

PRODUÇÃO DE BIOMETANO A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS UTILIZANDO BIODIGESTORES

Ranulfo Pereira¹, Igor Carvalho², João Vitor Penariol Leite³, André Luis Bonaventura³.

¹BRA Energy – Bioenergias e Economia Circular Ltda - startup incubada no NEXUS Hub de Inovação do PIT - Parque de Inovação Tecnológico de São José dos Campos – SP em 2021, Estrada Dr. Altino Bondensan, 500 - 12247-016 - Eugênio de Melo, São José dos Campos - SP, braspenenergy@gmail.com.

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica/Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias - 12228-904 - São José dos Campos - SP, igoriac@ita.br.

³Dirac Energia Ltda – startup incubada no UPLab-SENAI no Parque de Inovação Tecnológico de São José dos Campos-SP, Estrada Dr. Altino Bondensan, 500 - 12247-016 - Eugênio de Melo, São José dos Campos - SP, joaopenariol@diracenergia.com, andre@diracenergia.com.

Resumo

A crescente demanda por fontes de energia renováveis e a preocupação com a geração de resíduos impulsionam a exploração de alternativas sustentáveis. A conversão do gás gerado pela decomposição de resíduos sólidos em energia é uma solução promissora, especialmente para a descarbonização do setor automotivo, que contribui com 20% das emissões globais de CO₂. Essa pesquisa tem o objetivo é transformar passivos ambientais em ativos energéticos e econômicos. Por isso, neste trabalho, realizamos uma revisão bibliográfica sobre biodigestores, biomassa, biogás, fermentação anaeróbia, dimensionamento e caracterização de biodigestores. Em seguida, realizamos um experimento de bancada utilizando resíduos sólidos residenciais em um biodigestor de 2 litros. Por fim, discutimos inovações e apresentamos um projeto piloto robusto em escala industrial, Biodigestor Modelo CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor).

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Biogás. Biometano. Gás Natural Renovável. Aproveitamento Energético.

Área do Conhecimento: Engenharia Ambiental e Sanitária

Introdução

As formulações e reavaliações das políticas energéticas de cada país enfrentam um novo desafio: as futuras matrizes energéticas devem refletir ações que diminuam em ritmo crescente a queima do petróleo, gás natural, carvão e combustíveis de origem não renovável, na busca de minimizar a concentração de dióxido de carbono emitido para a atmosfera. Essa questão vem acompanhada de relatórios de organizações respeitadas, como do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, que adverte impactos ambientais no caso da negligência dessa situação. As questões energéticas mundiais sempre são alvo de mudanças e adaptações de acordo com a situação econômica, política, climática dos países. A produção de energia sempre foi reconhecida como a base do desenvolvimento das civilizações modernas ao redor do mundo (Silva, et al., 2009).

O biogás é um combustível renovável com diversas aplicações para fins energéticos, ele pode auxiliar na resolução de ambos os problemas citados. Segundo Li et al. (2015), o gás dos aterros sanitários pode ser utilizado para muitas finalidades (em função do nível de tratamento aplicado a ele), como: uso direto, geração de eletricidade, geração combinada de calor e eletricidade, além de abastecimento veicular. Em 2015, 58,7% dos resíduos sólidos urbanos produzidos no Brasil eram enviados para aterros sanitários (ABRELPE, 2015). O Brasil tem trabalhado para eliminar o uso de lixões pelo programa Brasil sem Lixões, estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010). O índice de disposição de resíduos em aterros sanitários tem aumentado,

visto que constitui a opção mais barata em face das demais. Os custos de operação dos aterros sanitários em países de renda média estão entre US\$ 15 e 65/ton. Para Santos et al. (2018) estimaram um potencial de geração de eletricidade a partir de biogás de aterros sanitários no país que pode atingir até 1,7 GW.

Atualmente, pesquisas em combustíveis sustentáveis estão focadas em sua aplicação em automóveis híbridos, buscando reduzir a emissão de gases de efeito estufa. O uso de gás natural veicular (GNV), por exemplo, pode diminuir em cerca de 20% as emissões de CO₂ quando comparado à gasolina. Além disso, a substituição do óleo diesel pelo biometano apresenta um potencial ainda maior, com uma redução de até 90% nas emissões, conforme estudo da montadora de caminhões Scania. Essas alternativas demonstram o impacto significativo que a transição para combustíveis mais limpos pode ter no setor de transportes, contribuindo para a descarbonização e a sustentabilidade ambiental.

Diante disso, analisando a alternativa da produção de biogás como combustível alternativo a partir do uso de biodigestores, considerando a facilidade de obtenção de matéria prima (biomassa), apresenta grande potencial para o processo de abastecimento de energia do país. Para Amaral et al. (2004), a fermentação da biomassa em reatores anaeróbios apresenta uma excelente alternativa, pois além de reduzir a taxa de poluição e contaminação do solo, ar e água, gera biogás, e apresenta uma destinação correta para resíduos sólidos urbanos. Neste contexto, o objetivo principal deste estudo é analisar a viabilidade técnica para aproveitamento da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos - FORSU, com utilização de biodigestores, para produção de biocombustíveis (biogás/biometano), energia elétrica e biofertilizantes, através de processo biológico que trata e estabiliza resíduos orgânicos, transformando-os em produtos de alto valor agregado, atendendo assim a grande demanda do poder público municipal por soluções inovadoras e eficazes para tratamento de RSU e descarbonização. O processo resulta em benefícios socioambientais ao valorizar resíduos, reintroduzindo-os ao ciclo produtivo, reduzindo emissões de GEE, ao melhorar o IDH e gerar benefícios como emprego e renda para população no entorno do empreendimento.

Metodologia

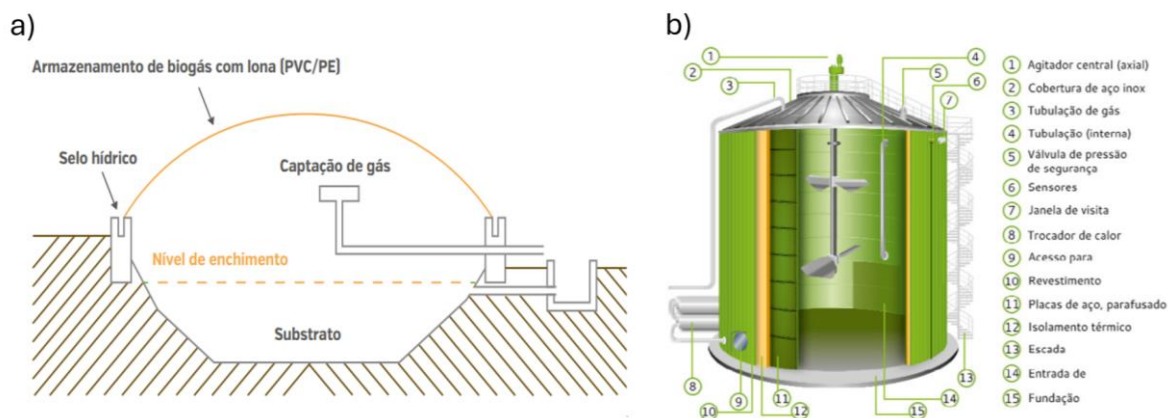
A metodologia combinou revisão bibliográfica e experimentos práticos, com base na metodologia TRL (Technology Readiness Level), resultando em um protótipo com nível de maturidade tecnológica TRL-4. Inicialmente, foi realizado um estudo do Estado da Arte sobre o tema. Em seguida, foi estudado o modelo de Biodigestor e o foram feitos desenhos em CAD, utilizando a versão para estudantes e gratuita do software. Posteriormente, foi realizada a manufatura dos itens que compõe o equipamento do projeto piloto proposto e assim se construiu um protótipo. Além disso, foi considerado modelo de biodigestor anaeróbio para produção de biogás, tendo como matéria prima a FORSU, isto é, Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos. O modelo de biodigestor mais adequado será definido considerando-se CAPEX, OPEX, qualidade e quantidade de biogás, quantidade de matéria orgânica processada e qualidade do digestato (material residual resultante do processo de digestão anaeróbia em um biodigestor).

A seguir detalharemos os métodos específicos usualmente aplicados nessa área de pesquisa:

- a) Biodigestores:** Consistem em equipamentos herméticos e impermeáveis dentro dos quais se deposita material orgânico para fermentar de forma anaeróbia, ou seja, sem a presença de ar atmosférico, por um determinado tempo de retenção Tempo de Retenção Hidráulica (TRH), no qual ocorre um processo bioquímico denominado biodigestão anaeróbia, que tem como resultado a formação de produtos gasosos, principalmente metano e dióxido de carbono além de biofertilizante (Magalhães, 1986). O biodigestor é constituído por um reservatório que armazena a biomassa por um determinado tempo, e por uma câmara (gasômetro) que armazena o biogás produzido. O biogás fica retido na parte livre do biodigestor e em seguida pode ser canalizado para ser utilizado em diversas aplicações. O biodigestor pode ser classificado como contínuo ou intermitente. No primeiro caso, o abastecimento de biomassa é diário, com descarga proporcional à entrada de biomassa. Já no intermitente, utiliza-se a capacidade máxima de armazenamento de biomassa, retendo-a até a completa biodigestão. Em seguida, são retirados os restos da digestão e realiza-se uma nova recarga.
- b) Modelos de Biodigestores:** Os modelos de biodigestores mais utilizados no Brasil são o canadense (Figura 1-a), isto é, lagoa coberta. Outro modelo é o CSTR – Continuous Stirred Tank Reactor, representado na Figura 1-b. O biodigestor de modelo canadense, desenvolvido pela Marinha Brasileira

em 1970, apresenta uma tecnologia moderna, ainda que possua uma construção simples. Possui uma câmara de digestão escavada no solo e um gasômetro inflável feito de material plástico ou similar. É do tipo horizontal, com uma caixa de entrada em alvenaria, como pode ser observado na Figura 1 - a. À medida que o biogás é produzido, a cúpula plástica maleável é inflada e o biogás é acumulado, ou pode ser enviado a um gasômetro separado para se obter um maior controle operacional (Junqueira, 2014). Em comparação com outros modelos, o modelo canadense apresenta a vantagem de poder receber grande quantidade de resíduos e ter menor CAPEX (Capital Expenditure) e OPEX (Operational Expenditure), porém a eficiência na geração de biogás é menor.

Figura 1. a) Biodigestor Canadense, b) Biodigestor CSTR.

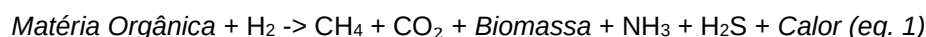


Fonte: Brasil ProBiogas (2015).

c) Biomassa: Por biomassa denominam-se quaisquer materiais passíveis de decomposição pela ação de diferentes tipos de microrganismos. A biomassa decomposta sob a ação de bactérias metanogênicas produz biogás sob condições específicas que incluem: temperatura, pH, relação C/N, presença ou não de oxigênio, nível de umidade e quantidade de bactérias por volume de biomassa. Sendo o objetivo de estudo desse trabalho a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos, estes serão considerados a matéria-prima a ser utilizada pelo modelo de biodigestor CSTR, que apresenta desempenho satisfatório com relação à produção de biogás e maior facilidade operacional (Cortez, 2008).

d) Biogás: Através da conversão de biomassa em energéticos pode-se obter o biogás que é uma mistura gasosa produzida a partir da decomposição anaeróbia de materiais orgânicos, composto de 55-70% de metano (CH_4) e 30-45% dióxido de carbono (CO_2), com pequenas quantidades de ácido sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3), traços de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), monóxido de carbono (CO), carboidratos e oxigênio (O_2). Segundo Oliver et al., (2008), o biogás é um gás e renovável, sendo usado como combustível e fonte de energia alternativa. Seu poder calorífico varia de 5000 a 7000 Kcal/ m^3 .

e) Fermentação anaeróbia: O processo de digestão anaeróbia envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica levando à formação de metano, produtos inorgânicos (dióxido de carbono) e resíduo líquido rico em minerais que pode ser utilizado como biofertilizante (matéria orgânica estabilizada). A representação da digestão anaeróbia pode ser feita pela equação 1 (Kelleher et al., 2002).



A digestão anaeróbia é um processo de fermentação simples que pode ocorrer em uma lagoa anaeróbia ou em um tanque. A degradação anaeróbia da matéria orgânica a metano é um processo biológico que ocorre em diferentes fases, sob ação de microrganismos que atuam de forma simbiótica (Kelleher et al., 2002). Isso torna necessária a representação do processo anaeróbio incluindo outras populações de bactérias intermediárias. A biodigestão é dividida em quatro fases: Hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Em cada uma destas fases, diferentes tipos de bactérias e microorganismos agem sobre a matéria orgânica, produzindo diversos gases, sendo o mais valioso

e objeto deste estudo o Biogás, que após receber tratamento e ser purificado, passa a ser denominado “biometano”, um gás com características e percentuais de metano idênticos ao GNV, com o grande diferencial de ser um gás orgânico e 90% menos poluente, se comparado ao óleo diesel.

f) Dimensionamento e caracterização do Biodigestor: Na segunda etapa determina-se como será a elaboração e o dimensionamento teórico do biodigestor, tendo como base as características físico-químicas da FORSU – Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos. O Peso Total da Mistura diária que alimentará o Biodigestor foi representado pela soma da FORSU, água e inoculante (Pinto, 2000). Segundo este autor, pode-se apurar os seguintes parâmetros para o cálculo: Inoculante (Si) - FI (fator de inoculação) = 0,2; Tamponamento - NaCO₃ = 0,06 kg/kg de inoculante; Teor de Umidade (T.U) = 0,58 L/Kg de inoculante.

Resultados

Com base na estimativa de sólidos orgânicos descartados por dia, realizou-se o dimensionamento teórico do mini biodigestor de bancada, caracterizando o resultado deste projeto. Neste projeto, o peso total da mistura que alimenta o biodigestor (PTMd) foi obtido pela soma de resíduos orgânicos, água e solução inoculante (Si), conforme equação 2, descrita abaixo:

$$PTMd = FORM + H_2O + Si \text{ (eq. 2)}$$

Resultando em PTMd = FORM 0,7 kg + H₂O 0,7 kg + Si 0,05 kg, totalizando PTMd = 1,45 kg. Considerando que o mini biodigestor tem capacidade para 2 litros ou 2 kg, restaram 550 ml para armazenamento do gás.

Dessa maneira, o biodigestor produzido neste trabalho teve capacidade total de 2 litros e foi abastecido uma única vez, com resíduos orgânicos residenciais, adicionando-se igual quantidade de água, ou seja, para cada 100 gramas de matéria orgânica, foram adicionados 100 ml de água.

No experimento, foram utilizados 0,7 kg de matéria orgânica mista, adicionados a 0,7 kg (ou 700 ml) de água. O material foi triturado em liquidificador por 10 minutos, formando uma mistura homogênea. Em seguida, foram adicionados 50 ml de solução inoculante, e o mini biodigestor foi abastecido. O volume total da mistura orgânica foi de 1.450 ml, restando 550 ml para acúmulo de gás.

O primeiro resultado, a formação de gás, ocorreu nos primeiros 15 dias; porém, não era inflamável, por se tratar de gases como dióxido de carbono (CO₂). A partir do 16º dia, iniciou-se a produção de gás com maior concentração de metano, possibilitando testes de queima, utilizando-se agulha conectada a registro e tubo de saída do biodigestor. A geração de biogás atingiu o pico no 19º dia, encerrando a geração de gás inflamável no 23º dia. Após esse período, a geração de gás reduziu gradativamente até encerrar no 28º dia.

A partir do experimento descrito acima e busca geração de RSU da cidade de São José dos Campos – SP, prospectamos o quanto de biogás poderiam ser produzidos diariamente. Tais dados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação entre teste de bancada e projeção de produção de biogás diária de São José dos Campos.

	Biomassa (kg)	Diluição H ₂ O (l.)	Inoculante (l.)	Biogás m ³
Teste de bancada	7,0x10 ⁻¹	7,0x10 ⁻¹	5,0x10 ⁻²	2,1x10 ⁻²
São José dos Campos*	3,0x10 ⁵	3,0x10 ⁵	2,14x10 ⁴	9,0x10 ³

*A cidade de São José dos Campos gera, aproximadamente 600 toneladas de RSU/dia, deste total, aproximadamente 50% ou 300 toneladas correspondem à matéria orgânica. Fonte: Urbam, 2015.

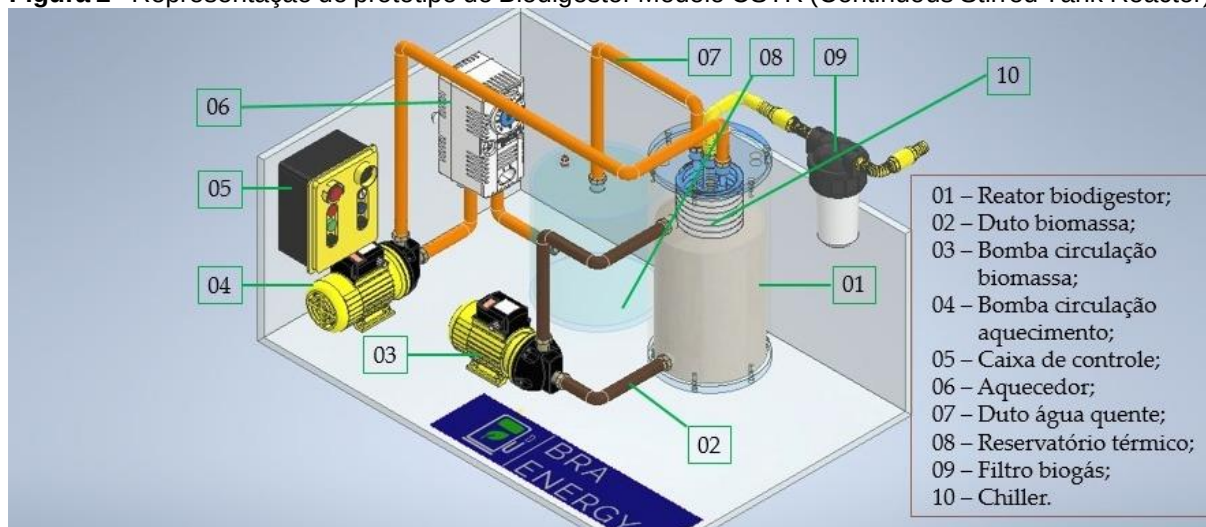
Com base nos resultados mostrados na Tabela 1, o biogás produzido a partir da FORSU poderia ser utilizado em substituição ao óleo diesel nos veículos municipais, inclusive na mobilidade urbana gerando grandes benefícios com descarbonização e melhoria da qualidade do ar, além de economia para os cofres públicos.

Discussão

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade do biodigestor desenvolvido neste estudo e indicam que pode ser replicado para biodigestores de grande porte. A revisão da literatura, combinada com os dados experimentais, permitiu otimizar o conceito, contribuindo para o desenvolvimento de um protótipo

virtual robusto, conforme Figura 2. Esse protótipo servirá como base para o aprimoramento da tecnologia, avançando para TRL-5, facilitando sua escalabilidade e aplicação em contextos maiores, como a gestão de resíduos urbanos e a produção de biogás/biometano em grande escala.

Figura 2 - Representação do protótipo do Biodigestor Modelo CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor).



Fonte: Autores (2024)

Conclusão

Considerando-se o grande volume de matéria orgânica disponível no Brasil, somente no setor de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o país produz, em média 80 milhões de toneladas de RSU/ano, segundo dados da ABRELPE e ABREMA. Deste total, aproximadamente 40 milhões de toneladas representam matéria orgânica, que é matéria prima para geração de biogás. Dados da Associação Brasileira do Biogás (Abiogás) indicam que a utilização de toda matéria orgânica gerada nos setores de saneamento, agronegócio e sucroenergético direcionada para geração de biogás o volume gerado seria de 84 bilhões de m³/ano, suficiente para atender 70% da demanda brasileira de óleo diesel, o que significa reduzir a importação e utilização de combustíveis fósseis, redução de emissão de GEE, geração de emprego e renda, equilíbrio da balança comercial, além de atender diversos ODS da ONU.

Neste contexto a opção por biodigestores se faz viável por se tratar de uma tecnologia moderna e avançada, por ser uma solução baseada na natureza (SbN), por ser ambientalmente correta, socialmente justa e economicamente viável. Vale ainda ressaltar que na implantação desta tecnologia associada à compostagem e ao tratamento mecânico biológico dos RSU, o processo completo reduz em até 80% a quantidade de resíduos sólidos urbanos enviada aos aterros sanitários, gera materiais recicláveis, biogás/biometano, energia elétrica, CDR – Combustível Derivado de Resíduo, corretivos orgânicos líquidos e sólidos para solos.

Todos estes benefícios confirmam o potencial para implantação da proposta, baseado nos requisitos econômicos, sociais e ambientais do processo de biodigestão abordado e a transformação de passivos ambientais em ativos energéticos, representando um complemento sustentável, relevante e contínuo à matriz energética brasileira.

Referências

AMARAL, C. C. et al. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1897-1902, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2018/2019**, 2019. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/downloadpanorama-2018-2019/>. Acesso em: 6 jun. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Ministério do Meio Ambiente**, Brasília, 2010.

BRASIL. ProBiogas. **Ministério das Cidades**. Brasília, 2015.

CHERNICHARO, C.A. L. Princípios de Tratamento Biológico de Esgotos – Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: **UFMG**, 2005.

JUNQUEIRA, S. L. C. D. Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado. Universidade do Rio Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, **UFRJ**, Rio de Janeiro, 2014.

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J. J.; HENIHAN, A. M.; O'DWYER, T. F.; SUTTON, D.; LEAHY, M. J. Advances in poultry litter disposal technology – a review. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 27-36, 2002.

LI, S.; YOO, H. K.; MACAULEY, M.; PALMER, K.; SHIH, J. S. Assessing the role of renewable energy policies in landfill gas to energy projects. **Social Science Research Network**, 2014. p. 687-697.

MAGALHÃES, Agenor P. T. Biogás: um projeto de saneamento urbano. São Paulo: **Nobel**, 1986, 120p.

OLIVER, A. de P. M. et al. **Manual de treinamento em biodigestão**. Salvador: Winrock, 2008. 23p.

PINTO, D. M. C. L. Avaliação da partida da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos inoculados com percolado. Tese de Doutorado. **Universidade de São Paulo**, Escola de Engenharia de São Carlos, 175 p. 2000.

SANTOS, R. E.; SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; BERNAL, A. P.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, F. G. B. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 231, p. 198-206, 2019.

SILVA, F. M., et al. Desempenho de um aquecedor de água a biogás. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP, vol. 25, no 3, set./dez, 2009.

TEIXEIRA, C. A. N.; COSTA, R. C. D.; MENDES, A. P. D. A.; ROCIO, M. A. R. A hora do biometano no Brasil. **BNDS**. 2024.

URBAM. Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de São José dos Campos – Julho/2015. Disponível em <https://www.urbam.com.br/>. Acesso set.2024.

Agradecimentos

A DIRAC agradece à FAPESP pelo apoio à PD&I via projeto PIPE-FAPESP, ao UpLab-SENAI, NEXUS Hub de Inovação do PIT - Parque Tecnológico de São José dos Campos e ITA.