

MANEJO DE DEJETOS E A SUSTENTABILIDADE DA PECUÁRIA LEITEIRA

Marcelo Henrique Otenio¹, Clérison Wagner Nascimento², Guilherme Henrique da Silva³, Larice Aparecida Rezende Santana⁴, Camila Souza Coelli⁵, Felipe Ferreira Coelho⁶

RESUMO - O acondicionamento dos dejetos em esterqueiras ou lagoas de decantação para serem utilizados em lavouras e pastagens são ações sustentáveis mais aplicadas nas fazendas leiteiras do país, seguido pela geração e utilização de energias renováveis e uso racional da água, como exemplo os biodigestores. O aproveitamento de dejetos da bovinocultura leiteira para a geração de energias renováveis é uma oportunidade para os produtores e para a cadeia de valor do leite. Pois esses dejetos são considerados biomassa passível de uso para geração de energia e fertilização de culturas vegetais, reduzindo o uso de fontes convencionais de energia e fertilizantes comerciais. Os dejetos, quando manejados de forma adequada, por meio do processo de biodigestão anaeróbia, torna o produtor rural autossuficiente em energia elétrica. A biodigestão anaeróbia no manejo de dejetos na agropecuária promove a geração do biogás, além de permitir a reciclagem do efluente e redução do potencial poluidor e dos riscos sanitários dos dejetos. Assim sendo, os biodigestores são estruturas destinadas a conter a biomassa e seu produto, o biogás. Diante do exposto, a busca por fontes alternativas para tratamento de resíduos e produção de energia demonstra o

¹ Professor do Departamento de Leite e Derivados, UFJF.

² Estudante de Pós-graduação Mestrando em Leite e Derivados na UFJF.

³ Estudante de Pós-graduação Doutorando em Engenharia Agrícola na UFV.

⁴ Estudante de Pós-graduação Doutoranda em Ciências Farmacêuticas na UFJF.

⁵ Estudante de Graduação em Medicina Veterinária na UFJF.

⁶ Estudante de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária na UFJF.

processo de biodigestão anaeróbia com utilização dos dejetos bovinos como substrato uma opção economicamente viável.

Palavras chave: agronegócio, impactos ambientais, sustentabilidade.

WASTE MANAGEMENT AND THE SUSTAINABILITY OF DAIRY FARMING

ABSTRACT - Conditioning of manure in slurry tank or stabilization ponds to be used in crops and pastures are sustainable actions most applied in dairy farms in Brazil, followed by the generation and use of renewable energies and rational use of water, as an example the biodigesters. The use of dairy cattle manure to generate renewable energy is an opportunity for farmers and the milk value chain. Because these wastes are considered biomass that can be used to generate energy and fertilize pasture crops, inviting the use of traditional sources of energy and commercial fertilizers. Manure when handled properly, through the process of anaerobic digestion, makes rural producers self-sufficient in electricity. Anaerobic biodigestion in the management of waste in agriculture promotes the generation of biogas, in addition to allowing the recycling of effluent and reduction of the polluting potential and sanitary residues of the waste. Therefore, biodigesters are structure to contain biomass and its product, biogas. Given the above, the search for alternative sources for waste treatment and energy production demonstrates the process of anaerobic digestion using bovine manure as a viable economic option.

Keywords: agribusiness, environmental impacts, sustainability.

Introdução

A cadeia produtiva do leite e derivados é um setor de grande importância econômica e social para o Brasil, o país é o terceiro maior produtor mundial de leite, produz 35 bilhões de litros de leite por ano. As propriedades rurais, em sua maioria de pequeno e médio porte, estão distribuídas em 98% dos municípios brasileiros, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), totalizando mais de 4 milhões de pessoas empregadas no setor de produção de leite no

país. A Secretaria de Política Agrícola, estima que para 2030 apenas os produtores mais eficientes, que se adaptarem à nova realidade de adoção de tecnologia, melhorias na gestão com eficiência técnica e econômica, permanecerão no mercado.

A produção leiteira, presente em todas as regiões, é uma importante atividade para contribuir com a segurança alimentar, geração de emprego e renda e permanência da população no campo. No entanto, seu desenvolvimento necessita de atenção, pois, muitas vezes, gera problemas ambientais, econômicos e sociais na área onde está inserido. Por isso, a sociedade em geral vem pressionando o setor a encontrar processos mais intensivos e sustentáveis. O setor, além de ter uma demanda para aumentar a produtividade, tem visto um aumento nas expectativas dos consumidores nos últimos anos em relação à qualidade do produto e questões de sustentabilidade e bem-estar animal.

Para diminuir o estresse animal e aumentar o seu bem-estar e sua capacidade produtiva, o sistema intensivo de confinamento tem sido cada vez mais inserido no Brasil. Neste sistema, os animais são criados em área restrita, separados por lotes e recebem uma dieta balanceada e adequada ao período produtivo. Um dos maiores problemas no confinamento de bovinos de leite é a quantidade de dejetos produzidos diariamente numa área reduzida. Estão entre as exigências esperadas para a produção de leite: o controle rigoroso da qualidade e do gasto de água nos processos produtivos da agropecuária; a destinação ambientalmente correta dos resíduos produzidos na fazenda de leite ou o seu aproveitamento em bases sustentáveis e processos de produção que levem em consideração o conforto animal, as medidas de proteção e de conservação do ambiente. Consideramos que os produtores devem estar atentos com suas atitudes para permanecer de forma competitiva no mercado, produzindo de forma sustentável. O produtor de leite precisa estar atento aos possíveis ajustes no seu sistema de produção.

A cadeia produtiva leiteira deverá inevitavelmente realizar a transição para alternativas tecnológicas mais sustentáveis, vide a representatividade e a importância do agronegócio e da pecuária leiteira nos quesitos sociais e econômicos. Ações rotineiras realizadas nas fazendas produtoras de leite reduzem a pegada ambiental e intensificam a produção sustentável. Ações sustentáveis como acondicionamento dos dejetos em esterqueiras ou lagoas de estabilização para serem utilizados posteriormente nas lavouras e pastagens é uma prática mais

aplicada nas fazendas leiteiras do país, seguido pela geração e utilização de energias renováveis e pelo uso racional da água, exemplo biodigestores.

O manejo inadequado dos dejetos, ricos em matéria orgânica e agentes patogênicos, causa poluição de águas superficiais e subterrâneas, devido ao carreamento desse material pela ação das chuvas. A contaminação do solo, lagos e rios pelos resíduos animais, a infiltração de águas residuárias no lençol freático e o desenvolvimento de moscas e gases malcheirosos são alguns dos problemas de poluição ambiental provocados pelos dejetos animais.

O aproveitamento de dejetos da bovinocultura leiteira para a geração de biogás é uma oportunidade para os produtores e para a cadeia de valor do leite. Pois o avanço da pecuária leiteira para criações dos animais em sistemas de confinamento ou semiconfinamento tende a aumentar o volume de dejetos gerados. Além da grande quantidade produzida, os dejetos da bovinocultura leiteira são considerados biomassa passível de uso para geração de energia e fertilização de culturas vegetais, reduzindo o uso de fontes convencionais de energia e fertilizantes comerciais.

A biodigestão anaeróbia (BA) é uma tecnologia alternativa para o tratamento de resíduos como os dejetos da bovinocultura leiteira, por minimizar seu potencial poluidor, promover a geração do biogás, utilizado como fonte de energia alternativa e a geração de efluente, que pode ser utilizado como biofertilizante.

Os dejetos, quando manejados de forma adequada, por meio do processo de BA, torna o produtor rural autossuficiente em energia elétrica e recupera o capital investido na implantação do biodigestor, equipamento usado para o processamento de matéria orgânica. O tempo de retorno dos investimentos pode ser reduzido se o biofertilizante produzido no biodigestor for aproveitado para fertirrigação, viabilizando ainda mais o uso da tecnologia.

Neste capítulo vamos abordar o manejo dos dejetos da produção leiteira, com aplicação da tecnologia da biodigestão anaeróbica, para agregação de valor e ganhos na sustentabilidade da produção agropecuária.

Biodigestão anaeróbia no manejo de dejetos bovinos para produção de biogás e biofertilizante

A biodigestão anaeróbia é um bioprocesso sustentável de baixo custo operacional e recuperação de energia, utilizada para tratamento de resíduos orgânicos complexos, como os dejetos (WANG et al., 2019). É um bioprocesso de degradação da matéria orgânica e matéria celular biodegradável realizada pela ação de diferentes grupos de microrganismos e ocorre em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Figura 1) (PASALARI et al., 2021).

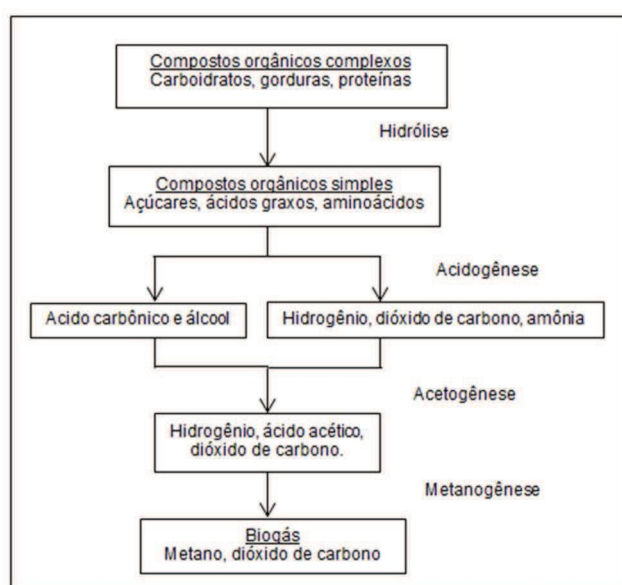


Figura 1 - Etapas da degradação do processo de biodigestão anaeróbia.

Fonte: Adaptado de AZIZ, HANAFIAH, ALI; 2018.

Na etapa da hidrólise os microrganismos hidrolíticos como dos gêneros *Firmicutes*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria*, *Proteobacteria* e *Chloroflexi* produzem enzimas extracelulares como amilase, celulase,

xilanase, lipase e protease (PASALARI et al., 2021). Essas enzimas degradam e/ou solubilizam os compostos orgânicos complexos como proteínas, lipídios e polissacarídeos em moléculas solúveis menores, como ácidos graxos, açúcares simples, aminoácidos, álcoois e aldeídos (AKINDOLIRE; RAMA; ROOPNARAIN, 2022; PRAMANIK et al., 2019). Na acidogênese os produtos da hidrólise são transformados em ácidos graxos voláteis (AGV), como ácido butírico e ácido propiônico, como dos gêneros *Clostridium*, *Bacteroides* e *Firmicutes* como *Paenibacillus sp.* e *Ruminococcus sp.* que estão presentes em todas as fases, mas são dominantes na acidogênica (OTTONI et al., 2022; PRAMANIK et al., 2019).

Na etapa de acetogênese, microrganismos acetogênicos dos gêneros como *Desulfococcus* e *Desulfotomaculum* transformam os produtos da acidogênese em ácido acético, ácido acético, gás carbônico e hidrogênio gasoso. Estas bactérias só podem sobreviver em simbiose com o gênero que consome hidrogênio e as redutoras de sulfato são capazes de degradar o lactato e o etanol, mas não são capazes de degradar os ácidos graxos e compostos aromáticos (OTTONI et al., 2022).

A metanogênese é a etapa final do bioprocesso, onde os microrganismos metanogênicos, como *Archaeas metanogênicas*, *Methanosarcina sp.* e *Methanobacterium sp.* transformam o ácido acético em metano e gás carbônico pelas bactérias metanogênicas acetoclásticas e o gás carbônico e o hidrogênio são combinados, formando metano, pelas bactérias metanogênicas hidrogenotróficas. As bactérias metanogênicas aparecem na segunda fase da fermentação, porém, a quantidade aumenta fase metanogênica (OTTONI et al., 2022; PRAMANIK et al., 2019).

A biodigestão anaeróbia no manejo de dejetos na agropecuária promove a geração do biogás, além de permitir a reciclagem do efluente e redução do potencial poluidor e dos riscos sanitários dos dejetos. Atualmente, esse bioprocesso a partir de dejetos bovinos é a chave para um sistema de produção mais sustentável, devido à redução do uso de energias convencionais, fertilizantes comerciais, além de fornecer um método altamente eficiente para reciclagem de recursos e fechamento do ciclo de produção (ABBASI, TAUSEEF, ABBASI; 2012).

O biodigestor é um equipamento utilizado para o processamento de matéria orgânica e proporciona as condições necessárias para que as bactérias metanogênicas atuem sobre a biomassa para a produção de biogás e biofertilizante (Figura 2) (AFRIANTI *et al.*, 2023).

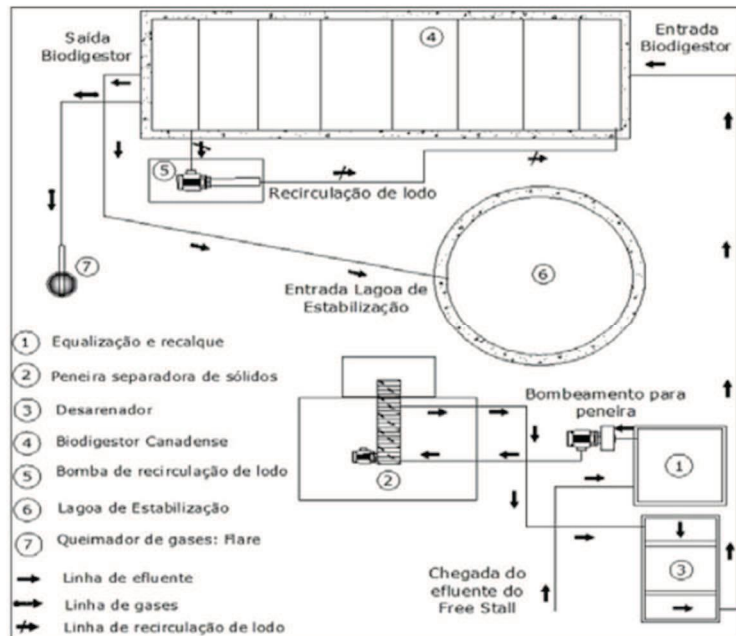


Figura 2 - Esquema do sistema de tratamento de ARB da área experimental da Fazenda Embrapa Gado de Leite.

Fonte: DE MENDONÇA *et al.* 2016.

O biogás produzido é uma mistura de gases contendo, aproximadamente, até, 75% de CH_4 e 25% de CO_2 . Esse biogás é canalizado e direcionado a um motor/gerador de energia a partir de biogás. A energia elétrica gerada é usada para o funcionamento dos equipamentos utilizados no sistema de produção (BIENIEK *et al.*, 2019) ou na geração distribuída, onde a energia produzida é injetada na rede da concessionária de energia do estado. A geração de biogás depende da característica do resíduo, que é o substrato para o

crescimento dos microrganismos. No entanto, a dieta dos animais interfere na distinção dos resíduos quanto à potencialidade de produção de biogás. As características bioquímicas dos resíduos devem permitir o desenvolvimento e a atividade microbiana anaeróbica. Já que o processo microbiológico requer não apenas fontes de carbono e nitrogênio, mas também deve haver um certo equilíbrio de minerais (BÜCKER *et al.*, 2020).

As fontes de carbono mais utilizadas pelos microrganismos são os carboidratos e compostos orgânicos, especialmente hexoses, que são degradadas por uma única via. Os resíduos da pecuária são considerados os substratos mais aplicados na biodigestão anaeróbia por apresentarem nutrientes como arsênio, cálcio, cobre, ferro, magnésio, manganês, zinco e elevado teor de matéria orgânica. Baixa concentração de fósforo, potássio e nitrogênio (HUSSEIN *et al.*, 2017). O correto manejo destes resíduos estabilizados traz benefícios ao solo, à cultura e possibilita a redução do uso de fertilizantes químicos convencionais (MACIEL *et al.*, 2019).

O biofertilizante é uma matéria orgânica rica em elementos minerais, possuindo grande capacidade de recuperação de solos degradados, sua composição varia de acordo com a matéria-prima a ser fermentada. Quando aplicado no solo, o biofertilizante promove o saneamento ambiental e restitui parte dos nutrientes consumidos pelas culturas, podendo contribuir significativamente para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável no Sistema Intensivo de Produção de Leite.

Esse desenvolvimento de uma agricultura sustentável ocorre devido a capacidade do biofertilizante em manter os sais minerais em formas aproveitáveis pelas plantas, evitando que esses sais sejam levados pelas águas; melhorar a estrutura e a textura, deixando-o mais fácil de ser trabalhado e facilitando a penetração das raízes; dar firmeza ao solo, de modo que resistam à ação desagregadora da água; deixar a terra com estrutura mais porosa, permitindo maior penetração do ar; favorecer a multiplicação das bactérias, fixando o nitrogênio atmosférico; aumentar a produtividade e reduzir o perigo de infestações nas lavouras. Os esterco bovinos destacam-se como fonte principal, seja pela maior disponibilidade, pelo elevado valor fertilizante ou pela alta necessidade de se promover a reciclagem dos nutrientes no sistema solo-planta-animal (MACIEL *et al.*, 2019).

O processo de biodigestão anaeróbia apresenta como vantagem precisar de menos espaço que aterros sanitários e compostagem; diminuir o volume de resíduo a ser descartado; reduzir o problema de saneamento ambiental com o aproveitamento de dejetos animais; produzir de biofertilizante; redução de custos energéticos; redução significativa da quantidade emitida de metano na atmosfera; constituir uma fonte de renda para propriedades rurais; geração de créditos de carbono; redução de custos energéticos; preservação da vegetação local; e melhoria da qualidade do solo. Como desvantagens variabilidade da produção de biogás em função do clima; a quantidade de energia gerada pelo biogás não ser constante; formação de gás sulfídrico, aumentando custos de manutenção devido à corrosão; custo de investimento inicial e de manutenção; e período de retorno do investimento variar com a tecnologia disponível (KHANH NGUYEN *et al.*, 2021).

Fatores que afetam a produção de biogás

A produção de biogás é afetada por fatores como teor de sólidos, concentração de nutrientes, pH, temperatura, tempo de retenção hidráulica (TRH), concentrações de sólidos voláteis e substâncias tóxicas (FLORES-MENDOZAA *et al.*, 2020; NKUNA *et al.*, 2022). A mobilidade das bactérias metanogênicas no substrato é limitada à medida que aumenta o teor de sólidos e, portanto, podem afetar a eficiência e a produção de gás. O teor de sólidos está diretamente relacionado com a quantidade de água e nutrientes presente no substrato. A carência de água no biodigestor pode provocar entupimento na tubulação e o excesso de água pode atrapalhar o processo da hidrólise, pois é exigida uma elevada carga de biomassa para que a mesma se processe adequadamente (CHERNICHARO, 2010).

Para a síntese de nova de biomassa são necessários macro e micronutrientes. Além de existir uma relação carbono/nitrogênio mantida entre 20:1 e 30:1. Pois o excesso de nitrogênio pode levar a redução da produção de biogás, podendo ter como produto final compostos nitrogenados como a amônia (NH₃) (NKUNA *et al.*, 2022).

O processo anaeróbio é adversamente afetado por pequenas mudanças nos níveis de pH. Os microrganismos metanogênicos são mais

susceptíveis. A baixa variação no pH e valores próximos à neutralidade entre 6,5 a 7,5 indica que a produção de ácidos orgânicos voláteis será neutralizada por substâncias alcalinizantes, mantendo os níveis adequados para o bom desempenho do bioprocesso (NKUNA *et al.*, 2022).

A temperatura de operação do biodigestor é considerada um dos principais parâmetros, devido à grande influência deste fator na taxa de biodigestão anaeróbia. A velocidade da reação depende da velocidade de crescimento dos microrganismos envolvidos, que por sua vez dependem da temperatura. O aumento da temperatura acelera a velocidade de crescimento dos microrganismos e o aumento da produção do biogás. No entanto, as variações bruscas de temperatura no biodigestor podem desencadear a desestabilização do processo. Existem três intervalos de temperatura em que se pode trabalhar com microrganismos anaeróbios, abaixo de 25 °C (psicrófilos), de 25 a 45 °C (mesófilos) e entre 45 e 65 °C (termófilos) (NKUNA *et al.*, 2022).

O tempo de retenção hidráulica é o tempo necessário para o resíduo ser digerido no biodigestor. Ocorre quando a produção de gás é máxima, definindo o ponto de melhor qualidade do biogás no processo de biodigestão anaeróbia. Em processo contínuo é determinado pela relação entre volume do biodigestor e o volume diário de carga introduzida. Usualmente, o TRH dura de 30 a 45 dias, em algumas situações é possível a existência do biogás logo na primeira semana (NKUNA *et al.*, 2022).

Quanto maior a concentração de sólidos voláteis no substrato, maior é o potencial de produção do biogás. Os sólidos voláteis contêm componentes orgânicos, que, teoricamente, deveriam ser convertidos em metano. Assim sendo, a remoção de sólidos voláteis está associada à sua transformação em biogás pelos microrganismos (DIVYA, GOPINATH, MERLIN CHRISTY; 2015; NKUNA *et al.*, 2022). O uso de substâncias tóxicas como desinfetantes, antibióticos e bactericidas podem “contaminar” o esterco, afetando as bactérias envolvidas no processo (CHEN *et al.*, 2014).

Tipos de biodigestores

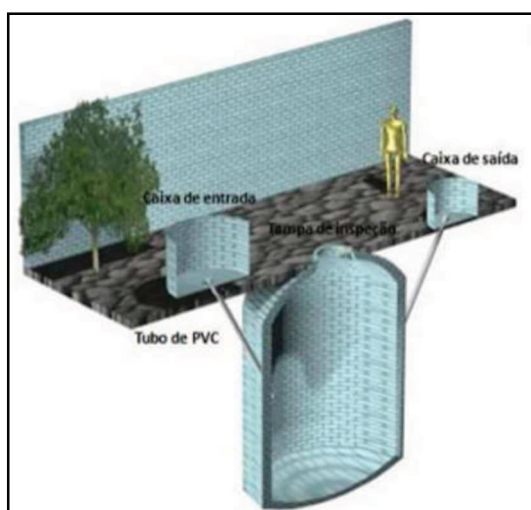
Os biodigestores são estruturas destinadas a conter a biomassa e seu produto, o biogás. O biodigestor não produz o biogás, mas

proporciona condições adequadas para que as bactérias metanogênicas atuem sobre a biomassa para produção desse combustível (MUHONGO, PREGO, VALENTIM; 2022). Existem dois modelos de biodigestores, contínuo e descontínuo (LEON *et al.*, 2021).

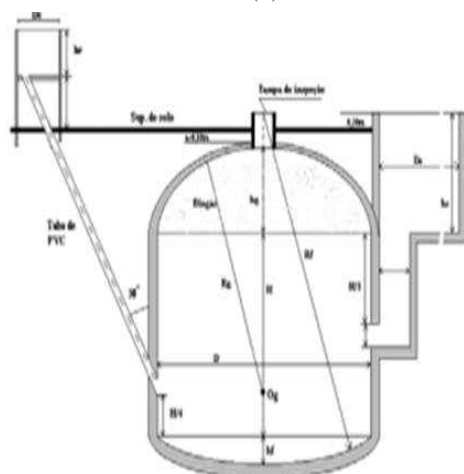
Os biodigestores contínuos se adaptam à maioria das biomassas; são abastecidos com cargas diárias ou periódicas e descarregam o biofertilizante de forma contínua. Enquanto os biodigestores descontínuos são específicos para biomassas de decomposição lenta; recebem a carga total, retendo-a até terminar o processo de biodigestão; ao término do processo, o biodigestor é totalmente esvaziado; e para novo processo, o biodigestor deve ser recarregado (LEON *et al.*, 2021). Os biodigestores mais utilizados são os contínuos como Chinês, Indiano e Lagoa Coberta (FREITAS *et al.*, 2019).

O biodigestor modelo Chinês é mais simples e barato em relação ao biodigestor modelo indiano é voltado para as pequenas propriedades rurais. Esse biodigestor funciona de acordo com o princípio da prensa hidráulica e apresenta menor efetividade do processo de produção do biogás. No entanto, a biomassa fornecida a este modelo deve conter no máximo 8% de sólidos totais para facilitar a fermentação. A construção do biodigestor modelo chinês é considerada o obstáculo da tecnologia por requerer mão de obra qualificada. Visto que construído de forma inadequada pode causar contaminação do lençol freático se houver contato direto com o substrato (Figura 3) (FREITAS *et al.*, 2019).

O biodigestor modelo indiano é de abastecimento contínuo, geralmente aplicado em propriedades pequenas que apresentam regularidade no fornecimento de dejetos. Pode ser construído em diversos tipos de solo, mesmo em ambientes com clima frio/temperado ou tropical. Neste modelo a fase de fermentação ocorre de forma mais rápida do que nos outros modelos de biodigestores, apresenta estabilidade da pressão de exaustão do biogás, devido à campânula flutuante, que por sua vez apresenta uma desvantagem de alto custo para o projeto. A concentração de sólidos totais dos dejetos adicionados neste biodigestor não deve ser superior a 8%, para evitar entupimentos na entrada e saída do biodigestor e facilitar a circulação da matéria orgânica. A água de lavagem de currais pode ser aproveitada, após a remoção de resíduos como pelos e ração que são carregados durante o manuseio da água (Figura 4) (FREITAS *et al.*, 2019).



(a)



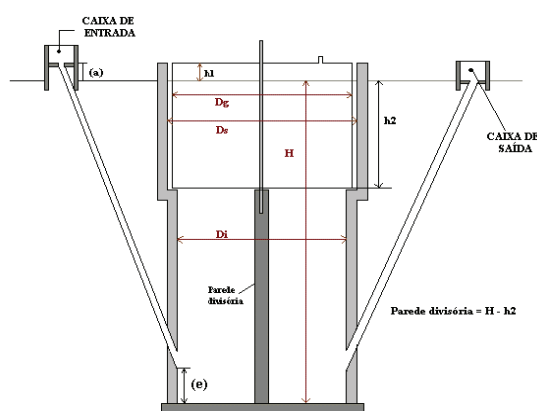
(b)

Figura 3 - (a) Vista tridimensional Biodigestor Chinês; (b) esquema do biodigestor modelo chinês.

Fonte: DEGANUTTI et. al, 2002.



(a)



(b)

Figura 4 - (a) Foto do biodigestor modelo Indiano. Fonte: Elaborado pelo autor (2022). (b) Esquema do biodigestor modelo Indiano.

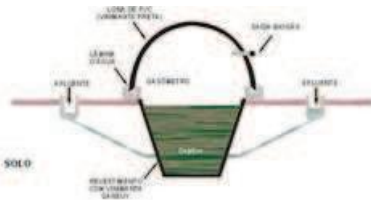
Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002).

O biodigestor modelo Lagoa Coberta é a tecnologia mais utilizada. É um biodigestor horizontal com caixa de carga em alvenaria e com a largura maior que a profundidade; apresenta uma área maior de exposição do sol, com grande espaço para produção de biogás; na qual o biogás pode ser enviado para um gasômetro separado. Como a

localização do biodigestor é de grande importância, uma vez que afeta o sucesso ou a falha do sistema ele deve estar pelo menos entre 30 e 50 metros de distância de qualquer fonte de água para evitar contaminações; estar localizado, preferencialmente, em área protegida de ventos frios e onde a temperatura permanece relativamente estável, tentando receber o máximo de energia solar (Figura 5) (FREITAS et al., 2019).



a



b

Figura 5 - (a) Biodigestor modelo Lagoa Coberta. Fonte: Elaborado pelo autor (2022). (b) esquema do biodigestor lagoa coberta / modelo canadense.

Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002).

Uma análise comparativa e econômica dos diferentes modelos de biodigestores deve ser realizada para determinar a melhor tecnologia para o projeto específico (FREITAS et al., 2019).

Conclusões

A busca por fontes alternativas para tratamento de resíduos e produção de energia demonstra o processo de BA com utilização dos dejetos bovinos como substrato uma opção economicamente viável. Pois os resíduos gerados pela pecuária são poluentes e questões sobre sustentabilidade são levantadas. Além do produto final do processo de BA apresentar potencialidade de uso como biofertilizante. Uma vez que a utilização do biofertilizante não traz efeito deletério ao solo a fertirrigação com este efluente é considerada uma alternativa de disposição final ambientalmente controlada, o que proporciona ao

produtor rural uma opção de manejo adequado dos resíduos produzidos e economia na produção agrícola.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas cotas de bolsa. Esta pesquisa foi financiada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Gado de Leite) ‘[número da concessão SEG-EMBRAPA 03.16.04.023.00.00]’; e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) ‘[Projeto: APQ-02872-18] e programa de bolsas; e pelo CNPq.

Literatura citada

- ABBASI, T.; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, S. A. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation - An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 5, p. 3228–3242, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.046>. Acesso em: 20 jun. 2023.
- AFRIANTI, S. *et al.* Model combination of biodigester and composter. *Caspian Journal of Environmental Sciences* v. 21, n. 1, p. 151–159, 2023. DOI: 10.22124/cjes.2023.6206. Acesso em: 21 jun. 2023.
- AKINDOLIRE, M. A.; RAMA, H.; ROOPNARAIN, A. Psychrophilic anaerobic digestion: A critical evaluation of microorganisms and enzymes to drive the process. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 161, p. 112394, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9849-5>. Acesso em: 22 jun. 2023.
- AZIZ, N. I. H. A.; HANAFIAH, M. M.; ALI, M. Y. M. Sustainable biogas production from agrowaste and effluents – A promising step for small-scale industry income. *Renewable Energy*, [s.l.], v. 132, p. 1–27, mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.149>. Acesso em: 22 jun. 2023.
- BIENIEK, A. *et al.* Application of biogas to supply the high compression ratio engine. *Combustion Engines* v. 179, n. 4, p. 40–46, 2019. DOI: 10.19206/CE-2019-406. Acesso em: 07 jun. 2023.
- BÜCKER, F. *et al.* Fish waste: An efficient alternative to biogas and methane production in an anaerobic mono-digestion system. *Renewable Energy*, v. 147, p. 798–805, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.140>. Acesso em: 22 jun. 2023.
- CHEN, J. L. *et al.* Toxicants inhibiting anaerobic digestion: A review. *Biotechnology Advances*, v. 32, p. 1523–1534, 2014. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.01.057. Acesso em: 12 jun. 2023.

CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores anaeróbios. 2.ed. Belo Horizonte: DESA/UFGM, 2010.

DE MENDONÇA, Henrique Vieira et al. Crescimento de cana-de-açúcar sob aplicação de biofertilizante da bovinocultura e ureia. *Revista em agronegócio e meio ambiente*, v. 9, n. 4, p. 973-987, 2016. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2016v9n4p973-987>. Acesso em: 12 jun. 2023.

DENAGUTTI, R.; PALHACI, P. J. C. M. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. *UNESP*. Bauru, SP. 2002.

DIVYA, D.; GOPINATH, L. R.; MERLIN CHRISTY, P. A. review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v. 42, p. 690–699, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.055>. Acesso em: 25 jun. 2023.

FLORES-MENDOZAA, A. P. et al. Methanogenesis of raw cheese whey: pH and substrate-inoculum ratio evaluation at mesophyll temperature range. *Chemical Technology and Biotechnology*, p. 1-26, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.6391>. Acesso em: 22 jun. 2023.

FREITAS, F. F. et al. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v. 101, n. June 2018, p. 146–157, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.007>. Acesso em: 29 jun. 2023.

HUSSEIN, M. et al. Sustainable production of housefly (*Musca domestica*) larvae as a protein-rich feed ingredient by utilizing cattle manure. *PLoS ONE*, São Francisco, v. 12, n. 2, p. e0171708, fev. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171708>. Acesso em: 18 jun. 2023.

JURGUTIS, L. et al. Towards a full circular economy in biogas plants: Sustainable management of digestate for growing biomass feedstocks and use as biofertilizer. *Energies* v. 14, n. 14, p. 4272, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14144272>. Acesso em: 18 jun. 2023.

KHANH NGUYEN, V. et al. Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge. *Fuel* v. 285, p. 119105, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119105>. Acesso em: 18 jun. 2023.

NKUNA, R. et al. Insights into organic loading rates of anaerobic digestion for biogas production: a review. *Critical Reviews in Biotechnology* v. 42, n. 4, p. 487–507, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1942778>. Acesso em: 22 jun. 2023.

LEON, F. A. et al. Proposal for modelling and numerical simulation with scilab for learning the continuous and discontinuous dynamics of biological and anaerobic digesters. *Desalination and Water Treatment* v. 234, p. 15–21, 2021. DOI: [10.5004/dwt.2021.27535](https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27535). Acesso em: 22 jun. 2023.

MACIEL, A. M et al. Aplicação de biofertilizante de bovinocultura leiteira em um planossolo. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 12, n. 1, p. 151-171, 2019. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n1p151-171>. Acesso em: 17 jun. 2023.

MUHONGO, V. R.; PREGO, G. J.; VALENTIM, A. F. Production of biogas and electric energy in the rural environment. *Environment. International*, v. 11, n. 4, p. 66-74, 2022. Doi: 10.11648/j.ijrse.20221104.11. Acesso em: 22 jun. 2023.

OTTONI, J. R. *et al.* Cultured and uncultured microbial community associated with biogas production in anaerobic digestion processes. *Archives of Microbiology*, Germania, v. 204, n. 340, mai. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02819-8>. Acesso em: 22 jun. 2023.

PASALARI, H. *et al.* Perspectives on microbial community in anaerobic digestion with emphasis on environmental parameters: A systematic review. *Chemosphere*, [s.l.], v. 270, p. 128618, mai. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128618>. Acesso em: 20 jun. 2023.

PRAMANIK, S. K. *et al.* The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints. *Bioresource Technology Reports*, v. 8, p. 100310, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310>. Acesso em: 26 jun. 2023.

WANG, C. *et al.* Responsiveness extracellular electron transfer (EET) enhancement of anaerobic digestion system during start-up and starvation recovery stages via magnetite addition. *Bioresource Technology*, [s.l.], v. 272, p. 162-170, jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.013>. Acesso em: 22 jun. 2023.