

III-345 - PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DE PROCESSOS DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA COM RECUPERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Débora do Carmo Linhares⁽¹⁾

Bióloga pelo Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo e Mestre em Ciências (Microbiologia) pela mesma Universidade. Pesquisadora do Laboratório de Biotecnologia Industrial do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

Patrícia Léo⁽²⁾

Bióloga pelo Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. Mestre e Doutora em Biotecnologia pela mesma Universidade. Pesquisadora do Laboratório de Biotecnologia Industrial do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

Thomaz de Gouveia⁽³⁾

Engenheiro químico pela Universidade Estadual de Maringá, Mestre em Engenharia Química e Doutor em Biotecnologia pela Universidade de São Paulo. Pesquisador do Laboratório de Biotecnologia Industrial do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

Letícia dos Santos Macedo⁽⁴⁾

Tecnóloga em Saneamento Ambiental pela Universidade Estadual de Campinas. Mestre em Ciências pela Universidade de São Paulo. Pesquisadora no Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

Cláudia Echevengúá Teixeira⁽⁵⁾

Bióloga pela Universidade de Caxias do Sul, Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas e Doutora em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade de Sherbooke. Pós-doutorado pela Universidade do Estado do Arizona. Pesquisadora no Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT).

Endereço⁽¹⁾: Avenida Professor Almeida Prado, 532 - Butantã - São Paulo - SP - CEP 05508- Brasil - Tel: +55 (11) 3767-4319 - e-mail: dlinhares@ipt.br

RESUMO

No Brasil a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) representa aproximadamente 52 % dos resíduos sólidos urbanos (RSU) totais. Quando disposta de maneira inadequada, a degradação da FORSU causa impacto ao meio ambiente pela geração de odores, lixiviados, produção de gases estufa, entre outros. Os processos biológicos envolvendo a digestão anaeróbia representam uma alternativa de processamento para estabilização da FORSU com recuperação de energia, prática que vem crescendo no mundo.

Neste trabalho, foi realizada a prospecção tecnológica de processos de biodigestão anaeróbia com recuperação de energia a partir de resíduos sólidos urbanos utilizando diversas fontes de dados, incluindo bibliografia em periódicos científicos e técnicos, patentes, dissertações, teses, *websites* de empresas, bem como contatos com fornecedores, especialistas, visitas técnicas e participação em eventos técnicos. A busca de mercado para obter informações sobre equipamentos também foi realizada por meio de um chamamento público.

Oito tecnologias principais para tratamento de FORSU e recuperação de biogás foram identificadas, apresentando possibilidade de aproveitamento do gás metano como combustível automotivo ou para geração de calor e energia elétrica. Dentre estas tecnologias aquelas que aplicam o modelo extrasseco (túneis de metanização) apresentaram as melhores pontuações de acordo com a metodologia utilizada para a prospecção e avaliação, levando-se em consideração: o nível de maturidade tecnológica, grau de complexidade e grau de aplicabilidade no cenário de municípios brasileiros de pequeno e médio porte.

A validação deste modelo deverá contar com a implantação de túneis de metanização em escala de demonstração em um município brasileiro de médio porte, como estudo de caso, visando obter parâmetros reais de custos de implantação, operação, eficiência e viabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Biodigestão anaeróbia, resíduos sólidos urbanos, recuperação de energia, biodigestor via extrasseca, biogás.

INTRODUÇÃO

No Brasil, a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU), constituída de restos animais e vegetais, representa aproximadamente 52 % dos resíduos sólidos urbanos (RSU) totais (IBGE, 2010; IPEA, 2012). A FORSU é responsável por grande parte dos aspectos ambientais associados aos resíduos como a geração de odores, lixiviados, liberação de biogás para atmosfera e os impactos ambientais decorrentes. Dentre as alternativas de processamento da FORSU, os processos via digestão anaeróbia com a recuperação de energia pelo uso do metano tem alcançado maior abrangência de mercado, impulsionado pelas políticas relacionadas à destinação final de resíduos.

A biodigestão anaeróbia é caracterizada pelos processos de conversão da matéria orgânica, na ausência de oxigênio, por ação de microrganismos. Esta conversão é um processo bioquímico que ocorre em quatro estágios principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo que em cada estágio estão envolvidas diferentes populações microbianas que se desenvolvem em condições fisiológicas específicas.

Os principais objetivos do tratamento biológico são:

- a estabilização da matéria orgânica em ambiente controlado, visando minimizar a disposição final de matéria orgânica em aterros, reduzindo desta forma a emissão de metano para a atmosfera;
- redução da massa de resíduos dispostos em aterros, prolongando a sua vida útil;
- recuperação energética do biogás produzido na fase anaeróbia do processo;
- aproveitamento do material estabilizado para usos diversos, tais como cobertura de encostas, condicionante para solos e/ou combustível em processos térmicos.

Os biodigestores anaeróbios, onde o processo é controlado, podem ser classificados de acordo com a concentração de sólidos totais com que operam. Reatores de via úmida, seca e extrasseca operam com as faixas de 3 % à 15 %, 15 % à 35 % e 25 % à 50 % de sólidos totais respectivamente (PROBIOGÁS, 2015).

As tecnologias que empregam reatores de via úmida não foram consideradas na prospecção tecnológica, visto que sua utilização para tratamento de FORSU rapidamente evoluiu para os outros sistemas. Portanto, as tecnologias de biodigestão anaeróbia prospectadas podem ser divididas em dois grandes grupos segundo a concentração de sólidos totais na operação: via seca e via extrasseca. Cabe ressaltar que muitas das unidades não operam somente com FORSU, mas com uma digestão conjunta com resíduos agropecuários.

No cenário brasileiro, estudos já apontam para o potencial de viabilidade do emprego da biodigestão anaeróbia como uma das etapas do tratamento de resíduos sólidos orgânicos, com foco para a possibilidade de recuperação de energia (EMAE, 2009; FADE, 2014; EPE, 2014). Dentre estes trabalhos, alguns chegaram a esboçar estudos de pré-viabilidade econômica, de forma mais ou menos ampla, baseados em dados de literatura (FEAM/DEFLOR, 2009; VIA PÚBLICA, 2012).

Dentro desta prospecção não foram encontradas plantas em operação com escala compatível com a realização deste tipo de tratamento da FORSU no Brasil. Porém, espera-se que novas implantações sejam incentivadas, indo ao encontro dos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), que tem como uma de suas diretrizes a “Redução de Resíduos Sólidos Urbanos Úmidos dispostos em aterros sanitários, tratamento e Recuperação de Gases em aterros sanitários.”, por meio de tratamentos biológicos relacionados a compostagem e biodigestão anaeróbia com recuperação de energia. No Estado de São Paulo, o Plano Estadual de Resíduos Sólidos (SÃO PAULO, 2014) apresenta metas bastante específicas, tais como a “Redução do percentual de resíduos úmidos dispostos em aterros, com base na caracterização nacional de 2013” em 35 % até 2019, 45 % até 2023 e 55 % até 2025. No contexto do Plano Estadual, a biodigestão anaeróbia com recuperação de energia é incentivada em especial para o saneamento rural.

O presente trabalho apresenta uma avaliação prospectiva teórica de alternativas tecnológicas de biodigestão, por meio de um sistema de critérios, de forma a pontuar e organizar estas tecnologias, na tentativa de identificar fatores relevantes quanto a viabilidade das mesmas para aplicação no contexto de tratamento de FORSU em municípios brasileiros.

METODOLOGIA UTILIZADA

A prospecção de alternativas tecnológicas comercialmente em uso no mundo, envolvendo a biodigestão anaeróbia de FORSU, envolveu o levantamento de dados a partir de fontes bibliográficas em periódicos, patentes, dissertações, teses, *websites* de empresas, bem como contatos com fornecedores, especialistas e outras fontes secundárias, visitas técnicas e participação em feiras.

Também foi realizada uma busca de mercado para o levantamento de equipamentos, por meio de *websites* de empresas nacionais e internacionais, bem como consultas a fabricantes e operadores de plantas (escala industrial e laboratorial), bem como à entidades de classe brasileiras e internacionais: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), Associação Brasileira de Limpeza Pública (ABLP), Compromisso Empresarial Para Reciclagem (CEMPRE), *Waste-to-Energy Research and Technology Council* (WTER) e *International Solid Waste Association* (ISWA). Municípios com projetos de instalação de biodigestores e incineradores, órgãos de controle ambientais (CETESB) (Brasil, 2010; CETESB, 2014), institutos de pesquisas e órgãos de fomento (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES e Banco Mundial) foram também consultados.

Para a realização de uma consulta abrangente e idônea com fornecedores de tecnologia, no mês de novembro de 2015 foi publicado um chamamento público (BRASIL, 2014) pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, visando convidar empresas a agendarem uma visita ao IPT para apresentarem suas tecnologias, no âmbito do projeto RSU-Energia (TEIXEIRA, et al. 2016).

As principais tecnologias disponíveis comercialmente foram organizadas tentando-se identificar o número de plantas instaladas pelo mundo, as capacidades instaladas, tipo de resíduo, recuperação de energia, fabricantes, patentes, custos de operação, implantação, entre outros.

Os dados levantados foram ponderados e pontuados levando-se em consideração: o nível de maturidade da tecnologia, grau de complexidade e grau de aplicabilidade no cenário de municípios brasileiros de pequeno e médio porte (IPT, 2016).

RESULTADOS OBTIDOS

Visando conhecer o maior número possível de fornecedores, o IPT abriu um chamamento público para apresentação de tecnologias para tratamento de RSU, seguido de entrevistas presenciais ou contato por e-mail no caso de empresas internacionais. Foram recebidas presencialmente cinco empresas nacionais, ou com representação nacional, além de contato por e-mail com mais 3 fornecedores internacionais sem representação no país.

Considerando os contatos e as buscas em literatura e mercado, as principais tecnologias de digestão anaeróbia via seca são a Dranco, Valorga, Laran e Kompogas. Estas tecnologias vêm sendo utilizadas na Europa desde as décadas de 1980-90 para o processo de metanização aplicada ao tratamento da FORSU (REICHERT, 2005). Uma das vantagens é a possibilidade de tratamento de grandes quantidades de FORSU em processo contínuo, em plantas com capacidade frequentemente superiores a 30.000 t/ano, sendo uma opção interessante para a estabilização da matéria orgânica e produção de biogás de forma controlada. Em média a produtividade em biogás destas tecnologias variam entre 80 e 120 Nm³/t, que após tratamento pode ser encaminhado a estações de cogeração de energia e calor, os quais podem ser aproveitados na própria planta e/ou comercializados (PROBIOGÁS, 2015).

Nestes sistemas, a adição de água ainda é essencial, o que acarreta na necessidade de um processo de desaguamento para posterior estabilização do material digerido. O volume de água produzido é alto, necessitando de maquinaria robusta e consumo de energia para desaguar (separação do material digerido), o que pode representar cerca de 30 % do custo de energia elétrica da planta (FRICKE & PEREIRA, 2014). Esta fração líquida ainda tem alta concentração de orgânicos e deve ser tratada antes da destinação final.

Outro inconveniente dos processos em via úmida e seca é a sensibilidade à alta porcentagem de impróprios carregados junto com a fração orgânica recuperada de RSU não separado na fonte. Estes impróprios, como plásticos, metais, vidros, entre outros, frequentemente obstruem tubulações e reatores, exigindo a parada do

sistema para remoção destes materiais, além de poder levar ao aumento de pressão no reator, com consequente aumento do risco de acidentes (GOMES; et al. 2012).

A partir de 2007, foram desenvolvidos na Europa os sistemas de digestão anaeróbia via extrasseca, conhecidos como túneis de metanização, ou sistemas de garagem. O processo biológico é o mesmo, porém, o teor de sólidos é suficientemente maior (até 50 %), ao ponto que os resíduos possam ser empilhados e transportados com pás carregadeiras ou equipamentos semelhantes. A principal vantagem deste sistema é a reduzida porcentagem de água extraída do processo, em comparação com os de via seca. Além disso, por este processo não exigir agitação mecânica, o sistema aceita uma elevada porcentagem de impróprios característicos da FORSU de países em desenvolvimento, os quais ainda não praticam uma segregação efetiva dos resíduos. Como os reatores são descontínuos, é possível associar os processos de digestão aeróbia e anaeróbia. Em média a redução de massa varia de 12 % a 25 % na fase anaeróbia e de 30 % a 60 % após a estabilização em aerobiose, o que já envolve a retirada de água livre do composto. Atualmente, existem três sistemas principais para tratamento de FORSU via extrasseca, sendo eles: Bioferm, Kompoferm - Eggersmann (Kompofermplus e SmartFerm) e Bekon.

Em geral, a planta instalada acompanha uma unidade de pré-tratamento do RSU, envolvendo pelo menos as etapas de retirada das embalagens, separação de materiais contaminantes grosseiros como plásticos e metais e redução do tamanho dos fragmentos. Da mesma forma, deve estar prevista ao menos uma unidade de armazenamento para o biogás produzido, e idealmente uma unidade de tratamento de gases e queimadores de segurança.

Na Tabela 1 estão apresentadas as oito principais tecnologias identificadas para tratamento de FORSU e recuperação de biogás, em que são destacados: os fornecedores, o tipo de resíduo e conteúdo de sólidos com qual trabalha, início aproximado do desenvolvimento e os principais métodos utilizados na prospecção tecnológica.

As oito tecnologias citadas apresentam possibilidade de aproveitamento energético da FORSU a partir da produção e recuperação de metano e posterior queima do mesmo para geração de eletricidade e/ou calor, ou mesmo a utilização como combustível automotivo. Além da geração de energia, se a qualidade do FORSU for adequada (FORSU separado na fonte), o material resultante também pode ser utilizado como adubo orgânico na agricultura.

O mercado principal das tecnologias de biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos continua sendo o Europeu, embora seu uso comercial esteja continuamente se difundindo para outras regiões. O crescimento constante da implantação é resultado da necessidade de tratamento dos resíduos orgânicos antes da disposição em aterros, incentivado também pela possibilidade de reaproveitamento energético, principalmente com geração de eletricidade e calor.

Tabela 1 – Principais fornecedores identificados na prospecção tecnológica com instalações próprias para tratamento biológico da FORSU por meio de biodigestão anaeróbica com recuperação de energia

Tecnologia (detentores) / (processo)	Plantas	Desenvolvimento das primeiras plantas	Prospecção tecnológica
DRANCO (Via seca)	31 unidades	Década de 90	Página oficial da empresa OWS ¹ , vídeos ² e referências de plantas ³ , literatura, contato por e-mail.
Valorga (Via seca)	31 unidades	Década de 90	Página oficial da empresa ⁴ e do grupo de limpeza pública associada Urbaser ⁵ , vídeos e referências de plantas, literatura.
Laran– Linde (Via seca)	21 unidades	Final da década de 90	Literatura
Kompogas (Via seca)	75 unidades	Década de 90	Página oficial da empresa AxpoKompogas ⁶ e da representante Kuttner ⁷ , vídeos e referências de plantas, literatura, contato com representante no Brasil (Kuttner)
BIOferm (Via extrasseca)	15 unidades	Anos 2000	Páginas oficiais da empresa ⁸ , vídeos e notícias, literatura, contato por e-mail.
Kompoferm (Via extrasseca)	7 unidades	2007	Página oficial da marca ⁹ , do grupo Eggersmann ¹⁰ e de divulgação ¹¹ geral, vídeos e notícias, literatura.
Bekon (Via extrasseca)	21 unidades	2009	Página oficial da empresa ¹² , vídeos e referências de plantas, literatura, contato por e-mail, patentes (US 2015/0068259 A1; US 2011/0236947 A1, US 2010/0311141 A1)
Methanum Methar TMO (Via extrasseca)	1 unidade em instalação	Em andamento	Página oficial da empresa ¹³ , contato com o fornecedor.

Notas: 1) http://www.ows.be/household_waste/dranco/; 2) <https://www.youtube.com/watch?v=F8qiMu9Q-eo&feature=youtu.be>; 3) <http://www.ows.be/biogas-plants/references/>; 4) <http://www.valorgainternational.fr/fr/>; 5) <http://www.urbaser.es/>; 6) <http://www.axpo.com/axpo/kompogas/de/home.html>; 7) <http://www.kuttner.com.br/Default245c.html?ID=28>; 8) <http://www.biofermenergy.com/anaerobic-digestion-technology/dry-fermentation/>; <http://www.biofermenergy.com/anaerobic-digestion-2/faq/>; <http://www.biofermenergy.com/biowatch/>; 9) <http://www.kompoferm.com/en/kompoferm.html>; 10) http://www.f-e.de/new-product-development_Kompoferm_Plus.html?PHPSESSID=8804adfb702e71d2108126b6b65f94be; 11) <http://zerowasteenergy.com/our-solutions/dry-anaerobic-digestion/>; 12) <http://www.bekon.eu/>; 13) <http://methanum.com/?methanum.com.br>

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Considerando o entendimento obtido nos levantamentos, as tecnologias foram classificadas pela equipe do projeto segundo o grau de maturidade tecnológica (TRL) e outros dois critérios relacionados à complexidade e à aplicabilidade para implantação em um dado cenário. Este sistema de tomada de decisão elaborado pela equipe (informação completa em IPT, 2016) visa subsidiar as escolhas sobre a Plataforma Tecnológica que poderá ser empregada para o tratamento de RSU em municípios Brasileiros, no caso do presente trabalho em municípios de pequeno a médio porte. É importante ressaltar que o presente trabalho trata da questão do tratamento biológico via digestão anaeróbica, embora o projeto “RSU Energia” como um todo seja abrangente e aborde desde a conscientização e percepção sobre a questão do RSU, até as possibilidades de separação, triagem, tratamento biológico e tratamento térmico.

Após avaliação e pontuação dos sistemas de tratamento da FORSU elencados neste documento (Tabela 2), dentre as opções de via seca, a melhor classificação foi apresentada pelo sistema Kompogas, pois além da robustez, é o único identificado com representante no Brasil. No entanto, por se tratar de uma tecnologia importada, o custo de montagem e manutenção deste sistema pode representar dificuldades adicionais para contratação pela maioria dos municípios brasileiros. Deve-se ainda ressaltar que, por tratar-se de um processo de biodigestão contínua, este possui sistemas complexos de alimentação da FORSU e extração do material

digerido, sendo sujeito a falhas e alto valor de manutenção. No Brasil, existe uma unidade em implantação no Ecoparque de Piracicaba.

Quanto aos túneis de metanização europeus, embora não tenham sido identificados representantes no Brasil, este parece ser um sistema promissor para o tratamento de FORSU em pequenos municípios (em geral até 50.000 t/ano). Por ser uma abordagem mais recente para o tratamento de FORSU e devido à existência de muitas plantas ainda em escala de demonstração, a maturidade desta tecnologia foi aqui considerada em nível inferior àquelas em via seca. Sendo um sistema modular, a ampliação de escala conforme a demanda local é facilitada. Em termos de complexidade, os túneis de metanização se mostram como sistemas mais simples que os sistemas de via seca, tanto para a construção como para a operação. Considerando a operação em via extrasseca, as três tecnologias europeias pontuaram igualmente, utilizando as informações e critérios disponíveis nas consultas realizadas.

No Brasil, a empresa Methanum está desenvolvendo a tecnologia Methar® TMO (Túneis de Metanização Otimizados) para valoração de resíduos, com baixa necessidade de segregação e pré-tratamento do RSU. A tecnologia Methar TMO obteve pontuação final menor do que as europeias, no que pesou a maturidade da tecnologia ainda em desenvolvimento no país e ainda em fase de implantação na cidade do Rio de Janeiro. Porém, pela disponibilidade de um fornecedor nacional, o critério de aplicabilidade ao projeto teve nota consideravelmente maior do que as demais.

Tabela 2– Pontuação das principais tecnologias de biodigestão anaeróbia prospectadas para tratamento de FORSU, no contexto do modelo de tomada de decisão.

Tecnologias	Nível de Maturidade Global	Grau de Complexidade Tecnológica	Grau de Aplicabilidade	Soma geral
Via seca - DRANCO	9	4	1,6875	14,6875
Via seca - Valorga	9	4	1,6875	14,6875
Via seca - Laran	9	5	1,6875	15,6875
Via seca - Kompogas	9	5	3,9375	17,9375
Via extrasseca - Bioferm	8	6	3,9375	17,9375
Via extrasseca - Kompoferm	8	6	3,9375	17,9375
Via extrasseca - Bekon	8	6	3,9375	17,9375
Via extrasseca - Methar TMO	5	6	5,0625	16,0625

Considerando as informações aqui descritas, o modelo a ser adotado pelo projeto no IPT para a construção de uma planta de demonstração segue os delineamentos da via extrasseca em túneis de metanização, tendo como condição de contorno principal obter a menor massa residual do processo, implicando em menor volume para fins de destinação.

Considerando a escassez de dados a partir de resíduos locais sobre operação e rendimentos do processo, o “projeto RSU Energia” previu o desenvolvimento de uma planta de demonstração do processo de biodigestão anaeróbia, a ser implantada como estudo de caso no Município de Bertioga, SP. Além de possibilitar diversas avaliações de processo, como o impacto da segregação e coleta seletiva, a aquisição de dados próprios deverá permitir a realização de um estudo mais abrangente e realista sobre a viabilidade técnica e econômica da tecnologia, considerando as condicionantes locais, num contexto de integração de rotas de tratamento.

Tendo como referência informações disponíveis em literatura e materiais de divulgação técnica, além de contato com fornecedores e da experiência do grupo, foi elaborado um memorial descritivo com especificações mínimas para a construção de uma planta piloto para o tratamento da FORSU. O documento que descreve a unidade de demonstração foi encaminhado para prospecção de fornecedores. Neste processo foram consultadas vinte e duas empresas com atividades relacionadas ao tema de tratamento de resíduos de forma geral, entre nacionais e internacionais.

As quatro fornecedoras de tecnologia de biodigestão anaeróbia via extrasseca, já citadas, foram consultadas. Outras trabalham com biodigestão anaeróbia por via seca ou úmida de resíduos, em especial agropecuários. Há também algumas ligadas a tratamento e/ou reaproveitamento de resíduos em geral, tratamento de águas

residuais e ainda empresas de engenharia que trabalham com projetos sob encomenda. Dentre todas estas, apenas duas apresentaram condições de atendimento para fornecimento de sistema por via extrasseca.

A dificuldade de se encontrar fornecedores aptos para construir uma planta de demonstração revela a complexidade do sistema e a pouca maturidade da tecnologia no Brasil e confirma a necessidade de avaliar o processo como um todo de forma imparcial.

CONCLUSÕES

Embora na Europa a tecnologia de biodigestão anaeróbia para tratamento de resíduos esteja mais consolidada, no Brasil esta forma de tratamento ainda é insipiente. Porém, frente às novas regulamentações sobre o tratamento e disposição de resíduos, a biodigestão anaeróbia se apresenta como uma das alternativas a serem pensadas para o tratamento e redução da fração orgânica antes da disposição final do RSU.

Considerando que no Brasil, até o momento, não foram identificadas plantas de digestão anaeróbia em operação para tratamento de FORSU, o grande desafio é avaliar e desenvolver esta tecnologia de tratamento adaptada à realidade brasileira. Utilizando as ferramentas de tomada de decisão desenvolvidas pela equipe do projeto “RSU Energia - IPT”, chegou-se a uma pontuação para as principais tecnologias, tendo se destacado os processos em via extrasseca como os menos complexos e mais indicados para aplicação em municípios brasileiros de pequeno e médio porte.

Neste sentido, os próximos passos do módulo de tratamento biológico que integra o “Projeto RSU Energia” deverá ser a implantação de túneis de metanização em escala de demonstração em um município como estudo de caso, visando obter parâmetros reais de custo de implantação, operação, eficiência e viabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AXPO. *Axpo Kompogas*. Disponível em: <http://www.axpo.com/axpo/kompogas/de/home.html>. Acesso em 2017.
2. BEKON. *Innovative Biogas*. Disponível em: <http://www.bekon.eu/en/>. Acesso em 2017.
3. BIOFERM. *BIOFerm Dry Fermentation Digester*. Disponível em: <http://www.biofermenergy.com/anaerobic-digestion-technology/dry-fermentation/>. Acesso em 2017.
4. BRASIL. *Lei no 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 02 ago. 2010.
5. EMAE. *Elaboração de estudo de modelagem de negócio para implantação de empreendimento de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo*. Contrato ASE/LPP/2001/01/2009.
6. ENGERSMANN. *KOMPOFERM Plus*. Disponível em: http://www.f-e.de/new-product-development_Kompoferm_Plus.html?PHPSESSID=8804adfb702e71d2108126b6b65f94be. Acesso em 2017.
7. EPE - *EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA*, *Nota Técnica DEA 18/14 – Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos*. EPE. Rio de Janeiro, 50 p. 2014.
8. FADE – Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco. *Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão*. BNDES, jun. 2014.
9. FEAM / DEFLOR. *Projeto Conceitual de um Modelo de Reator Anaeróbio para a Biometanização da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais*. 86 p. Belo Horizonte, 2009.
10. FRICKE, K; PEREIRA, C. *Biodigestão: uma ferramenta tecnológica eficiente para a recuperação energética e mássica dos resíduos sólidos*. 2014. Disponível em <http://www.abes-rs.org.br/qualidade2014/qualidade2014-21-maio-manha-09h-christiane-pereira.pdf>.
11. GOMES, F.C.S.P.; AQUINO, S. F.; COLTURATO, L.F.D.B. *Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos: estado da arte e análise crítica das principais tecnologias*. Eng. Sanit. Ambient. v.17, n.3, 2012, p. 295-304.

12. IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD)*. 2010.
13. IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Relatório de Pesquisa*. 2012.
14. IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS). *RSU energia um programa IPT de apoio às prefeituras nas decisões relativas a resíduos sólidos urbanos*. São Paulo: IPT/CT-Geo, 2016. 211 p. (Relatório Técnico 146017-205).
15. KOMPOFERM. *KOMPOFERM Modular Plants*. Disponível em: <http://www.kompoferm.com/en/kompoferm.html>. Acesso em 2017.
16. KUTTNER. *Tratamento biológico de resíduos*. Disponível em: <http://www.kuttner.com.br/Default245c.html?ID=28>. Acesso em 2017.
17. METHANUM. *METHANUM Resíduo e Energia*. Disponível em: <http://methanum.com/?methanum.com.br>. Acesso em 2017.
18. OWS. *Biogas Plants – DRANCO*. Disponível em: http://www.ows.be/household_waste/dranco/. Acesso em 2017.
19. PROBIOGÁS. *RSU – O Estado da Arte da Tecnologia da Metanização Seca*. Autores: Luis Felipe de Dornfeld Braga Colturato, Felipe Correia de Souza Pereira Gomes, Tathiana Almeida Seraval, Thiago Dornfeld Braga Colturato. Publicado por Projeto Brasil – Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS, 2015.
20. REICHERT, G.A. 2005. *Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão*. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005, Campo Grande, Brasil. Artigos Técnicos, ABES.
21. SÃO PAULO (2014). *Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo*. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). São Paulo, 2014.
22. TEIXEIRA, C. E.; YOSHIKAWA, N. K. ; MACEDO, L. S. . *RSU - Um programa do Governo do Estado para apoiar tencicamente os municípios nas decisões relativas aos resíduos sólidos urbanos*. Municípios de São Paulo, São Paulo, p. 20 - 22, 01 abr. 2016
23. URBASER. *Urbaser – Áreas de Actividad*. Disponível em: <http://www.urbaser.es/>. Acesso em 04 fev. 2016.
24. VALORGA INTERNATIONAL. *Valorga International*. Disponível em: <http://www.valorgainternational.fr/fr/>. Acesso em 2017.
25. VIA PÚBLICA. *Estudo de Alternativas de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos. Incinerador mass burn e Biodigestor anaeróbio*. 2012. Disponível em: < <http://polis.org.br/publicacoes/estudo-de-alternativas-de-tratamento-de-residuos-solidos-urbanos-incinerador-mass-burn-e-biodigestor-anaerobio/> >. Acesso: em 11/15.