e disposto de maneira ambientalmente adequada (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012).

Ou seja, segundo a PNRS, os resíduos passam a ser destituídos de seu caráter de descartabilidade imediata e adquirem viés de matéria-prima ainda

passível de exploração, desde que existam processos viáveis do ponto de vista tecnológico e econômico para seu processamento. Neste caso, subentende-se que projetos de biogás tendem a ser priorizados para o tratamento da fração orgânica dos RSU, em detrimento da direta disposição em aterros sanitários.

Esta determinação, em um primeiro momento, demonstra o interesse em favorecer a adoção de estratégias para aproveitamento e tratamento das frações reciclável e orgânica dos resíduos, uma vez que representa um impedimento legal à destinação destes aos aterros sanitários. Entretanto, os aterros continuam sendo locais de disposição legalizados, e apesar da metanização se constituir em uma alternativa sob o ponto de vista técnico, sob o ponto de vista econômico, os aterros sanitários continuam a ser favorecidos, por terem um custo de investimento e de operação significativamente menores. Vale ainda mencionar que além da competição com aterros sanitários, a compostagem se constitui em uma alternativa tecnicamente considerada, inclusive pela PNRS, apesar da falta de uma regulamentação e normativas técnicas que estabeleçam práticas adequadas, resultando em projetos com inúmeros problemas e limitações de aplicação.

Além da concorrência, é possível afirmar que ainda inexistente no país a percepção da metanização como solução técnica e economicamente viável para a fração orgânica, e o mercado para projetos de biogás ainda pode ser considerado incipiente, com poucas soluções técnicas viáveis e com replicação focada em projetos que se favorecem de ganhos de escala, resultando em plantas de elevada capacidade instalada, a exemplo da Europa. Entretanto, o aumento da capacidade operacional também eleva os custos envolvidos, que passam a ser inviáveis para a realidade nacional.

Na esfera pública, a PNRS estabeleceu a obrigatoriedade da elaboração de planos estaduais e municipais ou regionais de resíduos sólidos como condição de acesso a recursos da União destinados a empreendimentos e serviços relacionados à gestão de RSU, ou para serem beneficiados por incentivos ou financiamentos de entidades federais de crédito ou fomento para tal finalidade.

Para tanto, esses planos devem definir objetivos específicos e metas a serem alcançadas, bem como os meios necessários para evoluir da situação atual para a situação desejada, inclusive sob o ponto de vista técnico, indicando a solução a ser adotada em todas as esferas de gestão, desde a coleta ao tratamento e disposição final dos resíduos. Importante notar que a elaboração dos Planos Municipais de Resíduos Sólidos atende, simultaneamente, às exigências da Política Nacional de Saneamento Básico e passam a integrá-la, sendo necessário acrescer as demais áreas de saneamento referente ao abastecimento de água, drenagem, manejo de águas pluviais e serviço de esgotamento sanitário.

Importante salientar que a PNRS atribui prioridade de acesso aos recursos aos municípios que optarem por soluções consorciadas intermunicipais para a gestão dos resíduos sólidos e/ou implantarem a coleta seletiva com a participação de cooperativas ou outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis.

O fomento aos consórcios municipais objetiva, num primeiro momento, superar a dificuldade de muitos municípios brasileiros que não dispõem de recursos suficientes ou tem pouca capacidade técnica para gerir seus serviços de limpeza pública, coleta seletiva e tratamento de resíduos. A ine-

xistência de pessoal especializado e as debilidades na capacidade de gestão existentes no país fazem com que poucos municípios contem com uma gestão adequada dos resíduos sólidos, capaz de garantir a sustentabilidade dos serviços e a racionalidade da aplicação dos recursos técnicos, humanos e financeiros. Os consórcios representam uma importante ferramenta aos municípios e se constituem em fator decisório para acesso a recursos federais, o que tem motivado sua organização. Contudo, observa-se também que a lei prevê tratamento prioritário aos consórcios mas não descarta o financiamento com recursos públicos federais a municípios médios ou grandes que não tenham constituído consórcio intermunicipal. Há ainda a possibilidade de companhias de saneamento assumirem a gestão de RSU em regiões envolvendo vários municípios sem que estes tenham que se organizar como consórcio intermunicipal, bastando atender à regulamentação de concessões.

Entretanto, atenção deve ser dada à dificuldade de operacionalização dos consórcios devido às diferenças políticas e às constantes alterações partidárias nos poderes estaduais e municipais. Soma-se ainda a discussão de quem irá receber o passivo que representa um aterro sanitário. Caso a alternativa de destinação representasse uma central integrada de gestão de resíduos, com sistemas de triagem, metanização e compostagem, entendidas como tecnologias complementares e visando a geração de energia incentivada, provavelmente haveria menor restrição e melhor aceitação à solução estar sediada em seu território.

De modo geral, a disponibilização de recursos federais para os municípios que possuam planos de gerenciamento de resíduos, com prioridade para consórcios intermunicipais, tende a viabilizar não apenas a implementação de projetos de valorização ou recuperação energética dos resíduos, incluindo projetos de biogás, mas também tem o potencial de fomentar estratégias mais amplas de gestão integrada dos resíduos, na medida em que fomenta o planejamento como ferramenta base. Adicionalmente, a estratégia de consórcio propicia ganho de escala, uma vez que a maioria dos municípios brasileiros é de pequeno porte e não tem condições de implementar projetos para a gestão adequada dos resíduos em função da pequena população atendida pelos mesmos.

Por outro lado, é importante considerar que este incentivo a consórcios em detrimento a soluções individuais pode ser um fator complicador, uma vez que pode desfavorecer um município que tem um bom projeto individual para o tratamento de RSU e captação de recursos, quando comparado a um consórcio.

Na esfera privada, os planos de gerenciamento de resíduos sólidos se estendem a estabelecimentos comerciais e de prestação de serviços que gerem quaisquer resíduos que por sua natureza, composição ou volume, não sejam equiparados aos resíduos domiciliares (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012).

Nesta ótica, todos os estabelecimentos privados como restaurantes industriais, supermercados, centrais de abastecimento (CEASAs), estariam responsabilizados pela destinação dos seus resíduos orgânicos, o que tende a fomentar projetos de biogás em diferentes escalas no setor privado e focados nos grandes geradores. Entretanto, a questão da obrigatoriedade

12: Massachusetts Department of Environmental Protection (MassDEP) - 310 CMR 19.000: Final Commercial Organic Material Waste Ban Amendments, January 2014. Available at: <http://www.mass.gov/eea/agencies/massdep/recycle/solid/massachusetts-waste-disposal-bans.html>.

volta à pauta, pois o setor não irá se mobilizar caso não haja implicações legais ou financeiras que o motive a tal investimento. Como exemplo pode-se destacar o caso do estado de Massachusetts¹² nos Estados Unidos, onde foi promulgada uma legislação que proíbe geradores comerciais de uma tonelada ou mais de resíduo orgânico por semana, a descartarem esse material em aterro sanitário. Como alternativa propõem-se a redução do desperdício, a doação do excedente ainda utilizável, e o tratamento adequado dos resíduos orgânicos finais, seja em instalações *in situ* ou em outros locais que dispõem de plantas de digestão anaeróbia ou compostagem.

6.1.2 O Plano Nacional de Resíduos Sólidos

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos foi elaborado como uma ferramenta da PNRS, visando estabelecer uma série de diretrizes e estratégias para orientar as ações do governo, empresariado e sociedade civil quanto às ações que devem ser empreendidas para a efetiva implantação da política.

O plano possui oito áreas temáticas, dentre as quais se destaca a gestão de RSU. Esta área temática, por sua vez, divide-se em quatro sub-temáticas, das quais duas merecem atenção especial:

1. Redução de resíduos sólidos urbanos úmidos dispostos em aterros sanitários; e
2. Tratamento e recuperação de gases em aterros sanitários.

Como destaque podemos citar a diretriz que tem por objetivo reduzir a disposição de resíduos sólidos urbanos úmidos em aterros sanitários por meio da indução à compostagem e ao desenvolvimento de outras tecnologias para a geração de energia a partir da parcela úmida dos RSU coletados. Entre as estratégias mencionadas, destaca-se a implantação de programas de coleta de orgânicos em grandes geradores e a disponibilização de recursos financeiros e incentivos fiscais para a implantação de novas unidades de digestão anaeróbia e de aproveitamento de biogás de aterro; financiamento de estudos de viabilidade técnica para a implantação de unidades de biodigestão e de aproveitamento de biogás de aterros; elaboração de material de educação ambiental para conscientizar quanto a importância da segregação na fonte de resíduos orgânicos; desenvolvimento de atividades de difusão tecnológica e de conhecimento dos processos de biodigestão entre outras ações. Além disto, o foco na segregação e coleta seletiva podem constituir-se em importantes ferramentas para auxiliar na disponibilização de matéria-prima de qualidade para as plantas de metanização de RSU.

Para a efetivação da PNRS, o Plano Nacional estabeleceu metas para as ações que serão empreendidas para atendimento a cada uma das diretrizes firmadas. As metas foram projetadas tendo como base as disposições da Lei 12.305/10, as diretrizes e estratégias, o diagnóstico da situação dos resíduos sólidos no Brasil e o cenário 1 do Plano Nacional. Dentre as metas estabelecidas, podemos destacar as seguintes:

- » Eliminação total dos lixões até 2014;
- » 90% das áreas de lixões reabilitadas até o ano de 2031, sendo que os

Tabela 17: Redução do percentual de resíduos úmidos dispostos em aterros sanitários, com base na caracterização nacional de 2013.

- projetos devem contar com, entre outros itens, a captação de gases para geração de energia quando haja viabilidade econômica;
- >> Redução progressiva em até 53% da quantidade de resíduos úmidos dispostos em aterros até o ano de 2031;
 - >> A recuperação dos gases de aterros sanitários, atingindo uma potência instalada de 250 MW até o ano de 2031.

A Tabela 17 apresenta a meta 4 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos.

META	REGIÃO	PLANO DE METAS (% DE REDUÇÃO)				
		2015	2019	2023	2027	2031
Redução do percentual de resíduos úmidos disposto em aterros, com base na caracterização nacional realizada em 2013	Brasil	19	28	38	46	53
	Região Norte	10	20	30	40	50
	Região Nordeste	15	20	30	40	50
	Região Sul	30	40	50	55	60
	Região Sudeste	25	35	45	50	55
	Região Centro-oeste	15	25	35	45	50

O Plano traz ainda os programas e ações de resíduos sólidos, os quais serão implementados para o atingimento das metas estabelecidas. Os programas estabelecidos passam a compor o Plano Plurianual da União (PPA) e as metas estabelecidas de quatro em quatro anos, condizendo com as revisões do PPA. Os programas estão relacionados ao PPA 2012–2015, sendo que os recursos disponíveis para a implantação de cada programa são discutidos dentro da Lei Orçamentária Anual (LOA) da União. Os programas estão divididos nas temáticas Resíduos Sólidos, Logística Reversa e Saneamento Básico.

Importante notar que na área de resíduos sólidos existe legislação específica para a área sanitária, propriamente, mas falta ainda legislação / regulação nas áreas de produção e comercialização de energia e biometano, além de preços e tarifas específicas para o setor.

Merece destaque, ainda, que alguns temas como capacitação e assistência técnica, desenvolvimento tecnológico, disponibilização de recursos e financiamentos em condições diferenciadas, padronização de procedimentos de licenciamento ambiental – amplamente discutidos no Plano, retratam a base das barreiras encontradas para o desenvolvimento de projetos de biogás no Brasil. Esta consonância denota, por um lado, o reconhecimento de que o setor de RSU necessita de instrumentos específicos para se desenvolver e que o arcabouço legal do setor reconhece tais especificidades; por outro lado, apesar da sinergia verificada entre as diretrizes estratégicas da PNRS, do Plano Nacional e as principais demandas do setor, constata-se uma latência na implantação efetiva das medidas propostas.

A latência atribuída à implantação das medidas já consideradas na PNRS pode estar relacionada, em um primeiro momento, à falta de entendimento

da complementaridade das tecnologias e processos existentes para valorização das distintas frações dos resíduos. Por este motivo, predominam ações isoladas, voltadas aos resíduos orgânicos de determinada fonte via compostagem, ou direcionadas aos resíduos recicláveis. Em um segundo momento, falta a disponibilidade imediata, no mercado, das soluções técnicas existentes para gestão dos resíduos orgânicos, e a consciência que a disposição dos mesmos em aterros sanitários não é uma alternativa tecnicamente recomendada, já sendo restrita ou proibida em legislações mais avançadas. Associada a esta lacuna técnica, sente-se ainda a falta de experiências bem sucedidas para demonstrar a viabilidade técnica e reduzir o risco dos investimentos no setor. A efetiva implementação da PNRS e do Plano Nacional de Resíduos Sólidos depende da superação dessas barreiras.

Por último é necessário atentar para o fato de o Plano Nacional não ter ainda entrado em vigor na forma de Lei como previsto no Decreto 7.404/2010 que regulamenta a Lei 12.305 e cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de RSU. Tal decreto estabeleceu que o Plano deveria incorporar sugestões de audiências públicas e ser apreciado por diversos conselhos nacionais. Até o momento o Conselho Nacional de Política Agrícola não se reuniu nem se manifestou. Além deste grande impasse institucional, no dia 9/12/14 o Comitê Interministerial reuniu-se e determinou a reinstalação do GT-1 com a missão de promover a revisão do Plano tendo em vista a atualização, uma vez que os prazos sugeridos a este, no bojo da Lei 12.305/2010, não seriam mais factíveis.

6.2 Caracterização dos resíduos sólidos urbanos no Brasil

As características dos RSU gerados atualmente no Brasil têm direta relação com as estratégias de manejo e tratamento a serem implementadas para sua efetiva gestão.

De forma a possibilitar esta análise, apresenta-se a seguir a caracterização do setor, taxas de geração e características do RSU, e formas de manejo e disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, de forma a possibilitar o entendimento de como a metanização poderia influenciar no melhor tratamento da FORSU, de maneira concomitante com demais estratégias para o setor.

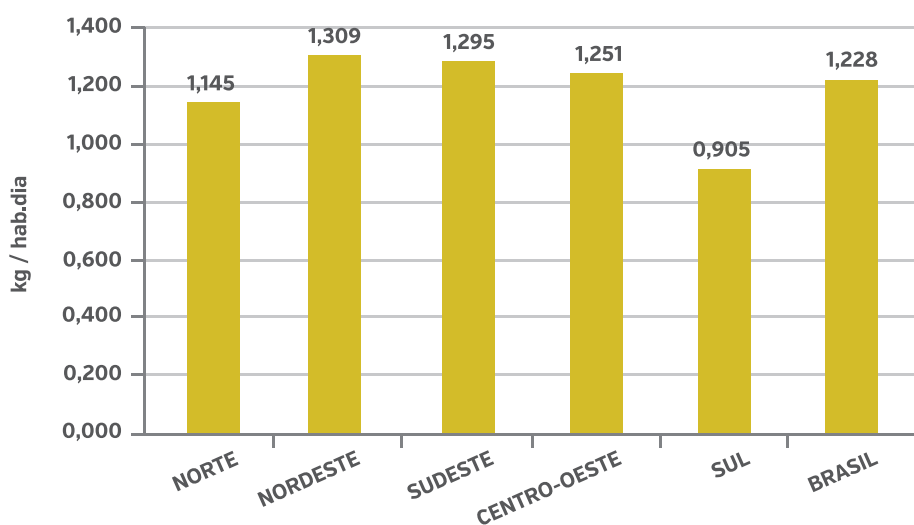
Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos urbanos englobam os resíduos domiciliares, oriundos de atividades domésticas em residências urbanas, e os resíduos de limpeza urbana, provenientes de serviços de varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, entre outros serviços de limpeza.

Segundo a ABRELPE (2013), entre os anos de 2011 e 2012 houve um acréscimo na geração de resíduos sólidos urbanos da ordem de 1,3%, superando a taxa de crescimento demográfico, equivalente a 0,9% para o mesmo período. Em 2012, foram geradas 62.730.096 toneladas de RSU, correspondendo a uma geração per capita aproximada de 383,2 kg/hab.ano e representando um aumento de 0,4% em relação ao ano anterior. A Figura 38 apresenta o índice de geração de RSU diária por habitante para cada região brasileira.

O mercado relacionado à limpeza urbana movimentou cerca de R\$ 23 bilhões em 2012, indicando um aumento aproximado de 7% em relação ao ano de 2011 e evidenciando sua relevância no cenário econômico nacional

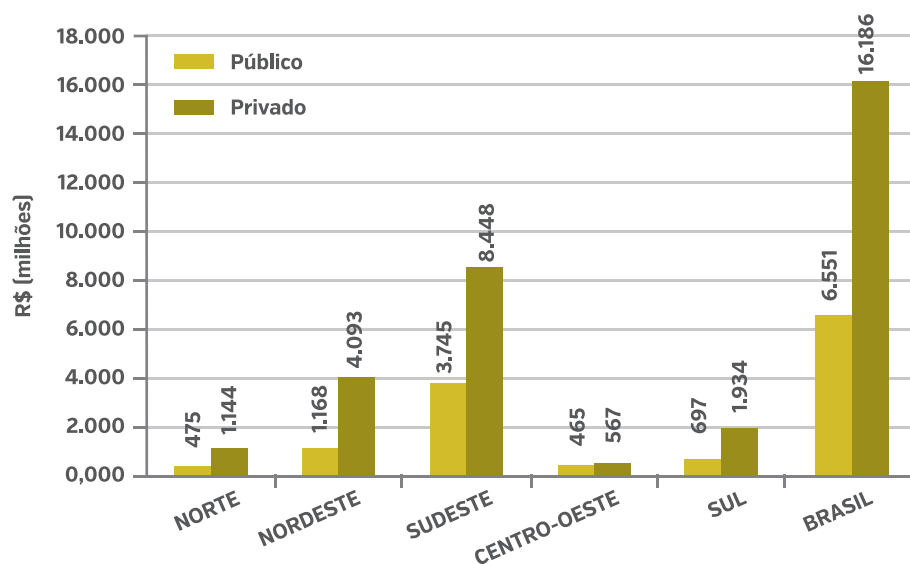
(ABRELPE, 2013). Cabe destacar que o volume de recursos financeiros privados movimentados pelo mercado de limpeza urbana, em 2012, foi significativamente superior aos recursos públicos alocados no mesmo período, situação recorrente nas distintas regiões do país (Figura 39). Este dado indica que a iniciativa privada tem encontrado terreno fértil no setor de resíduos e tal característica deve ser considerada na elaboração de políticas e incentivos específicos para projetos de biogás no setor de RSU.

Figura 38: Geração de RSU per capita por região brasileira em 2012.



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2013).

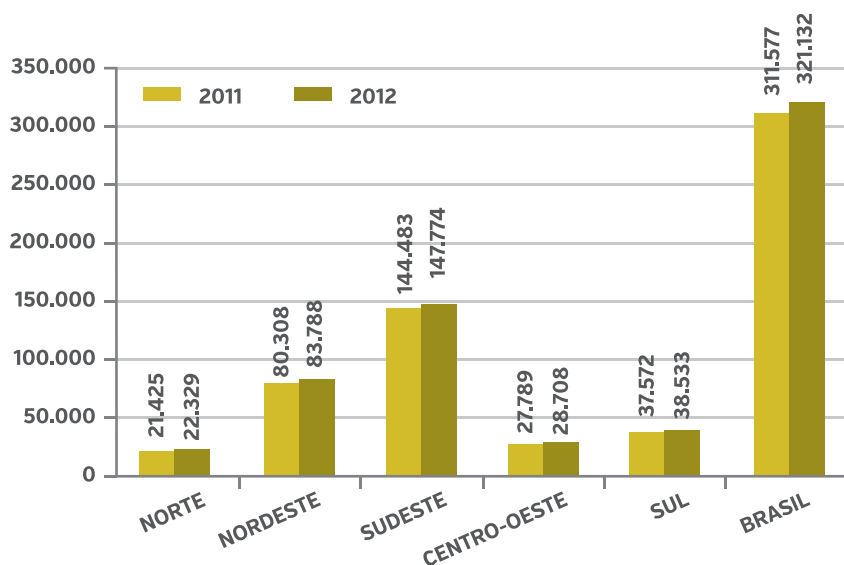
Figura 39: Volume de recursos movimentados por atividades relacionadas à limpeza urbana em 2012.



Fonte: ABRELPE (2013).

Observa-se também, o aumento na alocação de recursos humanos no mercado de limpeza urbana. A Figura 40 apresenta os empregos diretos gerados pelo serviço de limpeza urbana nas regiões brasileiras, indicando a maior alocação de pessoal na atividade, mas não necessariamente indica maior disponibilidade de mão-de-obra capacitada no setor.

Figura 40: Empregos diretos gerados pelo serviço de limpeza urbana em 2011 e 2012.

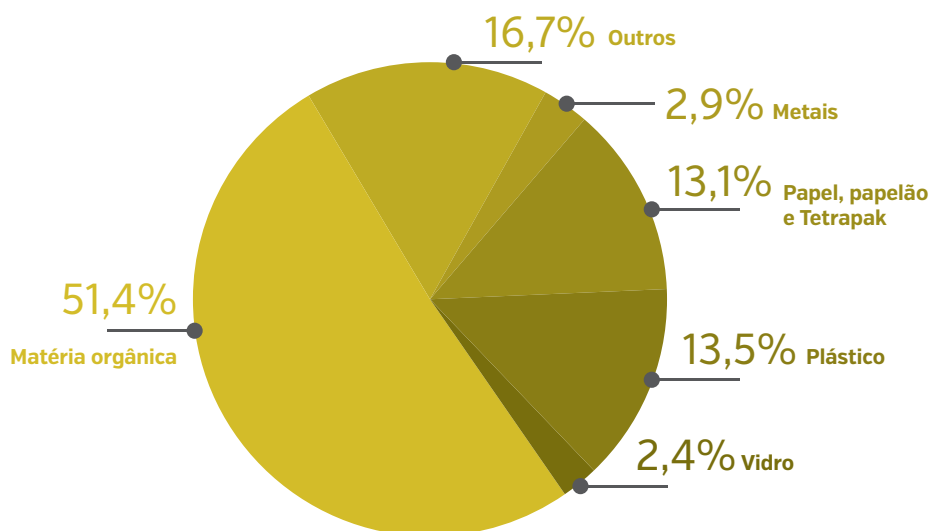


Fonte: ABRELPE (2013).

Ferreira (2000) afirma que a geração per capita diária de resíduos sólidos domiciliares é dependente das condições econômicas da cidade, variando de 0,5 a 1,2 kg/hab.

Conforme mencionado anteriormente, os resíduos sólidos urbanos são compostos por resíduos domiciliares e os resíduos de limpeza urbana. Das 56.561.856 toneladas de resíduos coletados no Brasil em 2012, a maior parcela corresponde à matéria orgânica e ao material reciclável, o que indica a importância da metanização como alternativa tecnológica complementar às formas de segregação visando a reciclagem (Figura 41).

Figura 41: Porcentagem em peso de cada tipo de RSU coletado.



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2013).

O fato de o material orgânico constituir mais da metade do total de resíduos sólidos urbanos gerados no país indica a importância da metanização para o gerenciamento adequado destes resíduos. Considerando ainda seu potencial para geração de energia incentivada, somado à possibilidade de redução de

gases efeito estufa e poluição que seu tratamento acarreta, a fração orgânica poderia ter maior atenção em termos de políticas estratégicas no Brasil, a exemplo da Europa e outros países no mundo.

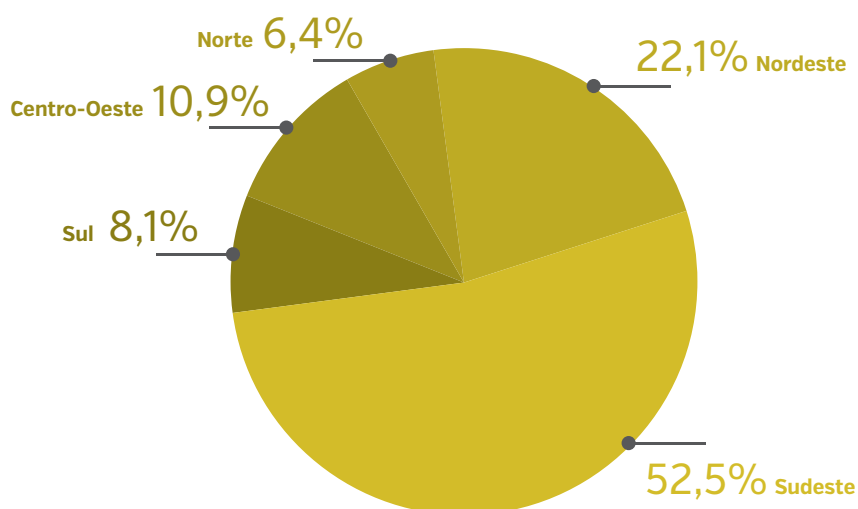
Entretanto, segundo Ferreira (2000), os resíduos domiciliares contêm alguns compostos que, mesmo em pequenas concentrações, podem conferir certa periculosidade a estes resíduos, tais como pilhas, baterias, óleo de motor, tintas, pesticidas, embalagens de inseticidas, solventes, produtos de limpeza, lâmpadas, termômetros, medicamentos e cosméticos. A presença destes materiais não tende a dificultar o tratamento da fração orgânica via metanização, entretanto, prejudica a qualidade final do composto orgânico, ou biossólido, obtido ao final do processo, bem como seu uso posterior para fins agrícolas. Este tema possui relevância uma vez que a destinação dos materiais finais impacta diretamente na viabilidade técnica e econômica de plantas de metanização, em particular àquelas localizadas nas adjacências de áreas urbanas. Este tema deve ser trabalhado na busca por melhorar a segregação de componentes indesejáveis e a qualidade do composto final.

6.2.1 Caracterização dos serviços de manejo envolvidos e disposição de RSU

No Brasil, a situação do manejo de RSU é bastante diferente de países da Europa, sendo a coleta o principal serviço prestado e a destinação aos aterros sanitários a principal forma de descarte adequado destes materiais. Do volume total de resíduos gerados em 2012, aproximadamente 90,17% foram coletados (56.561.856 toneladas), o que resulta em cerca de 6 milhões de toneladas de RSU não coletados, sendo a região rural a mais carente do serviço. A existência de coleta regular é condição base para a implantação de processos e rotas tecnológicas para tratamento dos resíduos, seja via metanização ou outras alternativas de tratamento, e a carência deste serviço é apontado como fator crítico no setor (BRASIL, 2007).

A participação percentual de cada região brasileira na quantidade de resíduos coletados é apresentada na Figura 42.

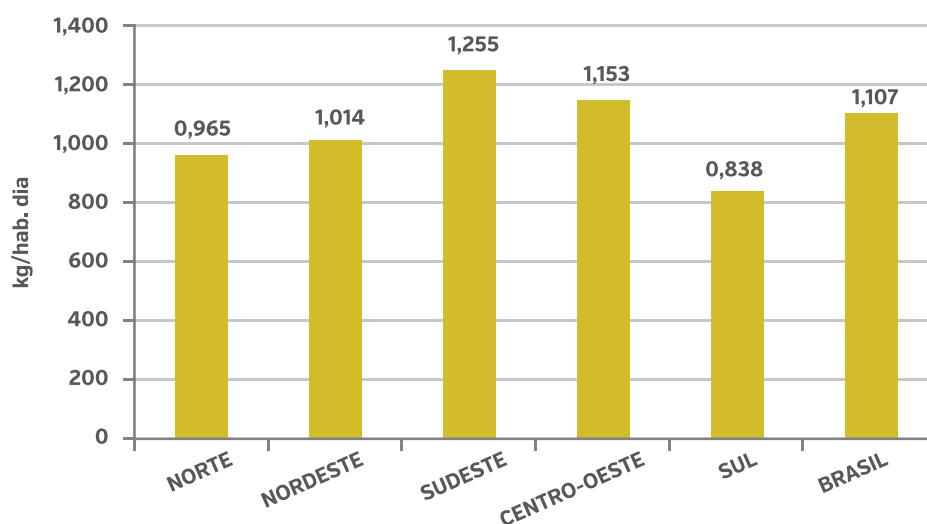
Figura 42: Participação de cada região na quantidade de RSU coletados.



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2013).

Considerando a quantidade de resíduos coletados por habitante por dia em 2012, chega-se a uma média nacional de 1,107 kg/hab.dia, sendo o sudeste a região que apresenta o maior índice (1,255 kg/hab.dia) e o sul a região com menor índice (0,838 kg/hab.dia), conforme apresentado na Figura 43.

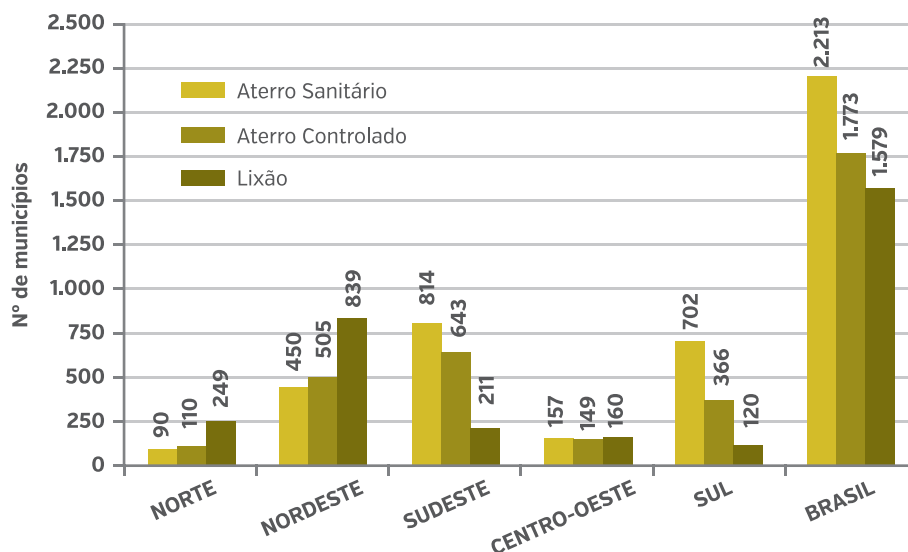
Figura 43: Coleta de resíduos per capita por região brasileira em 2012.



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2013).

Em 2012, 42% dos resíduos coletados (23.767.224 toneladas) foram inadequadamente destinados, sendo encaminhados para lixões ou aterros controlados, os quais não possuem sistemas de controle ambiental para mitigar os riscos ao meio ambiente e à saúde pública (ABRELPE, 2013). Em termos municipais, este montante se distribui entre cerca de 60% dos municípios brasileiros que destinam os resíduos sólidos urbanos a locais considerados inadequados. Somente na região sul e sudeste há maior quantidade de municípios que utilizam aterros sanitários para destinação do RSU (Figura 44).

Figura 44: Quantidade de municípios por destinação final de RSU em 2012.



Fonte: Elaborado a partir de ABRELPE (2013).

Tabela 18: Destinação dos resíduos domiciliares e/ou públicos coletados nos anos de 2000 e 2008.

Considerando outras formas de destinação final de resíduos sólidos urbanos, nota-se, de maneira geral, que a quantidade de resíduos cuja destinação foi inadequada diminuiu, considerando o período compreendido entre 2000 e 2008 (Tabela 18).

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

Nota: SI - sem informação. Na PNSB 2008 não se utilizou essa opção como destino final.

Fonte: Brasil (2007).

Em relação à coleta seletiva, observa-se que, em 2012, 60% dos municípios contavam com este serviço, seja por meio da disponibilização de locais de entrega voluntária (LEV), também conhecidos como PEV (pontos de entrega voluntária) ou eco-pontos ou por meio de convênios com cooperativas de catadores (ABRELPE, 2013). Apesar do número parecer representativo, o serviço prestado não atende a totalidade dos municípios. A Tabela 19 a seguir apresenta o número absoluto e porcentagem de municípios que contam com o serviço de coleta seletiva, por região brasileira.

Tabela 19: Quantidade de municípios que contam com serviço de coleta seletiva.

REGIÃO	Nº DE MUNICÍPIOS COM SERVIÇO DE COLETA SELETIVA	PORCENTAGEM DE MUNICÍPIOS COM SERVIÇO DE COLETA SELETIVA
Norte	213	47,4%
Nordeste	678	37,8%
Sudeste	1.342	80,5%
Centro-Oeste	148	31,8%
Sul	945	20,5%
Brasil	3.326	59,8%

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2013).

A implantação de uma coleta seletiva básica, focada apenas na separação dos resíduos “úmidos” (orgânicos) dos resíduos “secos” (inorgânicos em geral) tenderia a ampliar estes valores e facilitar a gestão e demanda de infraestrutura por parte dos municípios. Como resultados, haveria incremento na reciclagem dos materiais e facilitaria a aplicação de tecnologias de metanização da FORSU, uma vez que as frações não conteriam grandes proporções de impróprios ou contaminantes, advindos da outra fração.

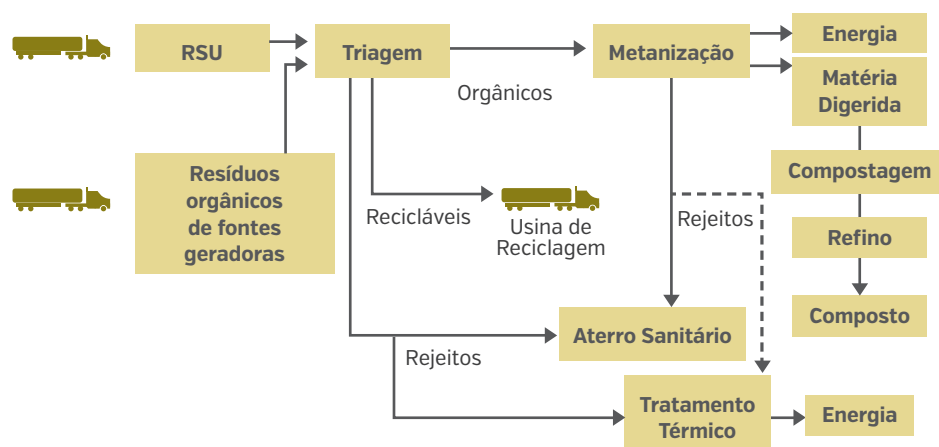
De modo geral, a avaliação das políticas públicas no âmbito da gestão de resíduos, bem como a situação do manejo do RSU no Brasil são fatores primordiais para a definição tecnológica relacionada ao tratamento de resíduos sólidos urbanos. De modo geral, é possível avaliar que existe uma base legal de fomento para o aproveitamento energético do RSU no âmbito das políticas de saneamento, entretanto, para alguns analistas faltam incentivos governamentais ao mercado de biogás (fiscal, tributário) enquanto fonte de energia incentivada, visando apoio à geração de energia renovável proveniente do setor.

O próximo capítulo apresenta os aspectos para definição da tecnologia com maior viabilidade para replicação no País, com base no contexto político-institucional e características do RSU gerado no Brasil, e apresenta um estudo de caso de uma tecnologia nacional em desenvolvimento.

6.3 Tecnologias para valorização da fração orgânica dos resíduos sólidos urbano

Apesar da existência de distintas alternativas de tratamento da FORSU, a metanização assume liderança se considerarmos os inúmeros benefícios que associa, relacionados ao saneamento e meio ambiente. Entretanto, a implantação dessa tecnologia implica em condições fundamentais para sua efetividade, como a coleta regular; um sistema de triagem para separação dos recicláveis e impróprios (vidros, madeira, fragmentos em geral); um sistema de metanização para a fração orgânica recuperada; a necessidade da disposição do material que não se enquadra como orgânico nem como reciclado, que pode ser direcionada a aterros sanitários ou tratamento térmico, visando a geração de energia adicional; e por fim, uma unidade de pós-tratamento da matéria orgânica digerida visando a geração de um composto de qualidade (compostagem e refino) e o tratamento/utilização do efluente líquido. A metanização, em si, se constitui em apenas uma etapa de um processo de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos integrado.

Figura 45: Fluxograma do processo de valorização integral do RSU, ilustrando as etapas de tratamento das distintas frações dos resíduos.



Fonte: Methanum.

Se considerarmos a principal fraqueza do Brasil em termos de gestão de RSU – a falta de coleta seletiva e baixa qualidade do material orgânico – depara-se com a principal restrição que as tecnologias secas europeias possuem – a limitação de teores de materiais impróprios no substrato, que causam perda de eficiência e inúmeros problemas operacionais.

A falta de coleta seletiva demanda, a priori, um sistema de pré-tratamento para o RSU de forma a garantir uma fração orgânica de qualidade para a metanização. Entretanto, esta situação tenderia a ampliar consideravelmente os custos de implantação desta alternativa tecnológica, que já se caracteriza por elevado custo de investimento (CAPEX). Esse aumento muitas vezes inviabiliza a instalação do empreendimento uma vez que predomina uma incerteza quanto as receitas da planta em termos de taxa de recepção dos resíduos, preço de venda da energia e preço de venda do composto orgânico gerado, já que não há garantias quanto a sua qualidade dada a possibilidade de contaminação do RSU (metais pesados provenientes de pilhas, baterias etc).

Conforme discutido no capítulo anterior, a presença de impróprios nos sistemas de metanização não compromete diretamente o processo anaeróbio, mas prejudica a eficiência operacional de plantas de metanização e compromete as estruturas dos componentes do sistema, podendo culminar na falha e interrupção do processo.

O problema gerado pela existência de impróprios é agravado em sistemas de metanização que operam em regime de fluxo contínuo ou semicontínuo, nos quais se enquadram as tecnologias secas apresentadas anteriormente (Dranco, Kompogas, Valorga, Laran), que têm tido problemas quanto à operação de reatores com RSU com elevado índice de impróprios.

O mesmo não ocorre nos sistemas de metanização que operam via processos descontínuos, ou em bateladas, também denominados extrassecos, uma vez que ocorre a completa extração do material ao final do tempo de digestão, evitando quaisquer riscos de obstruções ou wash-out da biomassa, já que os microorganismos ficam mantidos em um reator a parte.

Por outro lado, se considerarmos as principais fontes geradoras isoladamente, como os restaurantes industriais, centrais de abastecimento (CEASAs), etc., pode-se garantir resíduos orgânicos de qualidade, segregados na fonte, e divergir sua destinação do aterro sanitário. Neste caso, as tec-

nologias de metanização seca (Dranco, Kompogas, Valorga, Laran) poderiam ser aplicadas, caso a reduzida escala não fosse impeditivo, uma vez que estas tecnologias tendem a se viabilizar economicamente com ganhos de escala dos projetos. Além disto, os custos de importação são outro fator impeditivo, pois reduzem a viabilidade econômica da planta face à imprevisibilidade das receitas a serem geradas (taxa de recepção, venda de energia, venda do composto, tratamento/utilização do efluente líquido). Soma-se ainda a falta de referências nacionais de plantas similares, que somada à dificuldade de obtenção de serviços de pós-venda e pouca capacitação existente no mercado, tendem a aumentar o risco dos projetos. Todos estes fatores se constituem em barreiras para a implantação de tecnologias secas europeias no Brasil.

Devido a tais fatores, o desenvolvimento tecnológico nacional torna-se estratégico, pois tende a fomentar o mercado de biogás, na medida em que se constitui em uma unidade referência da tecnologia e comprova a sua viabilidade. Desta forma, espera-se que o aumento da oferta tecnológica resulte em maior concorrência, e, portanto, na redução de custos a médio prazo.

Em termos tecnológicos, se considerarmos as limitações do RSU ainda não segregado, podemos considerar que os sistemas com maior adequabilidade para aplicação no Brasil seriam os túneis de metanização, a exemplo das tecnologias extrassecas apresentadas anteriormente.

Face a esta percepção, esforços têm sido direcionados ao desenvolvimento de uma tecnologia que se baseia no conceito das tecnologias extrassecas europeias, mas com diferenciais que visam agregar vantagens competitivas e maior aplicabilidade à realidade nacional.

A Tabela 20 apresenta uma comparação entre os principais atributos relevantes entre as rotas tecnológicas de tratamento da FORSU com maior viabilidade de aplicação no cenário nacional, considerando o RSU não segregado: (i) Compostagem; (ii) Túneis de metanização europeus; (iii) Tecnologia extrasseca nacional em desenvolvimento.

Importante notar que a compostagem, assim como as tecnologias extrassecas, podem ser aplicadas a FORSU segregada na fonte, necessitando, neste caso, de uso de material estruturante (como podas de árvores) para evitar a compactação do material.

De toda forma, muito além de serem processos concorrentes, a compostagem e a metanização são processos complementares, na medida em que a compostagem é o processo final ao qual deve ser submetido o material digerido (tratado via anaeróbia), de forma a obter um composto totalmente estabilizado e seco.

A aplicação da tecnologia extrasseca é apenas uma abordagem com maior potencial de replicabilidade no Brasil, principalmente se considerarmos a situação atual do manejo de RSU no país, a baixa qualidade da FORSU e a inexistência de tecnologias nacionais de metanização, sejam via seca ou úmida.

Com base neste cenário, apresenta-se a seguir a abordagem tecnológica descrita como “nova tecnologia nacional”¹³, que trata da aplicação de uma tecnologia extrasseca desenvolvida nacionalmente para tratamento da FORSU.

13: O projeto é uma iniciativa da empresa Methanum Resíduo e Energia, em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) / Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) e FUNDEP, com colaboração financeira do BNDES

Tabela 20: Comparação dos atributos relevantes entre as rotas: (i) Compostagem; (ii) Túneis de Metanização Europeus (ii) Tecnologia Extrasseca Nacional em Desenvolvimento

ROTA TECNOLÓGICA	COMPOSTAGEM	TÚNEIS DE METANIZAÇÃO EUROPEUS	TECNOLOGIA EXTRASSECA NACIONAL EM DESENVOLVIMENTO
ATRIBUTO DE COMPARAÇÃO			
Infraestrutura necessária	+++	++	++
Custo de aquisição da infraestrutura	+++	+	++
Custo de operação da infraestrutura	+++	++	++
Geração de biogás	Não aplicável	++	++
Domínio da tecnologia	+	+++	++
Geração de odores indesejáveis	+	++	++
Geração de emprego e renda	++	++	++
Requerimento de área	+	++	+++
Tempo de processamento	++	++	+++
Grau de complexidade da operação	+++	++	++
Qualidade do composto	+	++	++
Balço energético	+	++	+++
Reduções das emissões de gases de efeito estufa	+	+++	+++
Necessidade de descarte de efluentes	++	++	+++
Requerimento de pós-tratamento do material digerido [compostagem]	Não aplicável	+	+++
Uniformidade na qualidade do produto final	++	++	++

+ O símbolo indica melhor desempenho no quesito apresentado. Quanto mais símbolos, melhor o desempenho.

Fonte: Methanum.

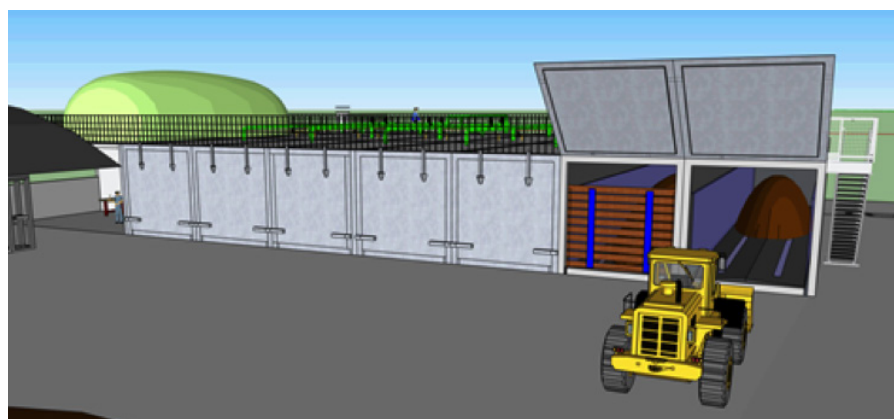
6.3.1 Tratamento Centralizado: Túneis de Metanização

Os Túneis de Metanização de Batelada Sequenciais (TMBS) têm se mostrado bastante eficientes em suas experiências na Europa, e tendem a ser adequados à realidade nacional face às características do RSU brasileiro, já que um dos seus principais diferenciais é possibilitar o tratamento dos resíduos com elevado teor de impróprios.

Os TMBS buscam solucionar os problemas operacionais comuns em grandes plantas de metanização de resíduos sólidos, com propostas inovadoras para reduzir o tempo de tratamento dos resíduos e otimizar a produtividade de biogás. Atendem taxas de geração de resíduos de municípios de pequeno a médio porte (população de 50.000 a 500.000 hab.), assim como centrais geradoras de resíduo orgânico em larga escala (CEASAs, mercados hortifrutigranjeiros, etc.).

O modelo é composto por reatores retangulares dispostos em série, que recebem sequencialmente a FORSU para tratamento até atingir a capacidade de processo de cada túnel. O resíduo permanece no interior do digester pelo período total do processo de metanização. A Figura 46 simula o sistema em operação, em que um túnel está preenchido, pronto para ser selado, outro está em processo de preenchimento, enquanto os demais estão em diferentes etapas da metanização.

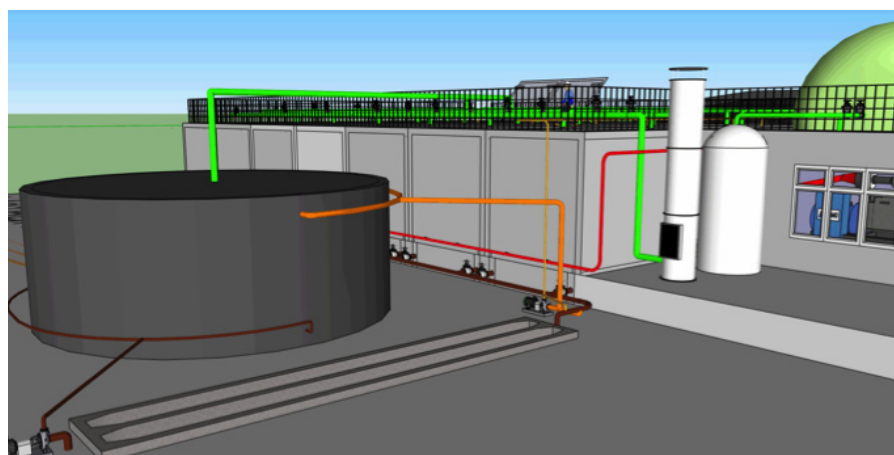
Figura 46: Esquema de preenchimento de um dos túneis e túnel já após o preenchimento pronto para ser selado.



Fonte: Arquivo de projetos Methanum.

Um reator auxiliar, em formato cilíndrico, é utilizado como Unidade Produtora de Inóculo (UPI), coletando os líquidos lixiviados gerados nos TMBS para que sejam mesclados com uma comunidade bacteriana já adaptada, de forma que os microrganismos metanogênicos sejam inoculados. No interior dos túneis não é necessário sistema de agitação, sendo a recirculação do lixiviado responsável pela otimização do processo. Na parte superior de cada TMBS existe um sistema de aspersão de inóculo proveniente da UPI, que é posicionado sobre a FORSU, possibilitando sua percolação e o aporte contínuo dos microrganismos metanogênicos ao material em tratamento. A Figura 47 ilustra a UPI, assim como o sistema de captação, sedimentação e bombeamento de lixiviado e as tubulações que conduzem o biogás, gerado nos túneis.

Figura 47: Unidade de produção de Inóculo (UPI) [tanque], com detalhe do Sistema de Captação, Sedimentação e Bombeamento de Lixiviado (SCSBL) [linhas laranja e vermelha] e tubulações para condução do biogás [linha verde].



Fonte: Arquivo de projetos Methanum.

Como mencionado anteriormente, um dos principais diferenciais da tecnologia é possibilitar o tratamento de resíduos com elevado teor de impróprios e possibilitar o tratamento da FORSU em conjunto com resíduos de poda e/ou agrícolas. É um sistema simplificado de preenchimento e esvaziamento dos reatores, uma vez que pode ser realizado com o auxílio de uma pá-carregadeira; possui simplicidade construtiva e operacional e baixa demanda de energia elétrica; possibilita acesso constante ao interior do reator para que sua manutenção seja realizada; o aproveitamento do volume útil do reator é máximo; pode ser feita a reintrodução constante do inóculo; o calor excedente dos motores de cogeração pode ser aproveitado para a secagem do material digerido, caso a opção de uso do biogás seja geração de energia elétrica e térmica; o resíduo resultante do processo é estabilizado e de fácil remoção de inertes, já que possui baixo teor de umidade; além disso, utiliza equipamentos, quase em sua totalidade, nacionais ou nacionalizados.

Estes diferenciais corroboram para a resolução dos problemas oriundos da acumulação de inertes sedimentáveis no interior do reator, minimização da demanda por sistema de pós-tratamento, otimização da manutenção dos digestores e a redução dos custos associados à introdução e extração dos resíduos no reator devido à não utilização de bombas. Estas demandas são frequentes nas plantas de metanização em todo o mundo, sendo referenciadas como alguns dos principais problemas associados à metanização.

O principal produto obtido com esta tecnologia é o tratamento adequado de resíduos orgânicos, com todos os benefícios associados. Como co-produtos, destacam-se o biogás, com geração de aproximadamente 100 m³ produzidos por tonelada de resíduo orgânico tratado, e os compostos orgânicos, gerados em uma taxa de 500 a 600kg por tonelada de resíduo tratado.

Os compostos orgânicos gerados podem ser utilizados para recuperação de áreas degradadas, recondicionamento de encostas e taludes e recuperação de solos desertificados. Além de ser produzido em menor volume, se comparado com o processo de compostagem, o composto anaeróbio é considerado de melhor qualidade, já que possui maior concentração de nutrientes. Entretanto, ressalva deve ser feita com relação à qualidade padrão do composto e às possibilidades de escoamento desse produto, segundo legislação específica, condições locais de mercado e logística. Tais aspectos devem ser considerados durante a fase de análise de viabilidade dos projetos, sendo avaliado caso a caso.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de processos de metanização para tratamento de resíduos orgânicos já atingiu um elevado grau de maturidade na União Europeia e possui papel expressivo não somente nas metas relacionadas à gestão de resíduos nos países membros como também na consolidação da matriz energética renovável do continente.

A maturidade atribuída ao mercado de metanização europeu se baseia na existência de uma cadeia de produção voltada ao setor, com fornecedores de tecnologias e suprimentos em geral, adequados aos diferentes tipos de resíduos e efluentes, incluindo, mais recentemente, os resíduos sólidos urbanos. Soma-se ainda a existência de inúmeras plantas em operação. Importante salientar também, a existência de instituições de fomento à capacitação e organização do setor, a exemplo da atuação do Centro de Pesquisa e Educação em Gestão de Resíduos- Center for Research, Education and Demonstration in Waste Management (CReED) e da Associação Europeia de Biogás - European Biogas Association (EBA).

Apesar de todo o arcabouço político institucional relacionado com a valorização energética de resíduos e efluentes, somado à experiência adquirida com as plantas de metanização em operação em toda a Europa, ainda há espaço para avanços relacionados à engenharia e operação de plantas desta natureza, em particular quando operando com um substrato de tamanha complexidade como o RSU.

No que tange à operação das tecnologias secas propriamente, os principais problemas evidenciados e que devem ser superados dizem respeito, principalmente, à introdução de materiais não biodegradáveis nos reatores, acarretando em acúmulo e sedimentação de inertes no reator, incrustação e entupimento dos sistemas de introdução, recirculação e extração. A presença de pessoal qualificado nas plantas tende a favorecer a adoção de processos de manutenção e operação preventivas, focada em sanar tais problemas, de forma a ampliar a viabilidade técnica das unidades e reduzir seus custos de operação.

Cabe ponderar, ainda, a importância de melhorias de cunho construtivo na engenharia dos reatores propriamente, de forma que contemplem mecanismos de abertura para eventuais procedimentos de limpeza e remoção de inertes.

De forma geral, pode-se concluir que a definição da tecnologia de metanização mais adequada para cada projeto em particular depende, fundamentalmente, do substrato em questão, tendo sido verificada crescente preferência pelo sistema seco para tratamento da FORSU na Europa devido a menor geração de efluentes líquidos do processo. Para o tratamento desses resíduos, em específico, verifica-se uma tendência de adoção de tecnologias extrassecas, devido à simplicidade operacional do sistema de introdução/extração e baixa ocorrência de problemas relacionados à acumulação de inertes.

Para a definição tecnológica é também fundamental levar em consideração as particularidades do local de implantação e operação destas plantas, como características dos resíduos sólidos urbanos, vocações produtivas da região, condições climáticas, condições de logística e mercados para os

subprodutos gerados, entre outros fatores. Um aspecto importante é o pré-tratamento, que deve ser adequado às características do RSU a ser tratado.

A gestão de resíduos sólidos no Brasil tem se caracterizado por atividades centradas no manejo e disposição final dos resíduos sólidos urbanos, e até a instituição da PNRS constituía-se em um setor carente de um arcabouço legal que regulasse e direcionasse as atividades de seus atores e agentes.

A PNRS introduziu importantes conceitos e regulamentações, que se fundamentam, basicamente, no aproveitamento integral das frações que compõem os RSU antes de sua disposição final, seja por meio da reciclagem, metanização, compostagem ou logística reversa. Por si só esta determinação já muda os paradigmas da atual gestão de resíduos no país, pautada em contratos de longo prazo onde resíduo vale o quanto pesa, de maneira indiscriminada, o que tem favorecido o aterramento de material de imenso potencial energético.

A abordagem tecnológica apresentada no presente relatório teve como base as principais premissas da PNRS e trata apenas de uma das soluções possíveis para um melhor gerenciamento dos resíduos orgânicos no Brasil, que pode variar conforme condições locais, contexto político-institucional e recursos financeiros disponíveis.

Por fim, espera-se que o referencial tecnológico ora apresentado dê subsídios para futuras ações voltadas para a valorização da FORSU no Brasil via metanização seca ou extrasseca, de forma a fomentar melhorias operacionais e construtivas com base na realidade dos resíduos sólidos urbanos e contexto local de operação destes sistemas.



REFERÊNCIAS

- ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: 2012. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm>. Acesso em: 02 dez. 2013.
- ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Resíduos Sólidos: Manual de Boas Práticas no Planejamento. Disponível em: <<http://a3p.jbrj.gov.br/pdf/ABRELPE%20Manual%20BOAS%20PRACTICAS%202013.pdf>> Acesso em: 19 fev. 2014.
- AUSTERMANN, S.; ARCHER, E.; WHITING, K. J. Comercial Assessment - Anaerobic Digestion Technology for Biomass Projects, Juniper for Renewables East. Juniper for Renewable East, 2007. Disponível em: <[http://www.biomassenergycentre.org.uk/pls/portal/docs/PAGE/RESOURCES/REF_LIB_RES/PUBLICATIONS/RENEWABLES%20EAST%20-%20ANAEROBIC%20DIGESTION%20\(FULL%20REPORT\).PDF](http://www.biomassenergycentre.org.uk/pls/portal/docs/PAGE/RESOURCES/REF_LIB_RES/PUBLICATIONS/RENEWABLES%20EAST%20-%20ANAEROBIC%20DIGESTION%20(FULL%20REPORT).PDF)>.
- AXPO KOMPOGAS NEUE ENERGIEN. Disponível em: <<http://www.kompogas.ch>>.
- Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. Balance anual de residuos 2008. Dpto. Medio Ambiente y Sostenibilidad. 2009. Disponível em: <<http://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/http/contenidosEstaticos/adjuntos/34050.pdf>>.
- BARCELOS, A.; BALLESTRIN, R.; COUTINHO, P.; CARILLO, A.; REICHERT, G. A. (Coord.). Estudo de Viabilidade e Sustentabilidade Projeto Ecoparque Porto Alegre: Relatório Final. Convênio DMLU, CGTEE e ELETROBRÁS, 279 p, 2004.
- BARCO, J. J. G. El Ecoparque de La Rioja: Experiência Prática de Obtención de Energía de los Resíduos Urbanos. Consorcio de Aguas y Residuos de La Rioja, 2007. Disponível em: <<http://www.fundaciongasnatural.org/SiteCollectionDocuments/Actividades/Seminarios/Logro%C3%B1o%20311007/5.-%20D.%20Juan%20Jos%C3%A9%20Gil%20Barco.pdf>>.
- BECCARI, M.; BONEMAZZI, F.; MAJONE, M.; RICCARDI, C. Interaction between acidogenesis and methanogenesis in the anaerobic treatment of olive oil mill effluents. Water Research.v.30, n.1, p.183-189, 1996.
- BEKON. Energy for the future Dry Fermentation. Innovative Solutions for Cities and Agriculture.2012. Disponível em: <http://www.bekon.eu/productdownloads.html>
- BIOFERM Energy Systems. The BIOFerm™ Dry Fermentation System.2013. Disponível em: <http://www.biofermenergy.com/bioferm-system/>
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Neue Wege zur Prozessoptimierung in Biogasanlage – band 11. 2013
- BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental / Ministério das Cidades. Resíduos sólidos: plano de gestão de resíduos sólidos urbanos: guia do profissional em treinamento: nível 2. Belo Horizonte: ReCESA, 2007. 96 p.

BUSWELL, A. W.; BORUFF, C. B. The Relationship Between Chemical Composition of Organic Matter and the Quality and Quantity of Biogas Production During Digestion. *Sewage Works Journal*, v. 4, N. 3, p. 454, 1932.

CADDET - CENTER FOR RENEWABLE ENERGY, Technical Brochure No. 154 - Upgrading of Biogas to Natural Gas Quality. IEA. Reino Unido, 4 p. 2001. Disponível em: <<http://www.caddet-re.org/assets/no154.pdf>>.

CASSINI, S. T. (coord.). Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 210 p. Projeto PROSAB.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: DESA-UFMG. P. 245, 1997.

CHERNICHARO, C.A.L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores Anaeróbios. 2a.ed. Belo Horizonte: Departamento de engenharia Sanitária e Ambiental, 2007.

CHYZASTEK, J. Biogazownie Rolnicze Firmy Strabag Realizowane w Technologiach - Laran® Suche i Mokrej. In: SEMINARIUM BIOENERGIA W ROLNICTWIE, 2009, Poznań, Polônia. Apresentação: 2009. Disponível em: <http://www.czystaenergia.pl/pdf/farma2009_07.pdf>.

DE BAERE, L. Dranco Process: A Dry Continuous System for Solid Organic Waste and Energy Crops. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANAEROBIC DRY FERMENTATION, 2008, Berlim, Alemanha. Apresentação: 2008. Disponível em: <http://www.ows.be/pub/Dranco-Process_IBBKfeb08.pdf>.

DE BAERE, L. Trends and Perspectives for Anaerobic Digestion: An Overview. In: ISWA BEACON CONFERENCE: 'The Global Challenge: Optimising The C-Cycle, 2008, Perugia, Itália. Disponível em: <http://www.iswa.it/materiali/ISWA_beacon_conference_2008/Proceedings%20Iswa%20Beacon%20Conference%202008/1-%20Thursday%2022nd%20May%20-%202008/Session%203%20-%20The%20anaerobic%20option/Luc%20De%20Baere.pdf>.

DE BAERE, L.; MATTHEEWS, B. State-of-the-art 2008 - Anaerobic Digestion of Solid Waste. *Waste Management World*. v.9, N. 4, Julho 2008. p. 8. Disponível em: <<http://www.waste-management-world.com/index/display/article-display/339836/articles/waste-management-world/volume-9/issue-4/features/state-of-the-art-2008-anaerobic-digestion-of-solid-waste.html>>.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA - 2008.

EDELMANN, W.; ENGELI, H. More than 12 Years of Experience with Commercial Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes in Switzerland. In: CONGRESS: ANAEROBIC DIGESTION OF SOLID WASTE ADSW, 2005, Copenhagen, Dinamarca. Artigo. 2005. Disponível em: <<http://www.arbi.ch/ADsw.pdf>>.

EGGERSMANN. The Kompoferm concepts. Innovative biogas plants for energy production from bio-waste and other organic wastes. 2013. Disponível em: http://www.f-e.de/db/docs/KOMPOFERM-Concepts-2013_EN_web.pdf.

ENERGAIA, Digestão Anaeróbia – Metodologia de Desenvolvimento. 2006. 14p. Disponível em: <http://www.biologicaonline.net/pt/attachments/DataBase/attachs2.pdf>.

ENERGAIA, Digestão Anaeróbia – Metodologia de Desenvolvimento. 2006. 14p. Disponível em: <http://www.biologicaonline.net/pt/attachments/DataBase/attachs2.pdf>.

Entitat del Medi Ambient, Dades Ambientals Metropolitans 2006. 149p. 2007. Disponível em: http://www.amb.cat/web/emma/publicacions/dades_06.

Entitat del Medi Ambient, Dades Ambientals Metropolitans 2007. 159p. 2008. Disponível em: http://www.amb.cat/web/emma/publicacions/dades_07.

Entitat del Medi Ambient, Dades Ambientals Metropolitans 2008. 222p. 2009. Disponível em: http://www.amb.cat/web/emma/publicacions/dades_08.

Entitat del Medi Ambient, Dades Ambientals Metropolitans 2009. 208p. 2009. Disponível em: http://www.amb.cat/web/emma/publicacions/dades_09.

Entitat del Medi Ambient, Technical Script. Ecoparc 2, Pensem en Positiu. 2004. Disponível em: http://www.dadesambientals.cat/EMSHTR/aplicacions/ecoparc2005/ecoparc_start.swf.

FERREIRA, J. A. Resíduos sólidos: Perspectivas atuais. In: SISINNO, C. L. S.; OLIVEIRA, R. M. Resíduos sólidos, ambiente e saúde: Uma visão multidisciplinar. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 2000. pag. 19-40.

FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane. Global Trends in Waste Management. Alemanha: Technische Universität Braunschweig/ Center for Research, Education and Demonstration in Waste Management, 2013.

GENERAL ELECTRIC COMPANY - GE's Jenbacher Gas Engines. Disponível em: http://www.gepower.com/prod_serv/products/recip_engines/en/index.htm.

GOBIERNO DE LA RIOJA, Sacar Partido a lo Inservible. Páginas de Información Ambiental. ASCACÍBAR, M. R. [Coord.]. Editora: Gobierno de La Rioja. N. 21. 4 – 9 p. 2005. Disponível em: http://www.ecoparquedelarioja.es/noticias/092005_informacion_ambiental_sacar_partido_a_lo_inservible.pdf.

GOMES, F. Biometanização Seca de Resíduos Sólidos Urbanos: O Estado da Arte e uma Análise Crítica das Principais Tecnologias. 2010. 198p. Dissertação – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG 2010.

HILL, A.; WOODRUFF, P.; ALARCÓN, G.; AZALI, S.; COOKE, E.; DIPAULO, K.; MARKARIAN, N.; MUTO, K.; ROSE, J.; PANT, D.; WOWK, K. Solid Waste Management Alternatives for The City of New York. Environmental Science & Policy Research Team, School of International and Public Affairs, Columbia University, and the Earth Institute Master of Public Administration Program in Environmental Science and Policy, Columbia University. 2005. Disponível em: <<http://www.columbia.edu/cu/mpaenvironment/pages/projects/EDC%20Submission.pdf>>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2013.

INTERNATIONAL, R. Feasibility of Generating Green Power through Anaerobic Digestion of Garden Refuse from the Sacramento Area - Final Report. Report to SMUD Advanced Renewable and Distributed Generation Program - Ris International Ltda. and MacViro Consultants Inc. Sacramento, EUA. 2005. Disponível em: <http://www.nerc.org/documents/sacramento_feasibility_study.pdf>.

Junta de Castilla y León, Plan Regional de Âmbito Sectorial de la Bioenergía en Castilla y León. 182 p. 2010. Disponível em: <<http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/619/314/PBCyL%20-%20Doc%20principal%20310110.pdf?blobheader=application/pdf;charset%3DUTF-8&blobnocache=true>>.

KELLEHER, M.; Anaerobic Digestion Outlook for Msw Streams, BioCycle, Vol. 48, N. 8, p. 51, 2007.

KUTTNER - Kuttner do Brasil Equipamentos Siderúrgicos Ltda. Proposta Técnica e Comercial 4466.0-PO-0809-Rev.0, Fermentadores para Resíduos Orgânicos. 2009.

LETTINGA G.; VAN VELSEN A. F. M.; HOBMA S. W.; DE ZEEUW W.; KLAPWIJK A. Use of Upflow Sludge Blanket (USB) reactor concept for biological wastewater Treatment especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering.v.22, p.699-734, 1980.

LIMA, Daniela Arantes Alves; CARVALHO, Eduardo. O BNDES e sua participação no setor de resíduos sólidos no Brasil - Estruturas de financiamento. Brasília: Departamento de Economia Solidária, nov. 2012. Apresentação.

MATTHEEUWS, B. Status of the Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Europe. In: CONFERENCE: AD Conference 2011: "The Future of Anaerobic Digestion in Europe", Dublin, Irlanda. 2011.

MCCARTY, P.L. Anaerobic waste treatment fundamentals. Public Works. 1964.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB. Brasília: dez. 2013.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Plano Nacional de Saneamento Básico 2011. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=736:brasil-tera-seu-plano-nacional-de-saneamento-basico-em-2011&catid=84&Itemid=113> Acesso em: 21 fev. 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – Destaques da Política Nacional de Resíduos. Disponível em: < http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu_urbano/_arquivos/folder_pnrs_125.pdf> Acesso em: 19 fev. 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Política Nacional de Resíduos Sólidos – Contexto e Principais Aspectos. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/contextos-e-principais-aspectos>> Acesso em: 19 fev. 2014a.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Política Nacional de Resíduos Sólidos – Linha do Tempo. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/linha-do-tempo>> Acesso em: 19 fev. 2014b.

OGEJO, J. A.; WEN.Z.; IGNOSH, J.; BENDFELDT, E.; COLLINS, E. R.; Biomethane Technology. Virginia Cooperative Extension. Virginia State University. 2009. Disponível em: < <http://pubs.ext.vt.edu/442/442-881/442-881.pdf>>.

ORGANIC WASTE SYSTEMS. Disponível em: <<http://www.ows.be>>.

OSTREM, K. Greening Waste: Anaerobic Digestion for Treating the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. 2004. 54 p. Dissertação [Mestrado em Earth Resources Engineering] - Foundation of School of Engineering and Applied Science, Columbia University, Nova York, EUA, 2004. Disponível em: <http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Ostrem_Thesis_final.pdf>.

RISE-AT - REGIONAL INFORMATION SERVICE CENTER FOR SOUTH EAST ASIA ON APPROPRIATE TECHNOLOGY. Review of Current Status of Anaerobic Digestion Technology for Treatment of Municipal Solid Waste. Institute of Science and Technology Research and Development. Chiang Mai University. 1998. Disponível em: <<http://www.ist.cmu.ac.th/riseat/documents/adreview.pdf>>.

SALOMON, K. R. e LORA, E. E. S. Estimate of The Electric Energy Generating Potential for Different Sources of Biogas in Brazil. Biomass and Bioenergy, v. 33, p. 1101-11-7, 2009.

SCHMID, W. Biokraftstoffe aus Biomüll am Beispiel des Kompogas-Verfahrens – Kompogas. In: E-WORLD ENERGY & WATER, 2008, Messe Essen, Alemanha. Apresentação. 2008. Disponível em: <http://www.energieregion.nrw.de/_database/_data/datainfopool/FK2008-A7Schmid.pdf>.

SCHU, K. Anaerobic Digestion of Waste. Problems whit Contraries and Innovative Solutions. IN: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY FROM BIOMASS AND WAST, Veneza, 2008.

STRABAG – Umweltanlagen. Disponível em: <<http://www.strabag-umweltanlagen.com>>.

STRABAG. Dry Digestion. 2010b. Disponível em: <http://www.strabag.com/databases/internet/_public/content.nsf/Navigation?OpenAgent&docid=D2C34A91EC253E0BC12574E5003B3F2F&urldocid=E8B7EDE5599B8EAFC12574FE005DF025>.

STRABAG. References, 2010a. Disponível em: <http://www.strabag.com/databases/internet/_public/content.nsf/Navigation?OpenAgent&docid=D2C34A91EC253E0BC12574E5003B3F2F&urldocid=E8B7EDE5599B8EAFC12574FE005DF025>.

SYKES, R. M. Reviewers Comments and Additions. 2001.

TCHOBANOGLIOUS, G.; METCALF & EDDY; BURTON, F. e STENSEL H. D. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Tata Mcgraw Hill. 4 Ed., p. 1848. 2002.

TECHNISCH WEEKBLAD. Disponível em: <<http://www.technischweekblad.nl/nog-e-norm-potentieel-voor-energie-uit-afval.78305.lynkx>>.

VALORGA INTERNATIONAL. Disponível em: <<http://www.valorgainternational.fr>>.

VANDEVIVERE, P.; DE BAERE, L. e VERSTRAETE, W. Types of Anaerobic Digester for Solid Wastes. In: BIOMETHANIZATION of THE ORGANIC FRACTION MUNICIPAL WASTE. MATA-ALVAREZ, J. (Coord.). Londres, Reino Unido. Editora: IWA Publishing, 2002. p. 111-137.

VON SPERLING, M. Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 211p. il. 1996.



Por meio da: **giz** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Ministério das Cidades

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PÁTRIA EDUCADORA

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7958-040-6



9 788579 580406

