

Capítulo III

OS BIODIGESTORES

*André Cestonaro do Amaral
Ricardo Luis Radis Steinmetz
Airton Kunz*

Introdução

O ponto central de um sistema de tratamento anaeróbio é o modelo do biodigestor utilizado. Por isso, deve-se buscar projetos adaptados ao tipo de substrato a ser tratado, nível de investimento e condições ambientais. A Tabela 1 apresenta os pontos-chave para estabelecimento do processo.

Tabela 1. Pontos importantes para escolha do sistema de biodigestão.

Tecnologia	Pontos-chave	Opções
Sistema de alimentação	Tipo de biodigestor e de matéria-prima para alimentação	Alimentação descontínua para biodigestores de batelada Alimentação contínua ou semicontínua para fluxo em pistão/digestores CSTR Sistema de alimentação sólido ou líquido, dependendo do conteúdo da matéria seca do substrato
Temperatura do reator	Risco para patógenos*	Temperatura mesofílicas quando não há risco de patógenos Temperaturas termofílicas quando houver risco de patógenos (ex.: lixo orgânico doméstico)
Número de fases	Composição de substratos, risco de acidificação	Sistemas de uma fase quando não há risco de acidificação Sistema de duas fases para substratos com um elevado teor de açúcar, amido, proteínas ou de difícil degradação
Sistema de agitação	Matéria-prima seca para alimentação	Agitadores mecânicos para alta concentração de sólidos no biodigestor Sistemas de agitação mecânica, hidráulica ou pneumática para baixa concentração de sólidos no biodigestor

*Uma alternativa pode ser a utilização do processo de tratamento térmico (ex.: pasteurização).

Tipos de biodigestores

Os biodigestores são caracterizados pelo regime de alimentação (batelada ou contínuo), forma de alimentação (ascendente ou laminar), concentração de sólidos no reator (digestão sólida >20%, semissólida 10 a 15% e úmida <10%) e sistema de agitação (mistura completa, parcial ou sem mistura). Os modelos mais encontrados no Brasil e os detalhes serão discutidos nesse capítulo.

Biodigestor de lagoa coberta (BLC)

O biodigestor de lagoa coberta é um tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto com material geossintético (PVC, PEAD, etc.) caracterizado pela baixa permeabilidade a fluídos e gases, e suficientemente flexível para acumular biogás. Sua geometria é de base retangular de seção trapezoidal com inclinação do talude variável de acordo com as características do solo (Figura 1).

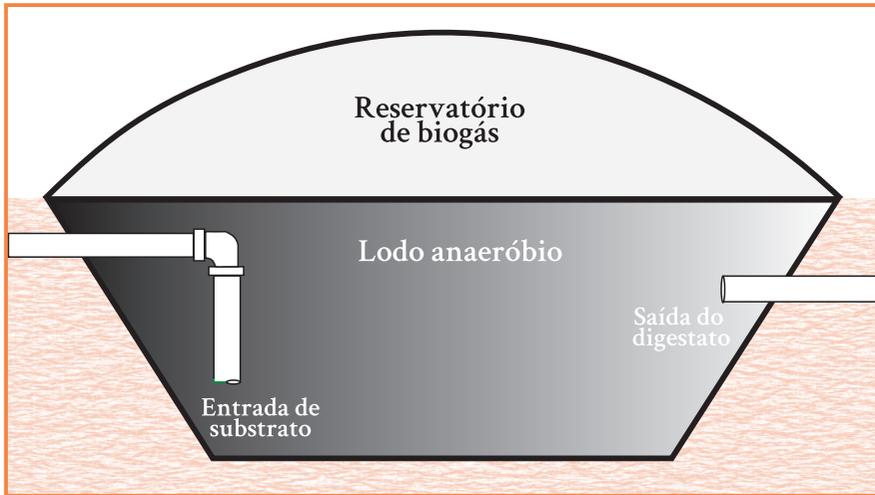


Ilustração: Airton Kunz

Figura 1. Esquema representativo da visão interna do reator modelo lagoa coberta.

O BLC tem sido amplamente empregado no meio rural no gerenciamento dos efluentes da produção animal. É considerado de baixo nível tecnológico, com facilidade de construção e operação. Usualmente encontramos referências a esse modelo como “canadense” ou “biodigestor de lona”. Em geral, não possuem sistemas de aquecimento nem de agitação. Por isso, em alguns casos também encontramos referência a este modelo como “tubular”, onde as dimensões construtivas e o regime de alimentação semicontínuo acabam por gerar configurações de fluxo que variam entre laminar e pistonado (Figura 2). Outro aspecto deste modelo é a necessidade de elevado tempo de retenção hidráulica (TRH), o que aumenta o requisito de área para instalação. O Exemplo 1 apresenta o dimensionamento de um BLC.

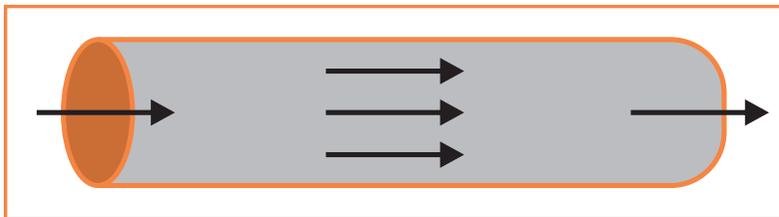


Ilustração: Ricardo Steinmentz

Figura 2. Esquema de um reator de fluxo pistonado (do inglês *plug-flow*).

A falta do sistema de aquecimento implica na variação da temperatura da biomassa do BLC em função da temperatura ambiente, ou seja, isto tem implicações diretas na capacidade de geração de biogás e será bastante afetada em regiões com inverno mais rigoroso (ex.: região Sul do Brasil). Pelo regime hidráulico do reator e, geralmente, pela não utilização de um sistema de remoção de sólidos previamente instalado ao BLC, haverá uma tendência de acúmulo de lodo no fundo do tanque (Exemplo 2), criando a necessidade de descarte (Figura 3). Este, muitas vezes, é dificultado pelo desenho do biodigestor, impedindo um descarte eficiente de sólidos.



Foto: Pedro Colombari/Granja São Pedro

Figura 3. Acúmulo de lodo em biodigestor do tipo lagoa coberta.

Esse modelo de biodigestor, geralmente, é utilizado para tratamento de efluentes com baixa concentração de sólidos, até cerca de 3% (m.v^{-1}) de sólidos totais, e uma baixa carga orgânica volumétrica (COV), entre 0,3 a 0,5 $\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{reator}} \cdot \text{d}^{-1}$. A produtividade de biogás por volume de reator encontra-se entre 0,03 e 0,15 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}_{\text{reator}} \cdot \text{d}^{-1}$ (Catrell et al., 2008), variando de acordo com tipo de substrato, COV, temperatura de operação e TRH.

Exemplo 1

Dimensionamento de um biodigestor de lagoa coberta em uma granja de suínos UPD (unidade produtora de desmamados), com 500 fêmeas suínas (matrizes). O dejetos suíno desta unidade apresenta concentração de sólidos voláteis de $18 \text{ kg}_{\text{sv}} \cdot \text{m}^{-3}$. No estado de origem desta granja, SC, o órgão ambiental considera produção de dejetos de $16,2 \text{ L} \cdot \text{matriz}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (IN11 – IMA, SC).

$$Q = PDM \times NM \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Q = dejetos produzidos diariamente ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

PDM = Produção de dejetos por matriz ($\text{m}^3 \cdot \text{matriz}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)

NM = número de matrizes (matrizes)

Sendo assim:

$$Q = 0,0162 \times 500 = \mathbf{8,10 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}}$$

Considerando-se a carga orgânica volumétrica de $0,5 \text{ kg}_{\text{sv}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, é possível calcular o volume do biodigestor, sendo:

$$V = \frac{Q \times S_o}{COV} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

V = Volume do biodigestor (m^3)

Q = Vazão de substrato ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

S_o = Concentração de sólidos voláteis no substrato ($\text{kg}_{\text{sv}} \cdot \text{m}^{-3}$)

COV = Carga orgânica volumétrica ($\text{kg}_{\text{sv}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

Sendo assim:

$$V = \frac{8,10 \times 18,0}{0,5} = \mathbf{291,60 \text{ m}^3}$$

O TRH pode ser calculado pela equação abaixo:

$$\mathbf{TRH = \frac{V}{Q}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

TRH = Tempo de Retenção Hidráulica (d)

V = Volume do biodigestor (m³)

Q = Vazão de substrato (m³.d⁻¹)

Sendo assim:

$$\mathbf{TRH = \frac{291,6}{8,10} = 36 \text{ d}}$$

O modelo BLC apresenta algumas particularidades que devem ser respeitadas na sua construção: a) relação comprimento x largura mínima de (2x1); b) profundidade (3 a 4,5 m); e c) inclinação do talude (cerca de 45°, podendo variar em função do solo).

Além da matéria orgânica, que é o substrato para produção de biogás, muitos efluentes também são compostos por materiais inorgânicos, caracterizados como sólidos fixos (SF). Esses sólidos, via de regra, não contribuem para a produção de biogás e podem assorear o biodigestor, diminuindo o TRH (Figura 3). Devido a isso, é necessário fazer o correto manejo do lodo no biodigestor.

Exemplo 2

Considera-se um BLC de 3.000 m³, com vazão de alimentação de 100 m³.d⁻¹ e concentração de SF no substrato em 12 kg.m⁻³. A concentração de SF no efluente (digestato) é de 9 kg.m⁻³. A estimativa de acúmulo de SF no BLC será:

$$AcSF = (SF_{substrato} - SF_{digestato}) \times Q \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

AcSF = Acúmulo de sólidos fixos (kg.d⁻¹)

SF_{substrato} = Concentração de sólidos fixos no substrato (kg.m⁻³)

SF_{digestato} = Concentração de sólidos fixos no digestato (kg.m⁻³)

Q = Vazão (m³.d⁻¹)

Logo:

$$AcSF = (12 - 9) \times 100$$

$$AcSF = \mathbf{300 \text{ kg}_{SF} \cdot d^{-1}}$$

Observa-se um acúmulo de SF no reator de 300 kg_{SF}.d⁻¹. Sendo assim, após um ano de operação ocorre o acúmulo de 108.000 kg de SF.

Para estimar o volume de lodo a ser descartado, podemos utilizar a densidade da areia de 2.000 kg.m⁻³, tem-se:

$$D = \frac{m}{v} \quad \text{Equação 5}$$

$$2.000 = \frac{108.000}{v}$$

$$v = \mathbf{54 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}}$$

Após um ano de operação ocorrerá acúmulo de 54 m³ de SF no biodigestor, isso significa aproximadamente 2% do volume útil. Cabe aqui ressaltar que estamos considerando apenas o SF e que os demais tipos de sólidos que podem acumular no biodigestor não estão sendo con-

siderados (ex.: geração de lodo por processos biológicos). Devido a isso, surge a recomendação de descarte periódico desse material. Observa-se também a necessidade de separação de sólidos antes do biodigestor (ex.: caixa de areia) para evitar acúmulo destes no fundo do BLC e redução do volume útil do tanque. A redução do volume útil do biodigestor resultará em menor TRH e proporcionará condições de sobrecarga.

Biodigestor tipo UASB

A sigla UASB vem do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*. O biodigestor UASB tem como característica o fluxo ascendente do afluente por uma manta de lodo até o topo do reator, onde há um separador trifásico (Figura 4).

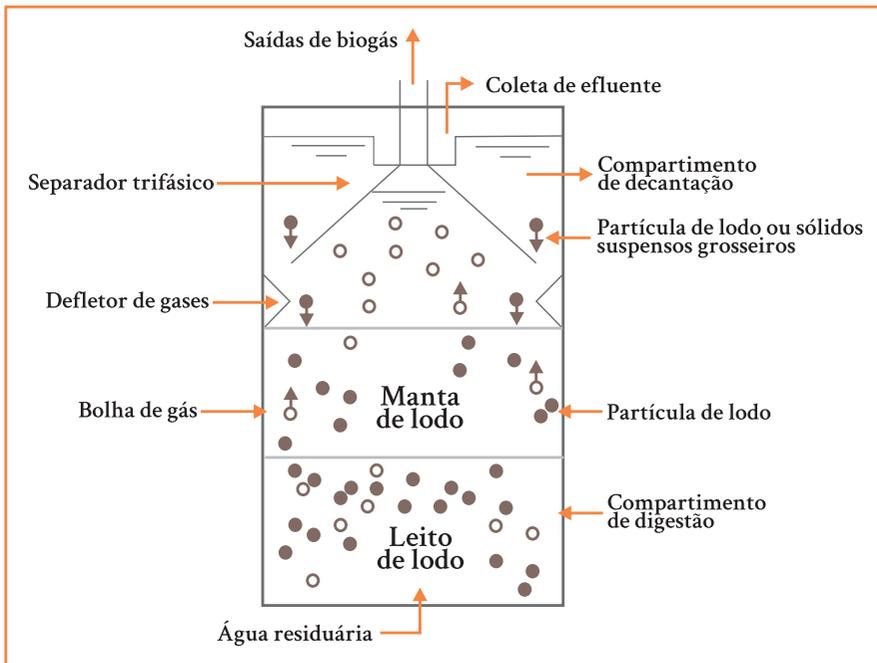


Ilustração: Marcos Lins

Figura 4. Esquema de funcionamento de um biodigestor tipo UASB.

Estes reatores têm como característica a alta capacidade de retenção de biomassa, o que permite trabalhar com baixo tempo de retenção hidráulica (4 a 72 horas). Além disso, os reatores UASB apresentam estabilidade em situações de variações das características do afluente e o suporte à alta carga orgânica volumétrica (0,5 a 8,0 $\text{Kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ou 2 a 32 $\text{kg}_{\text{DQO}_{\text{solúvel}}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$), especialmente em condições em que a matéria orgânica está solubilizada.

Por questões hidrodinâmicas, o afluente do reator UASB deve apresentar baixa concentração de sólidos totais (<2%). Esse fato indica que, para o tratamento de efluentes da produção animal, muitas vezes é necessário um pré-tratamento.

Dimensionamento de reator UASB

Para determinar as dimensões e volume necessário de um biodigestor UASB é necessário considerar a carga orgânica volumétrica, velocidade superficial e volume efetivo de tratamento. O volume efetivo de tratamento é o volume ocupado pela manta de lodo (biomassa ativa). Existe um volume adicional entre a manta de lodo e o separador trifásico. O volume nominal do biodigestor é calculado com base na carga orgânica volumétrica, como mostrado:

$$Vn = \frac{(Q \times S_o)}{COV} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

Vn = Volume nominal (m^3)

Q = Vazão de afluente ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

S_o = Concentração do afluente ($\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3}$)

COV = Carga orgânica volumétrica ($\text{Kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

Para determinar o volume total de líquido corrigido abaixo da coleta de gás é utilizado um fator de correção, o qual indica a fração ocupada pela manta de lodo. Levando em conta o fator de correção, que pode variar entre 0,8 a 0,9, o volume total do reator pode ser calculado:

$$Vc = \frac{Vn}{E} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

Vc = Volume corrigido (m³)

Vn = Volume nominal (m³)

E = Fator de correção, (0,8 a 0,9) adimensional

A velocidade ascensional é outra variável importante para evitar arraste de biomassa e é encontrada relacionando-se a vazão do afluente com a área da seção transversal do biodigestor UASB:

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

v = velocidade de ascensão (m.h⁻¹)

A = Área da seção transversal do UASB (m²)

Q = Vazão de afluente (m³.h⁻¹)

A velocidade de ascensão será dependente da disponibilidade da matéria orgânica presente no substrato. Podemos observar essa relação na Tabela 2.

Tabela 2. Velocidade ascendente e altura recomendada para biodigestores UASB tratando diferentes efluentes.

Tipo de efluente	Velocidade ascensional (m.h ⁻¹)		Altura do reator (m)	
	Alcance	Típico	Alcance	Típico
DQO totalmente solúvel	1,0-3,0	1,5	6-10	8
DQO parcialmente solúvel	1,0-1,25	1,0	3-7	6
Efluente doméstico	0,8-1,0	0,7	3-5	5

A altura de líquido do biodigestor pode ser determinada utilizando-se a seguinte relação:

$$H_L = \frac{V_C}{A} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

HL = altura do biodigestor com base no volume de líquido (m)

VC = Volume corrigido (m³)

A = Área da seção transversal do UASB (m²)

A altura do coletor de gás é adicional à altura do biodigestor UASB, aproximadamente 25% a mais. Então, a altura total do UASB será:

$$H_T = H_L + H_G \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

HT = altura total do biodigestor (m)

HL = altura do biodigestor com base no volume de líquido (m)

HG = altura do coletor de gás (m)

Exemplo 3

Muitos efluentes agroindustriais apresentam consideráveis concentrações de matéria orgânica prontamente disponível, seguidos de baixa concentração de sólidos voláteis. Esses fatos tornam possível o uso de reatores UASB para recuperação de biogás e estabilização dos resíduos. Dimensione e determine o TRH para um reator UASB tratando efluente agroindustrial com as características descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Característica do efluente agroindustrial.

Item	Unidade	Valor
Vazão	m ³ .h ⁻¹	41,67
ST	g.m ⁻³	2.000
SV	g.m ⁻³	1.700
Alcalinidade	g.m ⁻³ como CaCO ₃	500
Temperatura	°C	30

Solução:

Determinar o volume do reator UASB baseado na COV de 8 $\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$:

$$Vn = \frac{(Q \times S_o)}{COV} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

$$Q = 41,67 \times 24 \text{ h} = 1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Vn = \frac{1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \times 1,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{8 \text{ kgSV} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}}$$

$$Vn = 212,5 \text{ m}^3$$

Determinar o volume corrigido do reator:

$$Vc = \frac{Vn}{E} \quad \text{Equação 7}$$

$$Vc = \frac{212,5 \text{ m}^3}{0,85} = 250 \text{ m}^3$$

Determinação das dimensões do reator UASB:

Primeiro, determina-se a área da seção transversal, baseado na velocidade superficial (Tabela 2). Utilizou-se $1,5 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, pois a relação SV/ST no efluente é de 85%.

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 8}$$

$$A = \frac{1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}}{(1,5 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}) \cdot (24 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1})} = 27,8 \text{ m}^2$$

A partir disso, calcula-se o diâmetro:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$27,8 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \mathbf{6 \text{ m}}$$

Próximo passo é determinar a altura de líquido do biodigestor UASB:

$$H_L = \frac{V_c}{A} \quad \text{Equação 9}$$

$$H_L = \frac{250 \text{ m}^3}{27,8 \text{ m}^2} = \mathbf{9 \text{ m}}$$

Por último, determina-se a altura total do reator, sendo:

$$H_T = H_L + H_G \quad \text{Equação 10}$$

$$H_T = 9 \text{ m} + 2,25 \text{ m} = \mathbf{11,25 \text{ m}}$$

Obs: H_G foi calculado sendo 25% da altura H_L .

Em resumo:

- Diâmetro: 6 m
- Altura: 10 m
- Volume: 235 m³

Para o cálculo do TRH, considera-se o volume corrigido do reator e a vazão de alimentação:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad \text{Equação 3}$$

$$TRH = \frac{250 \text{ m}^3 \times 24 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}}{1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}} = 6 \text{ h}$$

Biodigestor CSTR

A sigla CSTR vem do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor* (reator com tanque agitado continuamente). Esse modelo de biodigestor suporta elevadas cargas orgânicas volumétricas (1 a 4 kg_{sv}·m⁻³·d⁻¹), sendo caracterizado por ter seu conteúdo em homogeneização devido à presença de sistema de agitação. Esta é a configuração de biodigestor mais utilizada em plantas de biogás, sobretudo quando se trata de codigestão (mistura de substratos) e com concentração de sólido mais elevada (próximo a 10% m.v⁻¹). Os biodigestores do tipo CSTR representam aproximadamente 90% dos reatores erguidos na Europa.

Para reatores anaeróbios do tipo CSTR, o tempo de retenção hidráulica (TRH) e o tempo de retenção de sólidos (TRS) são iguais, pois parte-se do pressuposto que não há acúmulo de lodo no reator. O TRH mínimo do reator geralmente é entre 15 e 20 dias, podendo variar bastante em função do tipo de substrato a ser digerido. Biodigestores CSTR sem recirculação de lodo são mais adequados para efluentes com altas concentrações de sólidos.

A presença de um sistema de agitação acrescenta custos de implantação e manutenção de um CSTR, mas auxilia na transferência de calor e mantém os sólidos em suspensão (melhora o contato entre a matéria orgânica e os microrganismos). A manutenção da temperatura por sistemas de aquecimento garante uma maior capacidade de produção de biogás, uma vez que colabora com a estabilização do reator e manutenção da população de microrganismos.

Sistema de alimentação

O sistema de alimentação traz o substrato do local de estocagem ao biodigestor. Podem ser estruturas simples de transporte, mas também podem ser sistemas elaborados acoplados a métodos de homogeneização, trituração e controle de vazão. O nível de tecnologia aplicado é dependente da necessidade e orçamento do projeto.

Sistema de agitação

Para a estabilidade do processo em um biodigestor CSTR, o bom funcionamento do sistema de agitação é fundamental. A utilização de sistema de agitação implica em um ganho de 15 a 30% na produtividade de biogás (Karim et al., 2005). A importância da agitação adequada se aplica ao aumento na distribuição de substratos, nutrientes, enzimas e microrganismos no biodigestor. A agitação também colabora para eliminação/diminuição de crostas e otimiza a liberação do biogás presente no lodo.

Dois aspectos importantes da agitação em um biodigestor são a intensidade e o tempo. No entanto, as informações disponíveis na literatura sobre esses aspectos ainda são contraditórias. Uma agitação muito intensa por longos períodos pode acarretar em problemas de formação de espuma, afetando a liberação do biogás do biodigestor. A agitação insuficiente implicará na separação de fases no biodigestor, interferindo no contato inóculo/substrato, transferência de calor e liberação do biogás. Em resumo, a influência da agitação na eficiência do biodigestor dependerá de fatores como o teor de sólidos, a viscosidade, o teor de gorduras e a presença de substâncias tensoativas (que promovem espuma).

As tecnologias de agitação podem ser divididas em mecânica, hidráulica ou pneumática. Na Figura 5, são demonstrados esquemas que exemplificam os tipos de agitação. A agitação hidráulica (Figura 5a) ocorre com a recirculação do interior do biodigestor por meio de bombas hidráulicas localizadas na parte interna ou externa do reator CSTR. A agitação pneumática (Figura 5b) é estabelecida em função da recirculação de biogás, causando homogeneização no meio reacional por borbulhamento no líquido ou por processo conhecido como *gas lift*. A agitação mecânica (Figura 5c) é a mais utilizada nas plantas de biogás e pode apresentar diferentes intensidades e modelos de agitadores, sendo:

- a) Motobombas submersas com hélices (Figuras 6a e 6b). Tem como característica a operação em elevada velocidade (1.500 RPM) e boa eficácia. Geralmente opera em modo descontínuo, ou seja, liga e desliga em intervalos programados de tempo.
- b) Misturador de eixo longo (Figuras 6c e 6d). Tem como característica a operação com velocidades na faixa de 10 a 50 RPM. Geralmente opera em modo contínuo, tendo como desvantagem o maior consumo de energia.
- c) Misturador em forma de pás horizontais (Figura 6e). Caracteriza-se pela baixa rotação (2 a 4 RPM). A operação desse agitador é contínua e a sua desvantagem é a dificuldade na manutenção.

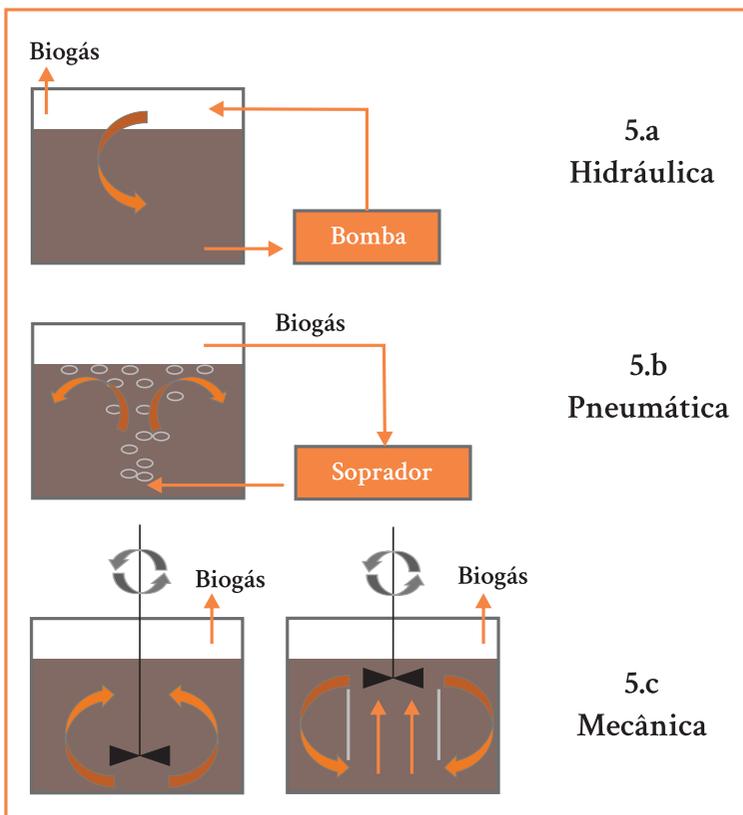


Figura 5. Exemplos dos diferentes modos de agitação, sendo: a) agitação hidráulica, b) agitação pneumática e c) agitação mecânica.

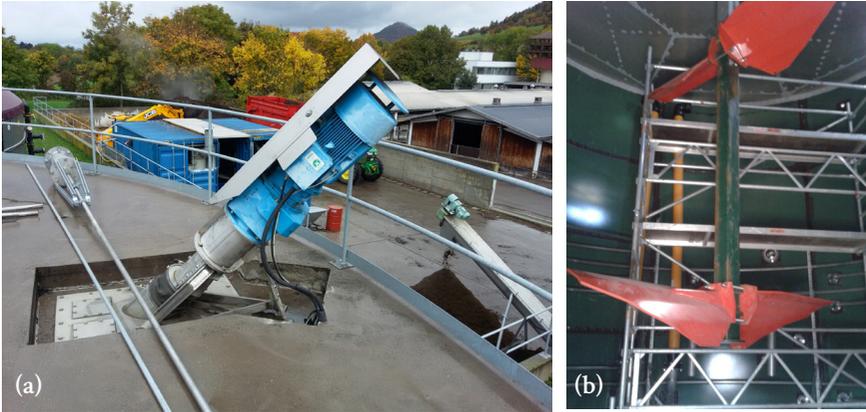


Foto: Ricardo Luis Radis Steinmetz

Figura 6. Exemplos de agitadores mecânicos: (a) Misturador de eixo longo e (b) Misturador em forma de pás verticais.

Sistema de aquecimento

Em processos contínuos, o método de aquecimento da biomassa é extremamente importante. O requerimento de calor vai ser função da vazão de substrato, capacidade calorífica específica dos materiais envolvidos, diferença de temperatura entre substrato e a temperatura de operação do biodigestor e da perda de calor pelo sistema.

Existem várias possibilidades para o aquecimento da biomassa em um biodigestor CSTR (Figura 7). Alguns sistemas optam pelo aquecimento do substrato, outros pelo aquecimento direto da biomassa ou ainda a circulação de água aquecida através de serpentinas na parte interna do reator.

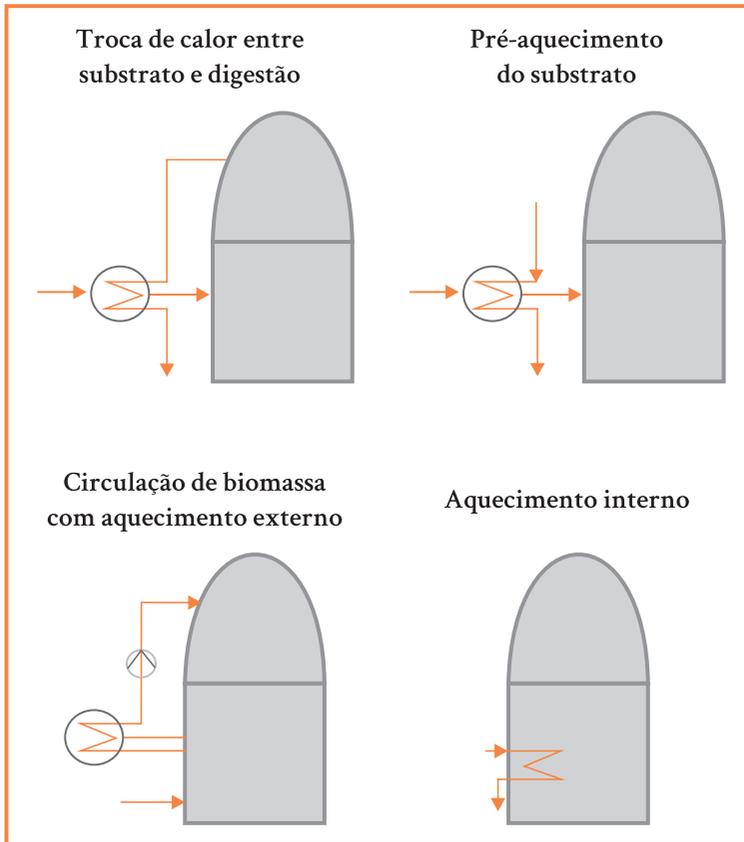


Ilustração: Vivian Fracasso

Figura 7. Sistemas de aquecimento mais utilizados na digestão anaeróbia.

A prática mais adotada é a utilização de serpentinas como trocador de calor, onde circula água aquecida através da biomassa, mantendo a temperatura desejada. Por meio de processos de transferência de calor, o substrato é aquecido até a temperatura desejada e adequada à produção de biogás.

A necessidade de calor a ser gerado pelo sistema de aquecimento pode ser calculado pela equação:

$$Q_{sa} = m \cdot c_{pa} (T_2 - T_1) \times \eta \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

Q_{sa} = Necessidade de calor (kJ)

m = Vazão do fluido de aquecimento, $kg.s^{-1}$

c_{pa} = Calor específico do fluido de aquecimento $kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ (Para água, $1 kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$).

T_1 = Temperatura inicial do substrato, $^{\circ}C$.

T_2 = temperatura de operação do reator, $^{\circ}C$.

η = Eficiência do processo, %.

O calor necessário para aquecimento do substrato à temperatura desejada pode ser obtido pela Equação 12:

$$Q = m_s c_e (T_2 - T_1) \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

Q = Energia requerida para o aquecimento do afluente, kJ.

c_e = Calor específico do substrato, $kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$.

m_s = Massa do substrato, kg.

T_1 = Temperatura inicial do substrato, $^{\circ}C$.

T_2 = Temperatura de operação do reator, $^{\circ}C$.

Para estimar o calor específico do substrato, considerando a concentração-se de sólidos totais, utiliza-se a equação:

$$C_e = 4,19 - 0,00275 \times S_{ST} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

S_{ST} = Concentração de sólidos totais no substrato, $g.L^{-1}$.

O calor necessário para manter constante a temperatura no interior do biodigestor é igual ao fluxo de calor através das superfícies externas e leva em conta o material da sua construção, podendo ser calculado pela equação:

$$Q_w = \frac{A(t_i - t_e)}{R} \quad \text{Equação 14}$$

$$R = \frac{e_x}{k_x} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

Q_w = Fluxo de calor através da superfície de contato ($W.m^{-2}$).

A = Área superficial, (m^2).

t_i = Temperatura interna, $^{\circ}C$.

t_e = Temperatura externa, $^{\circ}C$.

R = Resistência térmica do material, $m^2.^{\circ}C.W^{-1}$

ex = espessura do material, m.

kx = Condutividade térmica do material, $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$.

Exemplo 4

Estudou-se um sistema de aquecimento com água funcionando com duas resistências elétricas de 1.800 W cada, que aquecem 55 L de água externamente a um biodigestor de $10 m^3$, e a água aquecida é recirculada com motobomba através de serpentinas em contato com a biomassa no biodigestor.

A temperatura da biomassa foi controlada indiretamente pela temperatura da água que recircula na serpentina. Com o controlador de temperatura instalado, foi possível determinar um *set point* para a água da serpentina.

Foi realizada uma avaliação da quantidade de energia gasta para aquecer a biomassa, através do acompanhamento do tempo médio em que as resistências elétricas permaneceram ligadas.

O aquecimento teve como característica ligar-se por 8,20 minutos, permanecendo desligado em média 16 minutos. Isso resultou em 7,50 horas ligado por dia.

A potência das resistências foi calculada multiplicando Corrente x Tensão, resultando em 3,63 kW. Unindo as duas informações, temos que o consumo foi de 27,21 kWh.d⁻¹, ou em um mês 816,44 kWh.

Essa energia foi suficiente para manter a água que circula na serpentina do biodigestor entre 45 e 55 $^{\circ}C$, o que permitiu um aumento médio na temperatura do dejetos em 5,6 $^{\circ}C$, de 24,70 $^{\circ}C$ para 30,30 $^{\circ}C$ (no biodigestor).

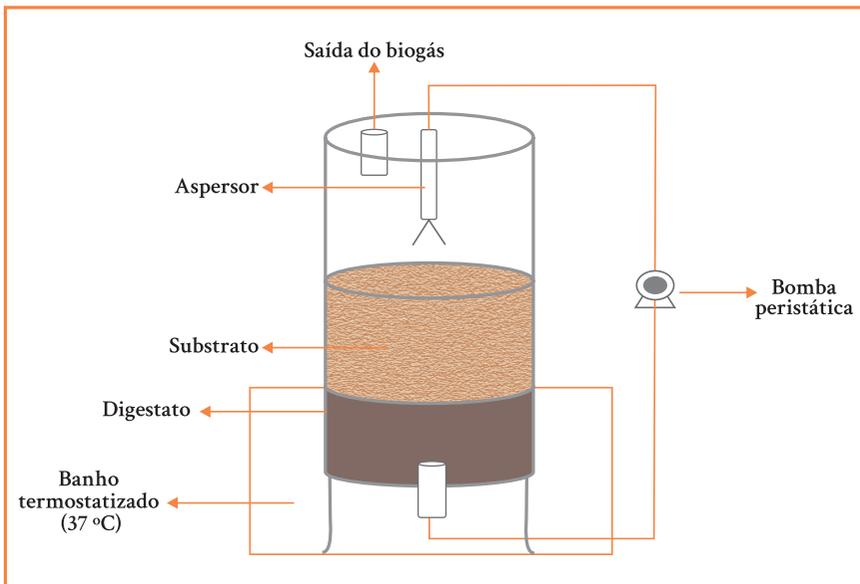
Durante esse experimento, as condições de operação do biodigestor foram:

$$\text{Vazão} = 560 \text{ L.d}^{-1}$$

$$\text{TRH} = 18 \text{ d.}$$

Biodigestor em fase sólida (*dry digestion*)

Biodigestores em fase sólida são mais comuns com operação em batelada (Figura 8), sendo alimentados com resíduos contendo entre 20 e 40% de sólidos. O substrato é adicionado ao reator juntamente com inóculo ($50\% \frac{m_{\text{substrato}}}{m_{\text{inóculo}}}$), tendo o líquido percolado recirculado sobre a fração sólida.



Fonte: Adaptado de Marchioro et al., 2018.

Figura 8. Biodigestor em fase sólida e em batelada, com recirculação de inóculo.

A quantidade de sólidos no biodigestor afeta o seu volume e o processo de tratamento. Devido à baixa concentração de água em sistemas de digestão em fase sólida, necessita-se de biodigestores com menor volume (comparados às outras tecnologias estudadas nesse livro). Em contrapartida, tem-se a necessidade de bombas para recirculação do lixiviado.

O tempo de digestão é entre 2 a 4 semanas, dependendo do tipo de substrato. A concentração de metano no biogás é relativamente alta, sendo aproximadamente 80%. A digestão em fase sólida apresenta algumas características:

- A produtividade de biogás é de 15 a 40% menor quando comparada com a via úmida.
- Menor volume do biodigestor.
- Suporta substratos com maior concentração de sólidos, além de maior tamanho de partícula.
- Não são necessárias grandes diluições aos substratos.
- O biorreator precisa ser aberto para ser preenchido e/ou esvaziado.
- A alimentação do biorreator é descontínua.

Segurança na operação de biodigestores e manuseio do biogás

Existe uma grande diversidade de perigos existentes em um digestor anaeróbio ou planta de biogás e/ou biometano. Estes perigos estão relacionados tanto aos riscos ocupacionais, ambientais e também quanto a efetividade do processo de produção de biogás.

O biogás, em função dos seus constituintes, já representa um perigo com riscos químicos e físicos atribuídos. A mistura gasosa que compõe o biogás apresenta propriedades asfixiantes (sufocamento). Outros aspectos como corrosividade e toxicidade do sulfeto de hidrogênio (H_2S), toxicidade da amônia (NH_3), além da inflamabilidade do metano (CH_4) e hidrogênio (H_2) também devem ser considerados.

No caso do metano, a mistura com o ar em concentrações entre 5 a 15% (v.v^{-1}) são suficientes para que ocorra a combustão e os vapores deflagrem uma explosão se restritos em um espaço confinado. No caso de sistemas de remoção de H_2S por injeção de ar ou oxigênio *in situ* no digestor anaeróbio, a concentração de oxigênio nunca deve superar 4,5% (Brasil, 2015a).

Portanto, o monitoramento periódico para avaliar se existem vazamentos de gás no reator, nos dutos e reservatórios é extremamente importante. A avaliação de estanqueidade do gás pode ser efetuada de diversas maneiras.

Em reatores com baixo nível tecnológico (ex.: BLC em propriedades rurais) pode ser utilizada uma solução de detergente 2% em água aplicado nas conexões, válvulas, juntas de vedação e lona com o auxílio de um pincel. A ocorrência de bolhas indicará o vazamento do gás. Em níveis tecnológicos mais avançados (ex.: plantas em escala industrial) é possível monitorar os vazamentos utilizando-se câmeras especiais, que geram imagens na região do infravermelho possibilitando identificar anomalias no ar.

Para contornar problemas com excesso de pressão, é recomendável o uso de manômetros para monitoramento da pressão do gás. Também, deve-se verificar a necessidade de uso de válvulas e/ou registros, além da possibilidade de sistemas corta-chamas nas áreas de risco. É desejável a instalação de, pelo menos, um registro por reator anaeróbio com isolamento de sua respectiva câmara de gás.

Os registros mais utilizados são as válvulas do tipo gaveta e borboleta. Em tubos com diâmetro nominal de até DN 50, frequentemente, são utilizadas válvulas do tipo esfera. As válvulas do tipo borboleta devem ser dotadas de batente. Devem ser empregadas válvulas de ferro fundido nodular ou aços de qualidade superior. Não devem ser usadas válvulas de ferro fundido cinzento pela possibilidade de ataque químico pelo H_2S . Assim, os registros devem ser constituídos por materiais resistentes ao potencial de corrosão do biogás. Registros devem ser instalados a montante e a jusante das válvulas corta-chamas, para que as atividades de manutenção sejam realizadas de forma segura e para que se evite a entrada de ar na tubulação de biogás.

Alternativamente, para controle de pressão em digestores que operam em baixa pressão e pequena escala, é utilizado um sistema bastante simples chamado de selo d'água, como demonstrado na Figura 9. Trata-se de um tubo em "U" preenchido com água para agir como selo hidráulico. Para biodigestores do tipo lagoa coberta, esta altura geralmente é em torno de 10 mm. A importância da equalização da pressão interna

pode ser observada na Figura 10, onde o biodigestor foi deslocado pelo excesso de gás armazenado, resultando em problemas estruturais graves.



Foto: Ricardo Luis Radis Steinmetz

Figura 9. Válvulas de alívio de pressão em gasômetro e sistema simplificado tipo selo d'água para equalização da pressão no interior do biodigestor.



Foto: André Cestonaro do Amaral

Figura 10. Biodigestor danificado em que ocorreu acúmulo excessivo de biogás e o selo d'água não funcionou de maneira adequada.

Outros fatores de risco envolvendo eletricidade e calor também devem ser considerados no projeto de um biodigestor ou planta de biogás. A preocupação com o aterramento de dutos e equipamentos deve ser considerada como precaução à eletricidade estática (evitar faíscas e descargas elétricas).

Portanto, possíveis fontes de ignição devem ser avaliadas e evitadas. Uso de telefones celulares, fumar ou qualquer outra fonte de centelha ou chama não devem ser permitidas nas áreas de risco. Além disso, a avaliação da utilização de para-raios também deve ser contemplada.

A instalação de queimadores para destinação do excedente do gás é uma ferramenta de segurança importante, mas que também necessita de alguns cuidados. A norma NBR 12.209 da ABNT de 1992 previa uma distância de segurança entre o queimador e digestor e/ou gasômetro de no mínimo 30 m. Além disso, a distância mínima até qualquer outro edifício deveria ser de 20 m.

Na redação atualizada desta norma (2011), estas distâncias foram desconsideradas, apenas indicando que os queimadores devem ser instalados de forma que suas chamas, gases e componentes quentes não ofereçam risco. Neste caso, a chama e a saída de gases e fumaça devem estar a uma altura mínima de 3 m; a área compreendida pelo raio de 5 m do queimador deve estar livre de vegetação (arbustos, árvores). O queimador do tipo enclausurado deve ser instalado a no mínimo 5 m de distância de edifícios e vias de trânsito; e queimadores de chama aberta podem exigir maiores distâncias (avaliadas em cada caso). Em todos os casos, o uso de anteparos contravento e protetores contra chuva é recomendado para melhoria do acendimento e do monitoramento do queimador e chama-piloto, quando houver (BRASIL, 2015a).

Outros riscos relacionados ao manejo dos substratos ou digestato também devem ser considerados. Além dos riscos ambientais, existe o risco ocupacional biológico. Portanto, sugere-se atentar aos requisitos contidos nas Normas Regulamentadoras sobre Segurança e Saúde no Trabalho – destaque para as normas 15 e 32 (Brasil, 2015b).

O risco biológico dependerá do tipo de substrato a ser utilizado no digestor e por isso os cuidados com segurança devem ser proporcionais. Uso de equipamentos de proteção individual (ex.: luvas, calçado fecha-

do, óculo de proteção) devem ser priorizados durante a manipulação de amostras de substrato e digestato.

No caso de substratos com maior potencial de risco (ex.: fração orgânica de resíduo sólido urbano, efluentes domésticos, lodo de ETE, animais mortos, etc.) há possibilidade de aplicação de processos térmicos como a pasteurização para redução e controle de patógenos. Obviamente, a avaliação da viabilidade técnica e econômica deve ser considerada em todos os casos.

Inspecções de bombas hidráulicas e dutos que conduzem substrato e digestato devem ser efetuadas rotineiramente para evitar entupimento e sobre pressão. Alguns líquidos podem formar precipitados ou depósitos nas paredes das tubulações (Figura 11), restringindo a vazão, causando aumento da pressão, sobrecarga de trabalho em bombas, vazamentos e até queda na produtividade de biogás.

Nestes casos, estratégias para inspeção de dutos e sistemas de contenção de vazamentos devem ser avaliadas. Alternativamente, é recomendado avaliar estratégias para contenção de vazamentos. Nestes casos, o uso de barreiras físicas, canaletas e tanques de armazenamento dos líquidos deve ser considerado em todas as áreas de risco.



Foto: Lucas Scherer Cardoso

Figura 11. Seção de tubulação de condução de digestato encrustada com estruvita.

Outro cuidado básico para prevenção de acidentes, é a delimitação das áreas onde estão os biodigestores, os reservatórios e outras instalações por meio de cercas e avisos de orientação (Figura 11).



Fonte: Lucas Scherer Cardoso

Figura 12. Áreas onde estão os biodigestores, os reservatórios e outras instalações devem ser cercadas e sinalizadas.

Outras questões como o controle de vegetação no entorno das instalações e o controle de roedores (que são grandes responsáveis por danificar membranas plásticas e cabos elétricos) também podem evitar problemas simples que impactam a operação de biodigestores ou planta de biogás.

Referências

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **PROBIOGÁS. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto.** Brasília, DF: Projeto Brasil, 2015a. 183 p. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/probiogas-guia-etes.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2019.

BRASIL, Ministério do Trabalho. **Normas Regulamentadoras**. Brasília, DF: 2015b. Disponível em: <http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras>. Acesso em: 25 fev. 2019.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: an introduction**. Wiley-VCH, 2011.

FATMA - FUNDAÇÃO DO MEIO AMBIENTE. **Instrução Normativa n. 11**, Suinocultura. Florianópolis, 2014. 37 p. Disponível em: <http://www.fatma.sc.gov.br/ckfinder/userfiles/arquivos/ins/11/IN%2011%20Suinocultura.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2016.

MARCHIORO, V.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C.; GASPARETO, T. C.; TREICHEL, H.; KUNZ, A. Poultry litter solid state anaerobic digestion: effect of digestate recirculation intervals and substrate/inoculum ratios on process efficiency. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 2, p. 1-10, 2018.

Literatura recomendada

CANTREL, K. B.; DUCEY, T.; RO, K. S.; HUNT, P. G. Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 7941-7953, 2008.

KOTHARI, R.; PANDEY, A. K.; KUMAR, S.; TYAGI, V. V.; TYAGI, S. K. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: an overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 174-195, 2014.