



Operação e monitoramento de reatores anaeróbios

Guia de boas práticas



CIBIOGAS
ENERGIAS RENOVÁVEIS



ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS
PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL



GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY
INVESTING IN OUR PLANET

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO REGIONAL

MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



Parceiros do Projeto



Parceiros nesta Atividade



Comitê Diretor do Projeto



ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS
PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL



GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY
INVESTING IN OUR PLANET

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO REGIONAL

MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



www.gefbiogas.org.br

This project/program is funded by the Global Environment Facility

Projeto “Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira” (GEF Biogás Brasil)



Este documento está sob a licença Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License. Citações ao material deste documento devem ser da seguinte forma:

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL; UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ; CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Operação e monitoramento de reatores anaeróbios**: guia de boas práticas. Brasília: MCTI, 2021. *E-book*. (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil).

COMITÊ DIRETOR DO PROJETO

Fundo Global para o Meio Ambiente

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Ministério de Minas e Energia

Ministério do Meio Ambiente

Ministério do Desenvolvimento Regional

Centro Internacional de Energias Renováveis

Itaipu Binacional

PARCEIROS DO PROJETO

Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

Associação Brasileira do Biogás

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FICHA TÉCNICA

Nome do produto:

Guia de boas práticas - Operação e monitoramento de reatores anaeróbios

Componente Output e Outcome:

2/ 2.1/ 2.1.2

Publicado pela(s) entidade(s):

Centro Internacional de Energias Renováveis em Biogás
Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

Entidade(s) diretamente envolvida(s):

Centro Internacional de Energias Renováveis em Biogás - CIBiogás
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Autores e coautores:

Daiana Gotardo Martinez (UNIDO / CIBiogás)
Jhenifer Aline Bastos (UTFPR)
João Henrique Lima Alino (UTFPR)
Paula Verônica Remor (UTFPR)
Thiago Edwiges (UTFPR)

Revisão técnica:

Fernando Fernandes - UEL

Coordenação:

Felipe Souza Marques

Editoração:

Nicole Mattiello

Data da publicação:

Outubro, 2020.

O68o

Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial.

Operação e monitoramento de reatores anaeróbios: guia de boas práticas / Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial; Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Comitê diretor do projeto Centro Internacional de Energias Renováveis. – Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021.

62 p.: il. – (GEF Biogás Brasil)

ISBN: 978-65-87432-24-3

1. Biogás. 2. Biomassa. I. Martinez, Daiana Gotardo. II. Bastos, Jhenifer Aline. III. Alino, João Henrique Lima. IV. Remor, Paula Verônica. V. Edwiges, Thiago. VI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. VII. UNIDO. VIII. Centro Internacional de Energias Renováveis. IX. CIBiogás. X. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. XI. Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira. XII. Título. XIII. Série.

CDU 662.767.2



APRESENTAÇÃO

O Projeto “Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira” (GEF Biogás Brasil) reúne o esforço coletivo de organismos internacionais, setor privado, entidades setoriais e do Governo Federal em prol da diversificação da matriz energética do país por meio do biogás.

O Projeto é liderado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), implementado pela Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO), financiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), e conta com o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás) como principal entidade executora.

O objetivo do Projeto é reduzir a emissão de gases de efeito estufa, fortalecendo as cadeias de valor e inovação tecnológica ligadas à produção de biogás. Por meio de ações concretas, o Projeto amplia a oferta de energia e combustível no Brasil a partir da geração de biogás e biometano, fortalecendo as cadeias nacionais de fornecimento de tecnologia no setor e facilitando investimentos.

O biogás é uma fonte renovável de energia elétrica, energia térmica e combustível. Seu processamento também resulta em biofertilizantes de alta qualidade para uso agrícola. A gestão sustentável dos resíduos orgânicos provenientes da agroindústria e de ambientes urbanos por meio da produção de biogás traz um diferencial competitivo para a economia brasileira. Desenvolver a cadeia de

valor do biogás significa investir em uma economia circular envolvendo inovação e novas oportunidades de negócios. Indústrias de equipamentos e serviços, concessionárias de energia e gás, produtores rurais e administrações municipais estão entre os beneficiários do Projeto, que conta com US \$7,828,000 em investimentos diretos.

Com abordagem inicial na Região Sul e no Distrito Federal, o Projeto gera impactos positivos para todo o país. As atividades do Projeto incluem a atuação direta junto a empresas, cooperativas e entidades da governança do biogás para implementar acordos de cooperação, fazer análises de mercado, desenvolver modelos de negócio inovadores e atrair investimentos nacionais e internacionais.

O Projeto também investe diretamente na otimização de plantas de biogás mais eficientes, seguras e com modelos replicáveis, entregando ao mercado exemplos práticos de sucesso operacional. Além disso, o Projeto desenvolve ferramentas digitais e atividades de capacitação que atualizam e dinamizam o setor, facilitando o desenvolvimento de projetos executivos de biogás. Em paralelo, especialistas do Projeto desenvolvem estudos técnicos com dados inéditos que apoiam o avanço de políticas públicas favoráveis ao biogás. Dessa forma, o Projeto entrega para o mercado brasileiro mais competitividade, fomentando o biogás como um grande catalizador de novas oportunidades.



Operação e monitoramento de reatores anaeróbios

Guia de boas práticas

Data da Publicação:

Outubro/2020

Sumário

1 INTRODUÇÃO	8
2 MANEJO DO SUBSTRATO	9
2.1 COMPOSIÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA	9
2.1.1 Carboidratos.....	9
2.1.2 Proteínas.....	10
2.1.3 Lipídeos.....	10
2.1.4 Lignocelulose	11
2.2 PRINCIPAIS FONTES DE BIOMASSA NO SETOR AGROINDUSTRIAL	12
2.2.1 Dejetos animais.....	12
2.2.2 Abatedouros.....	15
2.2.3 Laticínios	17
2.2.4 Cervejarias	18
2.2.5 Cana-de-açúcar.....	19
2.3 USO DE PRÉ-TRATAMENTO PARA FAVORECER A PRODUÇÃO DE BIOGÁS	20
2.3.1 Pré-tratamentos físicos	20
2.3.2 Pré-tratamentos químicos	22
2.3.3 Pré-tratamentos biológicos.....	23
2.3.4 Pré-tratamentos combinados	24
2.3.5 Comparação tecnológica entre os pré-tratamentos.....	24
3. SISTEMAS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	25
3.1 MONO-DIGESTÃO X CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	25
3.2 TIPOS DE REATORES	27
3.2.1 Reator em batelada.....	28
3.2.2 Reator de fluxo pistão (lagoa coberta)	29
3.2.3 Reator UASB.....	31
3.2.4 Reator de mistura completa	33
3.2.5 Reator de duas fases	35
3.2.6 Reatores de digestão anaeróbia em estágio sólido	36
3.3 PARÂMETROS OPERACIONAIS	37

3.3.1	<i>Tempos de retenção (TRH)</i>	38
3.3.2	<i>Definição de carga orgânica</i>	39
3.3.3	<i>Faixas de temperatura</i>	41
3.3.4	<i>Sistemas de agitação</i>	43
3.4	REQUISITOS DE NUTRIENTES	43
3.5	CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE (PH, ACIDEZ E ALCALINIDADE).....	45
4.	MONITORAMENTO DE REATORES ANAERÓBIOS	47
4.1	PARÂMETROS DE MONITORAMENTO E CONTROLE	47
4.1.1	<i>pH</i>	47
4.1.2	<i>Alcalinidade</i>	48
4.1.3	<i>Ácidos Graxos Voláteis (AGV)</i>	50
4.1.4	<i>Demanda Química de Oxigênio (DQO)</i>	52
4.1.5	<i>Série de sólidos</i>	52
4.1.6	<i>Nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e amônia</i>	53
4.1.7	<i>Composição do Biogás</i>	54
4.2	ARMAZENAMENTO DE AMOSTRAS.....	55
4.3	SOLUÇÃO DE PROBLEMAS (TROUBLESHOOTING).....	56
	AGRADECIMENTOS	57
	REFERÊNCIAS	57

Resumo/Abstract

PORTUGUÊS

A produção de biogás está diretamente relacionada a boas práticas de manejo do substrato e operação dos equipamentos e instrumentos envolvidos neste processo. Inúmeras matérias-primas podem ser utilizadas na digestão anaeróbia, deste modo, determinar suas características físico-químicas é considerada uma das primeiras etapas a se analisar, esta ação contribuirá na escolha de pré-tratamentos – caso sejam necessários – e do sistema de biodigestão. O reator anaeróbio é o ponto central de uma planta de biogás, seu desempenho deve ser acompanhado diariamente, por meio de monitoramento ambiental. Adotar ações de boas práticas em plantas de biogás, deve ser considerado parâmetro essencial para aumentar a vida útil de equipamentos e estruturas, assim como, alcançar produção de biogás constante, e em consequência não sofrer oscilações na geração de energia.

Palavras-chave: Reatores anaeróbios, boas práticas, procedimentos operacionais.

ENGLISH

The production of biogas is causally related to good practices of substrate management and operation of equipment and instruments involved in this process. Many raw materials can be used in anaerobic digestion, so determining their physical-chemical characteristics is considered one of the first steps to be analyzed, this action will contribute to the choice of pre-treatments - if necessary - and the biodigestion system. The anaerobic reactor is the central point of a biogas plant, its performance must be monitored daily, through environmental monitoring. Adopting good practice actions in biogas plants should be considered an essential parameter to increase the useful life of equipment and structures, as well as to achieve constant biogas production, and consequently not suffer oscillations in energy generation.

Keywords: Anaerobic reactors, good practices, operational procedures.

Impactos

Ao longo de alguns anos no Brasil, diversas plantas realizando o tratamento de resíduos via digestão anaeróbia, operaram com baixo ou nenhum grau de instrução, muitos casos, na tentativa de acerto ou erro, o que gerou uma série de cases com problemas e/ou insucesso. Deve-se atribuir parte da responsabilidade deste cenário a falta ou volume insuficiente na oferta de informações organizadas e disponíveis relacionadas a operação de reatores anaeróbios.

O processo de produção de biogás é algo que exige controle operacional e acompanhamento técnico. Em virtude disto, este guia de boas práticas possui a premissa de compartilhar orientações relacionadas aos parâmetros, manejo e características de substrato, pré-tratamento, sistemas de biodigestão e monitoramento de plantas de biogás, todas estas etapas acompanhadas com dicas práticas de recomendações a se seguir.

Espera-se impactar com este documento técnicos relacionados diretamente a plantas de biogás, ou ainda, profissionais e/ou produtores que tenham interesse em implantar/operar unidades de produção de biogás. Por entendermos que é uma tarefa que exige atenção, este guia visa suprir dúvidas que possam surgir na rotina de operação.

1. Introdução

A digestão anaeróbia vem sendo amplamente discutida como estratégia de tratamento para diversos tipos de resíduos orgânicos. Dentre as principais vantagens destacam-se: a possibilidade de implantação descentralizada em pequenos e médios geradores de biomassa; a adaptabilidade dos reatores quanto aos custos de implantação, e requisitos operacionais; a versatilidade do biogás como fonte de energia térmica, elétrica e combustível veicular que permitem minimizar a geração de gases de efeito estufa e, ainda, a possibilidade de geração de um biofertilizante capaz de reduzir a demanda por fertilizantes químicos e agregar valor ao produto final da digestão.

Apesar de versátil e adaptável, o tratamento por digestão anaeróbia requer atenção quanto às condições ideais do sistema para garantir características físicas e químicas adequadas ao desenvolvimento da atividade biológica e, desta forma, maximizar a produção de biogás, biometano e/ou biofertilizante. Sabe-se que cada tipo de substrato possui características peculiares e o conhecimento do processo, bem como o ajuste de fatores ambientais e operacionais são fatores fundamentais para a viabilidade de uma planta de biogás.

O objetivo deste guia é fornecer padrões voluntários e boas práticas relacionadas a informações quanto às características de seleção e manejo dos substratos, bem como apresentar as diferentes configurações de reatores anaeróbios, procedimentos operacionais e os principais parâmetros de monitoramento do processo de produção de biogás.

2. Manejo do substrato

2.1 Composição da matéria orgânica

O equilíbrio da produção de biogás depende diretamente da composição química dos substratos utilizados para a alimentação dos reatores. Ao escolher o substrato mais adequado, se garante não apenas melhor controle do sistema de tratamento, mas também melhor eficiência na bioconversão da matéria orgânica em energia e na produção de um digestato de melhor qualidade. Os principais substratos utilizados para a produção de biogás são os dejetos animais, os resíduos agroindustriais (abatedouros, cervejarias, laticínios e fecularias), sobras de alimentos e resíduos da agricultura como bagaço e palhadas. O que difere estes substratos são os diferentes teores de carboidratos, proteínas, lipídeos e lignocelulose em sua composição.

2.1.1 Carboidratos

Os carboidratos são os compostos orgânicos de maior abundância na natureza. Podem ser classificados em **monossacarídeos** (moléculas menores, solúveis em água e que são rapidamente transportados para o interior das células das bactérias), **dissacarídeos** (formados por dois monossacarídeos, também são solúveis em água, mas que precisam ser transformados em moléculas menores para serem transportados para o interior das células bacterianas) e **polissacarídeos** (insolúveis em água e com degradação mais lenta, pois necessitam de várias etapas enzimáticas até serem transformados em monossacarídeos solúveis).

A adição de substratos ricos em mono e dissacarídeos (ex. resíduos de frutas e vegetais) pode acidificar os reatores anaeróbios e causar a morte dos microrganismos produtores de metano.

Como a metanogênese é mais lenta que as etapas de hidrólise e fermentação (acidogênese e acetogênese), a rápida degradação dos carboidratos leva à formação de ácidos orgânicos em uma velocidade maior do que as metanogênicas conseguem consumir, resultando em acúmulo de ácidos e queda do pH dentro do reator.

O equilíbrio da relação C/N (proporção de carbono e nitrogênio) dos substratos utilizados na alimentação dos reatores é fundamental. Estes valores devem estar na faixa de 20/1 a 30-1 para que os microrganismos tenham disponibilidade suficiente de nitrogênio para a reprodução, consumindo o carbono presentes nos carboidratos.

2.1.2 Proteínas

As proteínas são compostos orgânicos nitrogenados presentes nas células vivas e, portanto, uma fonte de alimento indispensável ao homem e aos animais. Assim como os polissacarídeos (carboidratos), as proteínas também são compostos complexos e precisam ser transformados em aminoácidos na etapa de hidrólise para então serem degradados no interior das células bacterianas.

A fração de proteína não digerida é eliminada pelo sistema digestivo juntamente com as proteínas de origem microbiana e das enzimas utilizadas na digestão. As dejeções animais, como as dos suínos por exemplo, apresentam elevados teores de proteínas (45 - 60% do nitrogênio consumido é excretado), o que faz com que este tipo de resíduo orgânico seja atrativo para a utilização como substrato na digestão anaeróbia.

A formação de amônia (NH_3) proveniente da degradação das proteínas nos reatores anaeróbios é importante para manter os níveis de alcalinidade, evitando alterações bruscas de pH do meio durante a digestão anaeróbia.

No entanto, se os substratos utilizados para alimentar o reator apresentarem teor elevado de proteínas, a concentração de amônia tende a aumentar até um nível que pode ser tóxico para os microrganismos produtores de metano (CH_4).

O equilíbrio da relação C/N dentro da faixa de 20/1 a 30/1 também contribui para o consumo adequado de nitrogênio pelos microrganismos nos reatores.



2.1.3 Lipídeos

Os lipídeos são substratos ricos em energia e possuem elevado potencial para a produção de biogás. Os lipídeos incluem os óleos e gorduras e são encontrados nos tecidos de plantas e animais. As gorduras animais (ex.: banha) e as gorduras e óleos vegetais (ex: azeite de oliva) são as principais formas de lipídeos na natureza. Os substratos ricos em lipídeos são gerados nas indústrias de processamento de alimentos e de óleos comestíveis e agroindústrias como os laticínios e os abatedouros.

As gorduras e óleos são hidrolisados na primeira etapa da digestão e transformados em ácidos graxos de cadeia longa (menos complexos). Durante a fermentação estes ácidos são convertidos em ácidos orgânicos voláteis que são consumidos pelas bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas.

A alimentação de reatores com substratos ricos em lipídeos permite maiores rendimentos de biogás.

Por outro lado, o excesso de gordura dentro dos reatores também favorece a formação de espumas e a sobrecarga dos reatores em quantidades maiores do que os microrganismos presentes conseguem degradar, resultando em baixa eficiência e aumento de custos operacionais.

Reatores que operam com substratos ricos em lipídeos devem monitorar a colmatção de bombas utilizadas para a alimentação, controlar o regime de agitação e manter a temperatura de operação constante.

2.1.4 Lignocelulose

A lignocelulose é uma estrutura rígida e complexa, formada principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, representando aproximadamente 20% a 30% da massa seca da parede celular dos vegetais. A **celulose** é formada a partir de ligações de glicose (carboidrato). As fibras celulósicas são cobertas por hemicelulose e lignina. A **hemicelulose** é formada principalmente por xilose (carboidrato) e é facilmente hidrolisada. A **lignina** é formada por uma estrutura complexa de álcoois aromáticos interligados que tem a função de promover resistência aos ataques microbianos e ao estresse oxidativo. A limitação da digestão anaeróbia da lignina ocorre pela toxicidade de seus componentes aos microrganismos anaeróbios, pela barreira física da sua estrutura que impede o acesso das enzimas e por este ser um composto hidrofóbico, ou seja, não absorve água, a ação das enzimas torna-se ainda mais limitada.

As principais fontes de biomassa lignocelulósica para a produção de biogás incluem palhas de milho, trigo, resíduos de grama, podas de árvores e resíduos de cama utilizada para a produção de aves. A proporção dos diferentes componentes de lignocelulose dos substratos varia de acordo com o tipo de substrato e fase de formação. A Figura 2 apresenta alguns exemplos deste tipo de biomassa.

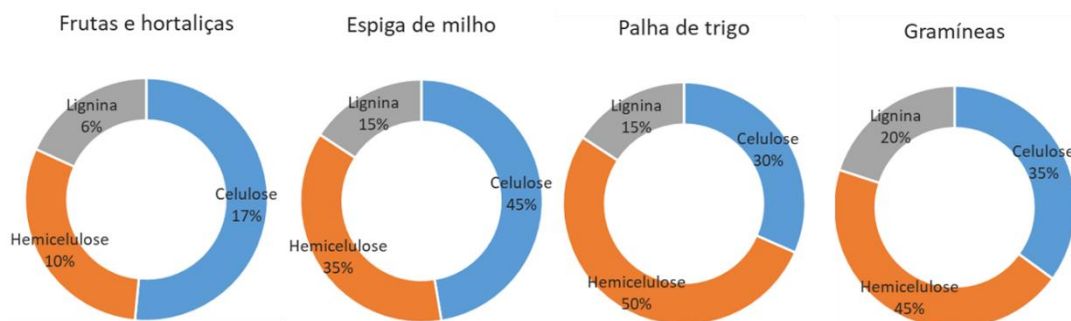


Figura 2- Teor de lignocelulose em diferentes substratos em base seca.

2.2 Principais fontes de biomassa no setor agroindustrial

2.2.1 Dejetos animais

O Brasil possui destaque na produção pecuária, com plantel da ordem de 1 bilhão de aves, mais de 200 milhões de cabeças de bovinos e 38 milhões de suínos. Os dejetos animais representam uma das fontes de biomassa mais importantes para a produção de biogás (e a que apresenta uma das melhores relações custo-benefício), tanto pela sua quantidade, quanto pela disponibilidade de nitrogênio, o que favorece a reprodução dos microrganismos dentro do reator. Além disso, a digestão anaeróbia dos dejetos animais é usualmente favorecida pelo bom equilíbrio de componentes orgânicos, principalmente carbono e nitrogênio.

Valores médios sobre a composição macromolecular de diferentes tipos de dejetos animais são apresentados na Tabela 1. Em função das características fisiológicas de cada espécie de animal, bem como o tamanho e as características da produção torna-se difícil estabelecer indicadores específicos de produção de dejetos e produção de biogás

Tabela 1 – Composição química média de diferentes tipos de dejetos animais

Tipo de dejeito	Sólidos Totais (%)	Sólidos Voláteis (%)	Proteína	Lípídeo (% ST)

			(% ST ¹)	
Dejeto bovino	8	80	9	3
Dejeto suíno	4	75	11	12
Dejeto aves	20	75	10	3

Fonte: Adaptado de ONUDI (2014).

O grau de bioconversão em que a fração orgânica presente no substrato é degradado em um reator anaeróbio depende da origem do material. O teor de matéria orgânica decomponível nas dejeções de bovinos, por exemplo, é de apenas 35% devido à alta concentração de fibras (lignocelulose) presentes na ração. Para os dejetos suínos, observam-se valores de degradação em torno de 50% e para os dejetos de aves valores ainda mais elevados, da ordem de 65% são registrados. Isto ocorre porque quanto maior o teor de nitrogênio presente no dejetos bruto, maior é o grau de biodegradabilidade do resíduo (Tabela 2).

Tabela 2 – Degradabilidade e pH dos dejetos animais

Tipo de dejetos	Grau de degradação das substâncias orgânicas (%)	Teor de amônio do conteúdo total de nitrogênio do dejetos (%)	pH
Dejeto suínos	54	70	7,7
Dejeto bovino de leite	37	58	7,8
Dejeto avícola	67	85	8,2

Fonte: Adaptado de Deublein (2008).

De acordo com a Tabela 2, pode-se observar que o teor de amônio nos dejetos de aves representa 85% do teor total de nitrogênio, o que torna este tipo de dejetos altamente biodegradável. Contudo, a alta concentração de amônia em um reator anaeróbio pode inibir o processo de digestão anaeróbia. O potencial de produção de biogás e metano de diferentes dejetos animais é apresentado Figura 3.

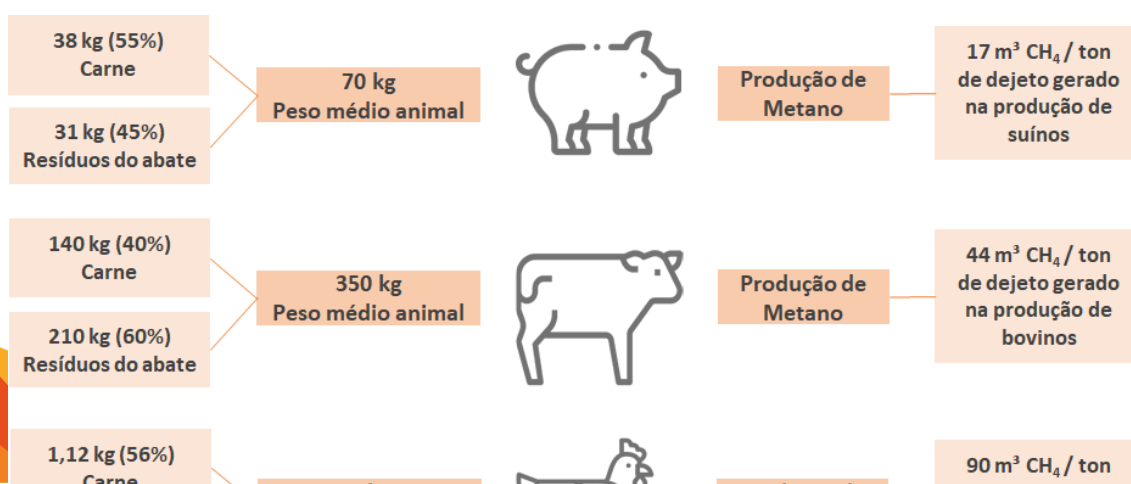


Figura 3 – Características médias de produção de metano por tipo de dejetos e de resíduos gerados no abate por tipo de animal

Fonte: Adaptado de BMELV (2010) e Díaz (2015).

Além do teor de nitrogênio presente nos dejetos, a fração de lignocelulose também deve ser observada. Quando presente em cama de aves por exemplo (composta usualmente por maravalha ou casca de arroz) e aliada ao baixo teor de umidade da mistura (dejetos + cama) trazem dificuldades quanto à bioconversão. Visando aumentar a eficiência da bioconversão de um substrato com tais características, deve-se buscar a adição de um outro substrato (codigestão) para equilibrar o teor de nitrogênio e umidade da mistura.

Atualmente existe apenas uma planta de biogás no Brasil que opera utilizando exclusivamente a cama de frango como fonte de substrato. Esta planta está localizada em Boa Esperança do Iguaçu e opera com alimentação de 3,8 ton./dia de substrato em um reator de fluxo pistão equipado com sistema de agitação. A produção anual de biogás é de 168.000 m³ convertidos em energia elétrica.

Além dos dejetos, materiais indesejados e inerentes ao processo de produção animal devido à alimentação e manutenção das propriedades podem ser observados na mistura e, desta forma, inibir a digestão anaeróbia, como:

- Areia proveniente de elementos minerais presentes na ração animal;
- Serragem;
- Solo;
- Pelos, cerdas e penas;

- Cordas, fios, plásticos e pedras em geral.

Os dejetos líquidos dos suínos também podem ser responsáveis pela formação de material sedimentado no fundo de reatores anaeróbios sem agitação, devido à presença de areia e de uma fração não digerida de vegetais como milho e outros grãos. Além disso, o elevado teor de cobre e zinco oriundos de aditivos na ração pode ser considerado um fator limitante à bioconversão destes dejetos em biogás. De forma geral, ácidos orgânicos, antibióticos, quimioterápicos, acidificantes e desinfetantes encontrados nas dejeções podem inibir e até interromper o processo de digestão anaeróbia.

Adotar rotinas de remoção de sólidos pode contribuir com o aumento da vida útil do biodigestor, evitando o acúmulo excessivo destes materiais no fundo do reator.

Não realizar isso pode gerar caminhos preferenciais comprometer a eficiência de produção de biogás e a longo prazo levar a parada do sistema.

2.2.2 Abatedouros

A contribuição brasileira para a produção mundial de bovinos, suínos e aves cresce anualmente, com produção esperada para atender 44,5% da demanda global em 2020. De acordo com o IBGE, 7,5 milhões de bovinos e 10,5 milhões de suínos foram abatidos apenas no primeiro trimestre de 2018 (Vilvert et al., 2020). As características físico-químicas dos resíduos variam em função das condições climáticas, tipo de alimentação, idade e peso do animal (Tabela 3).

Tabela 3 – Características físico-químicas de diferentes resíduos do processo de abate

Resíduo	pH	ST (%)	SV (%)	Nitrogênio total em relação ao peso seco (%)	Lipídeos (%)	Proteínas (%)
Rumem bovino	6.1	14.9	89.4	2.2	N.I.	N.I.
Sangue bovino	7.4	19.8	75.0	15.0	N.I.	N.I.

Resíduos do abate de bovinos	N.I.	53.2	98.8	1.0	86.6	65.7
Conteúdo estomacal de suínos	N.I.	18.2	98.3	7.8	47.8	36.8
Resíduos do abate de suínos	6.2	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.

Fonte: Adaptado de Díaz (2015). N.I.: não identificado.

Os resíduos de abatedouros englobam os efluentes líquidos e resíduos sólidos provenientes do abate e processamento de produtos de origem animal. Estes resíduos se caracterizam por serem ricos em energia (moléculas de proteínas e lipídeos) e, portanto, são uma fonte potencial para a geração de biogás.

Os principais tipos de resíduos gerados em abatedouros são:

Esterco, urina, vômito, sangue, vísceras não comestíveis, gorduras, aparas, pelos/penas e efluentes líquidos de lavagem de caminhões

O aproveitamento destes resíduos como substrato requer atenção especial, pois o excesso de gorduras pode causar sobrecarga, formação de espuma e colmatação de tubulações.

Ações para equilibrar a carga de alimentação, ajustar a agitação dos reatores e adicionar substratos líquidos na mistura de alimentação podem minimizar estes problemas. Já os pelos e penas devem ser removidos, pois não são facilmente digeridos e tendem a acumular no fundo dos reatores, reduzindo o volume operacional.

O potencial de produção de metano de diferentes tipos de resíduos gerados em abatedouros é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Potencial metanogênico de diferentes resíduos do processo de abate

Resíduo de abatedouro	Temperatura de operação	Condição de operação	Potencial metanogênico (L / kg SV)
Fração sólida de abate de bovinos	55°C	Mistura completa	410
Fração sólida e líquida do abate de bovino/suíno (mistura)	35°C	Batelada	274 - 302

Abate de suínos	35°C	Batelada	460
Abate de aves	35°C	Batelada	580
	35°C	Mistura completa	520-580

Fonte: Adaptado de Díaz (2015).

2.2.3 Laticínios

Entre os principais produtos gerados pelos laticínios estão o leite pasteurizado, leite UHT, leite em pó, iogurtes, queijos, requeijão, manteiga e doce de leite e são formados principalmente pelo soro do leite e do queijo e, ainda, resíduos de leite rejeitado para o processamento industrial devido a contaminações.

De forma geral, são gerados entre 3 a 5 litros de efluentes por cada quilograma de produto. As características físico-químicas dos efluentes gerados pelos laticínios variam em função do tipo de produto fabricado. Estes efluentes podem ser ricos em gorduras, carboidrato (lactose) e proteínas. Para a produção de 1 kg queijo por exemplo, estima-se a utilização de 10 kg de leite, resultando na geração de 9 kg de resíduos. As principais características do soro do leite são apresentadas no Tabela 5.

Tabela 5 – Principais características físico-químicas do soro do leite

Parâmetro	Valor
Sólidos totais	5,7%
Sólidos voláteis	95%
Proteína	1,4%
Carboidratos	3,6%
Lipídeos	0,2%

Fonte: Adaptado de Martínez-Ruano et al. (2019).

O soro do leite possui entre 10-15% da proteína 70-75% da lactose presente no leite e, por este motivo, possui potencial para o aproveitamento energético a partir do biogás, pois além da alta biodegradabilidade, o elevado teor de alcalinidade faz deste um substrato importante para a codigestão anaeróbia (Antonelli et al., 2015).

Potencial Metanogênico do Soro do Leite

- 168 – 174 L CH₄ / kg SV (Antonelli et al., 2015)
- 163 – L CH₄ / kg SV (Amon et al., 2007)
- 149 – 268 L CH₄ /kg SV (Lehtomaki et al., 2007)

2.2.4 Cervejarias

O Brasil é o terceiro maior produtor de cervejas do mundo, com aproximadamente 100 milhões de hectolitros anuais, atrás apenas da China com 381 e os Estados Unidos com 215 milhões de hectolitros ao ano (*Statistica*, 2020). A geração de efluentes líquidos nas cervejarias é da ordem de 2 a 6 litros por cada litro de cerveja produzido. A demanda química de oxigênio (DQO) deste tipo de efluente varia entre 2.000 a 6.000 mg/L e cerca de 50 a 70% da matéria orgânica presente nos efluentes é biodegradável, o que torna a digestão anaeróbia uma técnica de tratamento atrativa para este tipo de efluente.

Os principais componentes dos efluentes líquidos das cervejarias são os açúcares, etanol e amido solúvel. O bagaço de malte (sobras de cascas e polpa do malte, podendo conter ainda sobras de arroz, milho e trigo) gerado na etapa de filtração do mosto representa até 85% do total de resíduos sólidos gerados na produção da cerveja.

A geração de metano a partir do lodo de cervejaria em reator tipo batelada resultou em 306 L CH₄ kg/SV (Agler et al., 2010). A principais características dos efluentes líquidos gerados nas cervejarias são apresentadas Tabela 6.

Tabela 6 – Principais características físico-químicas do efluente de cervejarias

Parâmetros	Valor médio
Sólidos totais	1,2 mg/L
Sólidos voláteis	1,1 mg/L
Sólidos sedimentáveis	270 mg/L
Nitrogênio total	17,4 mg/L
Relação C/N	80

Fonte: Adaptado de Dos Santos et al. (2017).

2.2.5 Cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e a indústria sucroalcooleira tem papel importante no agronegócio brasileiro, principalmente quanto à substituição de combustíveis fósseis e geração de gases de efeito estufa. A produção anual de cana-de-açúcar no Brasil é de aproximadamente 650 milhões de toneladas em uma área de aproximadamente 9 milhões de hectares. A região sul é responsável por 6% desta produção, com 40 milhões de toneladas processadas anualmente. A colheita da cana-de-açúcar resulta em 39 milhões de toneladas de açúcar e 26 bilhões de litros de etanol anuais (CONAB, 2017).

Dentre os principais subprodutos da indústria sucroalcooleira destacam-se o bagaço, gerado na moagem e a vinhaça/torta de filtro, geradas no processamento industrial da cana-de-açúcar. O bagaço representa aproximadamente 25% da cana e é caracterizado pelo elevado teor de lignocelulose e baixa umidade (50%), sendo aproveitado para a geração de energia elétrica a partir da queima em caldeiras (cogeração). Já a vinhaça e a torta de filtro são geradas no processamento industrial da cana-de-açúcar são aproveitadas como fertilizante (principalmente potássio, mas também nitrogênio e fósforo), retornando à plantação.

Embora ainda pouco expressiva neste setor, as características da digestão anaeróbia permitem o uso tanto do bagaço (subproduto sólido), quanto da vinhaça (subproduto líquido) para a produção de biogás.

A vinhaça é um efluente gerado a partir da destilação alcoólica do suco da cana-de-açúcar e é caracterizada pelo baixo pH (3 - 5), elevada umidade (93 - 97% de água), presença de matéria orgânica como carboidratos ($\approx 5\%$) e sólidos insolúveis e inorgânicos ($\approx 2\%$). Tais características conferem recalcitrância à vinhaça, devido à presença de conteúdos fitotóxicos, antibacterianos e compostos recalcitrantes como fenóis, polifenóis e metais pesados, derivados do processo produtivo de destilação.

Mesmo apresentando características peculiares em termos de composição, a vinhaça é um substrato atrativo para a produção de biogás devido à presença de carboidratos, nutrientes (N, P e K) e do baixo teor de lignocelulose.

O manejo deste substrato requer boas práticas de diluição devido ao elevado conteúdo de compostos inibitórios. Diluição de 1/3 (vinhaça/água) podem resultar no aumento na produção de biogás.

A relação C/N da vinhaça é 11-15/1, inferior ao recomendado para a digestão anaeróbia

Já o bagaço apresenta elevados teores de carboidratos (elevada relação C/N), que podem ser disponibilizados por meio de técnicas de pré-tratamentos e tratados a partir da co-digestão utilizando outros substratos que equilibrem a relação C/N como as dejeções animais ou ainda aproveitados em reatores de estágio sólido (*dry-fermentation*) que permitem o tratamento em batelada, aliado aos períodos sazonais de geração deste tipo de substrato.

2.3 Uso de pré-tratamento para favorecer a produção de biogás

A busca por maiores rendimentos na produção de metano sem a necessidade de aumentar a área destinada ao tratamento e o tempo de digestão dentro dos reatores vem despertando o interesse em uma nova geração de substratos, como os resíduos da agricultura, resíduos de cama de aves e resíduos agroindustriais. O uso de substratos com diferentes teores de umidade e taxas de biodegradabilidade frequentemente requer a aplicação de processos físicos, químicos ou biológicos anteriormente à digestão anaeróbia. Tais substratos, quando submetidos aos pré-tratamentos, tornam-se menos complexos e mais acessíveis à produção de biogás. Estes processos podem ser divididos em **físicos** (mecânico, irradiação e térmico), **químicos** (ácido, alcalino e solvente), **biológicos** (fungos, consórcio de microrganismos e enzimas) ou ainda **processos combinados** que aliam mais de um pré-tratamento ao mesmo tempo.

2.3.1 Pré-tratamentos físicos

Guia de boas práticas - Operação e monitoramento de reatores anaeróbios

Os pré-tratamentos físicos modificam a estrutura do substrato, facilitando a degradação da matéria orgânica por meio do aumento na superfície de contato do substrato, ação de ondas eletromagnéticas ou, ainda, elevada temperatura. O teor de umidade e a dimensão da partícula do substrato e a demanda energética necessária por cada tipo de equipamento influenciam diretamente na viabilidade da aplicação deste tipo de pré-tratamento (BASTOS, 2020).

PRÉ-TRATAMENTOS FÍSICOS		
MECÂNICO	TRITURAÇÃO	Trituradores de discos ou bolas rotacionam em sentidos opostos causando atrito nas partículas do substrato com a parede do equipamento. Quanto menor a dimensão da partícula do substrato, mais rápida será a bioconversão em metano, com dimensões de partículas ideais dependentes do tipo de reator. Reduções inferiores à 0,2-0,4 mm podem não apresentar ganhos significativos de produção de biogás.
	EXTRUSÃO	Processo que envolve calor e forças de compressão e cisalhamento causados por um ou dois eixos que se deslocam, alterando a estrutura física e química dos substratos, sendo aplicada principalmente em substratos agropecuários como palhadas e resíduos da bovinocultura.
IRRADIAÇÃO	MICRO-ONDAS	As micro-ondas aumentam a energia cinética da água presente na biomassa (ou adicionada durante o pré-tratamento) levando ao ponto de ebulição. A rápida geração de calor que variam de 115 à 300 °C, e pressão contribuem para a hidrólise da biomassa, forçando a saída dos componentes para fora da estrutura celular.
	ULTRASSOM	O efeito do colapso das bolhas cavitacionais geradas durante o processo alteram a natureza química da biomassa, destruindo a parede celular e aumentando biodegradabilidade de substratos e a produção de biogás. A eficiência está relacionada ao teor de umidade presente na biomassa. Substratos lignocelulósicos apresentam melhores resposta aos pré-tratamento por ultrassom quando são misturados com água.

TÉRMICO	EXPLOÇÃO A VAPOR	A biomassa é exposta ao vapor em elevada temperatura de 160 a 260 °C e pressão de 0,7 a 4,8 MPa durante o período de 1 a 30 minutos utilizando autoclave ou reator encamisado. Em seguida, a temperatura e pressão são reduzidas abruptamente, o que permite uma 'explosão' na estrutura da biomassa, resultando em melhores rendimentos de biogás.
	HIDROTÉRMICO	O efeito da pressão causada pela água entre 50 a 200 °C permite que a água penetre na biomassa, hidratando a celulose e removendo a maior parte da hemicelulose e parte da lignina. O controle do pH neutro durante o processo é importante para minimizar a formação de substâncias inibidoras. A temperatura e o tempo de exposição da biomassa devem ser monitorados para evitar a formação de compostos inibitórios.

2.3.2 Pré-tratamentos químicos

O pré-tratamento químico altera a estrutura física e a composição química da lignocelulose presente dos substratos. Como consequência, tem-se um melhor uma fração da matéria orgânica maio biodegradável após este tipo de pré-tratamento, com maior contato entre biomassa e microrganismos, possibilitando melhores rendimentos de biogás. Soluções químicas ácidas ou alcalinas são aplicadas neste tipo de pré-tratamento, favorecendo a quebra das ligações estruturais da biomassa (CIBIOGÁS, 2020).

PRÉ-TRATAMENTOS QUÍMICOS	
ALCALINO	As reações de saponificação das ligações entre as moléculas aumentam a porosidade dos compostos, facilitando o contato das enzimas que realizam a degradação da celulose e hemicelulose. As principais soluções utilizadas neste tipo de pré-tratamento são: hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de cálcio (Ca(OH ₂)). Os reagentes químicos podem ser aplicados de forma concentrada (< 10%) ou diluídas (< 5%), sendo que o uso de soluções diluídas em temperaturas mais amenas é recomendado. A produção de metano pode atingir valores de 30-80% superiores ao substrato sem pré-tratamento. O efluente gerado após o pré-tratamento contém elevadas concentrações do reagente químico e o custo para o tratamento deve ser avaliado. O uso de soluções alcalinas em reatores alimentados com substratos ricos em gorduras deve ser evitado para inibir a formação de espumas dentro do reator. Estratégias de reaproveitamento dos efluentes para novos pré-tratamentos contribuem para a viabilidade econômica do processo e evitam gastos com tratamento e disposição final. As aplicações de reagentes como o KOH também permitem a comercialização devido ao potencial agrônômico.

ÁCIDO

As soluções ácidas promovem a hidrólise completa da hemicelulose em açúcares simples. Soluções ácidas concentradas (30-70%) em temperatura ambiente ou soluções ácidas diluídas (0,1%) em elevada temperatura (> 150 °C) são aplicadas, utilizando principalmente soluções de ácido sulfúrico (H₂SO₄) e ácido clorídrico (HCl) (BASTOS, 2020). O efluente gerado ao final deste tipo de pré-tratamento requer ações de gerenciamento pois pode contribuir para a corrosão de tubulações e tanques e para a redução no pH do reator. O reaproveitamento das soluções ácidas para novas baterias de pré-tratamento evita os custos com o tratamento que pode ser por neutralização química e a disposição final que deve ser em aterros industriais Classe 1.

2.3.3 Pré-tratamentos biológicos

Os pré-tratamento biológicos são aplicados em substratos de maior biodegradabilidade, utilizando microrganismos específicos como algumas espécies de fungos ou um consórcio de microrganismos ou enzimas para tornar as frações da matéria orgânica mais solúveis para a posterior digestão anaeróbia (BASTOS, 2020).

PRÉ-TRATAMENTOS BIOLÓGICOS	
FUNGOS	Enzimas produzidas por fungos lignolíticos como os da espécie white rot funghi and brown rot funghi degradam parte da lignina presente nos substratos (BASTOS, 2020). Por serem processos biológicos, o tempo de ação dos deste tipo de pré-tratamento é mais longo, quando comparado aos processos químicos, podendo atingir 10 dias. Os rendimentos de produção de metano variam em torno de 15-25%. O manejo dos fungos também requer condições adequadas de temperatura e umidade.
CONSÓRCIO DE MICRORGANISMOS	Diferentes comunidades de microrganismos encontradas na natureza são responsáveis pela degradação de matéria orgânica vegetal como folhas e troncos de árvores em decomposição. Estes mesmos microrganismos podem ser utilizados para degradar a lignocelulose dos substratos antes da digestão anaeróbia, tendo como benefícios redução no tempo de contato entre substrato e microrganismos quando comparado com os pré-tratamentos biológicos isolados, devido à facilidade de adaptação dos microrganismos (BASTOS, 2020). Rendimentos de metano podem ultrapassar 80% quando comparados aos substratos sem pré-tratamento.

ENZIMAS

Enzimas específicas como proteases, lacases e peroxidases são adicionadas no reator para acelerar a hidrólise dos substratos lignocelulósicos. A aplicação das enzimas pode ser realizada em um tanque de pré-tratamento separado, diretamente no biodigestor ou no digestato para ser recirculado no biodigestor. A demanda de enzimas específicas tende a elevar os custos e limitar a viabilidade econômica deste tipo de pré-tratamento.

2.3.4 Pré-tratamentos combinados

O pré-tratamento combinado alia benefícios obtidos com os processos mecânicos, físicos, químicos e biológicos ao combinar um ou mais tipos de pré-tratamento na mesma biomassa. Devido às particularidades de cada tipo de substrato, a aplicação de um pré-tratamento isolado pode não garantir as melhores taxas de conversão da matéria orgânica em biogás, seja por questões ligadas às dimensões da partícula, teores de umidade, composição química ou custos relativos dos processos. A aplicação de mais de um tipo de pré-tratamento pode facilitar ou tornar o processo mais eficiente e mais viável (CIBIOGÁS, 2020). As principais combinações de pré-tratamento combinados são os físico-químicos (utilizam uma solução química como agente catalizador ao processo físico por irradiação, micro-ondas ou ultrassom) e termoquímicos (combinam o efeito da temperatura (100-160 °C) com o pré-tratamento químico ácido ou alcalino).

2.3.5 Comparação tecnológica entre os pré-tratamentos

Como cada tipo de pré-tratamento requer características específicas quanto ao tempo, energia e soluções químicas ou microrganismos, um estudo de viabilidade técnica e econômica considerando as especificidades da biomassa a ser tratada, como as características de geração, os custos de aquisição de insumos e o manejo do material residual é uma etapa imprescindível para o sucesso da aplicação do pré-tratamento. A Tabela 7 resume os principais efeitos dos pré-tratamentos abordados.

Tabela 7 – Aspectos de cada tipo de pré-tratamento

Efeito	Mecânico	Térmico	Físico	Químico	Biológico
Aumento da superfície de contato	+	+	+	+	+
Solubilização da celulose	-	±	±	+	-
Solubilização da hemicelulose	-	+	±	+	-
Solubilização da lignina	-	±	-	+	-
Melhora da viscosidade	+	+	-	+	+
Remoção de patógenos	-	+	+	+	+
Formação de inibidores	-	+	± ²	+	-

Observação: + (efeito primário), ± (efeito secundário) e - (sem efeito).

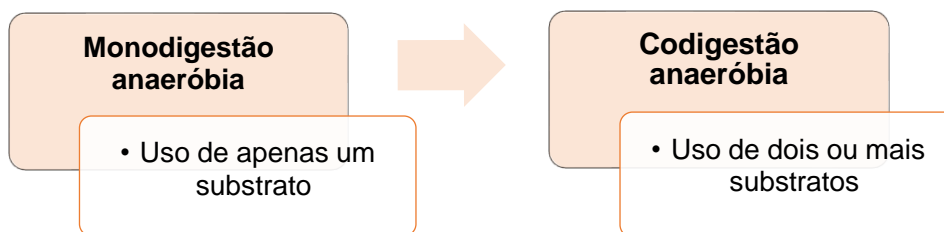
3. Sistemas de digestão anaeróbia

Como visto nos capítulos anteriores, o equilíbrio da digestão anaeróbia está relacionado à qualidade dos substratos orgânicos, da alimentação dos reatores e da atividade biológica dos microrganismos. Cada grupo de microrganismo possui requisitos próprios quanto às condições do ambiente e teores de nutrientes. Portanto, para que o processo ocorra com eficiência, uma série de parâmetros de controle devem ser avaliados.

3.1 Monodigestão x codigestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia pode ocorrer a partir do uso de um ou mais substratos para a alimentação dos reatores.

² Micro-ondas pode formar furfural e polifenóis em elevadas temperaturas assim como no PT térmico e químico.



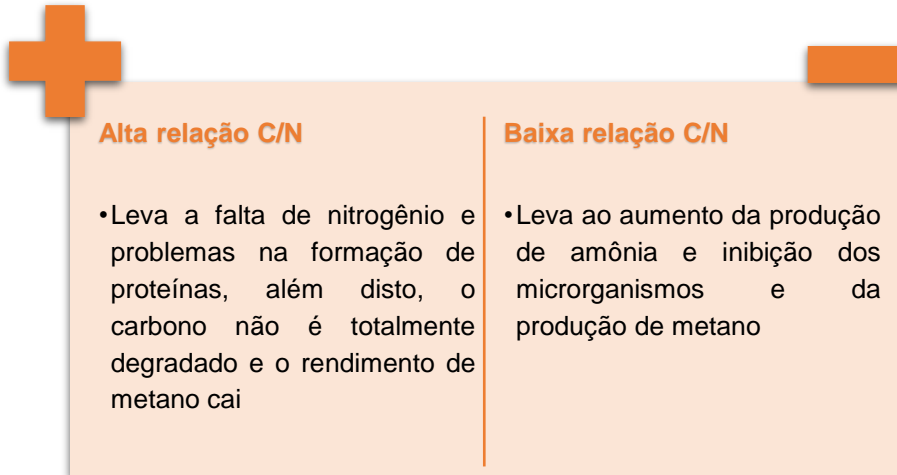
A monodigestão anaeróbia (MoA) é o método mais antigo e amplamente disseminado em todo o mundo, enquanto a codigestão anaeróbia (CoA) é uma estratégia aplicada com o intuito de melhorar parâmetros operacionais dos reatores, e conseqüentemente o rendimento de metano. A Tabela 8 expressa as vantagens e desvantagens na comparação dos dois métodos de digestão anaeróbia.

Tabela 8 – Vantagens e desvantagens dos métodos de mono e codigestão anaeróbia

Método	Vantagens	Desvantagens
Monodigestão	<ul style="list-style-type: none">- Baixo custo operacional- Não requer grandes quantidades de cosubstratos	<ul style="list-style-type: none">- Menor eficiência de conversão em biogás- Baixo equilíbrio nutricional- Mais suscetível a distúrbios de estabilidade.
Codigestão	<ul style="list-style-type: none">- Maior rendimento de metano- Melhor diluição de sólidos totais e compostos inibitórios- Maior estabilidade do processo- Aumento da biodegradabilidade de substratos recalcitrantes	<ul style="list-style-type: none">- Dependendo da mistura, pode ocorrer excesso, deficiência ou desequilíbrio de nutrientes- Maior probabilidade de acúmulo de AGVs.

A Codigestão anaeróbia busca equilibrar concentrações de nutrientes, enzimas e teores de alcalinidade nos reatores. A aplicação de substratos orgânicos em codigestão com dejetos de origem animal é altamente recomendada, pois esses dejetos podem regular efetivamente a capacidade de tamponamento do sistema e aumentar a produção de metano. Com proporções inadequadas de nutrientes, efeitos adversos são observados como elevação na concentração de amônia e de AGV, que limitam ou inibem a atividade metanogênica (BASTOS, 2020).

Um dos principais motivos para a aplicação de CoA é o equilíbrio da relação C/N, parâmetro que mede a relação entre a presença de carbono e nitrogênio no substrato. Estes nutrientes são os mais essenciais no processo de digestão e a proporção entre eles é um pré-requisito importante para a estabilidade do processo. A relação C/N ideal para o processo é entre 10 e 30.



Alta relação C/N	Baixa relação C/N
<ul style="list-style-type: none">•Leva a falta de nitrogênio e problemas na formação de proteínas, além disto, o carbono não é totalmente degradado e o rendimento de metano cai	<ul style="list-style-type: none">•Leva ao aumento da produção de amônia e inibição dos microrganismos e da produção de metano

3.2 Tipos de reatores

Existem diversas configurações de reatores anaeróbios quem podem ser aplicados ao tratamento da biomassa para a produção de biogás. A escolha do tipo de reator depende de características como teor de umidade do substrato, quantidade de substrato disponível para a alimentação diária, oferta de espaço para a implantação, disponibilidade de recursos financeiros e pessoal qualificado para a operação. Cada tipo de reator possui requisitos específicos de operação, e da mesma forma, gera rendimentos distintos quanto a produção de biogás.

As principais formas de classificação dos reatores são: quanto ao regime de alimentação (batelada/descontínuo e fluxo contínuo); forma de alimentação (ascendente ou laminar); agitação (sem agitação, agitação parcial e mistura completa); concentração de sólidos no interior do reator (digestão úmida < 10%, digestão semi-sólida 10 e 15% e digestão sólida ou *dry-fermentation* > 15%).

3.2.1 Reator em batelada

O reator em batelada (ou descontínuo) é caracterizado por um tanque único, operado com uma carga pontual de alimentação, que é removida ao final do processo de digestão anaeróbia. Desta forma, todas as etapas da digestão (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) acontecem no mesmo tanque (Figura 3). Um exemplo deste tipo de reator é o reator anaeróbio operado em batelada sequencial (ASBR, do inglês *anaerobic sequencing batch reactor*) que é utilizado para o tratamento de efluentes de laticínios, resíduos da suinocultura com baixo teor de sólidos totais.

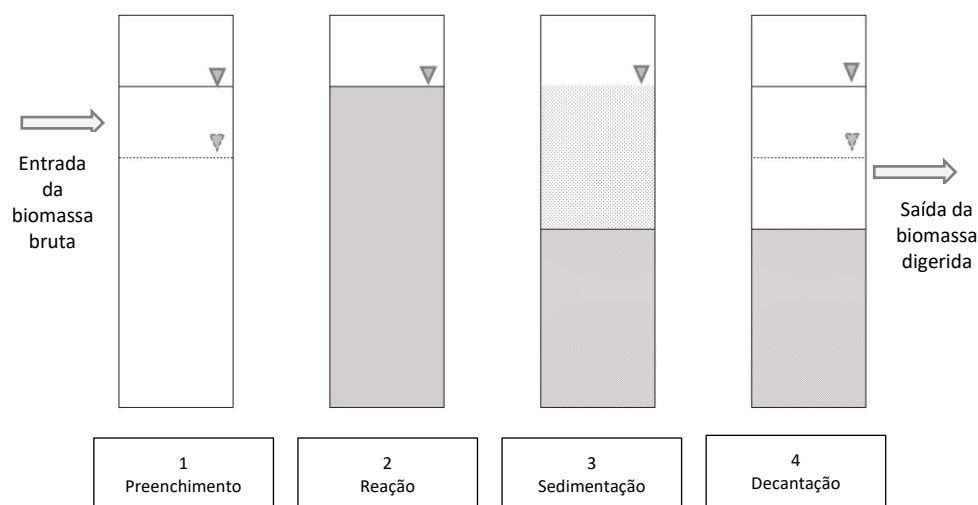


Figura 3 – Fases de operação de um reator em batelada

Comparado aos reatores contínuos, os reatores em batelada têm como vantagem o melhor controle do processo. A taxa de produção de biogás nestes reatores é elevada no início da operação e a ausência de novas cargas de alimentação pode favorecer a digestão, pois evita o acúmulo de metabólitos intermediários capazes de inibir a atividade biológica dos microrganismos. Logo após atingir o pico (momento de máxima produção de biogás), a taxa de produção de biogás cai bruscamente, devido à ausência de novas fontes de carbono dentro do reator, que faz com que as bactérias parem de se desenvolver.

Este tipo de reator é utilizado quando a produção de biomassa disponível para a geração de biogás é intermitente ou sazonal, como determinados resíduos da

agroindústria que dependem de períodos específicos do ano para a geração. A configuração dos reatores em batelada apresenta ainda as seguintes vantagens:

- facilidade operacional;
- baixa demanda por dispositivos mecânicos (bombas e motores);
- tratamento da biomassa com elevados teores de sólidos, pois pode não requerer água para a alimentação constante;
- tratamento de diferentes volumes de biomassa, ao contrário dos sistemas contínuos, em que o regime de alimentação deve ter vazão constante;
- boa relação custo-benefício.

Por outro lado, algumas desvantagens podem ser observadas nestes tipos de reatores, como:

- a sedimentação pode ser limitada pela presença de gás no meio líquido que impede materiais não digeridos de sedimentar;
- o tratamento pode ser restrito a pequenos volumes;
- requer agitação para melhorar o contato entre a biomassa e os microrganismos.

BOAS PRÁTICAS

Os substratos utilizados para a alimentação deste tipo de reator devem ter elevada biodegradabilidade, pois a baixa produção de biogás logo após a etapa de reação é que permite a sedimentação das partículas e a remoção do efluente clarificado na parte superior.

A agitação é um fator relevante neste tipo de reator, permitindo melhor contato entre o substrato e os microrganismos. A agitação (mecânica ou pela recirculação do líquido ou do biogás) deve ser controlada, pois agitação excessiva pode causar ruptura dos grânulos e reduzir a eficiência do reator.

3.2.2 Reator de fluxo pistão (lagoa coberta)

Os reatores de fluxo pistão, popularmente conhecidos como biodigestores de lagoa coberta ou biodigestores modelo canadense são compostos por uma lagoa anaeróbia impermeabilizada e de base retangular (tanque escavado no solo), com um sistema de cobertura feito de geomembrana de PEAD ou PVC que armazena o biogás produzido (Figura 4).

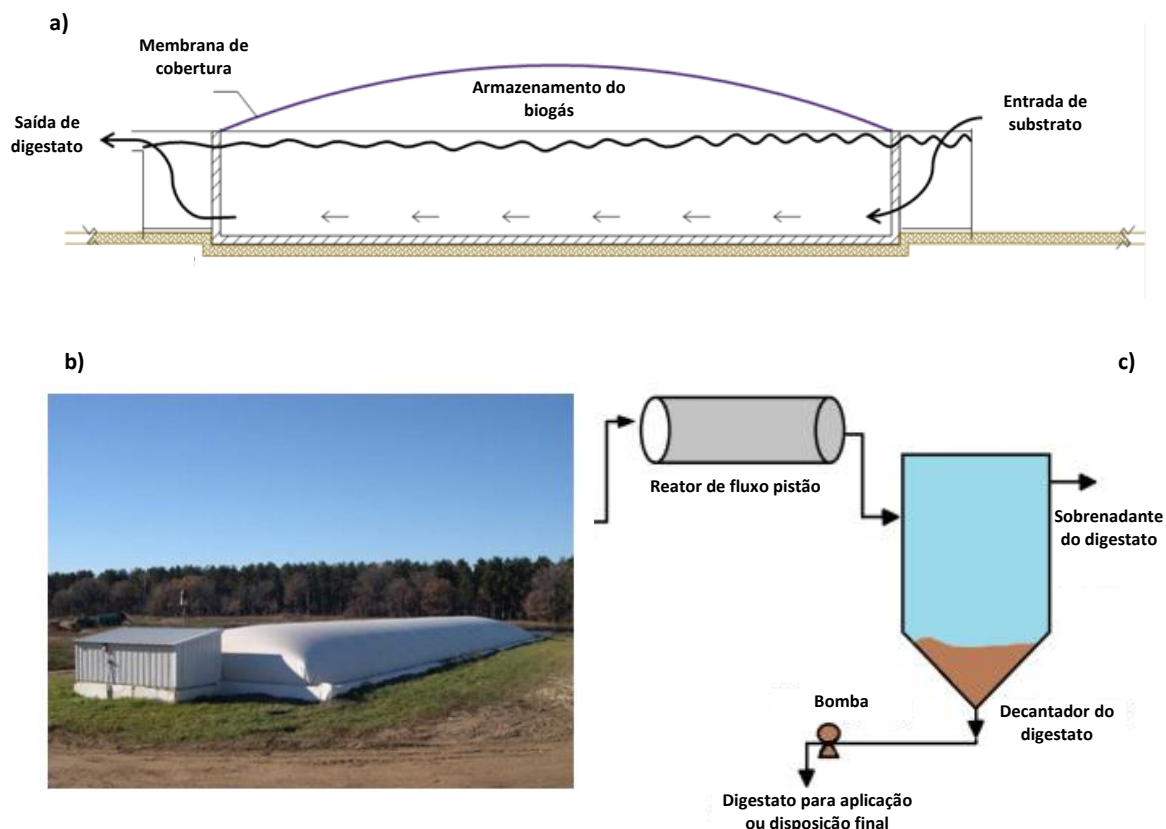


Figura 4 – Representação de um reator de fluxo pistão (a), modelo em escala real (b) e representação de uma unidade composta por reator + decantador (c)
 Fonte: Adaptado de EPA (2019) e Gould (2015).

A biomassa a ser digerida é inserida por uma extremidade do reator e vai sendo degradada na medida em que passa por seu interior, sendo removida na extremidade oposta. O TRH destes reatores usualmente varia entre 20 – 40 dias. Este tipo de reator é aplicado ao tratamento dos dejetos animais em escala rural, especialmente os dejetos de suínos em função do baixo teor de sólidos ($ST < 2\%$) presentes neste tipo de biomassa, o que favorece a dinâmica hidráulica dentro do reator. A Tabela 9 mostra as vantagens e desvantagens deste tipo de reator.

Tabela 9 – Vantagens e desvantagens dos reatores de fluxo pistão

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo de implantação; Facilidade operacional; 	<ul style="list-style-type: none"> Requer elevados tempos de retenção; Requer maior área de implantação;

- Pode operar sem agitação em casos específicos;
- Menor gradiente de temperatura no inverno;
- O sistema de cobertura com membrana funciona como um armazenador de biogás (gasômetro).
- Requer remoção periódica do material inerte (Figura 5);
- Vida útil da geomembrana limitada (10 anos)
- Possui eficiência menor que os reatores mais complexos.

Os modelos encontrados no sul do Brasil são geralmente de pequeno porte, sem sistema de agitação e aquecimento e são construídos para atender a demanda de pequenos e médios produtores de animais, que se beneficiam mais do tratamento adequado do que da máxima produção de biogás em potencial.



Figura 5 – Exemplo de um reator de lagoa coberta com acúmulo de material não digerido

Fonte: Kunz, et al. (2019).

BOAS PRÁTICAS

Um sistema de remoção de sólidos grosseiros e areia na entrada do reator previne elevados níveis de sedimentação dentro do reator e redução de área útil para o tratamento.

Na medida em que o volume de dejetos aumenta, dispositivos de agitação previnem a formação de caminhos preferenciais criados pela sedimentação dos sólidos presentes no dejetos e que criam áreas de ineficiência pela ausência de contato substrato/microrganismos.

A oscilação da temperatura ao longo do ano, principalmente em regiões mais frias também contribui para a baixa eficiência na produção de biogás deste tipo de reator.

Sistemas de aquecimento resultam na estabilidade do processo e padronização do rendimento de biogás ao longo do ano.

Os reatores tipo UASB (*upflow anaerobic sludge blanket* ou reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo) apresentam alta eficiência quanto à estabilização da matéria orgânica e são empregados para o tratamento de substratos com baixos teores de sólidos ($ST < 2\%$). Para substratos com

teores mais elevados de sólidos faz-se necessário algum tipo de sedimentação preliminar, de forma a ajustar a umidade antes da entrada no reator.

Neste modelo, o material a ser digerido é adicionado pela parte inferior do reator e removido pela parte superior, o que confere um fluxo hidráulico ascendente. A primeira câmara é composta por uma camada de sólidos mais densa (**leito de lodo**) formada pela fração sedimentável do substrato utilizado para alimentar o reator e partículas não digeridas de substratos já adicionados. Após passar pelo leito de lodo o substrato passa para uma segunda câmara onde o lodo é menos denso (**manta de lodo**). Nesta configuração de reator o maior contato entre o substrato e os microrganismos permite melhores taxas de degradação da matéria orgânica e geração de biogás, que ocorre nas duas câmaras (Figura 6).

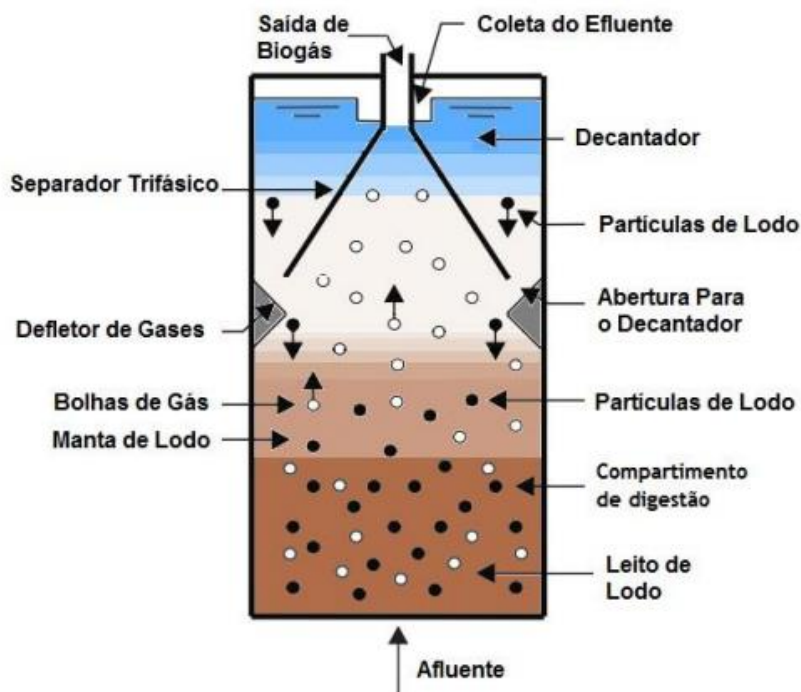


Figura 6 – Representação esquemática de um reator tipo UASB
Fonte: Borges e Santos (2017).

O fluxo de entrada de novo efluente faz com que os substratos já em digestão sejam movidos para a parte superior onde é removido na forma de digestato e o biogás é removido por meio de placas defletoras. Estas placas defletoras instaladas na parede do reator UASB garantem que as partículas sólidas carregadas pelas bolhas de biogás retornem para a manta de lodo para

a digestão e não sejam eliminadas no digestato. A mistura interna é garantida tanto pelo fluxo ascendente de substratos quanto pelas bolhas de biogás que, ao passarem pela massa líquida, garantem certo nível de agitação.

O tempo de retenção hidráulica (TRH) dos reatores UASB é consideravelmente menor quando comparado com os reatores de fluxo pistão, variando entre 4 horas até 3 dias sendo que o TDH mais usado, pela sua eficiência é de 8 horas. A retenção de elevada quantidade de biomassa no interior do reator é o que permite o menor TRH e menor área para a implantação.

BOAS PRÁTICAS

O desempenho dos reatores UASB depende do adequado processo de partida inicial, que visa garantir boa qualidade de microrganismos na manta de lodo adaptada ao tipo de substrato a ser tratado.

Por este motivo a operação destes reatores requer mão de obra qualificada, o que economicamente pode se justificar apenas em caso de grandes volumes de substrato.

Em função destas características, os reatores UASB são amplamente aplicados ao tratamento de esgoto sanitário em estações de tratamento de esgoto (ETE).

3.2.4 Reator de mistura completa

Reatores de mistura completa, também chamados de reatores tipo CSTR (*continuous stirred tank reactor*) possuem a vantagem de suportar cargas de alimentação superiores aos modelos anteriormente mencionados. O maior contato entre o substrato e os microrganismos, garantido por um sistema de agitação que mantém a massa líquida continuamente em agitação é a maior vantagem deste modelo (Figura 7).

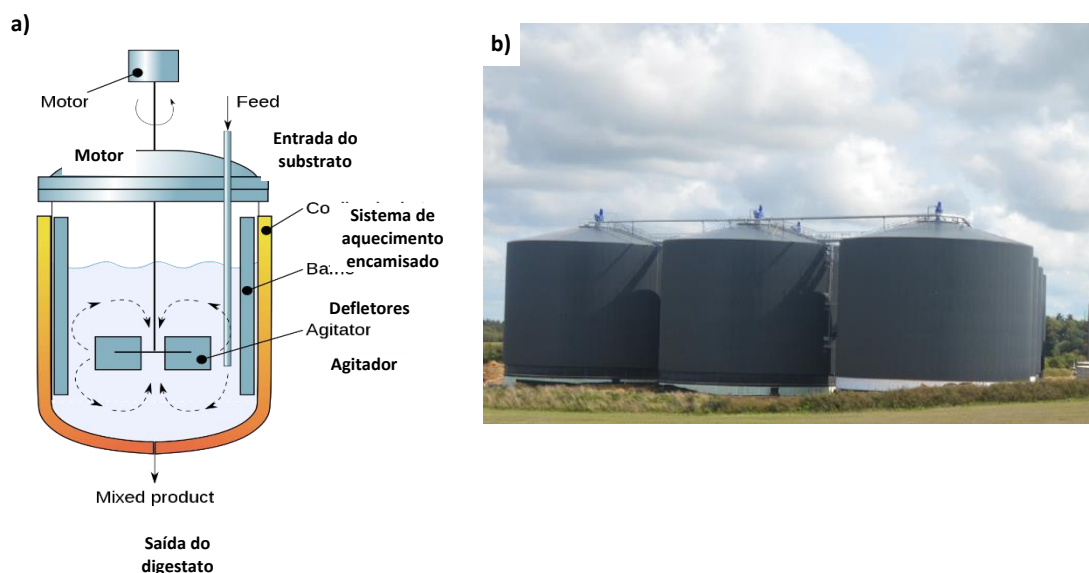


Figura 7 – Representação esquemática de um reator tipo CSTR (a) e exemplo de planta de biogás em escala real utilizando reatores CSTR na Dinamarca
Fonte: Wikipedia (a) e IEA Bioenergy, 2019 (b).

O sistema de agitação permite a adição de substratos com maiores teores de sólidos totais, geralmente até 10%, o que proporciona uma capacidade para o tratamento de uma ou mais fontes de biomassa ao mesmo tempo (co-digestão). Este modelo tem sido largamente usado nas plantas de biogás da Europa para o tratamento de dejetos animais de forma centralizada, bem como para a co-digestão entre os dejetos animais, resíduos da agricultura e resíduos de agroindústrias.

O TRH nos reatores CSTR costuma variar entre 20 – 30 dias, dependendo do tipo de material a ser tratado. Observa-se que com a adição de um co-substrato para aumentar o teor de sólidos de reatores que tratam dejetos da suinocultura por exemplo, o TRH também tende a aumentar.

A inserção de um sistema de agitação garante maiores rendimentos de biogás (que podem chegar a 30% quando comparado com outros tipos de reatores), porém demanda maiores gastos com energia para alimentar os motores e manter um sistema adequado de aquecimento. Tais gastos, aliados à necessidade de mão de obra especializada, fazem com que este tipo de reator seja instalado para o tratamento de grandes volumes de substrato.

BOAS PRÁTICAS

A agitação é um dos principais fatores a serem observados neste tipo de reator. Ela deve ser suficiente para garantir a mistura completa entre os substratos e os microrganismos utilizando o menor gasto energético possível. Também não deve permitir a sedimentação no fundo do reator. Agitação excessiva, além de aumentar o custo operacional, pode quebrar os grânulos formados pelos microrganismos e substratos e reduzir a eficiência. Valores ideais são definidos pelas características construtivas do reator, viscosidade e teor de umidade dos substratos.

Como a carga de alimentação pode ser maior neste tipo de reator, deve-se atentar para o equilíbrio da relação C/N, evitando acidificação do meio pela elevada concentração de carbono de fácil degradação (carboidratos simples) ou inibição dos microrganismos pela elevada concentração de nitrogênio.

3.2.5 Reator de duas fases

A homogeneização constante entre a biomassa e os microrganismos nos reatores tipo CSTR garante elevadas taxas de degradabilidade dos substratos e esta é a principal vantagem do processo. Por outro lado, substratos ricos em carboidratos de fácil digestão, como os efluentes de algumas agroindústrias (fecularias, cervejarias, produções de sucos e frutas processadas e laticínios) são facilmente transformados em açúcares simples e ácidos orgânicos voláteis, especialmente pela característica de mistura completa. Esta combinação pode levar o reator a um estágio de acidificação, que reduz o pH do meio e inibe ou até interrompe a atividade metanogênica.

Como alternativa para minimizar riscos de acidificação surgiram os reatores em dois estágios. Esta configuração de reator separa a fase de hidrólise e fermentação (hidrólise, acidogênese e acetogênese) em um reator inicial, que é mantido com elevada carga de alimentação, resultando em um pH constantemente ácido ($\text{pH} \approx 5,75$). Um segundo reator recebe doses do material fermentado de forma a garantir o equilíbrio do pH e a atividade metanogênica

(pH 6,5 a 7,5). A digestão anaeróbia em estágio único e em dois estágios utilizando ração de pellet de trigo (mistura de trigo proveniente dos moinhos de farinha) com TRH de 20 dias para os dois cenários resultou nas seguintes produções de metano: 261 L / kg SV (reator em estágio único) e 360 L / kg SV (reator em dois estágios), ou seja, aumento de aproximadamente 40% na produção em reator de dois estágios (Massanet-Nicolau et al., 2013).

BOAS PRÁTICAS

O pH é um dos principais parâmetros de controle neste tipo de reator. O pH do meio no reator acidogênico (1º reator) deve-se manter próximo a 5,75, sendo controlado por meio da carga orgânica alimentação no reator. Com cargas orgânicas baixas o pH tende a subir, dando lugar a formação de metano já no primeiro reator, reduzindo a eficiência do sistema. Por outro lado, se o pH reduzir para valores inferiores ao ideal, promove-se a formação de hidrogênio, reduzindo a eficiência da formação de metano.

3.2.6 Reatores de digestão anaeróbia em estágio sólido

A digestão anaeróbia em estágio sólido (*dry-fermentation*) permite o tratamento de substratos com reduzida umidade. Os teores de sólidos totais em reatores de estágio sólido são superiores a 15%. Os principais substratos com potencial para esta rota de tratamento são os resíduos da agricultura, como palhadas, bagaço da cana-de-açúcar e cama residual da produção de frango de corte. Esta é uma tecnologia em expansão, com um número crescente de pesquisas buscando identificar melhores condições operacionais em termos de umidade, temperatura dos reatores, tempo de retenção, fontes de microrganismos etc.

Os mesmos princípios bioquímicos que ocorrem na digestão anaeróbia convencional também ocorrem em reatores em estágio sólido. Os reatores podem ser alimentados de forma contínua ou em batelada. Reatores com alimentação contínua tendem a resultar em maiores custos operacionais devido

Guia de boas práticas - Operação e monitoramento de reatores anaeróbios

a frequentes paradas em função de entupimentos de bombas e demais equipamentos. Reatores em batelada costuma ser mais frequentes e, neste caso, a recirculação do digestato garante o desenvolvimento dos microrganismos, o equilíbrio da umidade e de nutrientes na massa sólida imobilizada (Figura 8).

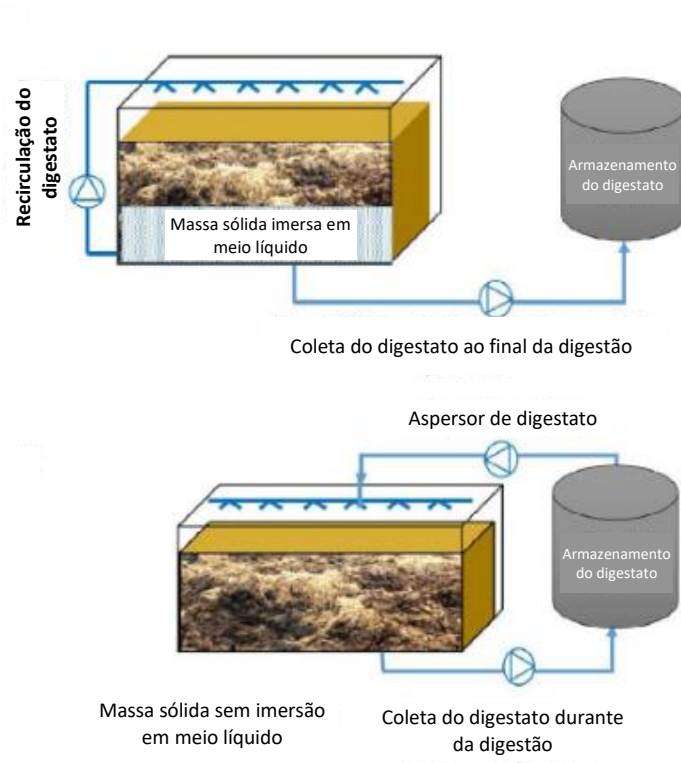


Figura 8 – Representação esquemática de sistema de digestão em estágio sólido
Fonte: André, Pauss e Ribeiro (2018).

BOAS PRÁTICAS

Os reatores em estágio sólido devem ser alimentados com substratos de menor dimensão de partícula ($< 10\text{-}20\text{ mm}$) pois a degradabilidade da matéria orgânica já é limitada pelo baixo teor de umidade.

A fonte de microrganismos presentes no inóculo que garantir a degradação deve ser a mais diversa e adaptada possível, capaz de degradar a maior parte do carbono mais complexo presente nos substratos sólidos.

A aplicação de pré-tratamentos físicos ou físico-químicos pode contribuir para a redução do tempo de tratamento, que pode chegar a 120-130 dias.

3.2.7 Resumo das principais características dos reatores anaeróbios

A Tabela 10 expressa as características dos reatores anaeróbios em função do teor de sólidos da mistura.

Tabela 10 – Relação de biodigestores por tipo de substrato

Característica	ASBR	Lagoa coberta	UASB	Mistura completa	Rota seca
Teor de sólidos (operação)	< 5%	< 5 %	< 2 %	< 20 %	20% a 40%
TRH	5 a 15 dias	20 a 40 dias	4 a 72 horas	20 a 40 dias	60 a 120 dias
Substratos mais utilizados	Efluentes de laticínios, dejetos da suinocultura e esgoto sanitário.	Dejetos de animais, vinhaça, manipueira, soro do leite e efluentes agroindustriais	Esgoto sanitário e efluentes agroindustriais	Dejetos de animais, vinhaça, manipueira, soro do leite, efluentes agroindustriais, esgoto sanitário, resíduos da agricultura e resíduos em co-digestão.	Resíduos da agricultura, cama de frango e resíduos sólidos agroindustriais.

3.3 Parâmetros operacionais

3.3.1 Tempos de retenção (TRH)

O TRH tem papel importante tanto no tratamento da biomassa, quanto na formação de metabólitos intermediários importantes para os microrganismos durante a digestão anaeróbia. O TRH está correlacionado ao volume do reator e ao volume de substrato utilizado para a alimentação por unidade de tempo e pode ser definido a partir da Equação 1.

$$TRH \text{ (dias)} = V \text{ (m}^3\text{)} / Q \text{ (m}^3 \text{ dia}^{-1}\text{)} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

TRH = tempo de retenção hidráulica;

V = volume do reator;

Q = vazão de alimentação do reator.

Caso o processo de digestão ocorra fora do TRH ideal a produção de metabólitos intermediários (ácidos orgânicos, álcoois, amônia etc.) indesejáveis pode ocorrer. Um sistema operando com longo TRH pode favorecer a morte de alguns tipos de microrganismos em função da ausência de nutrientes (para um mesmo volume de reator, quanto maior o TRH menor a vazão de entrada de substratos [Equação 1]). Longos períodos de TRH também podem requer maiores volumes de reatores e, conseqüentemente, maior espaço e custos de implantação e operação mais elevados.

A definição do TRH deve ainda considerar tipo de substrato utilizado como biomassa e da configuração do reator. Substratos ricos em ácidos voláteis ou açúcares simples como é o caso dos dejetos da suinocultura e agroindústrias produtoras de amido requerem um TRH menor, visto que estes compostos orgânicos são mais simples e podem ser rapidamente degradados. Já a biomassa lignocelulósica como os resíduos da agricultura e o bagaço da cana-de-açúcar, requerem longos TRH para que os microrganismos possam quebrar as moléculas de lignocelulose e converter a celulose a hemicelulose em biogás.

Como o tempo médio necessário para que a população de arqueas metanogênicas dobre de tamanho é de aproximadamente a 12 dias, o TRH de um reator anaeróbio não deve ser inferior a este valor. Valores abaixo desta faixa podem criar um efeito de *washout*, criado quando a saída de microrganismos é maior que seu período de reprodução.

3.3.2 Definição de carga orgânica

A COV é a quantidade de biomassa utilizada para a alimentação do reator por unidade de tempo e pode ser expressa em kg SV m⁻³ d⁻¹ (quilogramas de

Guia de boas práticas - Operação e monitoramento de reatores anaeróbios

sólidos voláteis por m³ de reator por dia) ou kg DQO m⁻³ d⁻¹ (quilogramas de demanda química de oxigênio por m³ de reator por dia). Para substratos sólidos ou semissólidos é mais comum a expressão com base em SV. No entanto, para substratos líquidos podem ser encontradas expressões com base em SV ou DQO. A COV pode ser determinada a partir da Equação 2.

$$COV = \frac{(C \times Q)}{V} = \frac{C}{TRH} \quad \text{Eq. 2}$$

Em que:

COV = carga orgânica volumétrica (kg SV (ou DQO).m⁻³ d⁻¹);

Q = vazão de alimentação do reator (m³.d⁻¹);

C = concentração do substrato utilizado para alimentar o reator (kg.m⁻³);

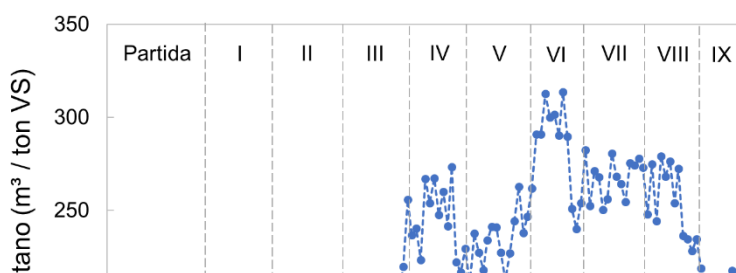
V = volume do reator anaeróbio (m³);

TRH = tempo de retenção hidráulica.

A COV influencia diretamente a dinâmica dos processos bioquímicos dentro do reator. A determinação da COV ideal depende do tipo de biomassa, do TRH desejado, do tipo de reator e da temperatura de operação. Cada tipo de reator consegue suportar uma determinada COV, pois cada um oferece diferentes regimes hidráulicos e capacidades distintas para fixar a biomassa de bactérias dentro do reator.

Uma COV abaixo do que o reator pode operar representa menor rendimento de biogás. Por outro lado, uma COV acima da capacidade do reator pode resultar em acidificação, entupimento de equipamentos e, da mesma forma, menor rendimento de biogás. A determinação da COV ideal é realizada a partir de testes de simulação em laboratório por meio de reatores de bancada que simulam as condições de campo.

Edwiges et al. (2020) avaliaram o efeito do aumento da COV durante a digestão anaeróbia de uma mistura de resíduos vegetais compostos por frutas, verduras e hortaliças ao longo de 140 dias em um reator de mistura completa (Figura 9).



Fase	COV (kg SV m ⁻³ d ⁻¹)	TRH (dias)
Partida	0,5	40
I	0,5	30
II	1,0	30
III	1,5	30
IV	2,0	30
V	2,5	30
VI	3,0	30
VII	3,5	30
VIII	4,0	30
IX	5,0	30

Figura 9– Desempenho da produção de metano em função do aumento da COV
Fonte: Adaptado de Edwiges et al. (2020).

A partir da Figura 9 pode-se observar que a produção de metano tende a aumentar na medida em que a COV é aumentada de 0,5 para 3,0 kg SV m⁻³ d⁻¹. A partir desta COV a produção de biogás tende ao declínio.

Este comportamento ocorre porque, conforme exposto acima, cada tipo de reator possui uma capacidade máxima de alimentação em termos de COV. Além disso, a composição química da biomassa utilizada para a alimentação do reator também influencia esta capacidade. De forma geral, para a produção de biogás, valores de COV abaixo de **4 kg SV m⁻³ d⁻¹** são recomendados, pois esta é a taxa máxima em que os microrganismos conseguem tolerar (Li et al., 2016).

3.3.3 Faixas de temperatura

A temperatura é um dos parâmetros mais importantes na concepção de uma planta de biogás. A atividade biológica e a produção de metano são diretamente relacionadas à temperatura de operação dos reatores. A maioria das arqueas metanogênicas são atividades em duas faixas de temperatura: entre **30-40°C** (temperatura mesofílica) e entre **50-60°C** (temperatura termofílica). Por ser uma faixa de transição, temperaturas na faixa de 40-50°C causam inibição das metanogênicas.

Além de permitir a alimentação com cargas mais elevadas de matéria orgânica, a temperatura termofílica garante maiores níveis de destruição de organismos patogênicos. Esta condição torna-se atrativa para grandes plantas

que são alimentadas com dejeções animais. Por outro lado, a sensibilidade quanto à toxicidade (amônia, ácidos graxos e outros compostos) é maior em temperaturas elevadas e o custo operacional pode influenciar na viabilidade econômica das plantas de biogás. A Tabela 11 apresenta algumas características operacionais para cada faixa de temperatura.

Tabela 11 – Comparação entre a operação em temperatura mesofílica e termofílica

Parâmetro	Temperatura mesofílica	Temperatura termofílica
Carga orgânica	Baixa	Alta
Destruição de patógenos	Baixa	Alta
Sensibilidade quanto agentes tóxicos	Baixo	Alta
Custos operacionais	Baixo	Alta
Controle de temperatura	Mais fácil	Mais difícil

O aquecimento de reatores anaeróbios garante condições estáveis de temperatura durante todo o ano. Esta estabilidade garante o equilíbrio do processo em períodos de inverno. Por outro lado, o aquecimento demanda energia e maiores gastos operacionais do processo. Como a atividade biológica dos microrganismos durante a digestão anaeróbia é maior em temperaturas ótimas (35-37°C), o tempo de degradação da matéria orgânica neste caso é menor. Ou seja, quanto mais baixa a temperatura, maior deve ser o tempo em que o material orgânico permanece dentro do reator.

O clima tropical predominante no Brasil favorece a instalação de plantas de biogás sem a necessidade de aquecimento. A maior parte dos reatores instalados em propriedades rurais, de pequena escala e baixa taxa de alimentação, operam em temperatura ambiente, especialmente os biodigestores do tipo lagoa coberta. O baixo custo de implantação e operação quando comparado com os reatores com sistema de aquecimento, aliado à elevada biodegradabilidade dos dejetos animais favorece este cenário.

Mesmo dentro de uma faixa, as metanogênicas mesofílicas são bastante sensíveis às alterações de temperatura. Portanto, para a boa eficiência dos reatores anaeróbios a temperatura de operação de um reator deve ser mantida dentro de uma faixa de $\pm 2^\circ\text{C}$. Caso esse critério não seja garantido, perdas de até 30% quanto à eficiência na produção de metano podem ser registradas.

3.3.4 Sistemas de agitação

A agitação é parte importante no sistema de digestão anaeróbia. Garantir condições ideais de agitação pode favorecer a distribuição uniforme da biomassa, microrganismos e nutrientes. Além disso garante uma série de outras vantagens, como:

- elimina bolsões de diferentes temperaturas dentro do reator;
- promove melhores taxas de hidrólise dos resíduos orgânicos como alguns tipos de amido insolúveis e palhadas da agricultura, pois previne a aglomeração destes tipos de resíduos e permite maior área de contato entre a biomassa e as bactérias hidrolíticas;
- minimiza a sedimentação de partículas mais pesas e a criação de uma área inerte dentro do reator;
- minimiza a formação de espuma;

A agitação pode ser realizada a partir de motores elétricos, dispositivos mecânicos por meio de bombas hidráulicas ou ainda pela injeção e recirculação de biogás no fundo dos reatores. Os agitadores mecânicos costumam ser mais eficientes do que a recirculação de gás, porém, dependendo do teor de sólidos de operação do reator e das características do substrato, o entupimento frequente de bombas pode limitar a operação.

3.4 Requisitos de nutrientes

Como a geração de biomassa (formação de bactérias) é menor nos sistemas de tratamento aeróbios quando comparado aos sistemas anaeróbios, a demanda por nutrientes passa a ser mais uma vantagem da digestão anaeróbia. Os principais nutrientes podem ser classificados em macronutrientes: nitrogênio (**N**), fósforo (**P**) e enxofre (**S**) e micronutrientes: ferro (**Fe**), níquel (**Ni**), cobalto (**Co**), selênio (**Se**), molibdênio (**Mo**) e tungstênio (**W**).

A relação ótima entre carbono/nitrogênio (C:N) é de 30:1. No entanto, esta é apenas uma indicação e relações da ordem de 30-60 podem ser aceitáveis para a digestão anaeróbia, caso os demais parâmetros sejam mantidos em condições ótimas.

O carbono é a principal fonte de alimentação das bactérias. As principais fontes de carbono são os carboidratos da biomassa que são degradados pelos microrganismos e utilizados como fonte energética para o seu crescimento. Já o nitrogênio é uma importante fonte para a síntese de proteínas e reprodução protoplasmática das bactérias.

A deficiência de nitrogênio no substrato implica em limitação da atividade metabólica dos microrganismos, que neste caso não conseguem degradar todo o carbono existente, resultado em ineficiência do processo de bioconversão de substratos em biogás. Por outro lado, o excesso de nitrogênio pode não ser totalmente utilizado pelas bactérias e tende a acumular no sistema, principalmente na forma de amônia (NH_3), o que provoca inibição da atividade biológica das metanogênicas e, conseqüentemente, instabilidade e ineficiência do sistema. A título de exemplificação, a relação carbono:nitrogênio (relação C/N) de alguns substratos é apresentada no Tabela 12

Tabela 12 – Exemplos de relação C:N de substratos de origem rural

Substrato	C:N
Dejeto suíno	18-20:1
Dejeto bovino	15-24:1
Efluentes de abatedouros	2-8:1
Peles de batata	25:1
Resíduos de frutas	35:1
Cevada, arroz, trigo	60-90:1

Fonte: Adaptado de Flotats e Sarquella (2008)

Amônia (NH_3) é um gás e amônio (NH_4^+) é um íon solúvel em água e estes compostos são formados a partir da degradação anaeróbia das proteínas e aminoácidos. A concentração do gás amônia ou do íon amônio depende do pH do meio (Figura 10). Quando o pH do sistema é de aproximadamente 7,0, a relação $\text{NH}_4^+:\text{NH}_3$ é de 99:1, ou seja, 99% de amônio e 1% de amônia. Por outro lado, quando o pH é de 9,25 tem-se um equilíbrio de 50:50 (Figura 10). A temperatura também influencia no equilíbrio entre a concentração de NH_3 e NH_4^+ . Quanto maior a temperatura do sistema maior a formação de amônia, ou seja, o efeito inibidor aumenta com o aumento da temperatura.

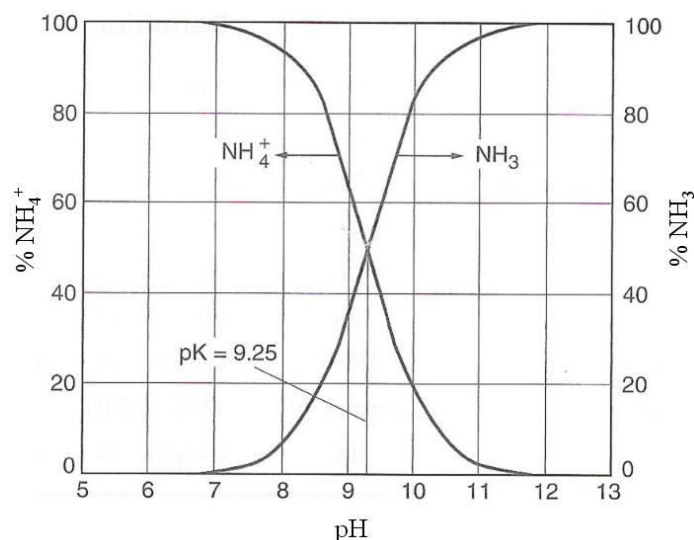


Figura 10 – Relação de amônio/amônia em função do pH
Fonte: Kunz e Mukhtar (2017).

A concentração de amônia pode inibir a atividade biológica das metanogênicas em concentrações entre 30 a 80 mg L⁻¹. Quando a concentração de amônia dentro do reator supera 150 mg L⁻¹ os efeitos podem ser tóxicos. Já o amônio é utilizado pelos microrganismos como fonte de nutriente e apresenta potencial de inibição muito inferior à amônia. Os efeitos inibitórios são reportados apenas em concentrações da ordem de 1.500 e 14.000 mg L⁻¹.

Para evitar a formação de amônia dentro do reator deve-se equilibrar a dosagem de substratos ricos em proteínas e manter um pH do sistema próximo da neutralidade (pH = 7). Valores mais baixos de pH podem inibir a atividade biológica das metanogênicas e valores mais altos podem favorecer a formação de amônia e aumentar o risco de toxicidade.

3.5 Critérios de estabilidade (pH, acidez e alcalinidade)

O pH é uma medida de acidez/alcalinidade de uma solução. A atividade enzimática dos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia é influenciada diretamente pelo pH.

A alcalinidade pode ser definida como a capacidade do meio em neutralizar o acúmulo de ácidos. Portanto, o pH e a alcalinidade estão

relacionadas e o fornecimento de alcalinidade é imprescindível para o controle do pH.

A atividade das bactérias formadoras de ácido (acidogênicas e acetogênicas) ocorre preferencialmente em pH inferior à 4,5, mas pode ocorrer de forma aceitável em pH superior a 5,0, pois estas bactérias são menos sensíveis ao pH. Por outro lado, a metanogênese só ocorre em pH superior a 6,2. A maior parte das arqueas metanogênicas apresentam melhor atividade com pH entre 6,8 e 7,2.

Como visto no Item 2, durante a etapa de fermentação ocorre a formação de ácidos orgânicos e álcoois e na medida em que estes ácidos se acumulam dentro do reator o pH tende a baixar, atingindo valores inferiores a 6,2. Contudo, a partir do consumo destes ácidos pelas metanogênicas, o pH tende a voltar a neutralidade. A alcalinidade do sistema (gerada a partir da degradação das proteínas) é que garante o acúmulo intermediário de ácidos no reator até que estes sejam consumidos pelas metanogênicas. Portanto, para que a bioconversão de um substrato em biogás ocorra de forma adequada, recomenda-se teores de alcalinidade entre **1.500 a 2.500 mg L⁻¹ CaCO₃**.

Relação	Indicação	Medidas corretivas
AI/AP \geq 0,3	Distúrbio no processo de digestão	Adição de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos (sódio e potássio), solução de elementos traço
AV/AT \geq 0,8	Colapso no sistema	Pausa imediata na alimentação

Biodigestores operando adequadamente tem alcalinidade na faixa de 200-400 mg CaCO₃ L⁻¹.

4. Monitoramento de reatores anaeróbios

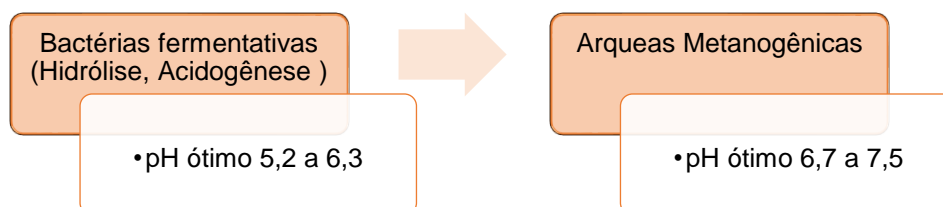
4.1 Parâmetros de monitoramento e controle

O monitoramento de fatores que influenciam a digestão anaeróbia visa garantir condições de estabilidade e produtividade dos reatores anaeróbios. Os principais parâmetros que influenciam a estabilidade e o desempenho dos reatores são: pH, acidez, alcalinidade, demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), amônia e composição do biogás.

4.1.1 pH

Os processos biológicos são em grande parte influenciados pelo valor do pH, sendo esta a medida responsável pela representação mais simples da acidez no processo de digestão anaeróbia. Este parâmetro influencia o crescimento dos microrganismos metanogênicos e controla o equilíbrio de importantes produtos do processo como os ácidos, a amônia e sulfeto de hidrogênio.

O pH ótimo varia para cada grupo de microrganismos envolvidos no processo de digestão. Os microrganismos metanogênicos são extremamente sensíveis ao valor do pH, enquanto as bactérias fermentativas são menos restritivas.



O próprio processo de fermentação, quando estável, tenderá a manter o pH próximo da neutralidade (pH = 7), contudo, se o valor cair abaixo de 6,5, as arqueas metanogênicas serão inibidas mas o restante das bactérias continuarão

produzindo ácidos que não serão convertidos em metano, levando ao acúmulo de ácidos e a acidificação do meio.

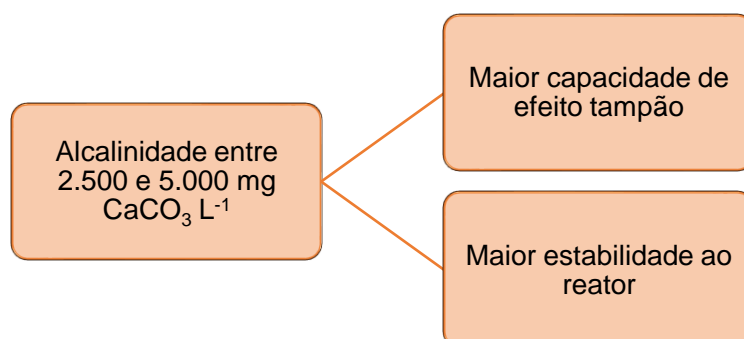
Apesar de ser um parâmetro importante no monitoramento de digestores, não deve ser exclusivo, uma vez que as variações de pH podem ser drásticas e o deslocamento da faixa ideal pode exigir medidas de correção urgentes.



A medição do valor de pH é normalmente feita com o equipamento pHmetro e deve ser realizada imediatamente após a coleta da amostra do digestor, uma vez que a mudança de temperatura interfere no real valor do pH da amostra.

4.1.2 Alcalinidade

A alcalinidade no digestor é resultado da presença de vários compostos, principalmente carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. Este parâmetro é conhecido por promover efeito tampão no meio uma vez que resulta na capacidade do reator de neutralizar ácidos, evitando mudanças bruscas no pH e desestabilização do processo de digestão. O valor da alcalinidade é expresso na forma de concentração de carbonato de cálcio, normalmente em $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$.



A alcalinidade também é utilizada para avaliar a estabilidade dos reatores durante o processo de biodigestão anaeróbia sendo medida pela relação entre Alcalinidade Intermediária (AI) e Alcalinidade Parcial (AP). A AI corresponde a

alcalinidade por bicarbonatos enquanto a AP equivale a alcalinidade dos ácidos orgânicos voláteis (RIPLEY; BOYLE; CONVERSE, 1986).

Este parâmetro permite que problemas na biologia do reator sejam detectados em um estágio inicial para que medidas de correção possam ser tomadas rapidamente. A Tabela 13 apresenta os valores de AI/AP com as respectivas características apresentadas pelo reator.

Tabela 13 – Característica do reator de acordo com a Relação AI/AP *

AI/AP	Carga de biomassa	Característica do Reator	Ação
> 0,6	Excessivamente alta	SOBRECARGA	Adição de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos (sódio e potássio), solução de elementos traço
0,5 – 0,6	Muito alta		
0,4 – 0,5	Alta		
0,3 – 0,4	Ótima	FAIXA ÓTIMA	Monitorar a estabilidade
0,2 – 0,3	Baixa	SUBCARGA	Aumentar a carga de alimentação (COV)
< 0,2	Muito baixa		

*AI – Alcalinidade intermediária; AP – Alcalinidade parcial

A determinação da AI/AP pode ser feita pela titulação de ácido sulfúrico (aproximadamente 0,05M ou 0,10N) até pH 5,75 para determinação da AP e até pH 4,3 para a AI. Para o cálculo da AI/AP, aplica-se a relação entre as Equações 3 e 4. Já para obtenção da alcalinidade total (AT), faz-se a soma de AI e AP.

$$AP (mg CaCO_3L^{-1}) = \frac{V_1 * M * 100.000}{V_a} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

V1 = Volume de ácido gasto na titulação até pH 5,75 (mL);

M = Molaridade do ácido utilizado;

Va = Volume da amostra (mL).

$$AI (mg CaCO_3L^{-1}) = \frac{V_2 * M * 100.000}{V_a} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

V_2 = Volume de ácido gasto na titulação até pH 4,3 (mL);

M = Molaridade do ácido utilizado;

V_a = Volume da amostra (mL).

4.1.3 Ácidos Graxos Voláteis (AGV)

A estabilidade do processo de digestão anaeróbia é refletida em grande parte pela concentração de compostos intermediários, como é o caso dos Ácidos Graxos Voláteis (AGV). Os AGVs são formados por ácidos produzidos durante a fase da acidogênese e os principais são os ácidos acético, propiônico e butírico.

Os ácidos **propiônico** e **butírico** são mais nocivos ao processo de digestão anaeróbia, principalmente aos microrganismos metanogênicos, contudo, costumam apresentar menores concentrações que o ácido acético.

Normalmente os ácidos estão presentes no substrato e são decompostos durante a digestão. Contudo, se muito substrato é inserido no reator sem que os microrganismos façam uma degradação equilibrada, a concentração de ácidos aumenta. Se esta concentração aumentar até atingir a capacidade de tamponamento do meio (alcalinidade), ocorrerá a acidificação do reator e a inibição da fermentação (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011). Juntamente com outros parâmetros, como o pH e a alcalinidade, a determinação da concentração e composição dos AGVs, pode detectar e ajudar a controlar os problemas na digestão.

Parâmetro	Concentração Ideal	Concentração Máxima	Unidade
AGVs totais	1	3	g L ⁻¹
Ácido Acético	1.000	-	mg L ⁻¹
Ácido Propiônico	200	300	mg L ⁻¹
Ácido Isobutírico	-	50	mg L ⁻¹
Ácido Isovalérico	-	50	mg L ⁻¹

Fonte: Deublein e Steinhauser, (2011)

Além da quantificação dos AGVs e da concentração de cada ácido, as relações entre estes parâmetros como “ácido propiônico/ácido acético” e “AGV/AT” também são utilizadas para monitoramento do processo nos reatores:

Ácido propiônico / ácido acético > 1,4

- Instabilidade no processo

AGV / AT > 0,4

- Instabilidade no processo

AGV / AT > 0,8

- Falha do processo
- Inibição dos microrganismos metanogênicos

A determinação dos AGVs pode ser feita por vários métodos, como titulação, cromatografia líquida e cromatografia gasosa. A partir dos métodos de cromatografia é possível determinar os AGVs totais e a composição de cada ácido presente.

O método da titulação é menos robusto e preciso, contudo, é o mais simples de ser empregado. Este método pode ser empregado sequencialmente após a análise da alcalinidade. Neste caso, após a determinação da alcalinidade, quando a amostra estará com pH 4,3, titula-se até pH 3 e ferve-se de 3 a 5 minutos. Após resfriar, é feita a titulação com hidróxido de sódio (aproximadamente 0,05N) do pH 4 até pH 7. O cálculo dos ácidos voláteis (AV) é feito então, pela Equação 5.

$$AV \text{ (mg CaCO}_3\text{L}^{-1}) = \frac{V_3 * N * 50.000}{V_a} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

V3 = Volume de base gasto na titulação do pH 4 até pH 7 (mL);

N = Normalidade da base utilizada;

Va = Volume da amostra (mL).

4.1.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A demanda química de oxigênio (DQO) determina a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente em uma amostra. Na digestão anaeróbia a DQO normalmente é utilizada para quantificar a matéria orgânica do digestor (MEEGODA et al., 2018).

A DQO representa a energia química máxima presente no substrato, ou seja, a energia que os microrganismos transformarão em metano. Portanto, a DQO pode ser utilizada para estimar a produção de biogás de um substrato. Porém, perdas devem ser consideradas, como a energia utilizada pelos próprios microrganismos bem como materiais que não são convertidos no processo.

Para a análise de determinação da DQO a amostra é digerida com ácido sulfúrico e dicromato de potássio e é feita a leitura da absorbância da amostra. Quando a amostra é digerida, o íon dicromato oxida a matéria e isso resulta na mudança do cromo hexavalente (VI) ao estado trivalente (III). Estas espécies de cromo são coloridas e absorvem na região visível do espectro (APHA, 2017).

4.1.5 Série de sólidos

Os sólidos totais (ST) estimam o teor de umidade presente na amostra. Influenciam diretamente na escolha dos equipamentos e tipos de tratamento para cada resíduo, uma vez que os reatores se diferem na capacidade de tratamento de acordo com o teor de sólidos da amostra.

Assim como a DQO, os sólidos voláteis (SV) podem ser considerados como uma medida da matéria orgânica da amostra do biodigestor, embora seja menos precisa que a primeira (MEEGODA et al., 2018).

Os SV são a parte da matéria que volatiliza por ignição. Sua determinação é normalmente feita juntamente com a determinação dos sólidos totais e determinada por diferença de massa. Para tanto, a amostra é seca em recipiente de porcelana (cadinho) até peso constante a 105°C (ST) e em seguida é posta em ignição até peso constante em forno mufla a 550°C. Os cálculos são então feitos pelas Equações 6 e 7.

$$ST (\%) = \frac{\text{Peso}_{105^{\circ}\text{C}} - \text{Peso}_{\text{Cadinho}}}{\text{Peso Amostra}} * 100 \quad \text{Equação 6}$$

$$SV (\%) = \frac{\text{Peso}_{105^{\circ}\text{C}} - \text{Peso}_{550^{\circ}\text{C}}}{\text{Peso Amostra}} * 100 \quad \text{Equação 7}$$

A redução do teor de SV no reator, ou seja, a diferença entre o teor de SV no início e no fim da operação, pode ainda ser considerada como uma medida para estimar a conversão da matéria orgânica e, portanto, a eficiência do reator.

4.1.6 Nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e amônia

O nitrogênio é um macronutriente de suma importância para o processo de digestão anaeróbia, uma vez que é necessário aos microrganismos anaeróbios, inclusive aos metanogênicos. O nitrogênio está presente na matéria orgânica e é convertido em amônia (NH_3) durante o processo. A amônia por sua vez, dissocia-se na água e forma o amônio (NH_4) (FNR, 2010).

A amônia é um componente importante para a digestão anaeróbia, sendo necessária apenas em baixas concentrações, pois tem alto potencial inibidor para o processo e pode ser tóxica quando em altas concentrações, principalmente aos microrganismos metanogênicos. O amônio é consideravelmente menos nocivo e é aceitável em altas concentrações (Tabela 14).

Tabela 14 – Valores limite para amônia e amônio

Substância	Concentração para Inibição (mg L^{-1})	Concentração para Toxicidade (mg L^{-1})
Amônia (NH_3)	80	150
Amônio (NH_4)	1.500 – 10.000	30.000

Fonte: Deublein e Steinhauser, (2011).

O efeito inibidor da amônia é dependente da variação de temperatura e pH, o que torna digestores termofílicos mais sensíveis a inibição por amônia, uma vez que com o aumento da temperatura o equilíbrio de dissociação de NH_3 para NH_4 diminui e conseqüentemente a concentração da amônia aumenta.

A quantificação da amônia de uma amostra pode ser feita pelo método do nitrogênio total Kjeldahl (NTK). Nesta análise o nitrogênio orgânico é convertido em nitrogênio amoniacal fervendo a amostra com ácido sulfúrico e um catalizador. Depois, uma base é adicionada e a amônia é destilada da solução alcalina para uma solução ácida (normalmente ácido bórico), onde a amônia é absorvida e quantificada.

4.1.7 Composição do Biogás

A determinação da composição do biogás produzido no digestor é de grande importância para avaliar o processo de digestão. O biogás é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), contendo ainda pequenas concentrações de outros elementos (Tabela 15).

Tabela 15 – Composição do biogás

Componente	Teor (%)
Metano (CH_4)	50 – 70
Dióxido de Carbono (CO_2)	25 – 45
Vapor de Água (H_2O)	2 (20°C) – 7 (40°C)
Oxigênio (O_2)	< 2
Nitrogênio (N_2)	< 2
Amônia (NH_3)	< 1
Hidrogênio (H_2)	< 1
Sulfeto de Hidrogênio (H_2S)	< 1

Fonte: Seadi et al. (2008).

O metano é o gás que evidencia a característica de combustível ao biogás e, portanto, estima-se maiores concentrações deste composto. O teor de cada componente no biogás é diretamente ligado a várias características do processo, como temperatura, tempo de retenção hidráulica, carga orgânica volumétrica, tipo de substrato, entre outros.

O substrato interfere significativamente na composição do biogás. A composição bioquímica, como o conteúdo de proteínas, lipídeos e carboidratos dos diferentes tipos de substratos é determinante para o rendimento teórico de metano (Tabela 16).

Tabela 16 – Composição teórica do biogás de acordo com o substrato

Conteúdo	Biogás teórico (L kg ST ⁻¹)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
Proteína	700	70-71	20-30
Lipídeos	1.200-1.250	67-68	32-33
Carboidratos	790-800	50	50

Fonte: Seadi et al. (2008)

A amostra de gás deve ser analisada imediatamente após a retirada do reator a fim de evitar perdas e contaminações, descaracterizando o biogás.

A determinação da composição do biogás é usualmente feita por meio de cromatografia gasosa. Nela as amostras são injetadas no cromatógrafo, analisadas e o cálculo da concentração de cada gás é feita a partir da área do cromatograma e de curvas de calibração feitas previamente com padrões comerciais de concentrações conhecidas. No mercado, também estão disponíveis equipamentos portáteis que realizam a caracterização no biogás.

4.2 Frequência de análises de monitoramento

Preferencialmente, as análises devem ser realizadas logo após a coleta da amostra dos reatores, mas na impossibilidade de realizá-la, as amostras devem ser armazenadas de modo a garantir o mínimo de descaracterização possível. A Tabela 17 indica as recomendações para armazenamento das amostras para posterior análise.

Tabela 17 – Armazenamento de amostra para análise de alcalinidade

Parâmetro	Frequência de monitoramento sugerida
Temperatura	Diária
pH	3 vezes na semana
Acidez	Semanal
Alcalinidade	Semanal
Série de sólidos	Semanal
DQO (substratos líquidos)	Semanal
Amônia	Semanal
Teor de Metano	2 vezes na semana

OBS: Frequência recomendada para reatores estáveis, sem alterações na carga orgânica e na composição de substratos de alimentação.

4.3 Solução de problemas (troubleshooting)

O monitoramento dos reatores indica níveis adequados de funcionamento e eficiência do sistema, bem como problemas que devem ser controlados para evitar a falha do processo. A Tabela 18 apresenta alguns dos principais problemas comuns em reatores anaeróbios.

Tabela 18 – Possíveis problemas em reatores e medidas de contenção

Problema	Possível causa	Medida de contenção
Baixo pH	<ul style="list-style-type: none"> - Acúmulo de AGVs - Carga de alimentação muito alta - Flutuação na temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> - Controlar carga de alimentação - Ajustar AV/AT - Aumentar alcalinidade - Avaliar sistema de aquecimento
Baixa Alcalinidade	<ul style="list-style-type: none"> - Característica do substrato - Acúmulo de ácidos 	<ul style="list-style-type: none"> - Inserir suplemento químico para aumentar alcalinidade
Acúmulo de AGVs	<ul style="list-style-type: none"> - Instabilidade/estresse no reator; - Alteração na atividade microbiana; - Inibição dos microrganismos metanogênicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Controlar carga de alimentação - Adequação da agitação - Ajuste de pH, alcalinidade e/ou temperatura

Produção de espuma e/ou espuma	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de AGVs; Excesso de alcalinidade - Flutuação na temperatura - Agitação insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> - Controlar carga de alimentação - Avaliar sistema de aquecimento (variação deve ser $< 2 \text{ }^\circ\text{C d}^{-1}$) - Avaliar agitação
Diminuição na produção de biogás	<ul style="list-style-type: none"> - Alteração no substrato - Alteração da temperatura - Substrato heterogêneo - Composto inibitório - Redução dos microrganismos 	<ul style="list-style-type: none"> - Garantir homogeneização e qualidade do substrato - Avaliar aquecimento - Checar compostos inibitórios - Inserir digestato de outro reator para recompor os microrganismos
Diminuição na produção de metano	<ul style="list-style-type: none"> - Alteração no substrato - Baixo pH - Acúmulo de ácidos - Compostos inibitórios 	<ul style="list-style-type: none"> - Garantir homogeneização e qualidade do substrato - Controlar carga de alimentação - Controlar alcalinidade - Checar por compostos inibitórios
AV/AT alta	<ul style="list-style-type: none"> - Alta carga de alimentação 	<ul style="list-style-type: none"> - Controlar alimentação do digestor - Aumentar alcalinidade
Acúmulo de amônia	<ul style="list-style-type: none"> - Substrato com alto teor de nitrogênio - Alteração no pH ou temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> - Controlar carga de alimentação - Co-digestão com substrato com baixo teor de nitrogênio - Controlar temperatura e pH

AGRADECIMENTOS

A presente nota é resultado do esforço empreendido em parceria com pesquisadores do Grupo de Pesquisa em Tecnologias de Produção e Purificação do Biogás (TPPBio) da UTFPR-Medianeira pela colaboração técnico-científica no desenvolvimento deste material. Agradecemos adicionalmente a Universidade Estadual de Londrina e seu grupo de pesquisa do Laboratório de Águas e Resíduos do Centro de Tecnologia e Urbanismo, pela validação do conteúdo aqui apresentado.

REFERÊNCIAS

ABEYKOON, C.; LI, K., MCAFEE, M.; MARTIN, P. J. E.; IRWIN, G. W. Controle de temperatura de fusão da extrusora com lógica difusa. 2011. Volumes de procedimentos da IFAC. 44, 8577-8582.

BADSHAH, M.; LAM, D. M.; LIU, J.; MATTIASSON, B. Use of an automatic methane potential test system for evaluating the biomethane potential of

sugarcane bagasse after different treatments. 2012. *Bioresource Technology*, 114, 262 – 269.

AL SEADI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; et al. **Biogas Handbook**. Denmark: University of Southern Denmark, 2008.

APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23st ed. Washington: American Water Works Association, 2017.

BASTOS, J. A. **Produção de biogás em resposta ao pré-tratamento químico e reúso do liquor negro aplicado aos resíduos de aparas de grama**. 2020. 69 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2020.

BASTOS, J. A.; REMOR, AP. V.; ALINO, J. H. L.; FRARE, L. M.; LOFHAGEN, J. C.; EDWIGES, T. Hydrolysate recycling improves economic feasibility of alkaline pretreatment for bioenergy production. 2021. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 9, 105935.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – BIOGÁS (CIBIOGÁS). **Como aumentar a produção de biogás? Conheça o manejo de substratos**. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog-post/como-aumentar-a-producao-de-biogas-conheca-o-manejo-de-substratos/>. Acesso em: 24/08/2021.

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

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (Alemanha). **PROBIOGÁS. Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização** - PROBIOGÁS. 5. ed. rev. e atual. Gülzow: FNR, 2010. 236 p.

GERARDI, Michael H. **The Microbiology of Anaerobic Digesters**. EUA: John Wiley & Sons, Inc., 2003. ISBN 0-471-20693-8.

LOSSIE, U.; PÜTZ, P. Targeted control of biogas plants with the help of FOS/TAC, Practicle report: Laboratory analysis, titration, FOS/TAC, Brochure of the company Hach – Lange, 2009.

MEEGODA, Jay N.; LI, Brian; PATEL, Kush; WANG, Lily B. A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, v. 15, n. 2224, 2018. DOI doi:10.3390/ijerph15102224.

RAPOSO, F.; DE LA RUBIA, M. A.; FERNÁNDEZ-CEGRÍ, V.; BORJA, R. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 861-887, 2012.

RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **Journal Water Pollution Control Federation**, v. 58, p. 406-411, 1986.



MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO REGIONAL

MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

