

CAPÍTULO 4

Digestão anaeróbia de efluentes da suinocultura

*Deisi Cristina Tapparo, João Fernando Ferri da Silva, Rafael Favretto,
André Cestonaro do Amaral, Camila Ester Hollas, Bruno Venturin,
Ricardo Luís Radis Steinmetz e Airton Kunz*

Introdução

O tratamento dos dejetos suínos com a utilização de biodigestores é uma tecnologia já conhecida e utilizada no Brasil. A possibilidade do aproveitamento desse resíduo para produção de biogás e biofertilizante, associada à mitigação dos impactos ambientais, é o que torna a tecnologia interessante.

O conhecimento das características do dejetos e do potencial bioquímico de biogás é a primeira etapa para a escolha do biodigestor adequado, sendo primordial para o sucesso do empreendimento. Os biodigestores são estruturas projetadas para fornecer condições ideais para os microrganismos converterem a matéria orgânica contida no dejetos em biogás. O planejamento e concepção de um biodigestor para tratamento de dejetos da suinocultura deve levar em consideração algumas características, como o volume do dejetos gerado e seu potencial de produção de biogás. Vários arranjos tecnológicos vêm sendo adaptados ao combinar diferentes modelos de biodigestores e unidades de separação sólido-líquido, visando desta forma aumentar a eficiência desses sistemas e a redução de custos de implementação e operação.

Do ponto de vista ambiental, a produção de suínos confinados coloca em risco os corpos hídricos, o solo e a qualidade do ar, pois a produção de dejetos torna-se concentrada. No entanto, cria a oportunidade de coletar este resíduo e aproveitá-lo para produção de energia, via digestão anaeróbia. Na suinocultura, além dos benefícios quanto à estabilização da matéria orgânica e produção de biogás, a adoção de biodigestores favorece a implementação de sistemas de remoção de nutrientes e, conseqüentemente, o reuso de água (Kunz *et al.*, 2015).

Potencial bioquímico de biogás

Conforme descrito no Capítulo 1, as características do dejetos suíno podem variar conforme a idade do animal e entre uma granja e outra, em função da gestão de água e dejetos nas unidades produtoras. Estas características, aliadas ao tempo de armazenamento do dejetos, interferem diretamente na produção de biogás (Tabela 1). O tempo de retenção do dejetos dentro das instalações favorece a degradação parcial da matéria orgânica, causando diminuição na concentração de sólidos voláteis (Kunz *et al.*, 2009; Kunz; Steinmetz, 2019). Estudos indicam a redução de 40% na concentração de sólidos voláteis quando o tempo de armazenamento excede oito semanas (Popovic; Jensen, 2012).

Tabela 1. Concentração de sólidos voláteis, tempo de estocagem do dejetos nas instalações e potencial de produção de biogás e metano a partir do dejetos em diferentes fases produtivas do suíno.

Amostra	SV (% m.v ⁻¹)	Tempo de estocagem do dejetos dentro das instalações (d)	PBB (m ³ _{Nbiogás} kg _{SV} ⁻¹)	PBM (m ³ _{NCH₄} kg _{SVadic} ⁻¹)
Gestação (granja A)	0,5	15	326,4 ± 5	169,73
Gestação (granja B)	2,3	7	577,1 ± 28	309,90
Maternidade (granja A)	0,6	15	860,1 ± 12	567,67
Maternidade (granja B)	2,6	7	479,2 ± 25	250,14
Crechário	0,4	40	970,2 ± 5	642,27
Terminação	2,1	1	474,5 ± 10	302,73

Onde: PBB: Potencial Bioquímico de Biogás. PBM: Potencial Bioquímico de Metano.

Fonte: Adaptado de Amaral *et al.* (2016).

Quando o dejetos suíno passa por uma unidade de separação sólido-líquido, as frações originadas possuem diferentes rendimentos de metano, possibilitando o uso de configurações de biodigestores e condições operacionais mais efetivas no tratamento do dejetos suíno (Amaral *et al.*, 2016).

Modelo de biodigestores

As características do substrato utilizado, a necessidade de atender parâmetros ambientais e questões relacionadas ao custo/benefício são os principais aspectos na hora de escolher o modelo mais adequado de biodigestor. A utilização de biodigestores, além de mitigar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) através da recuperação e aproveitamento do biogás, produz um efluente com menor carga orgânica, que quando aplicado de maneira correta é um excelente fertilizante orgânico. Existem diversas variações aos modelos de biodigestores listados a seguir, entretanto, o objetivo nesta seção é ilustrar as principais diferenças entre os modelos de biodigestores (Tabela 2). A Figura 1 ilustra os três modelos de biodigestores mais utilizados para a suinocultura.

Tabela 2. Características operacionais para BLC (Biodigestor de Lagoa Coberta), UASB (do inglês *Upstream Anaerobic Sludge Blanket*) e CSTR (do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor*).

	BLC	CSTR	UASB
Nível tecnológico	Baixo	Médio	Médio
Teor de sólidos totais (% m.V ⁻¹)	< 3	<12	< 1
TRH (d)	Entre 30 e 60	Acima de 15	1 a 3 dias
COV (kg _{SV} .m ⁻³ _{reator} .d ⁻¹)	0,3 a 0,5	2,0 a 4,0	0,5 a 8,0
Produtividade (m ³ _{biogás} .m ³ _{reator} ⁻¹ .d ⁻¹)	0,03 a 0,2	0,7 a 2,0	0,4 a 2,0
Condições ideais de clima	Quente	Todas	Quente
Necessidade de pré-tratamento	Sim (caixa de areia e sólidos grosseiros)	Sim (caixa de areia)	Sim (recomendável separação sólido-líquida com uso de agentes coagulantes/floculantes)

Fonte: Amaral; Steinmetz; Kunz (2019); AgSTAR Project (2023); Brasil (2015); Nguyen *et al.* (2019); Tapparo *et al.* (2021); Lins *et al.* (2020).

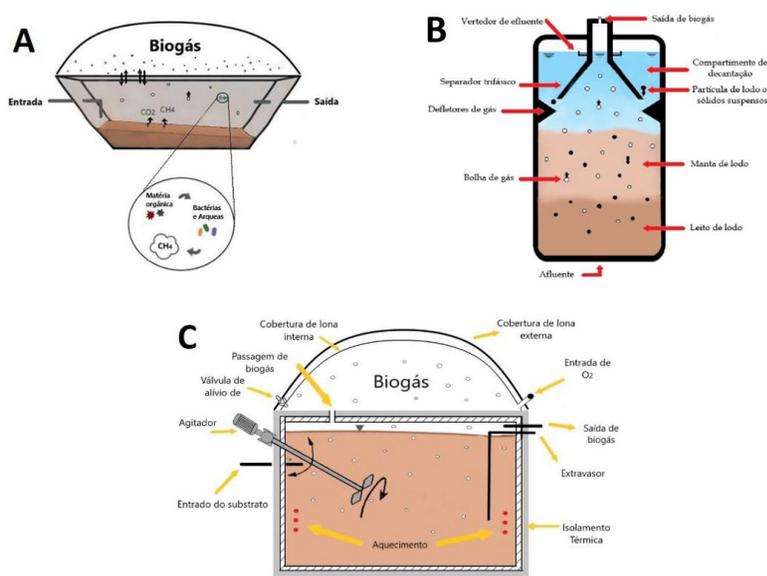


Ilustração: João Fernando Ferri da Silva

Figura 1. Esquema representativo da visão interna dos reatores modelo (A) LC, (B) UASB e (C) CSTR.

BLC (Biodigestor de lagoa coberta)

O BLC é a tecnologia de reator mais adotada no Brasil para o tratamento de dejetos da suinocultura, fato que muito se deve à facilidade na sua operação e menor custo de implantação e manejo. Ainda, trata-se de uma tecnologia versátil que pode ser implementada tanto em grandes quanto em pequenas propriedades rurais (Cantrell *et al.*, 2008).

O BLC é projetado para operar com teor de sólido totais (ST) de até 3% (V.V⁻¹), ou seja, ideal para as características do dejetos suíno. A estrutura do BLC é composta basicamente de um tanque impermeabilizado escavado no solo, onde as bactérias degradam o dejetos na ausência de oxigênio, coberto por uma manta sintética flexível (geralmente PVC ou PEAD) e inflável, que permita armazenar o biogás produzido (Figura 1A). Algumas particularidades devem ser obedecidas na construção do BLC. A relação comprimento x largura não deve ser menor que (2x1). A profundidade do BLC deve ser entre 3 e 4,5 m. Já a inclinação dos taludes pode variar em função das características do solo, mas deve ser mantida por volta de 45° (Alves, 2017; Amaral; Steinmetz; Kunz, 2019).

Existem algumas limitações, na comparação ao modelo CSTR (do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor*, vide item sobre CSTR), devido à falta de agitação e aquecimento na maioria dos projetos de BLC. A falta de um sistema de aquecimento faz com que haja variações sazonais na temperatura do biodigestor, influenciando o metabolismo dos microrganismos e, conseqüentemente, reduzindo a produtividade de metano, principalmente em regiões onde há maiores variações de temperatura durante o ano, além do arraste de sólidos (Kunz *et al.*, 2005). Pela configuração do reator, sem sistema de agitação, o contato entre os microrganismos e o substrato pode ser limitado, além de aumentar a sedimentação de sólidos no fundo dos biodigestores. Ressalta-se a importância de que seja considerado no planejamento do BLC um sistema de descarte e manejo do lodo excedente e/ ou uma caixa de areia para evitar o acúmulo de sólidos fixos dentro do biodigestor, uma vez que os mesmos podem acumular dentro do reator. O excesso de lodo, além de diminuir o volume útil do reator, pode criar caminhos preferenciais no mesmo, reduzindo significativamente a eficiência de remoção de matéria orgânica do BLC, e conseqüentemente a produção de biogás.

O pré-tratamento do dejetos, com separação das frações sólidas e líquidas, e aproveitamento da fração líquida nos BLC, além de aumentar a produtividade de biogás, evita a entrada de sólidos fixos no BLC, aumentando também a vida útil do biodigestor (Hollas *et al.*, 2021; Tápparo *et al.*, 2021). Geralmente, são utilizados sistemas de peneiramento, decantação, centrifugação ou prensagem para esta função (Cardoso; Oyamada; Silva, 2015). Informações sobre o dimensionamento de BLCs podem ser encontradas em Kunz *et al.* (2019).

UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)

O reator UASB tem como característica o fluxo ascendente do dejetos por uma manta de lodo até o topo do reator, onde há um separador trifásico (Figura 1B). Possui como característica a alta capacidade de retenção de biomassa, o qual permite operar com tempo de retenção hidráulica (TRH) na faixa de 4 a 72 h (Amaral; Steinmetz; Kunz, 2019). A variação da característica do efluente suinícola é comum, sendo que

reatores UASB possuem robustez para suportar altos teores de carga orgânica volumétrica (COV). No entanto, este modelo possui limitação quanto ao teor de ST ($< 1\%$, V.V⁻¹), sendo necessário que o dejetos suíno passe por um pré-tratamento. Neste caso, estações de tratamento de dejetos suíno utilizam uma unidade de separação físico-química, geralmente composta por uma peneira para remoção dos sólidos mais grosseiros, seguido de um flotodecantador, onde adiciona-se coagulante e floculante (por exemplo, tanino e solução aquosa de poliacrilamida) para remoção de sólidos (Kunz *et al.*, 2009). Informações sobre o dimensionamento de reatores UASB podem ser encontradas em Kunz *et al.* (2019).

CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor)

Os reatores modelos CSTR apresentam nível tecnológico mais avançado comparados aos BLCs. Esta configuração permite maior rendimento na produção de biogás e maior controle dos parâmetros operacionais do biodigestor. Devido ao seu design e desempenho, o CSTR é amplamente utilizado em todo o mundo para o tratamento dos mais diversos substratos (Figura 1C).

No Brasil, a tecnologia ainda não está bem difundida, mas as perspectivas de crescimento dos empreendimentos e as possibilidades de adaptação da tecnologia de reator CSTR o tornam muito interessante. Versões básicas do CSTR geralmente são utilizadas para o tratamento de dejetos animais, possuindo construção, equipamentos, operação e manutenção relativamente simples. Devido à tecnologia incorporada, o CSTR muitas vezes é utilizado para codigestão (dois ou mais resíduos diferentes do mesmo reator) dos resíduos da produção animal. Essa estratégia pode ser utilizada para gerenciar os resíduos orgânicos da propriedade, ajustar o teor ideal de sólidos no reator e aumentar a produção de biogás.

No CSTR, o TRH e o TRS (tempo de retenção de sólidos) são iguais, ou seja, o biodigestor deve operar com TRH superior a 15 dias para que evitar a lavagem (do inglês *wash out*) dos microrganismos. O CSTR é uma configuração de reator ideal para trabalhar em concentra-

ções de sólidos totais até 12% (Nguyen *et al.*, 2019). O conteúdo dentro do reator é misturado continuamente ou intermitentemente, garantindo maior homogeneidade entre o substrato e os microrganismos. A manutenção do CSTR é relativamente mais complexa e custosa quando comparada ao BLC, porém apresenta maior eficiência de degradação e maior produção de biogás.

O TRH do CSTR depende principalmente do grau de degradabilidade do substrato e da temperatura utilizada no processo. O aquecimento e revestimento do reator são necessários, uma vez que o processo de digestão no CSTR ocorre em temperaturas mesofílicas (aproximadamente 37 °C). Ou seja, o reator é constantemente aquecido mediante sistemas de aquecimento interno ou externo da biomassa. Os cuidados com a manutenção e operação são necessários para manter a estrutura em bom funcionamento.

Devido à baixa concentração de ST do dejetos suíno (entre 1 e 5% m.V⁻¹) e o alto volume de dejetos gerado, o aquecimento de um biodigestor tipo CSTR pode se tornar oneroso (Yang *et al.*, 2016). Assim, uma unidade de separação sólido-líquido (SSL) é uma opção de implementação em plantas de biogás visando a viabilidade econômica de implantação de biodigestor modelo CSTR (Vu *et al.*, 2016). A unidade de SSL consiste em um peneiramento prévio seguido de um decantador, onde são encaminhados ao reator modelo CSTR apenas a fração sólida, enquanto o sobrenadante é encaminhado ao reator tipo BLC (Tápparo *et al.*, 2021). A Tabela 3 apresenta um comparativo dos estudos que usam dejetos suíno para produção de biogás com diferentes modelos de biodigestores.

Informações sobre o dimensionamento de reatores CSTR podem ser encontradas em Kunz; Steinmetz (2019).

Tabela 3. Produtividade de biogás (PdB) e rendimento de biogás (RB) de dejeito suíno em estudos com diferentes modelos de bio-digestores.

	Substrato (dejeito suíno)	SV (%, m.V ⁻¹)	PdB (m ³ _{biogás} .m ⁻³ _{reator} .d ⁻¹)	RB (m ³ _{biogás} .kg ⁻¹ _{SVadic} .d ⁻¹)	CH ₄ (% V.V ⁻¹)	COV (kg _{SVadic} .m ⁻³ _{reator} .d ⁻¹)	Referência
UASB	Após SSL (separação sólido- líquido)	0,4	1,6	0,7	73	2,2	Lins <i>et al.</i> , 2020
BLC	Após SSL	-	0,2	0,9	70	0,17	Tapparo <i>et al.</i> , 2021
BLC	Após SSL	1,1	0,18	0,56	-	0,35	Tapparo <i>et al.</i> , 2021
CSTR	Sem SSL	1,3	0,6	0,8	53	0,7	Lins <i>et al.</i> , 2020
CSTR	Fração sólida	6	0,65	0,38	-	1,69	Tapparo <i>et al.</i> , 2021

Onde: UASB: do inglês *Upstream Anaerobic Sludge Blanket*. BLC: Biodigestor de Lagoa Coberta, e CSTR: do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor*.

Codigestão de dejetos de suínos com carcaças de animais mortos não abatidos

Estudos demonstram que a produção de biogás utilizando carcaça suína de animais não abatidos é uma rota de disposição desse material, considerando que o potencial de produção de biogás da carcaça, aproximadamente $1.076 \pm 48 \text{ NL}_{\text{biogás}} \cdot \text{kg}_{\text{SVadic}}^{-1}$, é até cinco vezes superior ao dejeito suíno (Tápparo *et al.*, 2019). Uma vez que as carcaças podem não ser adequadas para monodigestão em função da dificuldade de degradação e geração de compostos inibitórios, a codigestão com dejeito suíno apresenta-se como uma alternativa viável.

As principais vantagens em utilizar dejeito suíno como co-substrato são:

- Geração simultânea de dejeito suíno e carcaça na mesma área, com substancial vantagem considerando a perspectiva do estado sanitário das unidades produtivas e a ambiental.
- Existência de biodigestores alimentados com dejeito suíno já implementados em propriedades produtoras de suínos (cantrell *et al.*, 2008; Tápparo *et al.*, 2021).
- O dejeito suíno possui elevada concentração de alcalinidade, a qual pode favorecer a degradação da carcaça, sem grandes flutuações de ph no sistema (tápparo *et al.*, 2021).
- Oportunidade de potencialização da produção de biogás na granja.

No entanto, é imprescindível atentar-se às questões operacionais dos biodigestores. As taxas de mortalidade animal e produção de dejetos em conjunto com as características dos resíduos e as características operacionais dos biodigestores determinam os parâmetros operacionais do uso da codigestão de carcaças e dejetos suínos. Conforme descrito por Kunz *et al.* (2021), os seguintes aspectos devem ser considerados:

- **Trituração:** o tamanho da partícula da carcaça animal deve possuir a dimensão <5 cm. A dimensão inadequada pode impactar no sistema de mistura do equipamento de higienização (pedaços grandes, principalmente ossos, danificam o equipamento), sobrecarregar a tubulação que leva o material triturado ao biodigestor, causando entupimentos, e danificar ou causar perda de eficiência em sistemas de homogeneização de biodigestores que são agitados mecanicamente.
- **Redução de microrganismos patogênicos:**
 - a) **Pré-tratamento térmico:** é recomendável a aplicação de um pré-tratamento térmico para evitar a disseminação de patógenos, diminuindo os riscos à biossegurança dos sistemas produtivos e ao meio ambiente. Para que o pré-tratamento seja considerado efetivo, indicadores virais infecciosos termorresistentes, tais como o PCV2, devem ser reduzidos em 99,9% (3 logs). Para utilização de *Salmonella* spp. como indicador de inativação de patógenos bacterianos a redução mínima desejada também está na faixa de 99,9% (3 logs).
 - b) **Uso de lagoas para armazenamento do digestato (biofertilizante):** as lagoas de estabilização do digestato também podem ser utilizadas como estratégia para inativação de patógenos considerando-se o TRH e a temperatura ambiente média, haja vista que a higienização acontecerá aí em função dos longos TRHs. Sendo assim, o TRH mínimo recomendável para o inverno é de 120 dias e para o verão de 90 dias (Fongaro *et al.*, 2018).
- **Relação máxima carcaça/dejeto:** devido às diferentes fases de crescimento animal, e por consequência taxas de mortalidade e produção de dejeto, as relações carcaça/dejeto apresentam variabilidade nos diferentes sistemas produtivos, oscilando entre $2,5 \text{ kg}_{\text{carcaça}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{dejeto}}$ até cerca de $6 \text{ kg}_{\text{carcaça}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{dejeto}}$. No entanto, sob o ponto de vista de processo da digestão anaeróbia, os dados descritos por Tápparo *et al.*, (2019) apontam que em re-

atores modelo CSTR a relação carcaça/dejeto máxima pode ser de até $68 \text{ kg}_{\text{carcaça}} \cdot \text{m}^3_{\text{dejeto}}$, enquanto para o modelo BLC esta relação diminui para no máximo $15 \text{ kg}_{\text{carcaça}} \cdot \text{m}^3_{\text{dejeto}}$. As diferenças entre a relação máxima permitida são atribuídas à configuração de cada modelo de biodigestor. Enquanto o CSTR opera em faixa mesofílica ($\pm 37 \text{ }^\circ\text{C}$) de temperatura e possui sistema de agitação, o BLC opera em faixa psicrofílica ($<25 \text{ }^\circ\text{C}$) e normalmente não possui sistema de agitação.

O uso de carcaças em biodigestores ainda não possui normativa específica válida para o território nacional. Para o estado de Santa Catarina, o Instituto do Meio Ambiente (IMA) normatiza o uso de carcaças para a produção de biogás via codigestão com dejeto suíno através da instrução normativa de número 11 (Santa Catarina, 2022).

Uso do biogás

No território brasileiro, atualmente estão em operação 638 plantas de biogás, gerando $1,83 \text{ bilhões de Nm}^3_{\text{biogás}} \cdot \text{ano}^{-1}$. Destas, 503 geram biogás a partir de resíduos da atividade agropecuária (Cibiogás, 2021). A utilização do biogás como uma fonte de energia é possível, devido ao teor de metano (CH_4) presente neste gás. Além do metano, outros gases compõem o biogás, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Concentração de sólidos voláteis, tempo de estocagem do dejeto nas instalações e potencial de produção de biogás e metano a partir do dejeto em diferentes fases produtivas do suíno.

Componente	Concentração (% , V.V ⁻¹)
Metano (CH_4)	50 - 75
Dióxido de carbono (CO_2)	25 - 45
Vapor de água (H_2O)	2 - 7
Oxigênio (O_2)	< 2
Nitrogênio (N_2)	< 2
Amônia (NH_3)	< 1
Hidrogênio (H_2)	< 1
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	< 1

Fonte: Al Seadi (2008).

Sua composição é variável, de acordo com a composição do substrato (carboidratos, proteínas e gorduras), tipo de biodigestor e operação da planta de biogás (Tápparo *et al.*, 2021). O uso do biogás como uma fonte de energia pode ser feito através de diversas formas, sendo: a geração de energia térmica por combustão direta, a geração de energia elétrica ou como um combustível veicular.

A geração de energia térmica é a forma mais simples de utilização. Nesta, o biogás é queimado em caldeiras ou queimadores gerando calor no local para o aquecimento de água em *boilers* ou como fonte de aquecimento para as instalações (Tang *et al.*, 2021). Para a geração de energia elétrica, é necessário que haja a combustão do biogás e sua transformação em energia mecânica. Desta forma, o gerador é acionado e então é produzida a energia elétrica (FRN, 2013). A utilização do biogás como um combustível veicular (solução de mobilidade) exige um nível de complexidade maior quando comparado às demais formas de aproveitamento energético deste gás. A purificação, também chamada de *upgrading*, do biogás a biometano (gás com teor de metano acima de 90%) é necessária para que o poder calorífico deste gás seja maximizado e possibilite a sua utilização eficiente em motores veiculares (Sun *et al.*, 2015).

Dessulfurização

Em sua forma bruta, o biogás possui impurezas, dentre elas, o sulfeto de hidrogênio (H_2S), caracterizado como um gás tóxico e de odor desagradável. Este componente do biogás combina-se com o vapor de água presente no biogás e tem efeito corrosivo, danificando instalações e equipamentos, diminuindo também a vida útil de geradores (Zeng *et al.*, 2018). A dessulfurização é o processo de remoção do H_2S do biogás. Este processo pode ser biológico, físico ou químico. Além desta classificação, os métodos de dessulfurização podem ainda ser divididos em duas fases de aplicação: durante a digestão anaeróbia ou após a digestão anaeróbia.

- **Dosagem de ar:** consiste na microaeração (oxigênio puro) ou na injeção de ar (ar atmosférico) no biodigestor (no máximo 3%) (Brasil, 2015). A injeção de pequenos volumes de oxigênio ou ar atmosférico no *headspace* do biodigestor é uma forma conhecida e barata para reduzir a concentração de H_2S , sendo que a dosagem de ar atmosférico (cerca de 21% de oxigênio) geralmente é mais utilizada. A injeção de ar/oxigênio precisa ser cuidadosamente monitorada. O produto a ser formado é dependente da razão molar de consumo de oxigênio com sulfeto (O_2/S_{-2}). Na razão ≥ 2 , o principal produto formado é o sulfato (SO_4^{2-}), enquanto que em razões entre 0,5 e 1,0 o produto formado será majoritariamente enxofre elementar (S^0). No entanto, o método apresenta algumas desvantagens. É importante limitar o volume de O_2 no biogás, a fim de evitar a formação de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e outros compostos, como o SO_2 , precursor da chuva ácida. A dosagem errada de ar no sistema pode causar misturas explosivas (6-12% V.V⁻¹ de oxigênio). Além disso, o excesso de oxigênio e geração de sulfeto podem levar a inibição das arqueas metanogênicas e gerar depósitos de enxofre elementar dentro do biodigestor (Sun *et al.*, 2015, Silva; Mezzari, 2019; Tapparo *et al.*, 2021). Em plantas de biogás alimentadas com dejetos suínos, estima-se uma remoção de $H_2S > 98\%$ (Tápparo *et al.*, 2021). A adição de oxigênio pode ser feita utilizando-se uma bomba que dosa em quantidades adequadas. É imprescindível ainda o monitoramento e controle do processo.
- **Biofiltro:** são reatores preenchidos internamente com material poroso, que age como um biofilme para fixação dos microrganismos. Baseia-se no uso de bactérias específicas que são capazes de oxidar o H_2S . Uma solução de nutrientes é continuamente bombeada para dentro do biofiltro. O H_2S é absorvido na fase líquida. Após a absorção, é oxidado pelas bactérias, que crescem no leito do filtro. A concentração de H_2S pode ser reduzida e ter uma eficiência $> 98\%$, apresentando ótimo custo-benefício (Pirolli *et al.*, 2016). No caso dos efluentes, a exemplo

dos efluentes suínocolas, o digestato pode ser utilizado como solução de nutrientes, reduzindo os custos e mão de obra (Silva; Mezzari, 2019).

Biometano

A purificação do biogás a biometano (*Upgrading*) é uma tecnologia que desperta interesse dos proprietários de plantas de biogás. Este processo remove gases indesejáveis e amplia as possibilidades de utilização do metano como um recurso energético. As alternativas de uso vão ao encontro da substituição do gás natural, desde o uso como combustível veicular até a injeção na rede de gás natural (Sun *et al.*, 2015).

A produção de biometano deve estar alinhada ao que prevê a ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), na Resolução ANP nº 906, de 18 de novembro de 2022. Embora existam inúmeras tecnologias, as mais utilizadas para realizar a purificação do biogás a biometano para resíduos animais são lavagem (do inglês *Water scrubbing*) e adsorção com modulação de pressão (PSA – do inglês *pressure swing adsorption*).

- **Water scrubbing:** o processo baseia-se na absorção física dos gases em água, sendo que a força motriz é a diferença de solubilidade do CH₄ e do CO₂. Durante o processo, o biogás é pressurizado e entra pela parte inferior da coluna de water scrubbing. À medida que o biogás se desloca dentro da coluna, o CO₂ dissolve-se na água, e, conseqüentemente, o CH₄; ou o biometano sai pela parte superior da coluna. A água com o CO₂ dissolvido pode ser regenerada, retornando ao sistema (Kapor *et al.*, 2017).
- **Adsorção com modulação de pressão:** esta tecnologia separa os diferentes gases do biogás com base em suas características moleculares e na afinidade do material adsorvente, baseando-se na adsorção e dessorção físicas e alternadas por mudanças de pressão. As principais vantagens deste método são a fácil instalação e operação, não necessidade de adição de produtos químicos e o fato de ser um método a seco (Angelidaki *et al.*, 2018).

Estudo de caso

A tecnologia do biogás tem evoluído nos últimos anos no território brasileiro. A diversidade de substratos e de arranjos produtivos com potencial de geração de biogás/biometano permite elaborar projetos com casos de sucesso no país. Alguns cases de sucesso que utilizam dejetos suínos para produção de biogás e conversão a energia elétrica ou biometano estão descritos abaixo:

- **Biogasfort®**: A Embrapa Suínos e Aves, em parceria com as empresas Janus & Pergher e Kemia Tratamento de Efluentes, desenvolveram um biofiltro para remoção de H₂S. O biofiltro remove biologicamente o H₂S do biogás bruto utilizando o efluente suinícola. Na sequência, este biogás dessulfurizado é armazenado. O segundo passo da Unidade de Produção de Biometano para a geração de combustível veicular é a purificação do biogás dessulfurizado, onde a concentração de metano é > 90%, sendo realizada por resfriamento (para retirar a umidade) e PSA. O uso veicular do biometano ocorre na sequência e segue os mesmos procedimentos de abastecimento de GNV (Pereira, 2018).
- **Sistrates® - Granja Master**: A estação de tratamento de dejetos suíno conta com três biodigestores (um CSTR e dois BLC's) e recebe diariamente o dejetos suíno produzidos por aproximadamente 5.320 matrizes, o qual após separação sólido-líquida é encaminhado aos biodigestores. Os biodigestores contam com um sistema para remoção de H₂S, o qual injeta oxigênio na fração gasosa em concentrações que variam entre 0,2% e 1% (V.V⁻¹). O biogás é direcionado ao grupo gerador para conversão em energia elétrica, e a sobra de calor é utilizada para aquecimento do biodigestor CSTR. No ano de 2020, a granja atingiu uma geração de energia elétrica de 1.881 ± 1.859 kW.d⁻¹ (Cândido *et al.*, 2021; Kunz *et al.*, 2019; Embrapa, 2021).

- **Granja Colombari:** A granja possui cerca de cinco mil suínos em terminação, produzindo cerca de $45 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ de dejetos suínos, o qual é encaminhado para dois BLCs operados em série. O plantel atual possibilita a produção de $750 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ de biogás, que após filtração é utilizado para geração de energia elétrica por meio de um grupo motogerador (Freitas *et al.*, 2019).

Considerações finais

Conforme mencionado, são diversos os modelos de biodigestores já consolidados para produção de biogás a partir dos efluentes da suinocultura, os quais têm se apresentado como tecnologias robustas e eficientes. A capacidade de produção de biogás de uma unidade produtora de suínos está relacionada com o manejo do dejetos na propriedade, bem como com o nível de tecnologia aplicada. O modelo de biodigestor, a existência ou não de separação de sólidos e pré-tratamentos aliados a condições operacionais vão determinar a produtividade de biogás. A escolha do arranjo tecnológico ideal é uma questão a ser pensada e estudada junto a técnicos e especialistas da área, sendo dependente do volume de efluente, recursos financeiros da unidade produtora e objetivo do uso do biogás.

Referências

- ALVES, A. M. **Desenvolvimento de um aplicativo computacional para dimensionamento técnico e econômico de biodigestores tipo tubular**. 2017. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.
- AL SEADI, T. *et al.* **Biogas Handbook**. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark, 2008.
- AMARAL, A. C. *et al.* Influence of solid-liquid separation strategy on biogas yield from a stratified swine production system. **Journal of Environmental Management**, v. 168, p. 229–235, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.014>. Acesso em: 27 fev. 2024.

AMARAL, A. C.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. O processo de biodigestão. *In*: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. (Org). **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera, Embrapa, 2019. p. 15-28.

ANGELIDAKI, I. *et al.* Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 3, p. 452–466, apr. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP Nº 8 de 30 de janeiro de 2015. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2 fev. 2015.

AgSTAR PROJECT. **A handbook for developing anaerobic digestion**: biogas systems on farms in the United States. Washington, DC: Environmental Protection Agency, Jun. 2023.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília: Ministério das Cidades, 2015. 183 p.

CANDIDO, D. *et al.* Integration of swine manure anaerobic digestion and digestate nutrients removal/recovery under a circular economy concept. **Journal of Environmental Management**, v. 301, p. 113825, jan. 2022.

CANTRELL, K. B. *et al.* Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. **Bioresource Technology**. v. 99, n. 17, p. 7941–7953, 2008.

CARDOSO, B. F.; OYAMADA, G. C.; SILVA, C. M. Produção, tratamento e uso dos dejetos suínos no Brasil. **Desenvolvimento em questão**, v. 13, n. 32, p. 127-145, 2015.

CIBIOGÁS – Centro Nacional de Energias Renováveis - Biogás. **Nota Técnica nº 001/2021**: Panorama do Biogás no Brasil 2020. Foz do Iguaçu, mar. 2021.

EMBRAPA. **Sistema de Tratamento de Efluentes da Suinocultura – Sistrates**. 13 abr. 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=xn5p1CM-nH3s>. Acesso em: 03 mar. 2024.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR). **Guia Prático do Biogás**: geração e utilização. Tradução: Marcos de Miranda Zattar. 5. ed. Alemanha: FNR, 2010. 236 p.

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, p. 146-157, mar. 2019.

HOLLAS, C. E. *et al.* Effects of swine manure storage time on solid-liquid separation and biogas production: A life-cycle assessment approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111472, oct. 2021.

KAPOOR, R. *et al.* Factors affecting methane loss from a water scrubbing based biogas upgrading system. **Applied Energy**, v. 208, p. 1379-1388, dec. 2017.

KIM, Y. J., NAM, Y. S., KANG, Y. T. Study on a numerical model and PSA (pressure swing adsorption) process experiment for CH₄/CO₂ separation from biogas. **Energy**, v. 91, p. 732-741, 2015.

KUNZ, A.; MIELE, M.; STEINMETZ, R.L.R. Advanced swine manure treatment and utilization in Brazil. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 22, p. 5485-5489, nov. 2009.

KUNZ, A. *et al.* Effect of storage time on swine manure solid separation efficiency by screening. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 5, p. 1815-1818, mar. 2009.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R. Cuidados com os biodigestores para qualidade e estabilidade na geração de biogás. **Suinocultura Industrial**, p. 12-19, 2019.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. **Biodigestor para o tratamento de dejetos de suínos: Influência da temperatura ambiente**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2005. (Comunicado Técnico, 416). 5 p.

KUNZ, A. *et al.* **SISTRATES, Suinocultura com sustentabilidade ambiental e geração de renda**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2019. 4 p.

KUNZ, A. *et al.* **Considerações técnicas sobre o uso de carcaças de animais mortos não abatidos em processos de digestão anaeróbia**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2021. (Comunicado Técnico, 579). 12 p.

LINS, M. A. *et al.* Biogas yield and productiveness of swine manure for different reactor configurations. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 6, p. 664-673, nov. 2020.

NADALETI, W. C. *et al.* National potential production of methane and electrical energy from sugarcane vinasse in Brazil: A thermo-economic analysis. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 103422, apr. 2020.

NGUYEN, D. *et al.* Biogas Production by Anaerobic Digestion: Status and Perspectives. *In: Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels.* Elsevier, p. 763-778, 2019.

PEREIRA, M. L. **Filtro feito com bactérias purifica biogás para uso veicular.** Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/39219764/filtro-feito-com-bacterias-purifica-bio-gas-para-uso-veicular>. Acesso em: 03 mar. 2024.

PIROLI, M. *et al.* Methane production from a field-scale biofilter designed for desulfurization of biogas stream. **Journal of Environmental Management**, v. 177, p. 161-168, jul. 2016.

POPOVIC, O.; JENSEN, L. S. Storage temperature affects distribution of carbon, VFA, ammonia, phosphorus, copper and zinc in raw pig slurry and its separated liquid fraction. **Water Research**, v. 46, n. 12, p. 3849-3858, aug. 2012.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico e Sustentável. Instituto do Meio Ambiente. **Instrução normativa nº 11:** suinocultura. Florianópolis: IMA (órgão sucessor da FATMA), 2022. Disponível em: <https://in.ima.sc.gov.br/>. Acesso em: 19 jan. 2024.

SILVA, M. L. B.; MEZZARI, M. P. Tratamento e purificação de biogás. *In: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. (Org). Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.* Concórdia: Sbera, Embrapa, 2019.

SUN, Q. *et al.* Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 521-532, nov. 2015.

TANG, Z. *et al.* Biofuel trigeneration with energy storage for heating, cooling and power on farms. **Energy Reports**, v. 7, p. 5394-5405. nov. 2021.

TAPPARO, D. C. *et al.* Sanitary effectiveness and biogas yield by anaerobic co-digestion of swine carcasses and manure. **Environmental Technology**, v. 41, n. 6, p. 682-690, feb. 2020.

TAPPARO, D. C. *et al.* Swine manure biogas production improvement using pre-treatment strategies: lab-scale studies and full-scale application. **Bioresource Technology Reports**, v. 15, p. 100716, sep. 2021.

VU, P.T. *et al.* Composition and biogas yield of a novel source segregation system for pig excreta. **Biosystems Engineering**, v. 145, p. 29-38, may. 2016.

YANG, D. *et al.* Separation of swine wastewater into different concentration fractions and its contribution to combined anaerobic–aerobic process. **Journal of Environmental Management**, v. 168, p. 87-93, mar. 2016.

ZENG, Y. *et al.* Biogas desulfurization under anoxic conditions using synthetic wastewater and biogas slurry. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 133, p. 247-255, sep. 2018.