



BIOGÁS

**TECNOLOGIAS DE
DIGESTÃO ANAERÓBIA COM
RELEVÂNCIA PARA O BRASIL**
SUBSTRATOS, DIGESTORES
E USO DE BIOGÁS

BIOGÁS

**TECNOLOGIAS DE
DIGESTÃO ANAERÓBIA COM
RELEVÂNCIA PARA O BRASIL**
SUBSTRATOS, DIGESTORES E
USO DE BIOGÁS

Coletânea de publicações do PROBIOGÁS
Série Desenvolvimento do Mercado de Biogás

1ª Edição
Ministério das Cidades
Brasília, 2015

República Federativa do Brasil

Presidenta da República

Dilma Vana Rousseff

Ministro das Cidades

Gilberto Kassab

Secretário Executivo do Ministério das Cidades

Elton Santa Fé Zacarias

Secretário Nacional de Saneamento Ambiental

Paulo Ferreira

Chefe de Gabinete

Gustavo Zarif Frayha

Diretor de Articulação Institucional

Ernani Ciríaco de Miranda

Diretor de Desenvolvimento e Cooperação Técnica

Manoel Renato Machado Filho

Diretor de Águas e Esgotos

Johnny Ferreira dos Santos

Apoio Técnico

Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ).

Diretor Nacional: Wolf Michael Dio

Coordenador do Projeto: Wolfgang Roller

Informações legais

As idéias e opiniões expressas neste livro são dos autores e não refletem necessariamente a posição do Ministério das Cidades, da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental ou da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

A duplicação ou reprodução de todo ou partes (incluindo a transferência de dados para sistemas de armazenamento de mídia) e distribuição para fins não comerciais é permitida, desde que o projeto PROBIOGÁS seja citado como fonte da informação. Para outros usos comerciais, incluindo duplicação, reprodução ou distribuição de todo ou partes deste estudo, é necessário o consentimento por escrito do Ministério das Cidades e da GIZ.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação [CIP]

Bibliotecário Responsável: Illy Guimarães B. Batista [CRB/DF 2498]

Brasil. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás.

Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH [GIZ] ; autores, Oliver Jende ... [et al.]. – Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2015.

83 p. : il. – [Desenvolvimento do mercado de biogás; 2]

ISBN: 978-85-7958-039-0

1. Biogás – aspectos tecnológicos. 2. Digestão anaeróbia – aspectos tecnológicos. 3. Biogás – produção e utilização. 4. Energia – fontes alternativas. I. Ministério das Cidades. II. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH [GIZ]. III. Cabral, Carolina Bayer Gomes. IV. Título. V. Título: Substratos, digestores e uso de biogás. VI. Série.

CDD 665.776

CDU 662.767.2



Projeto Brasil – Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil

www.cidades.gov.br/probiogas

O Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS – é um projeto inovador, fruto da cooperação técnica entre o Governo Brasileiro, por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, e o Governo Alemão, por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Com o objetivo de contribuir para a ampliação do uso energético eficiente do biogás e, por conseguinte, para a redução de emissões de gases indutores do efeito estufa, o projeto conta com uma rede de parcerias nas esferas governamental, acadêmica e empresarial e possui vigência entre os anos de 2013 e 2017.

Para alcançar tais objetivos, o PROBIOGÁS desenvolve atividades em três linhas: (1) *condições-quadro*, atuando junto a órgãos governamentais em prol da melhoria das condições regulatórias relacionadas à produção de energia a partir do biogás; (2) *cooperação científica*, aproximando instituições de ensino e de pesquisa brasileiras entre si e das alemãs; e, (3) *cadeia de valor*, com o intuito de fomentar a indústria brasileira para produção nacional de tecnologia e de aproximar empresas brasileiras e alemãs para o intercâmbio de conhecimento. Além dessas atividades, o PROBIOGÁS busca capacitar profissionais brasileiros em diversos níveis, contemplando os atores que integram a cadeia de biogás e objetivando fortalecer o mercado de biogás no Brasil.

A realização da parceria Brasil-Alemanha possibilita a transferência do conhecimento e da experiência alemã sobre o aproveitamento do biogás gerado a partir do tratamento de efluentes e de resíduos, cuja expertise é reconhecida mundialmente. Neste contexto, o PROBIOGÁS assume papel relevante, indutor do desenvolvimento de tecnologias nacionais para o aproveitamento do biogás, possibilitando um retorno positivo para o setor saneamento básico no Brasil, em função do potencial de incremento na viabilidade técnica e econômica das plantas e instalações de tratamento de esgotos e de resíduos sólidos, a partir da geração de energia proveniente dos processos de biodegradação da fração orgânica.

Para melhor inserir o Projeto nas políticas nacionais foi criado um Comitê Gestor interministerial com a função de assegurar a integração entre as diversas áreas do Governo Federal com atuação no tema. O Comitê é formado pelos seguintes órgãos: Ministérios das Cidades, do Meio Ambiente, da Ciência, Tecnologia e Inovação, das Minas e Energia, da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, assim como a GIZ.

Gilberto Kassab
Ministro das Cidades



Partners of **giz** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Ministério das Cidades



Coordenação do projeto PROBIOGÁS

Ernani Ciríaco de Miranda (Ministério das Cidades) e Wolfgang Roller (GIZ)

Publicado por

Projeto Brasil–Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS (Projeto de Cooperação Técnica Bilateral entre a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades – SNSA/MCidades e a Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável – GIZ)

Contatos

SNSA/MCidades

Setor de Autarquias Sul, Quadra 01, Lote 01/06, Bloco H, Ed. Telemundi II
CEP: 70070-010, Brasília – DF, Brasil. Telefone: +55 (61) 2108-1000
www.cidades.gov.br

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

SCN Quadra 1 Bloco C Sala 1501 – 15º andar Ed. Brasília Trade Center,
CEP: 70711-902, Brasília-DF, Brasil. Telefone: +55 (61) 2101-2170
www.giz.de/brasil

Expediente

Autores

Oliver Jende (Rotária do Brasil), Christoph Platzer (Rotária do Brasil), Carolina Bayer Gomes Cabral (Rotária do Brasil), Heike Hoffmann (Rotária do Brasil), Sebastian Rosenfeldt (Rotária do Brasil), Luis Felipe de Dornfeld Braga Colturato (Methanum), Burkard (AKUT Umweltschutz Ingenieure), Thilo Burkard (AKUT Umweltschutz Ingenieure), Carsten Linnenberg (AD Solutions UG) e Daniel (AD Solutions UG), Walter Stinner (DBFZ), Frank Zörner (BN Umwelt), Enga Sylvi Schröder (BN Umwelt).

Revisores

Hélinah Cardoso (GIZ), Jens Giersdorf (GIZ), Luis Costa Jr. (GIZ), Roberta Knopki (GIZ), Wagner Santos (consultor)

Capa, projeto gráfico e diagramação

Estúdio Marujo

PREFÁCIO

A Lei de diretrizes nacionais para o saneamento básico – Lei 11.445/2007 – estabelece que a prestação dos serviços terá a sustentabilidade econômico-financeira assegurada e, sob os aspectos técnicos, atenderá a requisitos que garantam a qualidade adequada. Por sua vez, a Lei que institui a política nacional de resíduos sólidos – Lei 12.305/2010 – estabelece a obrigatoriedade da coleta seletiva e determina que apenas os rejeitos devem ser encaminhados a aterros sanitários (regra que ficou conhecida no país como o “fim dos lixões”). Tais elementos reforçam o grande desafio, enfrentado pelo Brasil, de ampliar os níveis de tratamento dos esgotos sanitários e dos resíduos sólidos urbanos.

O Plano Nacional de Saneamento Básico – Plansab –, aprovado em dezembro de 2013, com um horizonte de 20 anos, destaca que um dos princípios fundamentais da política de saneamento diz respeito à matriz tecnológica que orienta o planejamento e a política setorial. Segundo o Plansab, planejar o saneamento básico no país, com um olhar de longo prazo, necessariamente envolve a prospecção dos rumos tecnológicos que o setor pode e deve trilhar. Cabe à política de saneamento básico identificar tendências, nacionais e internacionais, segundo as quais a matriz tecnológica do saneamento vem se moldando, o que supõe também procurar enxergar novos conceitos, ainda que sejam antigas formulações em novas roupagens, ou novos desafios que pressionam no sentido de mudanças paradigmáticas. Neste sentido, temas como a sustentabilidade, a gestão integrada das águas urbanas, o saneamento ecológico e o combate às mudanças climáticas globais podem ser evocados como exemplos.

Neste contexto, o PROBIOGÁS é um instrumento de grande importância para a implementação do Plansab. O aproveitamento energético do biogás nos processos de tratamento dos esgotos sanitários e dos resíduos sólidos urbanos, consagrado em diversos países, representa um pequeno esforço de modernização das instalações dos sistemas brasileiros com impactos altamente positivos na sustentabilidade econômico-financeira, na qualidade dos processos de tratamento e na melhoria do meio ambiente, contribuindo de forma efetiva para a redução dos gases de efeito estufa.

Espera-se que os resultados do PROBIOGÁS possibilitem a inserção do aproveitamento energético do biogás na pauta dos governos e prestadores de serviços de saneamento, de modo a fazer com que esta fonte renovável de energia seja utilizada em toda a sua potencialidade, dentro da realidade brasileira, contribuindo também para a geração distribuída de energia e a maior diversificação da matriz energética nacional.

Paulo Ferreira
**Secretário Nacional de
Saneamento Ambiental**

Wolfgang Roller
Coordenador PROBIOGAS

APRESENTAÇÃO DA COLETÂNEA

A Coletânea de Publicações do PROBIOGÁS é uma relevante contribuição governamental aos profissionais brasileiros que atuam em diferentes setores da infraestrutura, energia renovável, inovação tecnológica e, em especial, no setor de saneamento. Essa coletânea é composta por cadernos técnicos que tratam do biogás como tema central.

A coletânea é dividida em quatro séries, cada uma agrupando um conjunto de publicações que contribuem para uma determinada área do conhecimento e/ou de atuação no tema.

BIOGAS

A primeira série é intitulada **Desenvolvimento do Mercado de Biogás**, abreviada como **BIOGÁS**, composta por publicações que tratam de aspectos tecnológicos da geração e utilização do biogás, do processo de licenciamento ambiental de plantas e instalações, da comercialização de co-produtos de plantas de biogás, entre outros tópicos pertinentes à estruturação da cadeia produtiva e à consolidação de um mercado nacional.

RSU

A segunda série aborda a utilização energética do biogás gerado a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, questão extremamente atual no contexto técnico e institucional do saneamento ambiental brasileiro. Denominada **Aproveitamento Energético do Biogás de Resíduos Sólidos Urbanos** e abreviada simplesmente como **RSU**, esta série abordará, entre outros tópicos, a metodologia e tecnologia da metanização seca e estudos de viabilidade técnica e econômica.

ETE

A terceira série é chamada **Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto**, simbolizada pela sigla **ETE**, composta por publicações que tratam de aspectos técnicos, desde o projeto à operação, de estudos de viabilidade técnica e econômica, e de orientações para a licitação de sistemas de tratamento que contemplem o biogás.

RA

Finalmente, a quarta série abordará a utilização do biogás oriundo dos resíduos das atividades agrícolas, pecuárias e da agroindústria, que possuem um elevado potencial de aproveitamento no país. Intitulada **Aproveitamento Energético do Biogás de Resíduos Agrosilvopastoris**, abreviada simplesmente como **RA**, as publicações versarão sobre os resíduos da suinocultura, comercialização de biofertilizante, entre outros tópicos.

Por oportuno, informamos que todas as Publicações da Coletânea estão disponíveis para download na página do Projeto PROBIOGÁS, hospedado no site da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades: www.cidades.gov.br/probiogas

SUMÁRIO

11	1 OBJETIVO E USO DESTA SISTEMATIZAÇÃO
----	---------------------------------------

12	2 RESÍDUOS E EFLUENTES COM ALTO TEOR DE ENERGIA NOS QUATRO SETORES PRINCIPAIS
14	2.1 Fatores da caracterização de substratos para a produção de biogás
17	2.2 Substratos da produção agropecuária
19	2.3 Substratos da indústria
22	2.4 Substratos dos resíduos sólidos urbanos
24	2.5 Substratos no setor de esgotamento doméstico
28	2.6 Referências

29	3 TECNOLOGIAS DIFUNDIDAS PARA TRATAMENTO ANAERÓBIO COM UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS
30	3.1 Tipos de reatores de tratamento anaeróbio e condições básicas
32	3.2 Produção de biogás com substratos da agropecuária
39	3.3 Produção de biogás com resíduos e efluentes da indústria alimentícia
48	3.4 Produção de biogás com resíduos sólidos urbanos
55	3.5 Produção de biogás no setor de tratamento de esgoto
62	3.6 Referências

64	4 TECNOLOGIAS ATUAIS DE TRATAMENTO E APROVEITAMENTO DE BIOGÁS
65	4.1 Visão geral sobre o tratamento e aproveitamento de biogás
65	4.2 Tratamento do biogás
70	4.3 Aproveitamento de biogás
75	4.4 Injeção de biometano nas redes de gás natural
76	4.6 Referências

77	5 ANEXOS
77	5.1 Anexo A: Matriz de tecnologias para geração de biogás
82	5.2 Anexo B: Matriz de tecnologias para o aproveitamento energético do biogás

LISTA DE FIGURAS

- 12 **1:** Produção de biogás na UE (fonte: EurobservER, 2012)
- 13 **2:** Geração de eletricidade usando biogás
- 13 **3:** Substratos para a produção da energia elétrica, Alemanha
- 29 **4:** UASB da ETE Feira de Santana, medição de biogás ETE para
tratamento de esgoto de 100.000 hab., projeto P&D, potencial de
aproveitamento de biogás.
- 29 **5:** Digestor com aproveitamento da energia nos EUA Harvest Energy
Garden de Parque Walt Disney, tratamento de esgotos sanitários
e restos de comida.
- 33 **6:** CSTR com misturadores tangenciais.
- 33 **7:** CSTR (silagem de milho – 700 kW), Alemanha.
- 34 **8:** CSTR com misturadores tangenciais e gás armazenado .
- 34 **9:** Suprimento de ar para a cúpula de biogás.
- 36 **10:** Lagoa com misturador na fase da instalação.
- 36 **11:** Lagoa para dejetos suínos e resíduos de matadouro.
- 37 **12:** Desenho de uma lagoa anaeróbia com misturador.
- 38 **13:** Lagoa com misturador em construção.
- 38 **14:** Lagoa anaeróbia coberta.
- 39 **15:** Lagoas cobertas de dejetos suínos.
- 41 **16:** CSTR com misturador central.
- 41 **17:** CSTR com misturador central.
- 42 **18:** CSTR com misturador central e pós-digestor com biogás.
- 45 **19:** Desenho esquemático de um reator UASB.
- 45 **20:** UASB, efluente industrial, Alemanha.
- 47 **21:** Desenho de lagoa intensificada.
- 47 **22:** Lagoa intensificada na Ásia.
- 50 **23:** Esquema do processo de digestão seca descontínua.
- 51 **24:** Digestão seca descontínua, Gütersloh, Alemanha.
- 52 **25:** Digestão seca contínua, Digestor vertical.
- 52 **26:** Digestão seca contínua: reator horizontal.
- 53 **27:** Digestão seca descontínua, Gütersloh, Alemanha.
- 54 **28:** Digestão úmida, MBA Lübeck, Alemanha.
- 57 **29:** Desenho esquemático de um reator UASB.

- 58 **30:** Modelo de RALF, SAMAE Jaraguá do Sul, SC.
- 58 **31:** Separador trifásico CAESB.
- 59 **32:** Lagoa anaeróbia coberta ETE, Lima, Peru.
- 60 **33:** Foto de digestor de lodo com forma oval, ETE Alemanha.
- 60 **34:** Esquema com corte de digestor de lodo com forma cilíndrica.
- 64 **35:** Purificação de biogás, Detmold.
- 64 **36:** Composição e uso do biogás e biometano,
 esquema adaptado de AEBIOM.
- 64 **37:** Ciclo de uso energético de biogás produzido na agricultura.
- 65 **38:** Tratamento conforme o uso final.
- 70 **39:** Aproveitamentos energéticos para biogás e biometano.
- 71 **40:** Contêiner com CHP.
- 74 **41:** Caldeira para aquecimento de um digestor.
- 75 **42:** Uso de biometano produzido na ETE Bottrop/Alemanha.

LISTA DE TABELAS

14	1: Perspectiva da contribuição das fontes orgânicas na produção de energia na Alemanha.
14	2: Produção de biogás na decomposição completa dos constituintes orgânicos.
17	3: Potencial de produção de metano com resíduos vegetais.
18	4: Potencial de produção de metano com resíduos de animais.
21	5: Potencial de produção de biometano com os resíduos da indústria de alimentos
22	6: Potencial de produção de metano com resíduos municipais
23	7: Potencial de produção de metano com resíduos orgânicos.
23	8: Potencial de produção de metano com resíduos de alimentos.
23	9: Potencial de produção de metano com
24	10: Composições típicas do biogás produzido nas ETEs.
25	11: Características físico-químicas dos esgotos sanitários.
26	12: Origem e características dos lodos gerados no tratamento de esgotos.
26	13: Características de geração de lodos não estabilizados de acordo com a origem.
32	14: Tecnologias para produção de biogás na agropecuária.
40	15: Tecnologias para produção de biogás na agroindústria
49	16: Tecnologias para produção de biogás com resíduos municipais.
56	17: Tecnologias para produção de biogás no setor de saneamento.
66	18: Processos de dessulfurização.
69	19: Características dos diferentes processos para a eliminação de CO ₂ .
69	20: Custos para o tratamento de biogás na Europa.
72	21: Custos específicos de motor a gás e bicombustível.
73	22: Comparação entre motor a gás e bicombustível.

1

OBJETIVO E USO DESTA SISTEMATIZAÇÃO

O objetivo deste mapeamento é oferecer uma visão geral sobre as diferentes opções tecnológicas para a produção e o consequente aproveitamento do biogás como fonte adicional de energia no Brasil.

Este produto é destinado a pessoas que já têm conhecimento, ainda que básico, acerca do biogás e que estejam interessadas em ampliar seus conhecimentos sobre essa alternativa, que alia o saneamento à produção de energia renovável, processos tão importantes nos dias de hoje.

Da experiência internacional, foram descritas as técnicas de maior relevância para o contexto brasileiro. Os critérios de seleção foram: a relevância das tecnologias com relação à disponibilidade dos substratos no Brasil; e a maturidade e possibilidade de aplicação dessas tecnologias.

Vale ressaltar que esse mapeamento não elimina a necessidade de estudos de planejamento e projetos de execução, devido à grande quantidade de variáveis e particularidades de cada situação.

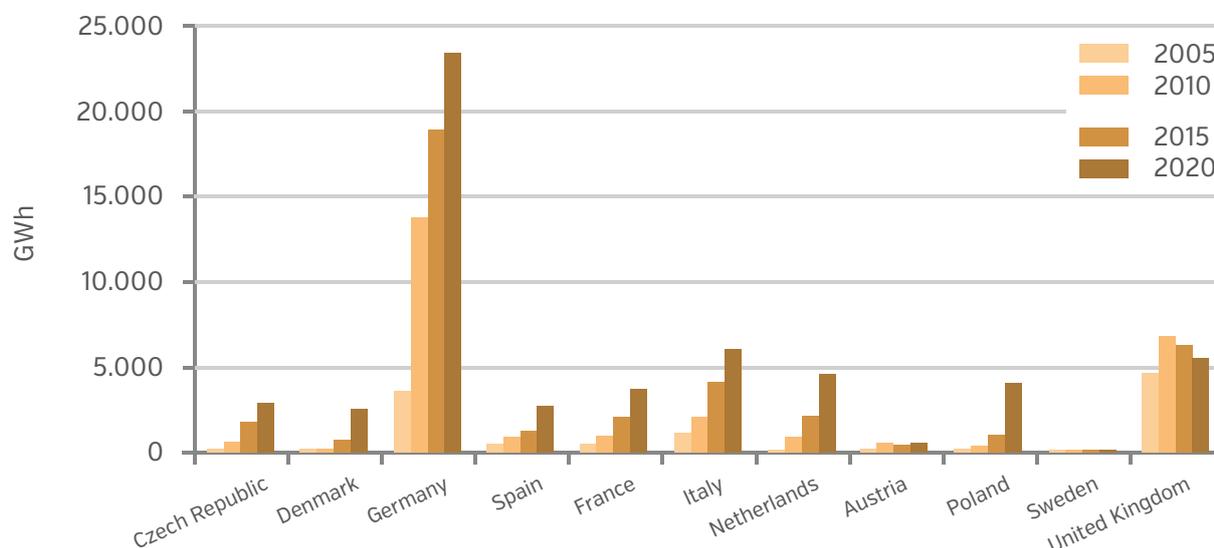
A primeira parte descreve os substratos com alto potencial para a produção de biogás e as condições para sua utilização. Esses são diferenciados por sua origem e foram separados em quatro grandes grupos: 1. Produção agropecuária (produção primária: restos da safra, esterco, biomassa dedicada); 2. Indústria de alimentos (processamentos: cana-de-açúcar, amidos, cervejaria, refrigerantes, laticínios, matadouros); 3. Resíduos sólidos urbanos (resíduos orgânicos domésticos e municipais); 4. Esgotos e lodos sanitários.

A segunda parte descreve, para cada classe de substratos, as tecnologias de digestão anaeróbia mais comuns, suas participações no mercado e a previsão de sua relevância em condições brasileiras, a ordem de grandeza dos investimentos, as condições a serem respeitadas para a operação, entre outras particularidades importantes, na opinião dos autores, para a implementação das tecnologias no Brasil.

A terceira parte descreve as tecnologias empregadas no tratamento e no uso energético do biogás. A necessidade de tratamento do biogás depende, principalmente, do tipo de aproveitamento desejado. Foram selecionadas as tecnologias mais disseminadas e maduras, levando-se em conta as condições necessárias para sua aplicação.

A sistematização foi realizada através da cooperação de uma equipe de consultores, composta por representantes das seguintes instituições: AKUT, Rotária do Brasil Ltda., AD Solutions UG, BN Umwelt e DBFZ. Todas essas instituições contam com ampla experiência internacional em projetos de produção e utilização do biogás, além de estarem familiarizadas com o mercado brasileiro.

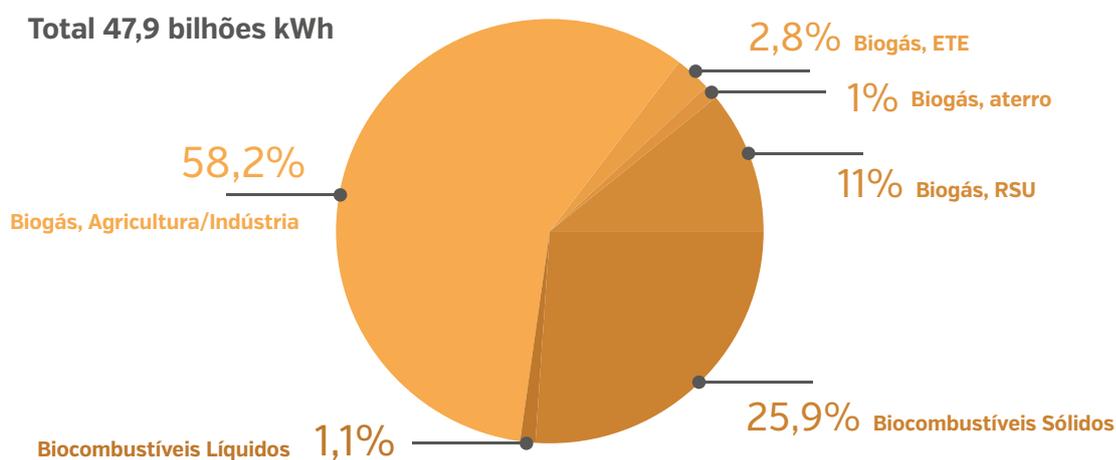
Figura 2: Geração de eletricidade usando biogás



Fonte: EBA, 2011

Figura 3: Substratos para a produção da energia elétrica, Alemanha

A Figura 3 apresenta as porcentagens dos diferentes substratos orgânicos utilizados na produção da energia elétrica.



Fonte: AGEE, 2014

A Tabela 1 mostra a perspectiva de desenvolvimento para a Alemanha no ano de 2030, no que diz respeito à produção de energia, utilizando-se diferentes substratos.

Vale ressaltar que a utilização energética de resíduos e efluentes orgânicos provenientes da produção agropecuária, da indústria e de serviços municipais de saneamento (RSU, esgotos e lodos sanitários), por meio da digestão anaeróbica, tem uma importância crescente no Brasil, uma vez que essas tecnologias permitem aliar a produção energética aos serviços de saneamento básico ambiental.

Tabela 1: Perspectiva da contribuição das fontes orgânicas na produção de energia na Alemanha.

ORIGEM DA BIOMASSA	POTENCIAL 2030
Biomassa dedicada	3.750 MW
Dejetos e esterco da produção animal	1.545 MW
Resíduos agrícolas vegetais (folhas, colheita)	1.503 MW
Subprodutos vegetais da agroindústria (resíduos e fluentes)	562 MW
Fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU)	337 MW
Resíduos animais da agroindústria (frigoríficos, laticínios)	126 MW

Fonte: AGEE-Stat. AG Erneuerbare Energien-Statistik, 2014.

2.1 Fatores da caracterização de substratos para a produção de biogás

Os principais grupos de moléculas orgânicas com potencial de aproveitamento energético são os carboidratos, as proteínas e as gorduras. Por intermédio da digestão anaeróbica completa, esses grupos são convertidos em biogás, que tem o metano como componente principal.

O biogás é um produto gasoso da degradação biológica de substratos orgânicos sob condições anaeróbicas. O biogás é composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) e, em menores quantidades, aparecem o gás sulfídrico (H₂S), a umidade (H₂O) e outros gases como, por exemplo, o nitrogênio (N₂). Para o uso energético (energia elétrica, térmica e veicular), o fator decisivo é o gás metano (CH₄), que varia entre 50 e 72% do total, dependendo dos substratos e das condições de degradação.

Tabela 2: Produção de biogás na decomposição completa dos constituintes orgânicos.

A Tabela 2 resume o potencial de produção de biogás, de gás metano e da recuperação de energia para cada grupo de moléculas orgânicas. Os dados estão relacionados à concentração de Sólidos Totais Voláteis (SV), parâmetro relevante para medir a concentração de matéria orgânica. Essa pode ser relacionada com a concentração de Sólidos Totais (ST) que, por sua vez, são compostos pelo conjunto de matéria orgânica e mineral. Quanto maior a porcentagem de matéria orgânica com relação aos sólidos totais, maior o potencial de produção de biogás de um substrato.

SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS	PRODUÇÃO DE BIOGÁS* [m ³ /kgSV]	TEOR DE CH ₄ [%]	ENERGIA	
			[MJ/kg SV]	[kWh/kg SV]
Carboidratos	0,83	50	15,1	4,2
Proteínas	0,72	72	18,4	5,1
Gorduras	1,43	70	36,0	10,0

* Os valores variam conforme a composição de carboidratos, proteínas e gorduras.

Fonte: DWA M 363,2010.

Em relação ao teor de metano formado, a maior concentração (72%) resulta da degradação das proteínas (produtos lácteos, carne, sangue, etc.). As gorduras (óleos e graxas orgânicas), porém, têm a maior produção do biogás relacionado à matéria orgânica seca (SV) e, conseqüentemente, o maior valor absoluto da produção de energia (10 kWh/kg SV). Os carboidratos (açúcar, álcool, amido, etc.) têm o menor potencial relacionado à matéria orgânica (SV), porém sua concentração no substrato pode ser muito elevada, especialmente nos efluentes da indústria de alimentos (cervejarias, fábricas de refrigerante, padarias, etc.).

Os substratos são compostos por diferentes moléculas orgânicas, sendo que, na maioria dos casos, um grupo de substâncias predomina. Observa-se que os substratos com alto teor de carboidratos (cana-de-açúcar, restos de frutas) são convertidos mais rapidamente em biogás, enquanto os com altos teores de gordura (p. ex. plantas oleaginosas) são convertidos mais lentamente, atingindo maiores taxas de produção.

O processo da digestão anaeróbia acontece em quatro etapas: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese. Cada uma depende de um conjunto de microrganismos e, como opções de processo, é possível executar todas as fases em um mesmo reator ou separá-las em dois reatores (processo bifásico).

A metanogênese é a etapa mais sensível da digestão anaeróbia. Qualquer concentração de oxigênio é tóxica aos microrganismos e valores baixos de pH inibem sua atividade. Vale ressaltar que a queda de pH pode ser provocada pelo acúmulo de ácidos resultantes da alta atividade fermentativa (acidogênese), o que pode acontecer no caso de substratos de alto valor energético, especialmente gorduras.

Os fatores-chave para a escolha e a classificação dos substratos para a digestão anaeróbia com produção de biogás consistem em:

1. A origem dos substratos. Substratos de mesma origem, denominados mono-substratos, geralmente já têm os requisitos para a degradação biológica, nesse caso, denominada mono-digestão. A digestão de uma mistura de substratos de diferentes origens (co-substratos) é chamada de co-digestão. Por meio da mistura consegue-se uma maior estabilidade no processo. Desta maneira, por meio da co-digestão:

- >> as características cinéticas das etapas da degradação biológica anaeróbia (velocidade da hidrólise, disponibilidade de nutrientes) podem ser determinadas;
- >> os efeitos tóxicos de alguns substratos, por exemplo, substratos da indústria farmacêutica que contêm elevadas concentrações de sais ou de fenóis, podem ser eliminados;
- >> a capacidade de tamponamento (neutralização em caso de produção de ácidos) pode ser aumentada; e
- >> as características hidráulicas (capacidade de mistura e de bombeamento) de substratos com alto teor de sólidos podem ser otimizadas.

Sobretudo, a co-digestão visa a uma maior geração específica de biogás, aumentando a eficiência da planta.

2. A sazonalidade dos substratos. Outro fator importante na escolha dos substratos é a sazonalidade da produção, especialmente ao se falar de safras, resíduos da agricultura ou da transformação de produtos agrícolas na indústria alimentícia. Vale ressaltar que a capacidade de adaptação de um processo a uma série de produtos sazonais (p. ex. na indústria de frutas) é limitada e requer grande esforço. Nesse caso, um co-substrato, como a silagem (milho verde, gramíneas verdes), pode fornecer a base necessária para assegurar o funcionamento do digestor anaeróbio sem paradas. A silagem é o produto de uma fermentação realizada por bactérias lácticas e esse processo é praticado na agricultura brasileira para, por exemplo, o armazenamento de forragem verde. Mantendo as condições anaeróbias, a silagem pode ser conservada por meses e, adicionalmente, substâncias de difícil degradação, como a celulose, são preparadas para a posterior degradação metanogênica no digestor anaeróbio.

3. A característica do material digerido. A escolha dos substratos é influenciada também pelas possibilidades de uso ou disposição final do material digerido (resíduo da digestão). Ainda que haja um alto valor de nutrientes, a aplicação agrícola como fertilizante nem sempre é possível. Os fatores limitantes podem ser i) físicos, como o tamanho da área agrícola disponível; ii) econômicos, como a distância entre o local da geração do biogás e a área para aplicação de fertilizantes; iii) legais, como a proibição a utilização do material digerido que potencialmente é contaminado com elevado grau de impurezas; e iv) falta de higienização dos materiais digeridos, válido para os substratos de origens como: esgoto sanitário, resíduos sólidos urbanos ou animal (esterco, estrume, matadouro).

Conforme a recomendação da Organização Mundial de Saúde (OMS), para a eliminação de coliformes fecais e parasitas, é indicada uma exposição ao calor acima de 50°C, durante sete dias. Para isso, é possível incluir, nos sistemas de digestão anaeróbia, um tratamento térmico, por meio de uma das opções a seguir:

- >> Utilização do calor residual (gerado no motor-gerador – CHP, juntamente com a energia elétrica) para o processo de higienização do material digerido.
- >> Compostagem térmica (digestão aeróbia), por meio da mistura do material digerido com substratos secos estruturantes de elevado teor de carbono (palha, serragem, cortes das áreas verdes) e eventual fornecimento de uma aeração adicional.
- >> Realização do processo termofílico de digestão anaeróbia, em que os substratos permanecem, entre 20 e 30 dias, submetidos a temperaturas superiores a 50°C.

2.2 Substratos da produção agropecuária

A princípio, todos os substratos da agropecuária, de origem vegetal (resíduos da safra) ou animal (esterco, estrume), e algumas culturas dedicadas (milho, sorgo, entre outros), podem ser utilizados como substrato em uma planta de biogás. O esterco tem uma importância adicional, porque pode ser utilizado como substrato base na co-digestão. A aplicação do material digerido como fertilizante é útil e eficaz para as plantações, mas deve ser controlada em termos de balanço de nutrientes e segurança sanitária.

2.2.1 Substratos da produção agrícola

Existe um grande potencial para a geração de energia a partir dos resíduos vegetais, pois eles contêm alto teor de matéria orgânica, principalmente carboidratos (açúcares e amidos). No Brasil, podem ser citadas culturas como as de batatas, mandioca, batata doce, banana, abacaxi, entre outras. A Tabela 3 caracteriza o potencial da produção de metano de alguns substratos típicos em relação ao teor de sólidos SV/ST (sólidos voláteis em relação aos sólidos totais). Vale destacar que existe, ainda, um grande potencial para pesquisa sobre o potencial energético de substratos específicos do Brasil.

Tabela 3: Potencial de produção de metano com resíduos vegetais.

SUBSTRATOS	ST (%)	SV/ST (%)	m ³ CH ₄ /t SV	m ³ CH ₄ /t _{substrato}
Palha de Trigo ¹	86	92	188	148
Milho - resíduos da colheita ¹	35	92	251	81
Resíduos da limpeza de grãos ¹	89	94	316	267
Batata - resíduos da colheita ¹	22	94	375	77
Silo de milho (planta verde) ¹	33	96	306	97
Silo de pastos (verde) ¹	40	90	316	113
Bananeiras ²	4,1	77	247	8
Bananeiras com bananas ²	7,4	88	385	25
Beterraba, folhas da colheita ³	16	78	318	30

¹Fonte: http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=8%2Cb&strsearch=&pos=left

²Fonte: Análises dos projetos de AD Solutions UG.

³Fonte: Handreichung Biogasnutzung, 2004.

Além dos resíduos, as biomassas dedicadas podem ser produzidas com a finalidade de geração de energia. Na Alemanha, elas representam o principal substrato para o fornecimento de energia a partir de biogás (Figura 2.3), e, desde julho de 2014, o governo alemão subvenciona sua produção. As biomassas dedicadas, principalmente o milho, são armazenadas em estoques tipo silo, onde ocorre um processo de fermentação ácida, facilitando a digestão no reator. O armazenamento também ameniza os efeitos da sazonalidade da safra. No Brasil, esse tipo de uso de biomassa pode ser interessante para a co-digestão, visto que pode garantir uma produção constante e uma maior quantidade de energia, no caso da mistura com substratos sazonais ou com alta umidade.

Vale ressaltar que os resíduos com alto conteúdo de lignina (serragem, madeira) não são interessantes para a digestão anaeróbia, pois requerem longos períodos em retenção hidráulica para sua degradação e, conseqüentemente, um volume muito grande do digestor.

A reutilização do material digerido dos substratos da produção agrícola (sem co-substrato) não é problemática sob aspectos sanitários e, relacionada aos nutrientes, é menos crítica que os substratos de origem animal ou resíduos de origem municipal, que normalmente contam com uma maior quantidade de nitrogênios e fosfatos. Entretanto, deve-se assegurar que pragas, plantas daninhas e/ou doenças fito-patogênicas não atinjam a lavoura.

2.2.2 Substratos da pecuária (dejetos de animais)

Os resíduos animais mais empregados na produção de biogás são os dejetos de suínos, os de bovinos e os da avicultura. A Tabela 4 apresenta os potenciais de produção de metano para dejetos de animais, segundo dados obtidos na Alemanha.

Tabela 4: Potencial de produção de metano com resíduos de animais

SUBSTRATOS	ST (%)	SV/ST (%)	m ³ CH ₄ /t SV	m ³ CH ₄ /t _{substrato}
Dejetos de bovino de leite (com restos de ração) ¹	8,5	85	193	14
Dejetos de bovino ²	8 - 11	75 - 82	120 - 300	12 - 18
Esterco de bovino (com palha) ²	25	68 - 76	125 - 150	25 - 30
Dejetos de suíno ²	7	75 - 85	200 - 450	12 - 24
Esterco de suíno ²	20 - 25	75 - 80	160 - 260	33 - 39
Excrementos de galinhas ¹	15	4	291	32
Esterco de galinhas ²	32	63 - 80	150 - 270	42 - 54

¹Fonte: http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=8%2Cb&strsearch=&pos=left

²Fonte: Handreichung Biogasnutzung, 2004.

É importante observar que, no caso dos substratos da pecuária, os surfactantes podem ter uma ação inibidora na produção de biogás. Assim sendo, os efluentes com grandes quantidades de desinfetante e detergente devem ser direcionados ao reservatório de material digerido, ao invés de passar pelo digestor. Outra característica crítica para o processo anaeróbio é a quantidade de nitrogênio amoniacal nos efluentes e a presença de sedimentos nos excrementos da avicultura. A solução tem sido uma co-digestão desses resíduos com outros substratos pobres em nitrogênio (silagem de milho, palha).

Para a adaptação de tecnologias empregadas na Europa às condições brasileiras, é importante observar as diferenças nos sistemas de produção animal, as quais podem ter um efeito relevante sobre a quantidade de matéria seca nos resíduos. Por exemplo, a criação suína é realizada, no Brasil, normalmente sobre pisos de concreto. Por causa da lavagem com água sob pressão, os efluentes são diluídos e acabam com teor de sólidos totais (ST) de aproximadamente 2%, o que reduz a eficiência de uma planta de biogás.

Na bovinocultura, o teor de sólidos totais pode variar muito entre a criação em confinamento, semelhante à criação suína, e à criação a pasto, em que o material apresenta mais matéria seca, porém menor carga orgânica devido à mistura com areia.

Na reutilização do material digerido dos substratos da pecuária, devem ser considerados os aspectos sanitários e o conteúdo elevado de nutrientes (nitrogênio e fosfato).

2.2.3 Co-substratos e co-digestão baseados nos resíduos agropecuários

Os substratos da agricultura e da pecuária, a princípio, são bons substratos para a co-digestão com resíduos sazonais da agroindústria, por exemplo. As silagens de plantas são apropriadas como substrato base para os reatores de biogás no caso de serem alimentados com co-substratos de ocorrência sazonal e para a neutralização de substratos com alto teor de amônia, como os já mencionados dejetos da avicultura.

O uso de co-substratos também é recomendável na digestão de esterco, para elevar a eficiência econômica. Prática realizada em 90% das 7.600 plantas de biogás na Alemanha, a co-digestão de biomassa dedicada com esterco e estrume pode aumentar o rendimento da produção de biogás em até quatro vezes.

Esterco e estrume têm, por característica, boa carga de microrganismos, alta quantidade de nutrientes e favorecem o efeito tampão, assegurando a estabilidade do processo anaeróbio na co-digestão com substratos sazonais e/ou volumes variáveis.

A utilização na agricultura do material digerido da co-digestão de resíduos vegetais com resíduos de origem animal ou municipal deve ser considerada, pois o material tem alta carga de nutrientes, porém faz-se necessária a higienização através de alguma das alternativas de tratamento térmico já apresentadas.

2.3 Substratos da indústria

Na maioria dos casos, o processamento de matérias-primas agrícolas resulta na produção de resíduos em forma líquida e sólida com boas características para a produção de biogás. Substratos sólidos e muitos dos líquidos são caracterizados pelo teor de umidade/sólidos totais (ST) e de fibras e minerais, entre 2 e 5% (vinhaça, soro de leite) a 95 e 100% (glicerina, torta de filtro da gordura).

Efluentes com baixo teor de sólidos geralmente se caracterizam por meio da DQO (demanda química de oxigênio) e DBO_5 (demanda bioquímica de oxigênio). Grandes diferenças entre DQO e DBO_5 indicam baixa capacidade de degradação dos substratos, sendo a DBO_5 o valor mais importante para os processos biológicos. Os valores nos efluentes variam de 1.000 mg DBO_5/L (indústria de laticínios) a mais de 20.000 mg DBO_5/L (cervejarias).

Grandes quantidades de resíduos orgânicos tipicamente são geradas em indústrias de:

- » Açúcar e Etanol (vinhaça, torta de filtro e bagaço);
- » Refrigerantes (efluentes e restos de produção);
- » Cervejarias (efluentes e resíduos, como bagaço de malte e restos de filtro);
- » Sucos e Vinhos (efluentes, lotes estragados e biomassas geradas na filtração);
- » Conservas e Frigoríficos (efluentes, resíduos e restos da produção);
- » Óleos e Margarinas (efluentes, torta de filtro de gordura e outros resíduos da produção);
- » Carne e Açougues (efluentes, sangue, intestinos, carne não comercializável e gordura);
- » Laticínios (soro de leite, lotes estragados e separador de gordura);
- » Amidos e Farinhas de cereais, mandioca, batatas (efluentes e restos da produção);
- » Panificação (efluentes da produção e resíduos da limpeza, lotes com falha, etc.);
- » Celulose, Papéis e Cartonagens (efluentes da produção);
- » Farmacêuticas (efluentes e resíduos com alto teor de substâncias biodegradáveis);
- » Café e Chás (efluentes e biomassas geradas na separação e na filtração, etc.);
- » Leveduras, Doces e outros produtos (efluentes da produção).

Vale ressaltar a possibilidade de co-digestão com diferentes resíduos, visando uma maior estabilidade do processo biológico.

Variações ou interrupções do processo de produção devem ser levadas em conta no planejamento da planta de biogás, tanto para substratos sazonais como não sazonais.

Na reutilização do material digerido, devem ser considerados os elevados riscos sanitários, caso se trate de substratos de açougues, da transformação de carne ou da produção de laticínios. Isso merece atenção especial quando esses substratos forem oriundos de processos sem pasteurização ou anteriores a ela.

A Tabela 5 apresenta as características relevantes de alguns substratos, possibilitando uma estimativa do potencial de produção do biogás e da geração de energia por unidade de matéria orgânica seca (SV). As variações devem-se aos diferentes tratamentos.

Tabela 5: Potencial de produção de biometano com os resíduos da indústria de alimentos

RESÍDUOS	ST (%)MASSA	SV/ST (%)	m ³ CH ₄ /t SV	m ³ CH ₄ /t _{sub*}
Vinhaça de Cana ¹	3 - 5	75 - 85	376	6
Bagaço de Cana ¹	60	93	330	281
Torta de filtro de Cana ⁴	25	70	262	47
Abacaxi, fábrica de conservas ⁴	15	96	358	52
Processamento de arroz ¹	91	82	56	41
Processamento de trigo ²	88	85	360	274
Polpa de Café ⁴	20	93	244	45
Polpa da laranja ³	12 - 30	94,5	227	24
Glicerina ¹	100	99,5	425	423
Rúmen/pança ¹ (Bovinos)	15 - 32	66 - 84	250 - 265	33 - 53
Conteúdos gastrointestinais (suínos) ²	15 - 30	85	278	97
EFLUENTES	DQO g/L	DQO % _{deg**}	m ³ CH ₄ /t DQO _{rem***}	m ³ CH ₄ /t _{sub*}
Processamento de abacaxi ⁴	5,5	85	289	1,6
Processamento de café ⁴	14,3	90	265	4,3
Destilaria de vinhaça ⁴	90	66	290	22
Cervejaria ²	5	85	340	1,6
Fábrica de laticínios ⁴	4	88	295	1,1
Matadouro ⁴	8	77	236	1,8

*Substrato **Degradável ***Removido

¹Fonte: Análises dos projetos de DBFZ

²Fonte: http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=8%2Cb&strsearch=&pos=left

³Fonte: Análises dos projetos da AD Solutions UG

⁴Fonte: Handreichung Biogasnutzung, 2004

2.4 Substratos dos resíduos sólidos urbanos

Os resíduos urbanos se caracterizam como uma mistura de resíduos sólidos de residências e os gerados nos serviços de limpeza urbana. A Tabela 6 apresenta possíveis composições de resíduo sólido urbano (RSU) da região de Blumenau (SC). Trata-se de uma estimativa realizada pela BN Umwelt.

Tabela 6: Potencial de produção de metano com resíduos municipais

PARÂMETRO	RESÍDUOS MUNICIPAIS (MISTURADOS)
Sólidos Totais (ST)	30 – 40%
Sólidos Totais Voláteis (SV)	50 – 60%
Impurezas (sem sedimentos)*	10 – 20%
Potencial de produção de biogás*	450 – 600 Nm ³ /t SV
Porcentagem de Metano*	60 – 65% CH ₄

* Os valores correspondem às estimativas adaptadas à realidade do Brasil, por BN Umwelt GmbH.

Fonte: Tekoa Engenharia e Consultoria LTDA (2011) por carga de BN Umwelt GmbH

Os resíduos brasileiros, se comparados aos alemães, têm porcentagem maior de material orgânico (até 60% SV), o que, juntamente com o clima tropical, os torna mais úmidos, mesmo com coletas mais frequentes.

A reutilização do material digerido, resultante do tratamento anaeróbico de resíduos municipais com baixo ou nenhum grau de separação, é proibida na Alemanha, devido à presença de impurezas, tais como metais, vidros e metais pesados. Esse material digerido é direcionado a aterros sanitários específicos ou incinerados após a desidratação. No caso de substratos separados na fonte (nos domicílios), o material digerido pode ser utilizado como fertilizante após a higienização.

2.4.1 Resíduos orgânicos municipais coletados separadamente

Os resíduos orgânicos urbanos na Alemanha são separados na fonte, ou seja, nas próprias residências, e, por suas características como substrato, podem ser tratados anaerobicamente. Se esses forem misturados com resíduos de silvicultura, parques ou zonas verdes da urbanização, o tratamento anaeróbico só é possível com baixa porcentagem de lignina. Caso contrário, deve-se realizar uma compostagem (material estruturante).

O grau da impureza depende principalmente da origem dos resíduos (coleta residencial ou coleta seletiva nos grandes geradores – restaurantes e mercados). A Tabela 7 apresenta a composição dos resíduos orgânicos armazenados e coletados separadamente dos demais resíduos.

A reutilização dos materiais digeridos como fertilizante ou adubo/composto na agricultura, é possível com uma boa separação dos substratos, ou seja, com baixo grau de impurezas, e após higienização.

Tabela 7: Potencial de produção de metano com resíduos orgânicos.

**Os dados correspondem às estimativas de BN Umwelt, adaptadas à realidade brasileira.*

Fonte: BN Umwelt GmbH

PARÂMETRO	RESÍDUOS ORGÂNICOS (SEPARADOS)
Sólidos Totais (ST)	30 – 40%
Sólidos Totais Voláteis (SV)	70 – 80%
Impurezas (sem sedimentos)*	1 – 5%
Potencial de produção de biogás*	350 Nm ³ /t SV
Porcentagem de Metano*	60 – 65% CH ₄

2.4.2 Resíduos orgânicos de grandes geradores coletados separadamente

Resíduos de cozinhas, de cantinas, de feiras ou de alimentos não apropriados para o consumo (vencidos) são ideais para tratamento no digestor, devido aos seus altos teores de gorduras, carboidratos e proteínas, bem como por sua alta umidade. A Tabela 8 apresenta a composição desses resíduos.

Tabela 8: Potencial de produção de metano com resíduos de alimentos.

**Os dados correspondem às estimativas da BN Umwelt, adaptadas à realidade brasileira.*

Fonte: BN Umwelt GmbH

PARÂMETRO	RESTOS DE ALIMENTOS
Sólidos Totais (ST)	15 – 20%
Sólidos Totais Voláteis (SV)	85 – 95%
Impurezas (sem sedimentos)*	5 – 10%
Potencial de produção de biogás*	850 Nm ³ /t SV
Porcentagem de Metano*	55 – 60% CH ₄

O destino do material digerido depende do teor das impurezas (vidro, cerâmica, metais, etc.), e sua utilização como fertilizante exige a higienização.

2.4.3 Gorduras orgânicas de caixa de gordura

As gorduras em solução nos efluentes, como as das cozinhas em geral, são separadas na caixa de gordura, visando sua segregação do efluente, diminuindo, assim, a necessidade de manutenção da canalização. A composição desse material é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9: Potencial de produção de metano com o conteúdo da caixa da gordura

**Os dados correspondem às estimativas da BN Umwelt, adaptadas à realidade brasileira.*

Fonte: BN Umwelt GmbH

PARÂMETRO	RESÍDUOS DA CAIXA DE GORDURA
Sólidos Totais (ST)	25 – 45%
Sólidos Totais Voláteis (SV)	90 – 95%
Impurezas (sem sedimentos)*	< 1%
Potencial de produção de biogás*	1.300 Nm ³ /t SV
Porcentagem de Metano*	50 – 60% CH ₄

O conteúdo das caixas de gordura é ideal para a digestão anaeróbia, por seu alto valor energético, podendo ser utilizada na co-digestão junto a substratos menos energéticos. Os co-substratos devem ter boas características de tampão (p. ex. lodo fecal, lodo de ETE ou esterco), pela possível acidificação no processo. Na Alemanha, as gorduras são aplicadas como co-substratos na digestão de lodo de ETE, com o objetivo de incrementar a produção de biogás.

2.5 Substratos no Setor de Esgotamento Doméstico

No Brasil, o tratamento anaeróbio primário de efluentes (UASB ou Lagoas anaeróbias cobertas) representa o estado da arte, sendo o metano produzido possível de utilização energética. Outra fonte com potencial de produção de metano são os lodos gerados no processo de tratamento de esgoto sanitário, caso tenham valor energético suficiente (> 75% SV/ ST). Ressalta-se que isso é inaplicável ao tratamento de água potável (ETAs). Na Tabela 10, pode-se observar a composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbios, ao se tratar o esgoto doméstico, e nos digestores de lodo.

Tabela 10: Composições típicas do biogás produzido nas ETEs.

PARÂMETRO	UNIDADE	COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA TÍPICA	
		REATORES ANAERÓBIOS	DIGESTORES DE LODO
Metano - CH ₄	%	60 a 85	60 a 70
Gás carbônico - CO ₂	%	5 a 15	20 a 40
Monóxido de carbono - CO	%	0 a 0,3	-
Nitrogênio - N ₂	%	10 a 25	< 2
Hidrogênio - H ₂	%	0 a 3	-
Sulfeto de hidrogênio - H ₂ S	ppmv	1.000 a 2.000	até 1.000
Oxigênio - O ₂	%	Traços	-

Fonte: Lobato, 2011.

Segundo Noyola et al. (2006) apud Lobato (2011), o biogás de reatores do tratamento de esgotos domésticos apresenta concentrações de metano entre 70 e 80%, de nitrogênio variando de 10 a 25% e de dióxido de carbono entre 5 e 10%.

Geralmente, o esgoto tratado no reator UASB passa por um tratamento secundário, para reduzir a matéria orgânica e os nutrientes, além de um tratamento terciário, para a desinfecção antes da descarga. O lodo sanitário digerido normalmente é desidratado antes de ser direcionado ao aterro sanitário.

2.5.1 Esgoto Sanitário como substrato de produção de biogás

Segundo Von Sperling (2005), os esgotos sanitários no Brasil contêm aproximadamente 99,9% de água e 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, além de microrganismos. A característica específica dos esgotos varia entre as áreas urbanas de acordo com os hábitos, situação social e econômica da população atendida, contribuição da indústria, etc. Na Tabela 11, são apresentadas as características físico-químicas típicas dos esgotos sanitários.

Tabela 11: Características físico-químicas dos esgotos sanitários.

PARÂMETRO	UNIDADE	PER CAPITA (G/HAB.D)		CONCENTRAÇÃO	
		FAIXA	TÍPICO	FAIXA	TÍPICO
ST – Sólidos Totais	mg ST/L	120 – 220	180	700 – 1.350	1.100
SV – Sólidos Totais Voláteis	mg SV/L	25 – 60	50	165 – 350	320
DBO ₅ – Demanda bioquímica de O ₂	mg O ₂ /L	40 – 60	50	250 – 400	300
DQO – Demanda química de O ₂	mg O ₂ /L	80 – 120	100	450 – 800	600
N _{total} – Nitrogênio Total	mg N/L	6 – 10	8	35 – 60	45
P _{total} – Fósforo Total	mg P/L	0,7 – 2,5	1,0	4 – 15	7

Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2005.

A produção de biogás, a partir dos esgotos sanitários, depende da quantidade de matéria orgânica presente no esgoto e das características do reator do tratamento. O processo de tratamento anaeróbio, nesses casos, é capaz de remover entre 60 e 70% da DQO. Nessas condições, segundo Metcalf & Eddy (2003):

*A produção de gás metano CH₄ por quantidade de DQO removida é de 0,35 m³ CH₄/kg DQO_{removida}**

A reutilização de esgoto anaerobicamente tratado exige que esse passe por um tratamento avançado e por uma higienização final e somente é possível para objetivos que não exijam potabilidade (irrigação ou lavagem nos processos industriais).

2.5.2 Lodos gerados no tratamento de esgotos sanitários como substrato

O lodo é um dos subprodutos gerados no tratamento dos esgotos, podendo ser dividido em lodo primário, resultante dos processos que recebem o esgoto bruto; e lodo secundário, produzido na etapa biológica do processo. As características de ambos os lodos são apresentadas na Tabela 12.

Uma característica especial das regiões sem serviço de redes de esgoto são os lodos fecais dos tanques sépticos que são retirados com caminhão de sucção e necessitam de tratamento. A composição específica de lodos fecais varia e, geralmente, esses são anaerobicamente estabilizados, o que significa baixa concentração de matéria orgânica (sólidos totais voláteis – SV) em relação aos Sólidos Totais (ST). Por outro lado, esses lodos têm o potencial de servir como co-substrato para estabilizar a degradação anaeróbia de substratos com maior valor energético.

Tabela 12: Origem e características dos lodos gerados no tratamento de esgotos.

SUBPRODUTO	ORIGEM	CARACTERÍSTICAS PARA DIGESTÃO
Lodo primário biologicamente não estabilizado	Decantador primário ou caixa de gordura e tanque com limpeza frequente (dias, semanas)	As condições (tempo da permanência, temperatura e degradabilidade) não proporcionam a estabilização anaeróbia, o lodo tem alto valor energético e apresenta o substrato ideal para digestão anaeróbia.
Lodo secundário (biomassa) biologicamente não estabilizado SV/ST > 0,7	Lodo ativado do tipo convencional, alta carga Biofiltro aeróbio de alta carga	Os compostos orgânicos absorvidos nos lodos (biomassa) gerados no tratamento com alta carga (pouco tempo da retenção celular) ainda não estão digeridos, apresentando alto valor energético para a digestão anaeróbia
Lodo primário ou secundário estabilizado SV/ST < 0,7	Tanque séptico, tanque Imhoff, UASB, RAC e o lodo ativado de aeração prolongada e reatores de baixa carga e de lagoas de tratamento	Digestão anaeróbia: O tempo da permanência em condições anaeróbias é suficiente para proporcionar a digestão dos compostos orgânicos. Estabilização aeróbia: a biomassa gerada está mineralizada devido à baixa carga orgânica. Não aptos como substratos para a produção de biogás (eventualmente co-substratos).

Fonte: *Elaboração própria.*

Na digestão anaeróbia do lodo, segundo a norma alemã DWA M 363 (2010), o rendimento do biogás, as taxas de sua produção e a sua qualidade dependem de condições inerentes aos processos, além da característica dos substratos, principalmente quanto à carga orgânica. Essas características, por sua vez, dependem das substâncias que compõem o esgoto e do tipo de processo empregado no tratamento, como é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13: Características de geração de lodos não estabilizados de acordo com a origem.

SISTEMA	TEOR DE SÓLIDOS SECOS (%)	MASSA DE LODO (g SS/hab.d)	VOLUME DE LODO (L/hab.d)
Lodo fecal de tanques sépticos	3 - 6	20 - 30	0,3 - 1,0
Tratamento primário convencional	2 - 4	35 - 45	0,9 - 2,0
Lodos ativados convencionais	1 - 2	60 - 80	3,1 - 8,2

Fonte: *Adaptado de Von Sperling, 2005.*

Com relação ao teor de sólidos totais (ST), os lodos de esgoto têm as seguintes características:

- >> Lodo primário (do decantador primário), ca. 30 – 45g ST/hab.d
- >> Lodo em excesso do lodo ativado, ca. 30 – 40g ST/hab.d
- >> Lodo bruto (primário e secundário), ca. 60 – 85g ST/hab.d.

O rendimento do biogás depende da contribuição de lodos com alto valor energético, ou seja, prioritariamente lodos primários que possuem uma relação ST/SV > 70%. Nas ETEs, entretanto, esses lodos são misturados com os lodos secundários que passaram pela estabilização aeróbica e têm um valor energético mais baixo. Nessas condições, segundo Metcalf & Eddy (2003):

A produção de gás metano CH₄ por quantidade de Sólidos Totais Voláteis removidos está entre 0,72 – 1,12m³ CH₄/ kg SVremovida.

A reutilização de lodo sanitário digerido é crítica por causa da possível permanência de microrganismos patogênicos, de metais pesados e de outros contaminantes.

2.6 Referências

- Andreoli, C. V.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Ufmg, 2001. 484 p. [Princípio do tratamento biológico de águas residuárias].
- EurobservER, 2012, The state of renewable Energies in Europa, Edition 2012 <http://www.eurobserv-er.org/downloads.asp>
- BMU, 2011: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [atual BMUB], Erneuerbare Energien in Zahlen, Nationale und internationale Entwicklung, Erfurt, 2011. www.renewable-energy-concepts.com/.../broschuere_ee_zahlen_2011.pdf
- European Biogas Association, 2011, Ramanauskaite; Biogas Market in Europe, Athen. www.biogasin.org/files/pdf/HLC_athens/03_R.Ramanauskaite_PresentationBiogasIN.pdf
- AGEE-Stat.2/2014; Erneuerbare Energien in Deutschland 2013, Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energien Statistik und Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/A/agee-stat-grafiken-und-tabellen,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- DWA-M 363 (novembro de 2010): Origem, Tratamento e Utilização do Biogás. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- LfL Bayern Biogausbeuten verschiedener Substrate www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=8%2Cb&strsearch=&pos=left;
- Handreichung Biogasnutzung, Institut für Energetik und Umwelt GmbH. BVA Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, 2004
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Darmstadt, 2005.
- Lobato, Livia C. S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Doutorado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. UFMG, 2011.
- Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and reuse. 4ª Ed. New York, 2003.
- Tekoa. Engenharia e Consultoria LTDA [2011], Diagnóstico e estudo de alternativas para aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos, Produto 3 – Prognóstico Viabilidade técnica e econômica, 2011, Blumenau.
- Von Sperling, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG, 2005. 452 p.

3

TECNOLOGIAS DIFUNDIDAS PARA TRATAMENTO ANAERÓBIO COM UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS

O descarte dos substratos orgânicos sem o devido tratamento causa enormes impactos negativos, pois os ambientes naturais, tanto terrestres quanto aquáticos, contam com limitada capacidade de autodepuração e a degradação não controlada libera gases de efeito estufa, provoca a eutrofização e resulta em uma série de outros problemas ambientais e na saúde humana. O tratamento através da digestão anaeróbia se mostra uma solução atrativa para o Brasil, por ser um tratamento aliado à produção energética aplicado em um país com condições climáticas favoráveis. Ressalta-se, entretanto que, em muitos casos, o processo anaeróbio não é suficiente para atingir os padrões de lançamento brasileiros, sendo necessário um pós-tratamento.

O Brasil é experiente no uso da digestão anaeróbia no tratamento do esgoto doméstico (Figura 4), dos resíduos da indústria e da agropecuária mesmo que sem o aproveitamento de biogás gerado. Apesar disso, o setor de resíduos sólidos ainda tem muito potencial para ser desenvolvido e o aproveitamento da energia gerada, bem como do substrato digerido, pode contribuir para valorizar o investimento nas tecnologias de tratamento.

Figura 4: UASB da ETE Feira de Santana, medição de biogás ETE para tratamento de esgoto de 100.000 hab., projeto P&D, potencial de aproveitamento de biogás.



Fonte: *Rotária do Brasil*.

Figura 5: Digestor com aproveitamento da energia nos EUA Harvest Energy Garden de Parque Walt Disney, tratamento de esgotos sanitários e restos de comida.



Fonte: *Biogas Roadmap*.

A seguir, tem-se a descrição das tecnologias mais usuais para cada setor com destaque para suas particularidades.

3.1 Tipos de reatores de tratamento anaeróbio e condições básicas

Os reatores de mistura contínua (CSTR – Continuous Flow Stirred Tank Reactor) são a tecnologia padrão para a digestão anaeróbia de substratos mais densos (ST de 15%), com características favoráveis para bombeamento e mistura. Essa tecnologia é mais aplicada nos setores da agropecuária, da indústria e no tratamento de lodos sanitários, sendo utilizada com menor frequência no tratamento de resíduos orgânicos urbanos, pois a tecnologia exige substratos praticamente livres de impurezas e suficientemente úmidos

- » CSTR versão básica: especialmente empregados para o tratamento de dejetos animais, têm construção, equipamentos, operação e manutenção relativamente simples.
- » CSTR versão avançada: são utilizados para substratos complexos, com altas cargas orgânicas e têm processo de construção mais elaborado, com reatores mais altos e misturadores centrais, necessitando de um maior investimento.

Além do CSTR com processo anaeróbio completo, existem os CSTR bifásicos, nos quais o processo ocorre separadamente em duas etapas. Uma opção é realizar a fase de hidrólise em um pré-digestor e a fase de metanogênese no digestor principal, permitindo um melhor controle operacional para substratos com alto valor energético. Outra possibilidade é a realização de uma pós-digestão, que fornece ganhos de energia e possibilita menores tempos de retenção no digestor principal.

As lagoas anaeróbias cobertas são fáceis de serem construídas e estão sendo utilizadas no Brasil para o tratamento de efluentes provenientes da agropecuária, da indústria (laticínios, carne e outros) e do tratamento do esgoto sanitário. Geralmente não são capazes de tratar completa e adequadamente os efluentes e, em muitos casos, não apresentam cobertura eficaz, deixando escapar gás metano para a atmosfera.

Algumas abordagens alternativas buscam combinar as vantagens econômicas das lagoas anaeróbias em clima quente a uma melhor eficiência do tratamento e da produção de biogás. Dividem-se em dois tipos:

- » Lagoas com misturador: podem representar uma alternativa ao reator de mistura contínua (CSTR) e um upgrading às lagoas anaeróbias existentes.
- » Lagoas intensificadas (AOPR – Anaerobic Organized Pond Reactor): possibilitam processos anaeróbios mais eficientes pela aplicação do efluente em toda área do fundo.

No setor agropecuário brasileiro, a maioria das lagoas anaeróbias necessita de melhorias para que o biogás possa ser aproveitado energeticamente. No setor de tratamento de esgotos, por sua vez, as lagoas vêm sendo substituídas pelos reatores UASB, apresentados a seguir.

Os reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) são os reatores mais compactos utilizados para o tratamento de efluentes industriais e, em locais de clima quente, também do esgoto sanitário. O UASB e suas variações técnicas, como o RALF (Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado), têm como características básicas: o tratamento do efluente com baixo tempo de retenção hidráulica (4-12h), a entrada de efluente no fundo do reator, onde se forma um filtro biologicamente ativo de grânulos (lodo), e o fluxo ascendente à parte superior, onde se separam a biomassa e o biogás, através do separador trifásico.

Vale ressaltar que o Brasil é um dos países com mais experiência na utilização de UASB para o tratamento de esgotos sanitários. Em países de clima frio, tais reatores são utilizados somente no tratamento de efluentes industriais com alta carga orgânica e necessitam de aquecimento para uma operação ótima.

Os reatores de digestão anaeróbia seca têm importância no tratamento de grandes volumes de substratos com pouca umidade, principalmente resíduos sólidos municipais e industriais.

Esses reatores dividem-se em dois tipos:

- » O reator descontínuo de digestão seca é um reator do tipo garagem, adequado para substratos com ST entre 35 e 45% e suportam altas porcentagens de impurezas.
- » O reator contínuo de digestão seca trabalha com substratos com ST de 25 a 35%, com a opção de uma construção horizontal, promovendo deslocamento do substrato por meio de misturadores; ou vertical, podendo ou não possuir sistema de mistura, no qual o deslocamento ocorre via recirculação do material (p. ex. sistema Dranco) ou por agitação via biogás comprimido (p. ex. sistema Valorga).

A condição básica para a classificação dos processos anaeróbios é a temperatura, visto que os processos metanogênicos dependem do calor. Geralmente, tais processos são realizados por meio de digestão mesofílica, com temperaturas em torno de 35°C e mesmo com as condições climáticas do Brasil, faz-se necessário um aquecimento adicional do reator ou do seu afluente, bem como o isolamento térmico do reator, para manutenção dessa temperatura. Em alguns casos, nos quais se faz uso de substratos já em altas temperaturas (p. ex. indústria alimentícia), o aquecimento pode ser eliminado.

Sem isolamento térmico, até mesmo nas áreas mais quentes do Brasil, raramente é possível manter a temperatura dos reatores constante e acima de 20-25°C. Por esse motivo, têm-se também no Brasil reatores operados a temperaturas psicrófilicas, ou seja, abaixo de 25°C. A digestão psicrófila é aplicada em lagoas de tratamento e em UASB, que tratam os esgotos sanitários, e envolve maior tempo

no reator e menor geração de gás, causada pela menor eficiência de decomposição. Os digestores anaeróbios de lodo no Brasil também funcionam nessa temperatura.

Já a digestão termofílica, com temperaturas entre 50 e 55°C, é indicada para grandes vazões, substratos complexos e não higienizados e possibilita maiores taxas de degradação com menores tempos de retenção, sendo indispensáveis o isolamento e o aquecimento do reator e exigem maior controle do processo. Substratos com componentes inibidores, como altas concentrações de amônia, não são adequados para o processo termofílico.

3.2 Produção de biogás com substratos da agropecuária

Tabela 14: Tecnologias para produção de biogás na agropecuária.

Para os substratos da produção agropecuária, especialmente esterco e silagem de milho, o reator de mistura contínua (CSTR) e as lagoas cobertas, principalmente as lagoas anaeróbias com misturador, apresentadas anteriormente, são as tecnologias mais relevantes. Na escolha da técnica, devem-se considerar as características do substrato, pois técnicas de mistura, bombeamento, entrada e retirada de material podem exigir alterações. Ao utilizar uma significativa massa de substrato fibroso, por exemplo, há necessidade de adaptação das técnicas de bombeamento, enquanto substratos que são rapidamente degradáveis necessitam de maior atenção no controle do processo. Na Tabela 14, são apresentados os requisitos, as vantagens e as desvantagens dessas tecnologias para os substratos da agropecuária.

	CSTR VERSÃO BÁSICA	LAGOA ANAERÓBIA COM MISTURADOR	LAGOA ANAERÓBIA COBERTA (CLÁSSICA)
Requisitos	Substratos orgânicos líquidos e pastosos, ou sólidos que se tornam líquidos no processo da digestão anaeróbia, com concentração de Sólidos Totais (ST) de:		
	ST < 20%	ST < 15%	ST < 5%
Vantagens	Tecnologias de baixo custo para tratamento e aproveitamento energético de resíduos agropecuários. Equipamentos simples, implementáveis em todo o mundo. Preparação e mistura do substrato relativamente fáceis de executar.		
	Tecnologia comprovada de geração de biogás com substratos agropecuários. Projeto e construção com valores padrões. Possível controle eficiente do processo por meio de mistura otimizada, aquecimento e isolamento do reator.	Possível adaptar as lagoas existentes para o aproveitamento de biogás. Sem limitação de tamanho. Volumes grandes oferecem maior estabilidade para o processo.	Método simples estabelecido e comprovado. Custos relativamente baixos, ampliável em etapas no método intensivo. Projeto e construção com valores padrões.

	CSTR VERSÃO BÁSICA	LAGOA ANAERÓBIA COM MISTURADOR	LAGOA ANAERÓBIA COBERTA (CLÁSSICA)
Desvantagens	Limite de aplicação para substratos com altos teores de impurezas, de natureza flutuante ou ricos em fibras.		
	Manutenção complexa dos equipamentos. Maiores custos de operação e manutenção se comparados com os das lagoas.	Separação de sólidos necessária. Custos elevados com a membrana de cobertura. Membrana única oferece pouca resistência, podendo rasgar caso não esteja sempre cheia de gás. Em comparação com CSTR: mistura limitada; limitação de fixação de agitadores; grandes superfícies; pequenas profundidades. Demanda maior de espaço e tempo de construção.	Em comparação com os CSTR, com as lagoas com misturador e com lagoas intensificadas, têm menor eficiência de degradação e menor produção de biogás.

3.2.1 Reator de mistura contínua (CSTR), versão básica

Para o tratamento de resíduos da agropecuária, existe uma série de diferentes possibilidades de equipamentos e configurações dos reatores de mistura contínua. A descrição aqui apresentada concentra-se na mono-digestão e na co-digestão de dejetos de animais, uma vez que é a aplicação mais importante dessa tecnologia no Brasil. As Figuras 6 e 7 apresentam a vista interna e externa, respectivamente, de um reator de mistura contínua (CSTR) típico na Alemanha para digestão de silagem de milho.

Figura 6: CSTR com misturadores tangenciais.

Figura 7: CSTR (silagem de milho – 700 kW), Alemanha.

Preparação do substrato: aqueles substratos que não estão preparados para bombeamento ou mistura devem ser triturados e submetidos à mistura/diluição com: i) água, ii) resíduos líquidos ou iii) efluente líquido do próprio digestor. Os substratos vegetais se liquidificam durante o processo, sendo suficiente uma trituração simples.



Fonte: Farmatic GmbH.



Fonte: Rotária do Brasil.

Construção e equipamento: para o tratamento de resíduos da agropecuária, são utilizados digestores CSTR na versão básica, com misturadores laterais, submersíveis ou tangenciais (Figura 6), em que o armazenamento de biogás está conectado diretamente como cobertura no topo do reator. Geralmente opta-se por essa construção devido aos custos, pois digestores CSTR com misturador central podem exigir maior investimento específico (seção 2.3.1). Nos reatores maiores, a cobertura do topo (geralmente inflada pelo acúmulo de gás) deve ser feita de membrana dupla para proteção contra a ação dos ventos (Figura 8 e Figura 9). No caso de coberturas menores ou de locais bem protegidos contra o vento, uma membrana simples fixada por cintas é suficiente. Nas coberturas de membrana dupla, a membrana interna flexível armazena o gás e a externa faz a proteção contra o vento, ficando inflada com ar injetado entre as duas membranas. À medida que há geração de biogás, a membrana interna se expande expelindo o ar entre as membranas.

Para maior eficiência, o processo deve ser mesofílico ou termofílico, com necessidade de isolamento do reator e aquecimento constante, mediante calefação interna ou trocadores de calor. Os armazéns de esterco já existentes podem ser utilizados como armazém de matéria digerida.

Para os digestores que utilizam esterco como substrato principal e para plantas menores, em geral, são utilizados poucos equipamentos de controle. Um exemplo é a instalação de registro de gaveta manual em vez de um pneumático com controle central, exceto em caso de co-substratos com maior potencial energético, quando devem ser considerados acessórios mais operacionais e, em alguns casos, adicionais.

Figura 8: CSTR com misturadores tangenciais e gás armazenado .

Figura 9: Suprimento de ar para a cúpula de biogás.



Fonte: DBFZ.

Eficiência: Para os substratos da agropecuária, o usual são cargas volumétricas de 2 a 4 kg SV/m³ nos digestores, com as instalações adequadas às cargas previstas. O tempo de retenção hidráulica é de mais de 20 dias e depende do grau de degradabilidade e da temperatura no reator. Já a produtividade gira entre 0,7 e 3 m³ biogás/m³ digestor *d dependendo do substrato utilizado.

Custos: Os custos de investimento e operação variam dependendo do tamanho do digestor, do substrato utilizado e sua preparação, além da técnica de implementação (custos de operação). Como base, podem-se utilizar os valores típicos aplicados na Alemanha, onde o investimento, incluindo a utilização do gás, é de cerca de 7.000,- €/kW para digestores no tamanho de 50-75 kW e vai diminuindo até estações da ordem de 1 MW a cerca de 3.500,- €/kW.

Tamanho das plantas: Os digestores de mistura contínua, versão básica, são aptos para tamanhos acima dos 15kW (armazéns de esterco transformados). Na Alemanha, são encontrados digestores a partir de 50kW.

Vida útil: Geralmente, as construções, tais como os reatores e prédio da operação, têm uma vida útil de 20 a 25 anos, enquanto os equipamentos contam com uma vida útil de aproximadamente 10 anos.

Tempo de projeto: O projeto técnico pode ser elaborado em 6 meses, desde que o financiamento, a licença de construção, o controle técnico-estrutural e os contratos para o tratamento de resíduos e para a produção de energia não façam parte desse cálculo.

Tempo de construção: No caso de um CSTR na versão básica, com bom preparo, a construção pode ser realizada em 6 meses.

Período de comissionamento: O start up biológico pode durar menos de 3 meses, por meio da utilização de inóculo ativo de uma usina já em funcionamento que apresente parâmetros operacionais parecidos. No caso do esterco bovino como inóculo, a fase inicial demora de 3 a 6 meses e, com utilização de diferentes substratos como inóculo, o arranque é mais lento.

Maturidade da tecnologia/Difusão internacional: O CSTR é a tecnologia mais utilizada para a digestão de resíduos da agropecuária no quadro mundial e na Alemanha, por exemplo, representa 90% das unidades, sendo considerada a tecnologia padrão para o setor.

3.2.2 Lagoas anaeróbias com misturador

Esse tipo de lagoa representa uma adaptação dos reatores de mistura contínua e apresenta maior eficiência na produção de biogás, se comparada às lagoas clássicas existentes. Ao contrário dos modelos clássicos, as lagoas anaeróbias com misturador são constituídas por uma lagoa coberta com mistura mecânica, sem possibilidade de isolamento térmico, limitando sua aplicação a zonas quentes e com nível freático profundo (redução da perda de calor). Recomenda-se a utilização de trocadores de calor para manutenção da temperatura de reação.

Preparação do substrato: As mesmas condições dos digestores de mistura contínua de versão básica são válidas, sendo possível utilizar-se uma série de substratos, preparados e misturados com resíduos agropecuários para chegar a uma concentração de ST de 10 a 15%.

Construção e equipamento: A lagoa anaeróbia com misturador, geralmente, conta com uma superfície retangular e a seção transversal tem a forma de base piramidal invertida. A inclinação das paredes depende das características do solo e a vedação da lagoa se dá por meio de uma geomembrana (HDPE), cobrindo o fundo e paredes da construção (Figura 10).

Figura 10: Lagoa com misturador na fase da instalação.



Fonte: Suma GmbH

Figura 11: Lagoa para dejetos suínos e resíduos de matadouro.

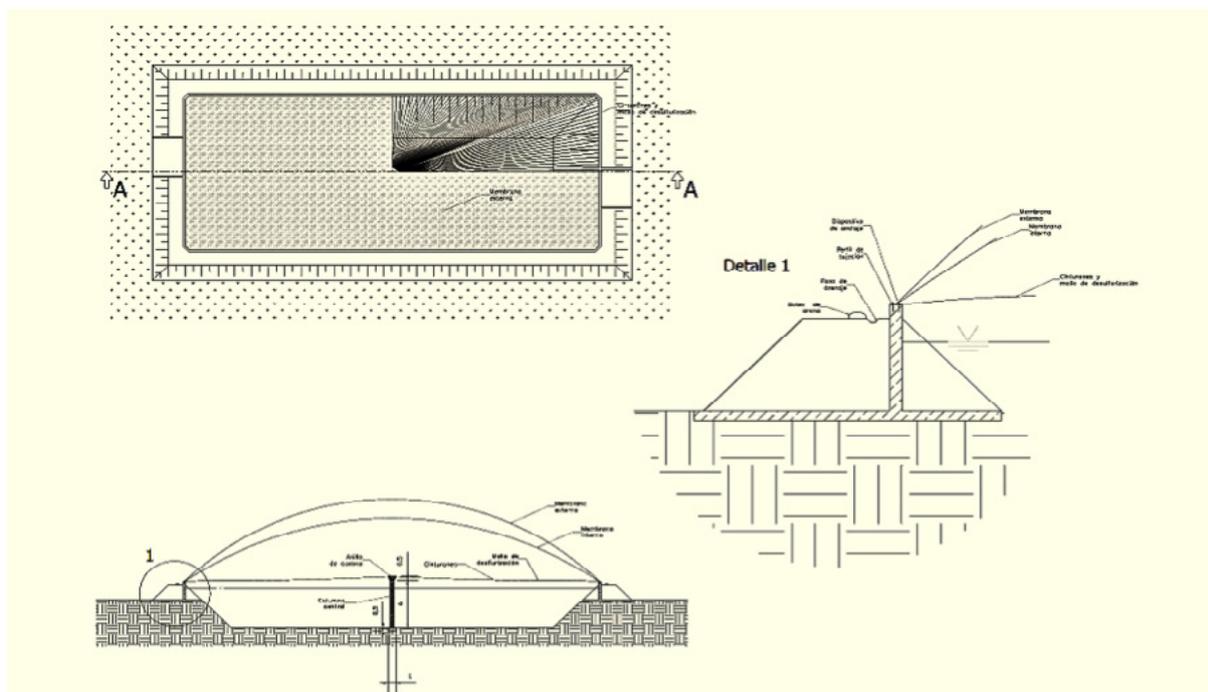


Fonte: AD Solutions UG.

As lagoas anaeróbias com misturador são revolvidas por meio de técnica convencional (misturadores ou bombas de circulação). As lagoas mais profundas apresentam uma melhor relação superfície/profundidade para uma circulação eficiente. A Figura 12 apresenta um esquema da tecnologia.

Para obter-se uma temperatura de processo estável, podem ser utilizados trocadores de calor externos ou tubulações de aquecimento interno (de instalação mais complexa). Todos os outros equipamentos, como por exemplo, as estações de bombeamento, o equipamento da trituração e da separação de substrato e tanques de armazenamento são equivalentes aos utilizados no sistema CSTR convencional.

Figura 12: Desenho de uma lagoa anaeróbia com misturador .



Fonte: AD Solutions UG.

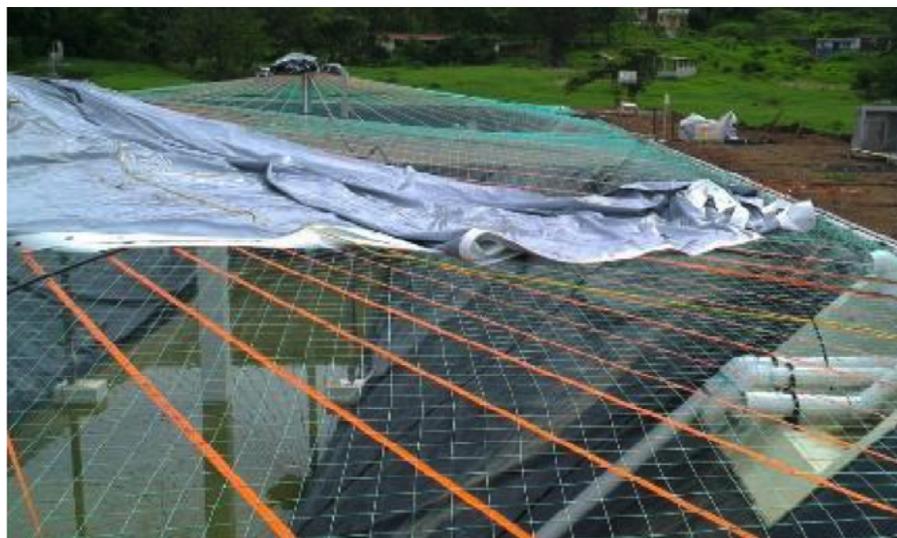
Eficiência: Com a condição de uma circulação quase total com mistura aplicada, percebe-se uma eficiência comparável à de um CSTR, variando entre 0,7 e $> 3 \text{ m}^3 \text{ Biogás}/(\text{m}^3 \text{ lagoa} \cdot \text{d})$. Essa eficiência, obviamente, depende da temperatura ambiente, da potência do trocador de calor (energia térmica disponível) e do substrato utilizado.

Custos: Além dos trabalhos de terraplanagem, a instalação da geomembrana e da membrana de cobertura e a fundação para a fixação da cobertura devem ser levadas em consideração, com custos entre 30 e 70% do total de um CSTR convencional. Partindo da experiência de instalações na Alemanha, pode-se dizer que a tecnologia de lagoa tem uma vantagem de custo de 5 a 11% em comparação a um CSTR convencional. Ressalta-se que os custos do reator representam, em média, cerca de 20% do investimento em uma usina de biogás.

Tamanho, vida útil, tempo de projeto, construção e comissionamento: Para essa tecnologia, há poucas diferenças em comparação ao digestor de mistura contínua (versão básica). A Figura 13 ilustra uma lagoa com misturador em construção.

Maturidade da tecnologia/Difusão internacional: As lagoas anaeróbias cobertas com misturador são muito comuns e representam o estado da arte em países com climas tropicais, como o Brasil, combinando vantagens das lagoas cobertas com as do CSTR.

Figura 13: Lagoa com misturador em construção.

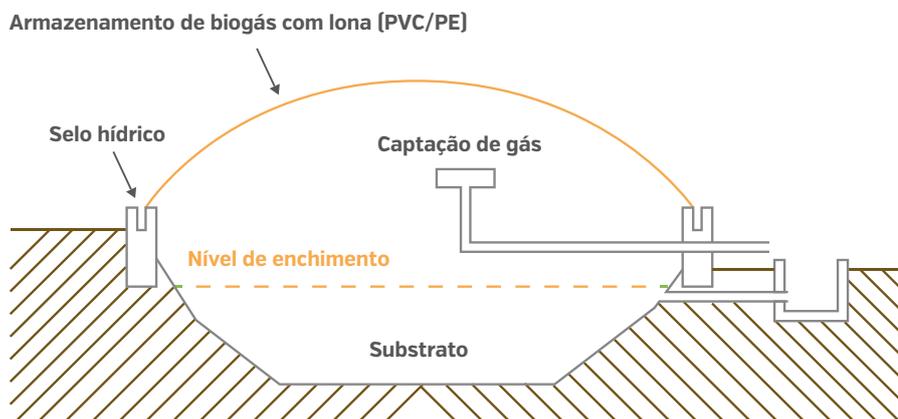


Fonte: AD Solutions UG.

3.2.3 Lagoas anaeróbias cobertas

Assim como no tratamento de esgoto doméstico, há grande experiência no Brasil no tratamento de efluentes da agropecuária e da indústria de alimentos com lagoas anaeróbias cobertas de simples construção, para os quais há fornecedores comerciais no mercado. Um esquema e um exemplo da tecnologia podem ser observados nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

Figura 14: Lagoa anaeróbia coberta.



Fonte: Oliveira et al., 2006.

Esses sistemas podem receber somente efluentes praticamente livres de sólidos ($ST < 5\%$), o que significa, para dejetos, a necessidade de uma separação de fase, em que somente os líquidos são direcionados à lagoa, enquanto os sólidos podem ser encaminhados para compostagem. No caso de esterco, os efluentes tratados das lagoas são utilizados na agricultura como fertilizante, sem necessidade de higienização.

Figura 15: Lagoas cobertas de dejetos suínos.



Fonte: *Rotária do Brasil.*

O problema das lagoas se encontra geralmente em sua manutenção, pois não há, no Brasil, serviço especializado. Um exemplo é a dificuldade encontrada para remoção da cobertura que reserva o gás quando da manutenção interna ou da retirada de lodo acumulado. As membranas simples rasgam facilmente e devem estar infladas todo o tempo. Isso é controlado por uma válvula na membrana, que continuamente solta pequenas quantidades de metano para o ajuste da pressão.

Uma manutenção mais eficiente e maiores rendimentos (produção de biogás por quantidade de substrato) são obtidos nas lagoas com misturador (Seção 2.2.2), já que nelas podem ser tratados substratos com teor de sólidos mais altos (ST de 10 a 15%). Para resíduos líquidos (ST < 5%), a melhor alternativa são as lagoas anaeróbias intensificadas (Seção 2.3.2).

3.3 Produção de biogás com resíduos e efluentes da indústria alimentícia

Para a digestão desses substratos utilizam-se, principalmente, reatores de mistura contínua, que são adequados para substratos bombeáveis e misturáveis (resíduos de açougues, restos de fruta, etc.), desde que estejam livres de impurezas.

A digestão de resíduos orgânicos industriais geralmente é feita com a co-digestão de dejetos da criação de animais e vice-versa. A co-digestão é importante para o setor industrial, pois geralmente, os resíduos gerados em suas atividades são sazonais e os dejetos reduzem essa interferência na produção de biogás. Para o setor agrícola, esses resíduos da indústria auxiliam na estabilização do processo de digestão de dejetos. Além disso, a co-digestão pode ser atrativa economicamente. Essa interação entre esses setores dificulta diferenciar os processos entre si, entretanto, o tratamento de resíduos industriais demanda equipamentos de maior qualidade, devido à necessidade de um maior controle do processo.

Uma alternativa para o tratamento dos resíduos industriais é a lagoa anaeróbia coberta, com armazenamento de biogás. Para esse caso, apresenta-se o sistema da lagoa anaeróbia intensificada. Para efluentes líquidos industriais com elevada carga orgânica, pode ser utilizado um reator UASB, que é mais compacto, porém mais exigente com relação ao processo. Essa última tecnologia é aplicada somente em casos especiais no Brasil, devido aos custos relacionados à tecnologia.

Uma comparação entre as tecnologias é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15: Tecnologias para produção de biogás na agroindústria

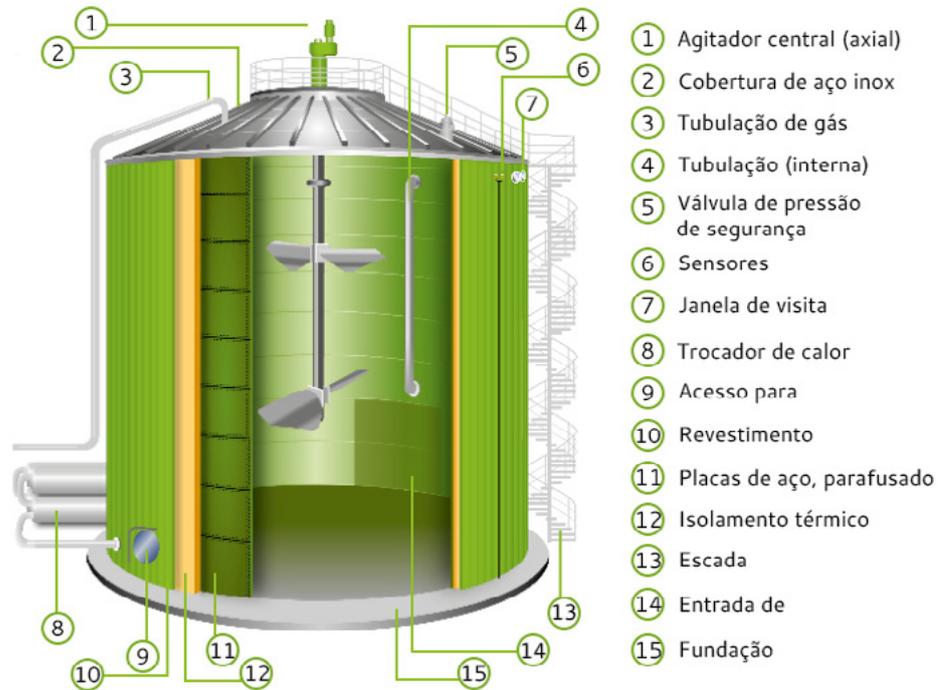
A utilização energética dos substratos apresentados nesse capítulo requer maiores custos de investimento e operação, que somente se justificam se forem atingidas taxas de produção de biogás significativamente altas.

	CSTR VERSÃO AVANÇADA	LAGOA ANAERÓBIA INTENSIFICADA	UASB
Requisitos	Substratos líquidos/pastosos ou que se tornem líquidos (ST 15% - 20%).	Substratos líquidos (ST<5%), alimentação contínua ou descontínua.	Substratos líquidos (ST<300 mg/l), DQO>3.000 mg/L, fluxo equilibrado.
	Utilização de substratos sólidos e co-substratos líquidos, ricos em energia.	Adaptação das lagoas sobrecarregadas e/ou não cobertas para a utilização de biogás.	Efluentes com alta carga orgânica, com poucos sólidos ou sólidos sedimentáveis.
	Vasta gama de aplicações.		Aplicação limitada.
Vantagens	Eficiência do tratamento de resíduos com a oportunidade da utilização de biogás.		
	Em comparação com as lagoas: mais compacto, possível aquecer para tratamento meso e termofílico mais controlável.	Em geral: custos relativamente baixos, construção rápida e despesas operacionais moderadas. Não suscetível à corrosão.	Em comparação com CSTR: extremamente compacto, maior eficiência com alta produção de biogás, lodo (grânulos) concentrado e separado do efluente. Cobertura pequena, operação/controle mais fácil
Desvantagens	Nenhuma (para essa aplicação, sem concorrência)	A maior demanda de área e aplicação depende do lençol freático. O isolamento não é possível (perda de calor do processo).	Limitado a poucos tipos de efluentes. Para aproveitamento do potencial, a operação exige um monitoramento mais rígido (vazão pH e temperatura).

3.3.1 Reator de mistura contínua (CSTR), versão avançada

No caso do tratamento de resíduos industriais com maior valor energético (em comparação aos substratos apresentados em 2.2.1), são necessários maiores investimentos, devido à maior velocidade do processo e da elevada suscetibilidade a perturbações. O investimento referido, quando se trata de sistema CSTR, inclui gastos com automação para monitoramento e controle, como também a maior qualidade do material (p. ex. válvulas tipo gaveta de aço inox pneumáticas ao invés do modelo manual de latão). Portanto, para os substratos em questão, normalmente, são utilizados os CSTR com cobertura fixa e misturador central (Figuras 16 e 17).

Figura 16: CSTR com misturador central.



Fonte: Farmatic GmbH.

Figura 17: CSTR com misturador central.



Fonte: Farmatic GmbH.

As vantagens são melhor controle de fluxo e menores forças de cisalhamento, que, no entanto, estão relacionadas a elevados investimentos, já que a estática do reator deve aguentar a força do misturador e é necessário um armazenamento adicional de biogás. Muitas vezes, o processo de tratamento de substratos com alto valor energético é realizado em duas fases (digestão bifásica), no qual o pós-digestor serve, também, como reservatório de biogás (Figura 18).

Preparação do substrato: Aplicam-se as mesmas condições dos reatores da agropecuária. A diferença é que os reatores apresentados nessa seção utilizam substratos com valor energético elevado, como resíduos de açougue, da indústria de frutas, de açúcar, entre outros, que eventualmente foram levados ao estado bombeável por meio de trituração ou, caso necessário e possível, pela mistura com co-substratos líquidos.

Figura 18: CSTR com misturador central e pós-digestor com biogás.



Fonte: Farmatic GmbH.

Construção e equipamento: Para reatores com misturadores tangenciais, aplicam-se as mesmas condições apresentadas na seção 2.2.1, mas com tecnologia mais elaborada de controle. As plantas para substratos mais complexos, geralmente utilizam CSTR com misturador central, tendo como importância a técnica de mistura. Na Figura 18, à esquerda, é possível perceber um reator com misturador central em posição concêntrica e cobertura com teto de aço inox. Esse tipo de construção possibilita uma mistura ideal no caso de rotações lentas. Em comparação ao sistema com misturadores tangenciais (Figura 6), o CSTR com misturador central consome somente 25% da energia usada na circulação do substrato. O estado da arte para a mistura são os motores externos, já que eles diminuem o esforço de manutenção e não sofrem o efeito corrosivo, especialmente em sistemas termofílicos. A configuração com misturador central requer que o reservatório de biogás seja externo, como por exemplo, com um pós-digestor.

O restante dos equipamentos necessários depende dos substratos utilizados. Quanto maior a porcentagem de resíduos com degradação rápida, maior a demanda por tecnologia de medição e controle. Para prevenir entupimentos, por exemplo, devem ser considerados, no projeto e nos equipamentos, substratos que são fibrosos. O isolamento do reator é necessário para atingir uma elevada eficiência na produção de biogás e, sempre que não se utilizam substratos com altas temperaturas, há a necessidade de aquecimento adicional, em especial para processos termofílicos.

Eficiência: Com uma tecnologia de controle adequada, pode-se trabalhar com uma carga volumétrica de até 7 kg de SV/m³ do volume do digestor. O tempo de retenção é geralmente maior que 20 dias, dependendo do grau de degradabilidade do substrato e da temperatura no reator. O uso de pós-digestor (bifásico) reduz o tempo da retenção no digestor principal. A produtividade do reator é de, aproximadamente, $0,7 \text{ a } > 6 \text{ m}^3_{\text{Biogás}} / (\text{m}^3_{\text{volume de reator}} \cdot \text{d})$.

Custos: Dependendo do tamanho do digestor, das demandas para a preparação do substrato industrial, do equipamento e, por exemplo, de outros requerimentos adicionais para a gestão de higiene, os custos de investimento para o sistema de digestão giram em torno de 3.000,- e 6.000,- €/kW.

Tamanho da planta: No âmbito da digestão de resíduos, os CSTR podem ser aplicados em plantas a partir de 100 kW, quando o substrato é simples, sem demanda de pré-tratamento e sem circuito de higienização (p. ex. processamento de frutas, vinho e cervejarias). Já substratos mais complexos (como resíduos de açougue) geram maiores custos de operação (pré-tratamento, higiene) e, portanto, se tornam economicamente viáveis a partir de tamanhos maiores.

Tamanho, vida útil, tempo de projeto, construção e comissionamento: Com relação a esses pontos, em geral, não há diferenças significativas em comparação ao apresentado no item 2.2.1. A princípio, os digestores anaeróbios industriais têm dimensões maiores que os agrícolas, além de equipamento técnico mais complexo. Consequentemente, para plantas industriais, o investimento na parte de equipamentos corresponde à maior parte do total (no caso dos reatores agropecuários, é a parte civil) resultando em uma menor vida útil média. Por causa da maior complexidade de integrar-se com a cadeia produtiva em que os resíduos são gerados, os tempos de projeto e execução são geralmente maiores.

Maturidade, tecnológica / Difusão internacional: Os CSTR com mistura contínua compostos por digestores com misturadores centrais e pós-digestores com reservatório de biogás são a tecnologia mais difundida internacionalmente para a digestão de substratos complexos com alto valor energético. Esses podem ser considerados o estado da arte da tecnologia.

3.3.2. UASB para efluentes industriais

O reator anaeróbio de manta de lodo ou UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) representa uma das opções mais compactas e eficientes para o tratamento dos efluentes com alta concentração de matéria orgânica (DQO na faixa de 3.000 a 30.000 mg/L). O processo segue o mesmo princípio do tratamento de esgoto sanitário (seção 2.5.1), área em que o uso do UASB é muito comum no Brasil.

Comparado com o esgoto sanitário, o tratamento dos substratos com maior valor energético é mais exigente. Assim, por exemplo, para operar com todo seu potencial, esses reatores necessitam de cargas equilibradas, especialmente com relação à vazão (carga hidráulica). Além disso, é importante manter, dentro de um UASB, o pH estável (aproximadamente 6) e a temperatura elevada (34°C a 39°C) e constante. Os efluentes com alto teor de material carbonáceo (por exemplo, da produção de papel, celulose) ainda podem exigir que a relação C:N:P seja controlada. Nessas condições, os UASB chegam a eficiências que giram entre 70 e 95% de remoção de matéria

orgânica (DQO ou DBO_5) e formam, no fundo do reator, os grânulos constituídos por biomassa anaeróbia compactada, que filtram o efluente biologicamente. Essa é uma característica típica do processo no UASB.

Vale destacar que, no Brasil, o uso de UASB para efluentes industriais se limita ainda a casos especiais, por exemplo, em cervejarias. Em relação à crescente importância dessas tecnologias no mercado internacional e às boas experiências que existem no Brasil, na sua aplicação para o esgoto sanitário, o potencial para os efluentes industriais é muito grande.

Preparação do substrato: Para não afetar a hidráulica do UASB e, especialmente, o sistema de distribuição do efluente no fundo do reator, este deve ter baixa concentração de sólidos (<300mg ST/L). Portanto, o tratamento é indicado para efluentes que já atendam a essas condições ou que a separação de sólidos seja possível com peneiras ou outra separação mecânica (decantação, flotação, etc.). O tratamento de efluentes com alto teor de gordura (por exemplo, de açougues) é possível, porém pode exigir uma adaptação do sistema de distribuição do efluente no reator para evitar entupimentos.

Construção e equipamento: A distribuição do efluente no fundo normalmente é realizada por bombeamento automatizado (Figura 19). A vazão é equilibrada por meio da recirculação interna de efluente tratado (entre 1 e 20 vezes), via tanque de armazenamento. O tanque pode ser dividido para, também, armazenar o efluente bruto e misturá-lo, dependendo da demanda, com o efluente tratado. A recirculação do efluente tratado e a diluição do efluente bruto têm como efeitos adicionais a melhor captação de biogás, melhor conservação da alcalinidade e uma diminuição dos efeitos tóxicos.

O reator UASB para tratamento de efluentes industriais pode ter altura entre 4 e mais de 12 m. A estrutura pode ser de inox, aço vitrificado ou de concreto armado com proteção contra corrosão. A escolha depende do fornecedor, mas também do tipo de substrato a tratar.

Na parte superior do reator UASB e, em alguns casos, também nas laterais, é instalado um separador trifásico que permite tanto a coleta de biogás, sem permitir seu escape, como a retenção de sólidos no interior do reator e a saída do efluente tratado. UASB com alturas maiores (>12 m) podem usar separadores duplos, um sobre o outro, para garantir uma melhor separação. A eficiência do processo depende principalmente do desenho e da adequação do separador trifásico, mas também do material usado, que normalmente é de polipropileno.

Para a operação dos processos com substratos de alto valor energético, é necessário, como instrumentação mínima, um equipamento adequado para a medição e controle de vazão de efluente, temperatura e pH. Adicionalmente, é recomendável medir a vazão e analisar a composição do biogás, parâmetros que também indicam a eficiência do processo.

A Figura 20 ilustra um reator UASB construído na Alemanha.

Figura 19: Desenho esquemático de um reator UASB.



Fonte: VOITH.

Figura 20: UASB, efluente industrial, Alemanha.



Fonte: WZV Malchin – Stavenhagen.

O efluente da fábrica PFANI (amidos/batatas) é tratado no local da ETE municipal primeiro por separado no UASB [depois junto com o esgoto sanitário] e possui CHP para gerar energia elétrica a partir do biogás.

Construção/Instalação: Os reatores UASB para efluentes industriais normalmente são instalados e equipados por fornecedores especializados para cumprir as exigências do processo. As temperaturas devem se manter na faixa mesofílica (35°C), o que torna necessário o isolamento do reator e talvez a instalação de um sistema de aquecimento do efluente.

Eficiência: Nas condições mesofílicas, a carga orgânica varia conforme as características do substrato entre 5 e 25 kg DQO/m³.d, e o tempo de retenção hidráulica varia entre 4 e 12h. A produção de biogás está relacionada à remoção de matéria orgânica e tem-se que a eficiência na remoção da DQO situa-se na faixa de 70 a 95%. No caso do UASB, a concentração do metano no biogás é sempre maior que 60%, e a produção específica é de 0,35 Nm³/kg DQO_{removido}.

Custos: Os custos de reatores UASB para o tratamento de efluentes industriais variam muito em função do efluente a ser tratado, como também dos materiais e equipamentos usados. De forma geral, os reatores UASB para o tratamento de efluentes industriais são mais caros do que reatores UASB para tratamento de efluentes domésticos, principalmente por sua sofisticação tecnológica.

Tamanho, vida útil, tempo de projeto, construção e comissionamento: Não existe limitação quanto ao volume do reator, porém, para facilitar a construção e a operação, Chernicharo (2007) recomenda um volume máximo de 2.500m³ para cada unidade (sistema modular). A vida útil do equipamento depende principalmente da qualidade do material, da execução da obra e das medidas contra corrosão. Com relação à duração da elaboração dos projetos e da fase de construção, não há fatores particulares que aumentem o prazo, e o tempo médio fica entre 12 e 24 meses. A partida dos reatores para tratamento de efluentes de indústrias alimentícias pode demorar de 1 a 3 meses, quando não for utilizado inóculo, que, em pequenas quantidades, pode reduzir esse prazo para 3 semanas.

Maturidade tecnológica/Difusão internacional: Esse é o processo de tratamento anaeróbio de efluentes industriais com alta carga orgânica mais difundido no mundo (Bischofsberger, 2005). A Alemanha, por exemplo, conta atualmente com 263 UASB (como o da Figura 20, para efluente de PFANI), que tratam efluentes de fábricas de papel, cartonagem e celulose (86), cervejarias e cachaçarias (40), produção de açúcares (34), produção com amidos (24), indústria farmacêutica (10), processamento de carnes (10), laticínios (5), entre outras na produção de conservas de frutas e verduras, refrigerantes, sucos, leveduras e outros (54).

3.3.3 Lagoas anaeróbias intensificadas

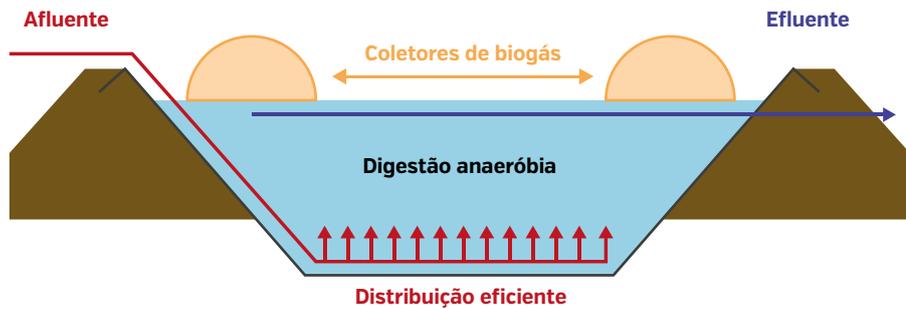
O emprego de lagoas anaeróbias intensificadas representa uma alternativa econômica e ecológica para as lagoas usadas no tratamento de efluentes da área industrial (açougue, indústria de laticínios). Essas são usualmente lagoas abertas (anaeróbias e/ou facultativas), que geralmente liberam grandes quantidades de metano para a atmosfera e, por falhas operacionais, podem não cumprir os requisitos de tratamento prescritos na legislação. A readaptação desses sistemas com as medidas aqui descritas possibilita uma utilização econômica do biogás e aumenta significativamente a qualidade dos efluentes tratados, além de prevenir a emissão do metano para a atmosfera.

Preparação do substrato: Os substratos utilizados nas lagoas anaeróbias intensificadas devem apresentar ST<5%, fazendo com que, por meio de pré-tratamento (recirculação de efluentes tratados e mistura/diluição, uso de co-substratos líquidos ou bomba trituradora), todos os substratos possam se tornar aptos para esse sistema.

Construção/Instalação: As lagoas usualmente contam com uma superfície retangular e seção transversal em forma de base piramidal invertida como mostra a Figura 21. A inclinação das paredes depende das características do solo, como já foi comentado previamente no item 2.2.2. O chão e as paredes devem ser cobertos com geomembranas que podem ser construídas com paredes de concreto adicionais, fator que pode, entretanto, aumentar os custos e anular as vantagens econômicas dessa tecnologia.

A alimentação é feita de maneira uniforme no fundo da lagoa e a mistura com parte do efluente tratado é recirculada. A meta é alcançar uma boa circulação hidráulica com uma retenção efetiva do lodo ativado, sendo sua retirada feita, geralmente, por meio de canalização perforada.

Figura 21: Desenho de lagoa intensificada.



Fonte: UCY Waste Water to Energy GmbH.

O biogás produzido é armazenado nos reservatórios, que podem cobrir a lagoa completamente ou apenas algumas partes (Figura 22). Para a sua fixação, constrói-se uma base de concreto, que absorve as forças resultantes da pressão do gás, ao redor da lagoa, tendo como alternativa a instalação de reservatórios flutuantes com contrapesos (tubos e mangueiras cheias de água). Vale ressaltar que, nesse tipo de lagoa, o uso de membrana simples (por redução de custos) pode resultar em interrupções e danos, causados por chuva e vento quando o reservatório está vazio, problema não encontrado no uso das membranas duplas, que apresentam investimento inicial mais alto.

Figura 22: Lagoa intensificada na Ásia.



Fonte: UCY Waste Water to Energy GmbH.

Eficiência: A eficiência desse tipo de lagoa depende da temperatura tanto do efluente quanto do ambiente, podendo chegar a 80% de remoção da matéria orgânica (DBO_5) sendo a matéria orgânica convertida em biogás e lodo. Ainda é possível, nesse tipo de lagoa, tratarem-se efluentes de baixa e alta carga orgânica, com diferença no tempo de tratamento.

Custos: Dependendo do substrato, a faixa de aplicação da lagoa anaeróbia intensificada pode ser comparada aos reatores com mistura contínua (CSTR) e aos UASB. Devido à sua construção mais simples, os custos gerais são menores que os dos reatores CSTR, tornando as lagoas intensificadas interessantes para tratar grandes volumes de efluentes. Em comparação com o UASB, a diferença de investimento é ainda maior, apesar da maior eficiência desse último. Além disso, as lagoas intensificadas são mais aptas no caso de efluentes que contêm maiores concentrações de sólidos. A vida útil das lagoas intensificadas é de cerca de 20 anos, sendo que, o reservatório de gás é o componente mais delicado, pois sofre com a considerável radiação solar nas áreas em que é instalado. O tempo de construção se compara ao de outras tecnologias (2.2.1), mas pode ser menor, caso se trate de adaptação de uma lagoa “clássica” existente.

Maturidade tecnológica / Difusão internacional: Apesar da pequena quantidade de unidades que utilizam essa tecnologia, existe experiência com o tratamento eficiente de efluentes industriais com alta carga orgânica, principalmente nos continentes asiático, americano e africano, com perspectiva de crescimento de utilização e aprimoramento da tecnologia. A previsão é que recebam mais atenção e importância, tanto pelo aumento da demanda de tratamento, como pela falta de alternativas para tratar grandes volumes de efluentes agroindustriais.

3.4 Produção de biogás com resíduos sólidos urbanos

Os processos de produção de biogás, a partir de resíduos sólidos urbanos, são, em primeiro lugar, processos de tratamento que oferecem vantagens sociais, ambientais e econômicas, pois reduzem e/ou estabilizam o volume de resíduos a ser destinado a aterros, reduzem a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e geram energia. As tecnologias usuais diferenciam-se em reatores de digestão anaeróbia seca ($ST > 20\%$) e úmida ($ST < 15\%$).

Diferente dos substratos da agropecuária e indústria de alimentos, os resíduos sólidos urbanos se caracterizam pela sua composição complexa (seção 1.4), que varia de acordo com os serviços (qualidade, frequência, etc.) de coleta seletiva e de variação de locais públicos prestados, das atividades comerciais e industriais desenvolvidas, do nível econômico e educacional da sociedade, entre outros fatores.

Para o tratamento anaeróbio desses resíduos, empregam-se usualmente três processos: a digestão anaeróbia seca descontínua (1), a seca contínua (2) e a úmida (3). A tecnologia aplicada sempre deve ser escolhida a partir das características do substrato (principalmente a carga de sólidos totais – ST) e dos objetivos do tratamento, que podem exigir, por exemplo, a higienização do produto de tratamento. No Brasil, devido a quase inexistência de coleta seletiva dos resíduos urbanos, as tecnologias de digestão seca são mais apropriadas, pois são menos sensíveis à presença de impurezas. Caso haja segregação na fonte dos resíduos orgânicos ou coleta exclusiva de grandes geradores, pode-se utilizar a digestão úmida termofílica, que já promove a higienização do material digerido.

Na Tabela 16, pode-se observar uma comparação entre as tecnologias supracitadas.

Tabela 16: Tecnologias para produção de biogás com resíduos municipais.

	DIGESTÃO ANAERÓBIA SECA DESCONTÍNUA GARAGEM	DIGESTÃO ANAERÓBIA SECA CONTÍNUA	DIGESTÃO ANAERÓBIA ÚMIDA CONTÍNUA CSTR
Requisitos	Sólidos totais ST > 35%	Sólidos totais ST > 25%	Sólidos totais ST < 15% (bombeável)
	Substratos mistos relativamente secos, pouco selecionados, com grande quantidade de impurezas.	Substrato misto separado com trituração e, eventualmente, umidificação com água.	Substratos com teor de umidade mais alto, bem separados, nível aceitável de impureza <5%.
	Amplamente aplicáveis para RSU		Aplicação limitada
Vantagens	Eficiente forma de tratamento de resíduos com a oportunidade de aproveitamento de biogás. Utilizável como processo termofílico com a higienização do material digerido.		
	Em comparação com a digestão contínua:	Em comparação com a digestão descontínua:	Em geral: Alta taxa de produção de gás. Alta estabilidade de processo. Controle das emissões de metano. Material digerido utilizável na agricultura.
	Pouca preparação do substrato. Baixa utilização de energia e equipamentos. Tecnologia modular.	Maior eficiência energética. Alta estabilidade do processo. Controle das emissões de metano.	
Desvantagens	Demanda de área relativamente alta. Maiores emissões de metano, com conseqüente menor aproveitamento energético. Grande quantidade de resíduo gerado e transporte caro.	Desgaste dos equipamentos mecânicos. Necessidade de alimentação contínua, de armazenagem dos resíduos e, conseqüentemente, custos e logística exigentes.	Separação e preparação do substrato muito exigentes. Desgaste dos equipamentos mecânicos. O fluxo homogeneizado exige volume de armazenagem. O desaguamento do material digerido cria grande quantidade de efluente líquido que exige tratamento
	Material digerido não aplicável na agricultura em alguns países.		

A escolha da tecnologia deve considerar a necessidade ou não de pré-tratamento dos substratos, pois esta etapa pode encarecer o processo, como no uso do CSTR, por exemplo. Vale mencionar que os custos relativos a esse pré-tratamento não constam na matriz resumo (anexo I).

3.4.1 Digestão anaeróbia seca descontínua

Os processos da digestão anaeróbia seca descontínua, ou seja, em batelada, realizados em reatores de tipo garagem (Figuras 23 e 24), apresentam vantagens em relação à preparação de substrato, menor demanda energética e também em relação aos requisitos de monitoramento e controle do processo, quando comparados às outras tecnologias, apesar das perdas de eficiência na produção e captação do biogás.

Preparação do substrato: Os resíduos sólidos urbanos podem ser inseridos no reator, com uso de carregadeiras, sem separação, sendo necessária trituração apenas dos resíduos grandes na própria planta. Para a iniciação do processo é necessário utilizar um inoculo (líquido), gerado na biomassa ativa do processo anterior. Uma vez iniciado, o processo não exige homogeneização ou mistura e, por esse motivo, o equipamento não está sujeito a desgaste por impurezas presentes no resíduo. Depois de um ciclo de tratamento de 3 a 6 semanas (dependendo do substrato) o material digerido é retirado e direcionado a uma pós-digestão aeróbia.

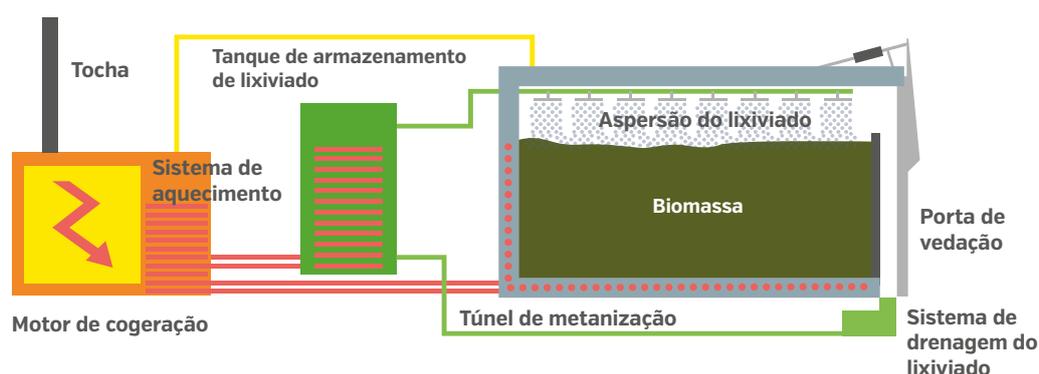
Construção e equipamento: A quantidade necessária de digestores tipo garagem é definida através da carga a ser tratada, levando em consideração o ciclo de tratamento de 3 a 6 semanas de cada reator.

As garagens são estanques, conectadas a um reservatório de biogás e contam com aspersão do percolado sobre o substrato, visando à criação das condições de vida ideais para os microrganismos metanogênicos. Em alguns casos, com o objetivo de iniciar o processo de degradação aeróbica, é utilizada, antes da inoculação, uma aeração curta com difusores de ar localizados abaixo do substrato depositado. Depois disso, o aquecimento incorporado às paredes dos contêineres assegura uma temperatura de processo ideal (mesofílico ou termofílico).

Ao final do ciclo de digestão, antes da abertura, o reator é aerado para evitar a emissão de metano, que pode criar um ambiente explosivo. Faz-se necessário um filtro biológico para tratar o ar extraído. Parte do material digerido é separada para a inoculação do processo e a outra parte é levada à pós-digestão.

A figura 23 apresenta um esquema no processo de digestão seca descontínua.

Figura 23: Esquema do processo de digestão seca descontínua.



Fonte: BEKON.

Eficiência: Por ser um processo descontínuo, com menor mistura do substrato e necessidade de abertura do contêiner após o ciclo da digestão, o processo apresenta uma menor eficiência na geração de biogás, obtendo-se um volume de biogás de 20 a 30% menor do que no processo contínuo.

Custos: Os custos de investimento do reator da digestão seca descontínua são inferiores ao da digestão seca contínua, principalmente, pela ausência de grandes custos para a preparação e mistura do substrato. Os custos de operação ainda são tema de discussão entre os profissionais no mercado. Para o caso da aplicação no Brasil ainda não podem ser claramente determinados em comparação ao processo contínuo.

Tamanho, vida útil, tempo de projeto, construção e comissionamento: O tamanho das estações é bastante variável, por ser uma estrutura modular, estando o número de contêineres de digestão condicionado à vazão da estação. Os tamanhos variam entre 100 kWel ($25 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$) e 10 MWel ($2.500 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$), e a vida útil varia entre 13 e 20 anos, sendo o tempo de construção de 9 meses a um ano. A fase de comissionamento, por se tratar de um processo em batelada, é menor e dura de 1 a 3 meses.

Na figura 24, pode-se observar um exemplo de planta de digestão seca descontínua.

Figura 24: Digestão seca descontínua, Gütersloh, Alemanha.



Fonte: BN Umwelt. GmbH.

Maturidade tecnológica / Difusão internacional: Por ser um processo flexível e com poucas condições para o uso dos substratos, o processo de digestão seca descontínua com percolação apareceu com grande sucesso. Entretanto, na Alemanha, vem se optando mais frequentemente pelo processo contínuo de digestão, uma vez que este apresenta maior produtividade de biogás e menor emissão de GEE.

3.4.2 Digestão anaeróbia seca contínua

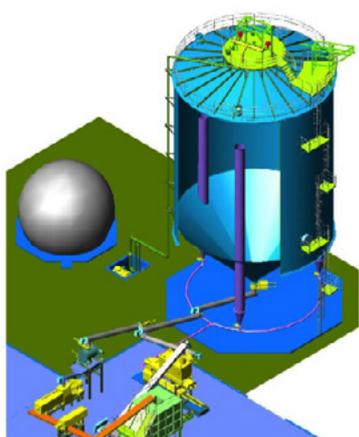
Esse é um processo em que a digestão não é interrompida, ou seja, os substratos são inseridos no digestor ao mesmo tempo que se retira o material digerido, resultando em um sistema com vazão e produção de biogás constantes, tendo como digestores mais comuns os que funcionam por pistão ou por fluxo horizontal (Figuras 26 e 27). Na Alemanha, os reatores verticais (Figura 25), em que os substratos entram no reator por cima e são misturados por uma bomba, não se firmaram para o tratamento de resíduos sólidos municipais.

Preparação do substrato: A preparação do substrato, para a digestão no sistema pistão, envolve trituração e peneiramento (separação do material fino, que segue para o digestor, da parcela grossa, que segue para aterro). Em seguida, retiram-se os metais (impurezas) dos grãos finos, que seguem para o digestor por meio de um descompactador. A umidificação do substrato, que deve apresentar um conteúdo de água maior que 25%, ocorre por recirculação de efluente do processo e/ou utilização de água. Para inoculação do substrato com a biomassa metanogênica ativa, uma parte do material digerido é recirculada.

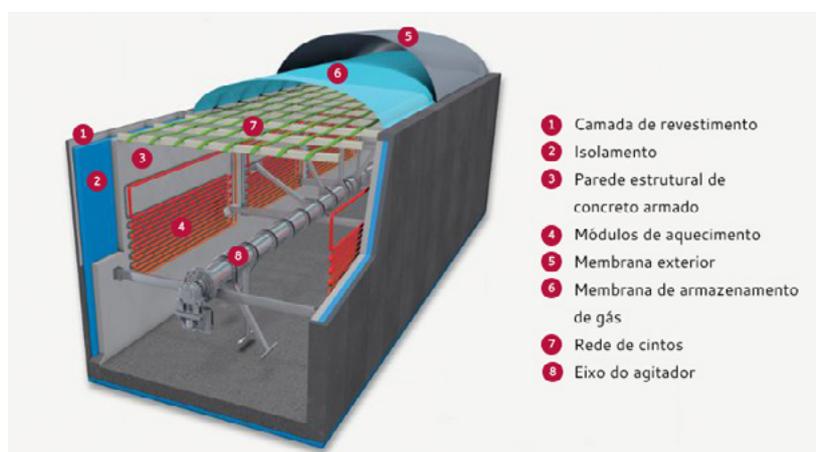
Construção/Instalação: A quantidade de reatores depende da vazão da planta e todos eles têm um espaço de armazenamento de biogás acima do nível máximo de líquido, o que faz deles um reservatório primário de biogás, possibilitando, inclusive, que reservatórios externos sejam dispensados, dependendo da destinação do gás. No digestor com sistema tipo pistão, a passagem do substrato se dá, na entrada, pela pressão da transportadora tipo caracol/rosca, e, na saída, por uma bomba de retirada a cada término de ciclo de digestão, que tem duração de 14 a 21 dias. O biogás é extraído do líquido pela rotação de misturadores com eixo horizontal, que mantêm todo o substrato em suspensão, e a inoculação do material novo acontece por meio da recirculação de materiais digeridos, sendo a temperatura do processo (mesofílico ou termofílico) garantida por meio de aquecimento das paredes ou em forma de lanças térmicas dentro do substrato.

Figura 25: Digestão seca contínua, Digestor vertical.

Figura 26: Digestão seca contínua. Digestor horizontal.



Fonte: OWS/Dranco.



Fonte: Eisenmann.

Os materiais digeridos que não são recirculados devem ser desidratados e levados para o pós-tratamento (compostagem) necessário, enquanto o efluente líquido é armazenado temporariamente e recirculado para a umidificação dos substratos nos reatores.

Eficiência: Esse processo é a técnica mais estável para digestão de resíduos em relação à eficiência energética, eficiência de processo e diminuição de emissões, sendo o equilíbrio entre uma boa produção de biogás, mínima liberação de gases e qualidade de material digerido, garantido.

Custos: Os custos de investimento, por conta das maiores exigências tecnológicas envolvidas, são mais elevados do que os do sistema seco descontínuo. Em relação aos custos operacionais, não há unanimidade entre especialistas na comparação com os do processo descontínuo, conforme mencionado anteriormente. Com uma melhor produção de biogás, é possível obter um maior volume de receitas, em comparação ao sistema descontínuo.

Tamanho, vida útil, tempo de projeto, construção e comissionamento: O sistema modular da construção possibilita alta capacidade de adaptação do sistema à demanda individual. Para um tamanho economicamente viável, deve-se projetar unidades entre 400 kW_{el} ($=100 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{h}$) e 5 MW_{el} ($=1.250 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{h}$), tendo elas uma vida útil entre 13 e 20 anos. O tempo de construção varia de 12 a 18 meses, dependendo da dimensão do equipamento e o processo começa a ter estabilidade biológica depois de 3 a 6 meses.

Figura 27: Digestão seca descontínua, Gütersloh, Alemanha.



Fonte: BN Umwelt. GmbH.

Maturidade tecnológica / Difusão internacional: O sistema de fluxo em pistão (Plug Flow) é uma das tecnologias mais utilizadas e com maior potencial de crescimento na Alemanha, por sua alta estabilidade de processo, seus baixos custos de operação e suas baixas emissões de gases causadores do efeito estufa.

3.4.3 Digestão anaeróbia úmida com CSTR

Como descrito anteriormente, os reatores de mistura contínua, exemplificados na Figura 28, podem ser utilizados para uma grande variedade de substratos, inclusive para tratamento de resíduos sólidos, apesar de sua utilização limitada nesse caso. Para sua construção, aplicam-se as indicações da seção 2.2.1 (resíduos agropecuários), e, para automação e controle, aplicam-se as indicações da seção 2.3.1 (resíduos agroindustriais).

Devido às características dos resíduos sólidos (30 – 40% ST), é necessário um pré-tratamento para que sejam utilizados na digestão úmida, por meio da umidificação e posterior homogeneização, atingindo-se um teor máximo de ST de 15%, importante também para a mistura e o transporte mediante bombeamento. O CSTR é mais indicado para resíduos que são previamente separados, como restos de alimentos de restaurantes ou mercados com coleta seletiva.

Quando se trata de resíduos urbanos é necessário observar que os reatores de mistura contínua são sensíveis a impurezas como areia, metal, pedras e vidro, sendo submetidos a um intenso desgaste quando recebem tais materiais. Os materiais leves como plástico ou materiais lenhosos podem provocar o entupimento do sistema ou a formação de uma camada grossa flutuante, conhecida como espuma, cuja retirada demanda esforço e causa dificuldades operacionais. Por isso, é recomendado que o substrato seja bem selecionado e livre de impurezas, o que aumenta os custos operacionais.

Figura 28: Digestão úmida, MBA Lübeck, Alemanha.



Fonte: HAASE Anlagenbau.

Geralmente, esse sistema utiliza um processo bifásico, que se inicia com uma hidrólise com detenção hidráulica de 2 a 5 dias. Em seguida, ocorrem as reações (acidogênese, acetogênese, metanogênese) de geração de biogás no reator central, sendo que o material digerido deve ser aerado e desidratado depois da digestão anaeróbia, podendo haver variação na ordem dos processos. A aeração normalmente acontece com a inserção de ar por meio de um aerador, como no tanque de aeração de uma estação de tratamento de esgoto e, em seguida, o efluente da digestão é desidratado em duas etapas: por meio do decantador, e de um secador de esteira ou de tambor. Os restos desidratados são tratados aerobiamente em compartimentos ou túneis de compostagem.

Preparação do substrato: A preparação dos substratos depende da composição e da consistência deles, sendo o substrato seco triturado (peneira de <30 – 40 mm) e as impurezas (metais e materiais leves – filmes plásticos, lignina) retiradas, evitando conglomerados flutuantes. Mediante a adição de água ao substrato fresco, no tanque de mistura, ocorre a calibração dos Sólidos Totais (ST) e a homogeneização do substrato, passando, em seguida, por um separador de materiais pesados (caixa de areia, hidrociclone), no qual as partes minerais são quase completamente removidas. Finalmente ocorre a extração dos materiais leves/flutuantes.

Construção / Instalação: A construção e instalação são semelhantes à digestão úmida de substratos agropecuários (ver 2.2.1), sendo que, nesse processo, é necessária a pós-digestão dos materiais, que devem ser quase totalmente desidratados. Esse processo mostra-se dispendioso, pois a umidificação ocorrida na digestão central é alta.

Eficiência: Apesar de apresentar as maiores produções de biogás, a digestão úmida, apresenta vantagem econômica, no setor de tratamento de resíduos sólidos, apenas para processamento de resíduos previamente úmidos e livres de impurezas, pois há alto investimento no processamento, na operação e pelo desgaste dos equipamentos.

Custos: Em comparação ao sistema contínuo seco, há menores custos de investimento e as mesmas despesas para a operação.

Tamanho, vida útil, tempo de projeto, construção e comissionamento: Do ponto de vista econômico, esse tipo de sistema é viável em tamanhos entre 100 kWel (= 25 m³ CH₄/h) e 3 MWel (= 750 m³ CH₄/h), com vida útil de 10 a 15 anos e tempo de montagem entre 10 e 15 meses. A fase que vai do start-up até a estabilização do processo biológico dura de 4 a 6 meses.

Maturidade tecnológica / Difusão internacional: Devido ao desgaste desses sistemas, mesmo com elevada produção de biogás, a digestão úmida somente é utilizada para tratamento de resíduos previamente segregados do setor alimentício, mas não para o tratamento de resíduos urbanos e orgânicos.

3.5 Produção de biogás no setor de tratamento de esgoto

A aplicação de tecnologias de biogás no setor de tratamento de esgoto se diferencia dos demais setores em dois sentidos: porque o tratamento de esgoto tem como objetivo central o tratamento de efluentes e lodos fecais, e porque tem-se a oportunidade de produzir energia em forma de biogás com a finalidade de uma contribuição à eficiência energética das ETEs.

A Tabela 17 apresenta um resumo das tecnologias mais usuais para esse setor.

Tabela 17: Tecnologias para produção de biogás no setor de saneamento.

	LAGOA ANAERÓBIA	UASB OU RALF	DIGESTOR DE LODO
Requisitos	Esgoto bruto, pré-tratado somente com gradeamento.	Esgoto bruto, pré-tratado com gradeamento, desarenador, caixa de gordura e peneira.	Lodo com alto valor energético (ST>3%) ou também com co-substratos em qualidade suficiente.
	Cobertura e coleta do biogás.		
Vantagem	Tratamento de esgoto com eficiência de 60 a 70%, sem gasto de energia, com muito pouca produção de lodo e com oportunidade de utilização do biogás.	Operação extremamente simples. Alta tolerância a variações de carga e de vazão.	Aproveitar o valor energético de lodos e a possibilidade de usar co-substratos. Eficiente para estabilizar lodos com alto valor energético. Permite várias condições operacionais (meso ou termofílicas, digestão em duas etapas).
Desvantagens	Ocupação de grandes áreas. Cobertura econômica e tecnicamente exigente. Possibilidade de geração de odores.	Extremamente compacto. Comparado a outras tecnologias, apresenta operação pouco exigente.	Nenhuma [para a aplicação sem concorrência].
		Baixa tolerância a grandes alterações hidráulicas e a cargas tóxicas. Formação de espumas. Para cumprir a legislação, o efluente necessita de um pós-tratamento.	

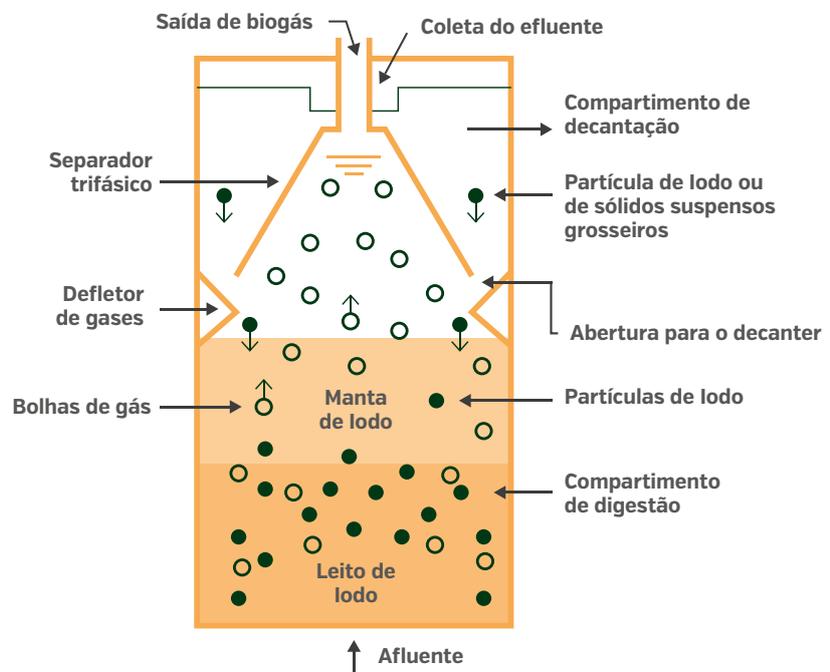
3.5.1 UASB para o tratamento de esgoto sanitário

A tecnologia do reator anaeróbio de manta de lodo, ou UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), já é utilizada no Brasil em várias ETEs para o tratamento de esgotos sanitários (Figuras 29 e 31). Uma variação de UASB desenvolvido no Brasil é o RALF (Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado), que apresenta uma área de decantação diferenciada, parcialmente de fluxo horizontal (Figura 30). Para serem tratados no UASB ou em suas variações, os esgotos podem ser de composição simples ou complexa, de baixa ou alta concentração, e com diferentes níveis de substratos particulados (Campos, 1999).

Em comparação a outras tecnologias de tratamento, o UASB possibilita uma ótima relação custo-benefício, pois remove de 60 a 80% da carga orgânica (DBO_5) sem uso de energia e produz biogás. No Brasil, ainda são poucas as ETEs que aproveitam o biogás energeticamente.

O princípio de tratamento de esgotos sanitários no UASB, mostrado na Figura 29, é igual ao de efluentes industriais (seção 2.3.2), porém a construção e os equipamentos são simplificados, sem aquecimento, isolamento de reator ou recirculação de efluente tratado. Não há controle do pH e da alcalinidade, visto que a degradação do esgoto sanitário é um processo “lento”, se comparada à digestão de efluentes industriais.

Figura 29: Desenho esquemático de um reator UASB.



Fonte: Campos, 1999.

O esgoto afluente, previamente tratado, entra continuamente através de um sistema de distribuição no fundo do reator e passa em fluxo ascendente pela manta de lodo, composta por microrganismos que formam flocos ou grânulos densos suspensos, onde ocorre a digestão anaeróbia. Esse efeito de auto-adesão resulta em características favoráveis à sedimentação e permite o acúmulo desses microrganismos no sistema. A manta de lodo pode desenvolver uma concentração de 40.000 a 100.000 mgST/L.

O separador trifásico, mostrado na Figura 31, é instalado na parte superior do reator UASB e permite a coleta de biogás gerado na digestão anaeróbia, a retenção de sólidos e a saída do efluente tratado. No caso de esgoto sanitário, o processo é dimensionado por meio de critérios hidráulicos, o que resulta em cargas orgânicas volumétricas na faixa de 2,5 a 3,5 kg DQO/m³. (Campos, 1999).

Preparação do substrato: O esgoto deve passar por um gradeamento fino, de, no mínimo, 6 mm, para que a areia e as gorduras, as quais podem afetar o sistema por meio da colmatação e formação de espuma, possam ser eliminadas.

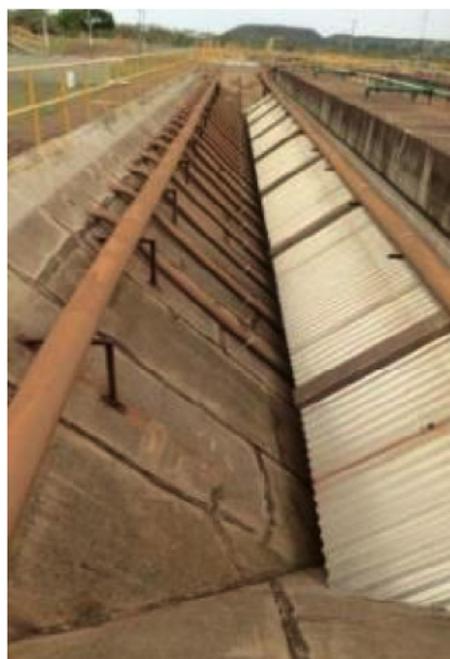
Construção / Instalação: Visto que não há equipamentos eletromecânicos envolvidos, a construção/instalação desse tipo de reator demanda somente aspectos da construção civil, com foco na estrutura de concreto armado e proteção contra corrosão. Alguns elementos, como o separador trifásico, podem ser confeccionados em materiais não corrosivos e leves, como PVC, plástico e fibra de vidro.

Eficiência: A eficiência na remoção da DBO_5 e DQO pode chegar à ordem de 65% e 75%, respectivamente, dependendo das condições de temperatura e de retenção hidráulica.

Figura 30: Modelo de RALF, SAMAE Jaraguá do Sul, SC.



Figura 31: Separador trifásico CAESB.



Fonte: Rotária do Brasil.

1: Índice dos custos do setor da construção civil.

Custos: Considerando os valores adotados por Chernicharo (2007), para o ano de 2004, e a variação do Custo Unitário Básico (CUB)¹, desde essa data, estima-se um custo de investimento entre 47 e 78 R\$/hab, com custos operacionais entre 3,77 e 5,28 R\$/hab.a (Chernicharo, 2007).

Tamanho, vida útil, tempo de projeto, construção e comissionamento: Para facilitar tanto a construção quanto a operação, Chernicharo (2007) recomenda um volume máximo de 2.500 m³ por reator. Sistemas maiores devem ser executados com reatores em paralelo. Mesmo para pequenos sistemas de tratamento de esgotos domésticos, o autor sugere a adoção de reatores modulados com volumes parciais na ordem de 400 a 500 m³.

A vida útil depende, principalmente, da qualidade do material da construção, da execução da obra e das medidas contra corrosão, com tempo de construção médio de 12 a 24 meses. A estabilização do processo varia de 4 a 6 meses, sem utilização de inóculo, com redução desse tempo para cerca de 3 semanas se forem utilizadas pequenas quantidades de inóculo.

Maturidade tecnológica / Distribuição internacional: No Brasil, esse processo é predominante no tratamento de esgotos domésticos e outros países de clima quente também estão começando a optar por essa tecnologia. Na América Latina, há cerca de 700 reatores UASB para tratamento de esgoto doméstico (estimativa).

3.5.2 Lagoas anaeróbias cobertas para o tratamento de esgoto sanitário

As lagoas anaeróbias são sistemas tradicionais no tratamento de esgoto de grandes populações, mas que podem apresentar problemas com relação à manutenção e ao projeto, acarretando em problemas ambientais, principalmente quando não são cobertas. A cobertura dessas lagoas (Figura 32) gera custos elevados, por apresentarem superfície relativamente grande e exigirem boa qualidade da geomembrana e boa fixação.

Figura 32: Lagoa anaeróbia coberta ETE, Lima, Peru.



Fonte: Rotária do Brasil.

Esse investimento, porém, ainda não resolve o problema da eficiência limitada (50 a 60%) do tratamento nas lagoas anaeróbias. Por essa razão, muitas das lagoas antigas, ao invés de receberem cobertura, são substituídas por um reator UASB que trata o efluente de forma compacta e com menos custos para realizar o aproveitamento da energia. Os UASB tratam até 75% da carga de DBO_5 , assim, as lagoas existentes servem como pós-tratamento (lagoa facultativa ou lagoa de maturação) dos efluentes. Outra alternativa seria a adaptação para lagoas anaeróbias intensificadas, explicadas na seção 2.3.3, para o uso no tratamento de efluentes agroindustriais. Os requisitos de construção, operação, projetos e custos seriam muito parecidos para o tratamento do esgoto doméstico.

3.5.3. Digestor anaeróbio para o tratamento de lodos sanitários

Da mesma forma que o tratamento de esgoto, a digestão de lodo tem como objetivo o tratamento, ou seja, a estabilização de lodos do tratamento de esgoto. Na Alemanha, atualmente, 76% do lodo sanitário de esgoto tratado é digerido, em sistema mesofílico, com o fim adicional de produção de biogás, sendo 60% em processo monofásico e 16% em processos bifásicos (StBA, 2009). Com o aumento do aproveitamento econômico que ocorreu nos últimos 30 anos, cresceu significativamente o interesse na aplicação de co-substratos, devido ao alto rendimento, utilizando a gordura das caixas de gordura das estações no processo de co-digestão.

Figura 33: Foto de digestor de lodo com forma oval, ETE Alemanha.



Fonte: AZV BUEHL.

Figura 34: Esquema com corte de digestor de lodo com forma cilíndrica.



Fonte: MANNVIT.

Preparação do substrato: Geralmente, são utilizados dois tipos de lodo: lodo do decantador primário (lodo primário) e o excesso de lodo do tratamento secundário (lodo secundário). O lodo tem baixas concentrações de sólidos (ST), o que torna recomendável sua desidratação para redução do volume dos digestores e/ou aumento no tempo de detenção hidráulica. A desidratação mecânica (p. ex. prensas) pode atingir um ST de 4 a 8%.

Construção / Instalação: O tipo de construção mais difundido é o em forma ovoide (Figura 33), que apresenta uma boa estática e fornece parâmetros ideais para a mistura do substrato (p. ex. bomba tipo parafuso ou injeção de gás por bocais incorporados em círculo). Além disso, a forma ovoide favorece a retenção de calor, já que a relação de volume por massa impede maiores perdas. Esse tipo de construção é utilizado em estações de médio e grande porte, visto que o volume pode alcançar 17.000 m³.

A estrutura em forma de cilindro ou cubo com fundo plano (Figura 34) tem vantagens para o processo de construção, porém precisa de uma mistura mais intensa. A montagem e a operação do digestor cilíndrico são significativamente mais econômicas do que as da forma ovoide. O tipo de mistura com bomba parafuso corresponde ao dos reatores com misturador central (2.3.1).

Uma técnica de mistura que se estabeleceu nas últimas décadas é a injeção concêntrica de gás. O biogás é comprimido e descontinuamente injetado no fundo do reator, tendo vantagens de operação em comparação à agitação mecânica, sendo problemático no caso de lodos que tendem a produzir espuma.

A digestão de lodo geralmente ocorre em condições mesofílicas. Os reatores na Alemanha, por exemplo, sempre são isolados e seu aquecimento pode ser realizado por meio de serpentinas, trocadores de calor externos ou injeção de vapor quente com baixa pressão. A origem da energia térmica é o calor gerado no CHP. No Brasil, o isolamento e o aquecimento não são usados nos poucos digestores existentes e, em consequência disso, os tempos de retenção hidráulica aumentam (40 dias). Porém, vale destacar que, para a digestão mesofílica e termofílica, o isolamento e o aquecimento são necessários, mesmo no Brasil.

Vale mencionar ainda que a produção de lodo pode ser maior quando se incluem os efluentes resultantes da precipitação (efeitos das chuvas intensas), picos de afluentes sazonais e, principalmente, quando se aplicam co-substratos nos digestores de lodo, que podem ser lodos fecais das instalações sanitárias que não estão conectadas à rede ou gorduras de caixa de gordura (caminhão limpa fossa), entre outros.

Eficiência: No caso de lodos brutos misturados, a geração de biogás específica, com uma eficiência de degradação de matéria orgânica de 85%, é estimada conforme os dados apresentados a seguir:

- >> Lodo primário ca. 0,57 Nm³/kg SV;
- >> Lodo em excesso ca. 0,33 Nm³/kg SV;
- >> Lodo bruto misturado ca. 0,43 Nm³/kg SV, porcentagem de metano ca. 65%.

Sendo assim, uma estação com uma carga média de 67g ST/ hab.d, com ca. 70% de SV e 0,43 Nm³/kg SV resulta em uma produção de aproximadamente 20l/hab.d com um teor de energia de aproximadamente 48 kWh/hab.a ou 18 kWhel/hab.a. Para uma ETE que atende a uma população de 30.000 habitantes equivalentes (hab. eq.), estima-se uma produção de energia de 70kW, enquanto para uma ETE 100.000 hab.eq., pode-se chegar a uma potência de aproximadamente 245kW (com base de 7.500 h de uso por ano e um valor de eficiência elétrica de 38%).

Custos: Os custos de investimento na Alemanha estão sendo estimados em 45 €/hab., para investimentos de 20.000 €/kW, ou seja, 30.000 hab. eq em 32 €/hab. para investimento de 13.000 €/kW (>100.000 hab.). Os custos de operação são diferentes para cada tipo de construção e são compostos por: equipe, energia de rede (eletricidade e calor), condicionadores (p. ex. químicos para floculação e outros), tratamento de lodo (transporte + tratamento ou destinação final) e manutenção.

Vale lembrar que, em ETEs com digestor de lodo, após o sistema de tratamento aeróbio, existe potencial para o abastecimento próprio do processo (aeração, bombas) com a energia produzida a partir do biogás (CHP local), de aprox. 50 a 60%. Em ETEs que utilizam o processo da estabilização aeróbia de lodo em excesso (lodo ativado de aeração prolongada), o potencial da eficiência energética usando o biogás é ainda mais pronunciado.

Tamanho, vida útil, tempo de projeto, construção e comissionamento: Na Alemanha, o tratamento anaeróbio de lodo se aplica em ETEs superior a 25.000 hab.eq. Atualmente, ETEs de menor porte estão buscando viabilizar essa tecnologia, a fim de diminuir os custos com eletricidade.

Maturidade tecnológica / Distribuição internacional: A digestão anaeróbia de lodos existe na Europa há mais de 80 anos, sendo a experiência mundial bastante grande. Hoje em dia, quase todas as estações que têm um digestor de lodo, contam também com um CHP. De todo o biogás produzido na digestão do lodo na Alemanha, 75% é utilizado como energia elétrica e 15% na forma de energia térmica (aquecimento do reator). Outros 4% do biogás são injetados na rede de gás natural e os 6% restantes representam as perdas (StBA, 2009). Esses dados demonstram que há possibilidade de conduzir uma integração sustentável entre o tratamento de esgoto e a geração de energia.

3.6 Referências

AEBIOM; 2009, European Biomass Association, A Biogas Road Map for Europe, www.aebiom.org/IMG/pdf/Brochure.pdf

AZV BUEHL: Abwasserzweckverband Bühl und Umgebung (companhia de água e saneamento, responsável pela cidade de Bühl e sua região) <http://azvbuehl.de/lightbox/verbandsklaerwerk.html>

Biogas Roadmap, Biogas Opportunities Roadmap, 2014, U.S. Department of Agriculture,

U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Department of Energy, www.epa.gov/climatechange/Downloads/Biogas-Roadmap.pdf

Bischofsberger, W. Et. Al. Anaerobtechnik. Berlin. Heidelberg: Springer-Verlag, [2005].

Campos, J. R. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, 464 p. [1999].

Chernicharo, C.: Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Vol. 5. Reatores Anaeróbios. DESA-UFMG, 380 p. [2007].

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) – Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung – Gülzow-Prüzen, 2013.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) – Biogaserzeugung durch Trockenvergärung von organischen Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen aus der Landwirtschaft – Gülzow, 2007.

Handreichung Biogasgewinnung –nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow 2005.

INES Ingenieurbüro für nachhaltige Energiesysteme – Feststoff-Vergärung in der Schweiz – Schlussbericht 2007 – Bern, 2007.

Sieker, J. Umrüstung von aeroben Schlammstabilisierungsanlagen in Anlagen mit Schlammfäulung, DWA Lehrertagung Stuttgart 2008.

StBA 2009: Statistisches Bundesamt Deutschland, Erhebungen des Jahres 2009.

Technische Universität Braunschweig, Bauhaus-Universität Weimar & Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT – Endbericht zu Förderprojekt 03KB022 – Steigerung der Energieeffizienz in der Verwertung biogener Reststoffe – Braunschweig, 2012.

Rotaria do Brasil, documento interno, P&D COELBA, 7º Relatório, conclusão de levantamento de Dados Básicos, 2013.

Verordnung über pauschale Investitionszuweisungen zum Bau von Abwasseranlagen, Anlage Kostenrichtwerte, Hessisches Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verkehr, 26. April 2002.

Von Sperling, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias V. 1 – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: DESA/UFMG [1996].

WZV Malchin-Stavenhagen: Wasserzweckverband [companhia de água e saneamento, responsável pela região das cidades de Malchin e de Stavenhagen] <http://www.wzv-malchin-stavenhagen.de/>

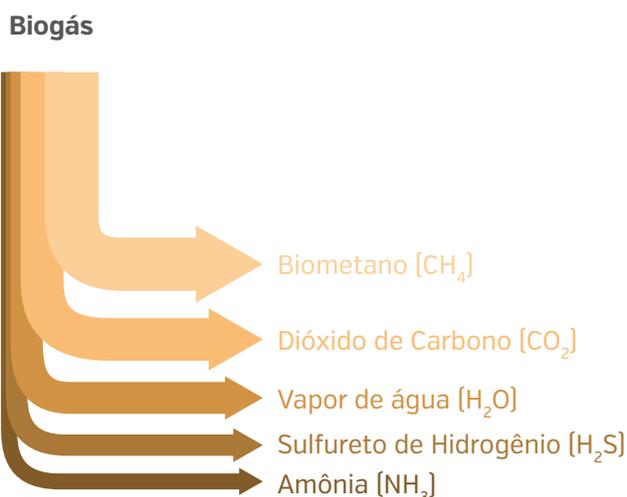
4

TECNOLOGIAS ATUAIS DE TRATAMENTO E APROVEITAMENTO DE BIOGÁS

Para a utilização do biogás é necessário selecionar tecnologias e projetar sistemas para tratar o biogás até o nível exigido pelo tipo de aproveitamento. Como mostra a Figura 36, o biogás, tendo sido removidas as maiores contaminações (principalmente o gás H_2S), pode ser utilizado para a produção de energia elétrica (CHP) e energia térmica (aquecer, secar, resfriar). O biometano, por sua vez, resulta, como mostra a Figura 35, de uma purificação muito mais exigente aplicada em grandes e constantes volumes de biogás, e possibilita o mesmo uso que o do gás natural. Vale ressaltar que a escolha de tecnologias para o tratamento e aproveitamento do biogás depende da composição, quantidade, continuidade de produção do biogás e das condições locais da planta e não do tipo de substrato utilizado.

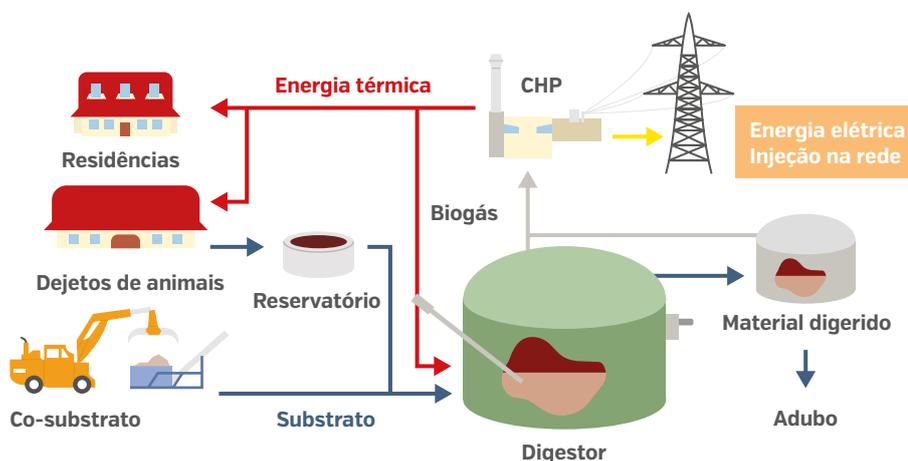
Figura 35: Purificação de biogás, Detmold.

Figura 36: Composição e uso do biogás e biometano, esquema adaptado de AEBIOM.



Fonte: EurobservER, 2012.

Figura 37: Ciclo de uso energético de biogás produzido na agricultura.



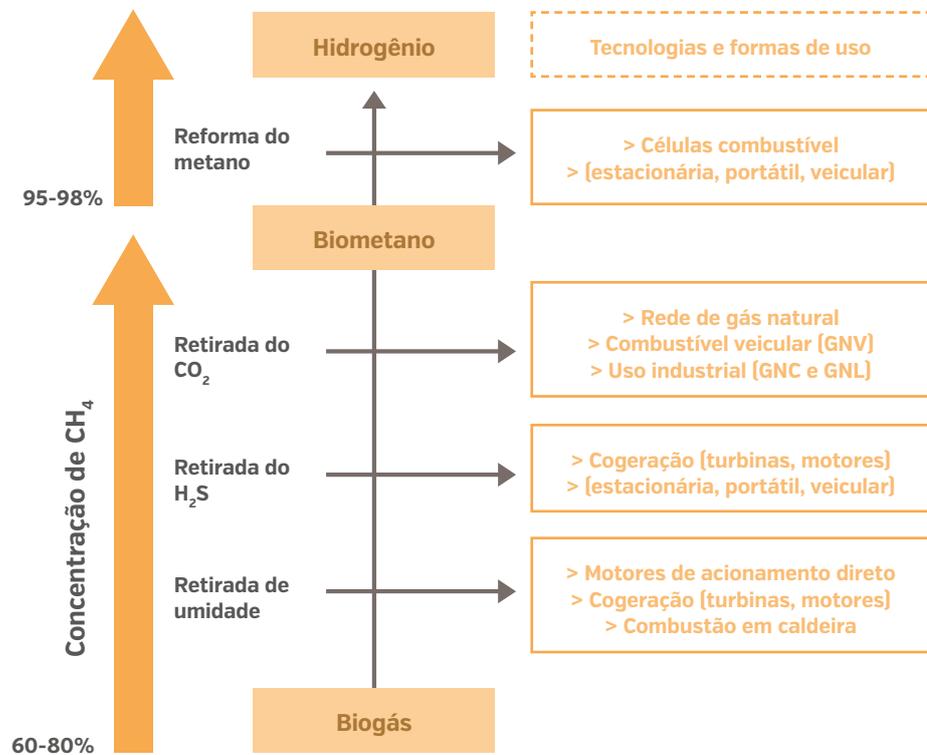
Fonte: AEBIOM.

4.1 Visão geral sobre o tratamento e aproveitamento de biogás

O biogás, como mostra Lobato (2011), pode atender a diversos fins, tais como a utilização em caldeiras, fornos e estufas em substituição a outros combustíveis; a geração de eletricidade para uso local ou venda para concessionárias; a co-geração de eletricidade e calor; e o uso como combustível alternativo na linha de gás ou em veículos.

Na seleção da tecnologia de conversão, além do poder calorífico e da composição do biogás, é necessário observar algumas propriedades, como a presença de umidade, pressão, contaminantes, gases inertes e gases ácidos, responsáveis por corrosão precoce dos equipamentos, além da emissão de poluentes. A depender do tipo de uso do biogás, será selecionado o tipo de tratamento a ser realizado, podendo ser mais ou menos exigente, conforme apresentado na figura 38.

Figura 38: Tratamento conforme o uso final.



Fonte: Adaptado de BTE, IFEU, ISA 2004.

4.2 Tratamento do biogás

Dependendo das características do biogás e das exigências tecnológicas de aproveitamento energético, são determinados os tipos de tratamento necessários e as combinações entre eles.

4.2.1 Remoção de umidade

A quantidade de água e vapor d'água que o biogás pode absorver depende da sua temperatura e devem ser removidos do biogás para atender às exigências de purificação das etapas posteriores e proteger os componentes de processamento de gás contra desgastes e corrosão. No digestor, a umidade relativa do biogás é de 100% (completamente saturado) e sua secagem pode ser realizada por condensação (resfriamento), por adsorção (gel de sílica,

carvão ativado) e por absorção (desidratação por glicol), sendo o processo de remoção por resfriamento – explicado a seguir – o mais utilizado. Para maiores informações sobre os processos, recomenda-se a consulta à norma alemã DWA M 361 e ao Guia Prático do Biogás (Leitfaden Biogas traduzido).

Secagem por resfriamento: A desumidificação do biogás é realizada, em geral, por meio de um processo de resfriamento do gás, em tubulação inclinada ou enterrada, e posterior remoção do condensado em purgador(es) localizado(s) no(s) ponto(s) mais baixo(s), com o gás sendo conduzido através de um trocador de calor, que é carregado com um fluido de arrefecimento. O refrigerante flui em direção contrária ao fluxo de gás, absorvendo o calor e deixando o gás a uma temperatura de aproximadamente 5°C. Isso leva à redução da temperatura até um nível inferior ao ponto de orvalho condensando a umidade que pode, então, ser removida. Após o resfriamento, a temperatura do gás é novamente elevada e, devido ao ponto de orvalho reduzido, devido à menor umidade do gás, este deixa de condensar em temperaturas operacionais. Vale destacar, por fim, que as tubulações devem ser suficientemente longas para que o resfriamento ocorra, sendo mais eficiente em tubulações enterradas.

4.2.2 Dessulfurização

O processo de dessulfurização é necessário para a manutenção dos componentes do sistema que podem ser prejudicados através da ação corrosiva do ácido sulfuroso, resultante da reação entre sulfeto de hidrogênio e água. Esse processo, que pode ser uma dessulfurização grossa e/ou fina dependendo da concentração de enxofre inicial pretendida, e pode ser biológico, químico ou físico, como mostra a comparação apresentada na Tabela 18.

Tabela 18: Processos de dessulfurização.

PROCESSO	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	INSUMOS INDIRETOS		INJEÇÃO DE AR	PUREZA EM PPMV	PROBLEMAS
		CONSUMO	ELIMINAÇÃO			
Biodessulfurização no digestor [injeção de ar no digestor]	++	++	++	Sim	50-2000	Falta de exatidão no controle do processo.
Biodessulfurização Externa [filtro biológico percolador]	-	+	+	Sim	50-100	Falta de exatidão no controle do processo.
Lavador biológico de gás	-	-	+	Não	50-100	Complexidade elevada.
Precipitação de sulfeto	o	--	o	Não	50-500	Processo lento.
Dessulfurização química interna	o	--	--	Sim	1-100	Efeito purificador reduzido drasticamente.
Carvão ativado	o	--	-	Sim	<5	Eliminação do carvão ativado.

++ muito vantajoso, + vantajoso, ou neutro, - desvantajoso, - - muito desvantajoso.

Fonte: Leitfaden Biogas, 2010.

Os principais processos biológicos e físico-químicos de remoção de H_2S são apresentados a seguir. Sua descrição foi baseada na norma alemã DWA M 361.

Reator de filtro biológico percolador: Tipicamente, a biodessulfurização é realizada em um sistema de filtro biológico percolador contínuo, com bactérias quimio-litotróficas, que oxidam os componentes do enxofre em sulfato e outros compostos de enxofre na presença de oxigênio. O biogás bruto entra pela base da coluna de lavagem e sai pelo topo.

Injeção de ar no digestor: A injeção de ar é um método eficiente e de baixo custo de eliminação do enxofre, sendo muito popular, sobretudo, em usinas agrícolas de biogás. Nesse processo, bactérias oxidam o sulfeto de hidrogênio em enxofre elementar ou ácido sulfuroso.

Dosagem de ferro simultânea: O processo se dá pela adição de compostos de ferros, como os sais e hidróxidos de ferro, que, ao serem adicionados na digestão anaeróbia, reagem com sulfeto de hidrogênio formando sulfetos não solúveis, que são removidos junto com o lodo e os biofertilizantes. Esse processo é considerado uma dessulfurização grossa.

Óxido de ferro: A dessulfurização convencional do biogás é obtida pela utilização de massa de tratamento de gás contendo ferro, $Fe(OH)_3$, na qual a eliminação do H_2S acontece através da ligação sulfídrica com o ferro e pode ser aplicada a concentrações de gás bruto de até 6.000 ppm de H_2S . Com o dimensionamento adequado, o processo permite atingir baixas concentrações de saída (abaixo de 20 ppm).

Adsorção em carvão ativado: O processo de dessulfurização via carvão ativado pode ser utilizado em escala comercial, quando a concentração de H_2S no gás é de até aprox. 500 ppm, e proporciona um bom grau de pureza ao gás tratado, chegando a valores inferiores a 1 ppm. O processo ocorre preferencialmente a temperaturas entre 10 e 70°C e se dá por meio da oxidação catalítica na estrutura porosa do carvão, no qual o H_2S é convertido em enxofre elementar, que é adsorvido nos microporos do carvão. Esse processo é frequentemente instalado depois de outros processos de dessulfurização visando a limpeza fina.

4.2.3 Eliminação do siloxano

A combustão do biogás em motores a gás origina depósitos de silício de alta dureza, que têm efeito abrasivo e podem levar ao aumento do desgaste e dos danos nos equipamentos. A forma mais utilizada de tratamento é a remoção por carvão ativado.

Adsorção por carvão ativado: O adsorvente de siloxano é um reservatório preenchido com carvão ativado especial, no qual os siloxanos são adsorvidos e, com isso, podem ser atingidos valores de gás puro da ordem da exatidão de detecção (0,1 mg/m³). Os intervalos de manutenção dos filtros devem ser avaliados por meio de análises de gases, após a (re)instalação e durante a operação, e podem ser reduzidos com a instalação de dois filtros consecutivos, retardando a saturação.

4.2.4 Tecnologias para a eliminação de Dióxido de Carbono

Estão disponíveis atualmente no mercado diferentes opções, que utilizam métodos físicos e químicos para a remoção do CO₂ existente no biogás. As tecnologias mais difundidas serão detalhadas a seguir e comparadas na Tabela 19.

Adsorção com modulação de pressão (PSA): A tecnologia PSA se baseia na alternância entre adsorção e dessorção física mediante mudança da pressão no substrato, que ocasiona a aderência dos contaminantes do biogás, principalmente o CO₂, na superfície dos sólidos adsorbentes, como carvão ativado, zeólitos e peneira molecular de carbono. Esse processo pode ocasionar também uma pequena retenção de vapor de água, sulfeto de hidrogênio, enxofre e oxigênio. Devido à presença de metano nas emissões de lavagem, faz-se necessário pós-tratamento (queima ou oxidação).

Lavagem com água pressurizada: Nesse processo, a eliminação do dióxido de carbono ocorre por absorção através da inserção de água ao biogás. O dióxido de carbono, bem como componentes ácidos (H₂S) e básicos (NH₃), liga-se à água por meio de ligações físicas (fisissorção) ocasionadas pelo aumento de pressão, sendo eliminado do gás. A água pode ser regenerada através de despressurização e aeração. Assim como na PSA, é necessário pós-tratamento das emissões de lavagem.

Absorção química com solventes orgânicos: Esse método de quimissorção, também chamado de “lavagem com amina”, utiliza uma mistura de água e etanolamina como meio de absorção dos elementos indesejáveis que devem ser retirados do biogás, principalmente CO₂ e H₂S. Diferentemente das duas técnicas anteriormente apresentadas, nessa quase não há necessidade de pressurização, uma vez que a regeneração ocorre no desorvedor, por meio de aquecimento. Nesse caso, o pós-tratamento é dispensável, pois o processo oferece alta pureza ao gás com poucas perdas de metano.

Absorção física com solventes químicos: Esse tipo de absorção física funciona de modo semelhante à lavagem com água pressurizada, porém com uso de reagente orgânico (p. ex. misturas de poliglicóis) como absorvente, no qual as impurezas (CO₂, H₂S e H₂O) são absorvidas durante o aumento de pressão na coluna de absorção. A dessorção completa ocorre com uma despressurização parcial mediante aquecimento (50 a 80°C) e aeração das soluções de lavagem. Neste processo, novamente tem-se a necessidade de pós-tratamento (oxidação/queima) das emissões.

Método de membrana: Esse método utiliza-se da diferença de permeabilidade entre as membranas de polímero para separar o gás de interesse (CH₄) de suas impurezas indesejáveis. O processo ocorre com aumento da pressão que permite maior efusão dos gases pela membrana. A durabilidade e a eficiência da membrana podem ser melhoradas optando-se por um pré-tratamento do biogás antes da sua injeção da membrana, através da separação de poeira e aerossóis, secagem e dessulfurização. Assim como ocorre com a absorção física, o descarte das emissões de lavagem deve ser precedido de pós-tratamento.

Tabela 19: Características dos diferentes processos para a eliminação de CO₂.

A Tabela 19 compara as tecnologias aqui descritas com relação as suas características e a Tabela 20 com relação aos custos operacionais e de investimento.

PARÂMETROS DE PROCESSO	PSA	DWW	ABSORÇÃO QUÍMICA	ABSORÇÃO FÍSICA	MEMBRANAS
Capacidade típica de plantas [Nm ³ /h biometano]	300 - 800	200 - 1.200	400 - 2.000	300 - 1.500	50 - 500
Demanda energia elétrica [kWh/Nm ³ biometano]*	0,46	0,46	0,27	0,49 - 0,67	0,25 - 0,43
Demanda energia térmica [kWh/Nm ³] *	-	-	0,65	0,30	-
Temperatura [°C]	-	-	110 - 160	55 - 80	-
Pressão [bar]	4 - 7	5 - 10	0,1 - 4	4 - 7	5 - 10
Perda de metano [%]	1 - 5	0,5 - 2	0,1	1 - 4	2 - 8
Tratamento de gás de escape	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Dessulfurização	Sim	Dependendo do processo	Sim	Sim	Sim
Demanda água	Não	Sim	Sim	Não	Não
Demanda química	Não	Não	Sim	Sim	Não

* com base no produto gasoso.

Fonte: Technische Universität Wien, 2012.

Tabela 20: Custos para o tratamento de biogás na Europa.

CUSTOS	PSA	DWW	ABSORÇÃO QUÍMICA	ABSORÇÃO FÍSICA	MEMBRANAS
Investimento [€/Nm³/h biometano]					
100 Nm ³ /h biometano	10.400	10.100	9.500	9.500	7.300 - 7.600
250 Nm ³ /h biometano	5.400	5.500	5.000	5.000	4.700 - 4.900
500 Nm ³ /h biometano	3.700	3.500	3.500	3.500	3.500 - 3.700
Operação [ct/Nm³ biometano]					
100 Nm ³ /h biometano	12,8	14,0	14,4	13,8	10,8 - 15,8
250 Nm ³ /h biometano	10,1	10,3	12,0	10,2	7,7 - 11,6
500 Nm ³ /h biometano	9,2	9,1	11,2	9,0	6,5 - 10,1

Fonte: Technische Universität Wien, 2012.

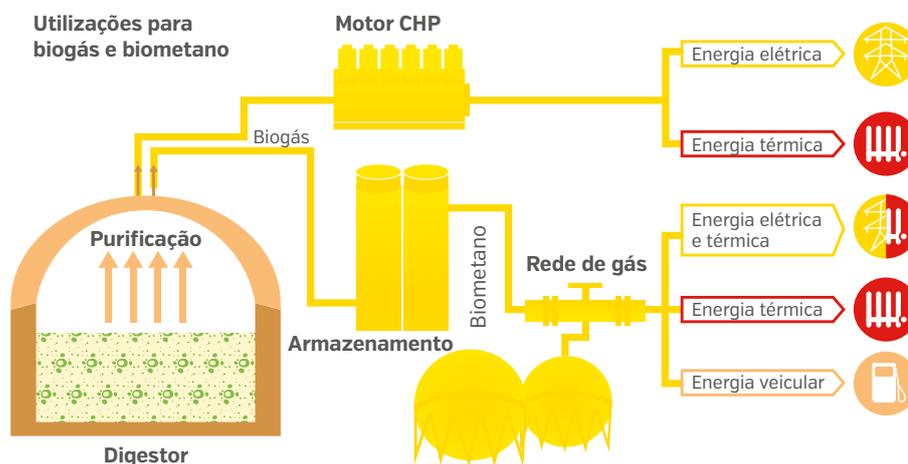
4.3 Aproveitamento de biogás

As principais opções de aproveitamento energético de biogás que podem ser consideradas tecnicamente amadurecidas e comprovadas na prática são:

- >> Motores a gás estacionários (CHP) para gerar energia elétrica e térmica;
- >> Caldeiras a gás para gerar energia térmica;
- >> Injeção na rede de gás natural através da purificação do biogás a biometano, possibilitando posterior aproveitamento como energia elétrica, térmica e energia veicular.

Como nos mostra a Figura 39, a partir de uma visão generalizada, a preparação e purificação do biogás depende do aproveitamento desejado. Em seguida, apresentaremos em detalhes as tecnologias de aproveitamento disponíveis.

Figura 39: Aproveitamentos energéticos para biogás e biometano.



Fonte: FNR.

4.3.1 Motores de cogeração CHP

Descrição do processo: Para a utilização do biogás para geração de energia elétrica, geralmente se utilizam motores à combustão com gerador de eletricidade que, devido à produção de calor, podem ser utilizados como CHP (Figura 40), com motores do tipo Otto/Gasolina (a gás) e diesel (bicombustíveis). Os motores a gás têm sido mais procurados atualmente devido às menores emissões de gases NOx, que, nesses motores, representam cerca de 20% das emissões dos motores bicombustíveis, além da redução na emissão de partículas de fuligem. Ambos os tipos de motores devem ser adequados pra suportar a variação na qualidade do biogás e as cargas de impureza, sendo que, no caso dos motores a gás, muitas vezes faz-se necessário um pré-tratamento do biogás.

Na utilização de um CHP, é possível explorar 90% da energia contida no gás. A separação do calor acontece em quatro lugares:

- >> Na água de refrigeração para o bloco do motor;
- >> No coletor de escape refrigerado com água;
- >> No trocador de calor de gás;
- >> No intercooler (refrigeração intermediária).

Figura 40: Contêiner com CHP.



Fonte: Rotária do Brasil.

O calor liberado pode ser utilizado a uma temperatura de cerca de 80°C, com uma diferença de temperatura de 20K entre entrada e saída. No caso de utilização de calor de emissão gasosa, a temperatura pode ser aumentada para até 150°C.

Motores a gás de ciclo Otto: Esses motores foram desenvolvidos para queima exclusiva com combustíveis gasosos e, baseados no princípio de Otto, utilizam o excesso de ar para diminuir emissões de CO₂ e SO_x. Para queima de biogás, exige-se uma concentração mínima de metano de 45% e a vida útil desses motores varia entre 40 e 60 mil horas, dependendo fortemente das condições de trabalho e do plano de manutenção. A faixa típica destes motores é entre 100 kWel e 1 MWel.

Motores bicombustíveis (motores com ignição a compressão): Esses motores, utilizados em carros de reboque ou caminhões, funcionam pelo princípio dos motores a diesel e, para a operação com uma mistura de diesel e biogás, ou seja, para serem bicombustíveis, necessitam de adaptações. Esses motores também funcionam com excesso de ar e necessitam da injeção de diesel (correspondente a 2% a 10% da potência) na câmara de combustão para auxiliar na combustão e refrigerar os bicos de injeção (carbonização). Para esse processo, há dois conceitos de controle que devem ser levados em consideração:

- >> Operação controlada pela quantidade de biogás – o controle de carga se efetua por meio do sistema de gás, significando que o motor trabalha com volume de diesel constante e volume de gás variável.
- >> Regulação de potência constante – na ausência de gás, ocorre a compensação de volume com o combustível diesel.

Os motores bicombustíveis geralmente contam com uma potência instalada de até 500kWel, com um tempo de operação menor que o dos motores a gás. É possível operar os motores bicombustíveis unicamente com diesel para, por exemplo, servirem de gerador de emergência. A potência neste caso se limita a 60% da potência nominal.

Geradores: Na construção de CHP, utilizam-se geradores elétricos de corrente alternada, que podem ser síncronos – mais complexos, ou assíncronos – mais simples e econômicos. Os geradores síncronos apresentam autoignição. A frequência da tensão produzida depende da rotação, significando a necessidade de adaptar a rotação do motor à frequência da rede. O gerador assíncrono é mais simples e com isso mais econômico. Ele recebe a tensão de ignição da rede, conseqüentemente, a frequência não depende da rotação, mas sim é determinada pela rede. No caso de falta de eletricidade o gerador assíncrono para de funcionar. O gerador assíncrono se utiliza somente para motores pequenos.

Input: O uso de biogás em motores a gás demanda que o gás utilizado tenha, no mínimo, um teor de metano de 45%, diferente dos motores bicombustíveis que trabalham com valores inferiores e, por esse motivo, apresentam a formação de vapores indesejados ao processo, causados pelos outros gases presentes em maiores quantidades. Em alguns casos, principalmente em plantas com resíduos da agropecuária, uma dessulfurização e uma desidratação/seca-gem são feitas no processo para garantir a qualidade exigida do biogás.

Eficiência / Produtividade: O grau de eficiência elétrica está entre 34 e 45% nos motores a gás, enquanto, para os motores bicombustíveis, a faixa de variação é de 30 a 45%.

Custos: Os custos específicos de investimento dependem significativamente da potência instalada, como mostra a Tabela 21, sendo que os gastos de manutenção e operação partem, normalmente, de 0,015 €/kWh para CHP com motores a gás. No caso da utilização de motores bicombustíveis, os custos podem variar de 0,005 a 0,015 €/kWh.

Maturidade tecnológica / Difusão internacional: Ambos os tipos de motores correspondem ao estado da arte.

Tabela 21: Custos específicos de motor a gás e bicombustível.

TIPO	POTÊNCIA	CUSTO DE INVESTIMENTO
Motores a gás	100 kW	1.200 EUR/kW
	600 kW	600 EUR/kW
Bicombustíveis	50 kW	1.400 EUR/kW
	100 kW	800 EUR/kW
	250 kW	450 EUR/kW

Fonte: *Resumo adaptado de FNR, 2013.*

Vantagens e desvantagens:**Tabela 22:** Comparação entre motor a gás e bicombustível.

MOTOR A GÁS	
VANTAGENS	DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> » Projetado especificamente para gás. » Menores emissões. » Menores custos de manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> » Custos de investimento mais elevados. » Na faixa potência inferior, apresenta menores eficiências.
BICOMBUSTÍVEL	
VANTAGENS	DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> » Menor custo de instalação. » Mesmo na faixa inferior, apresenta alta eficiência. » Fácil operação. » Sem tratamento complexo de gás necessário. 	<ul style="list-style-type: none"> » Aumento dos custos de manutenção [perigo de entupimentos, corrosão, etc.]. » Uso adicional de óleo de ignição. » Emissões.

Fonte: Elaboração própria.

4.3.2 Caldeiras de biogás (vapor e calor)

Descrição do processo: As caldeiras apresentam-se como outra possibilidade de utilização do biogás para a produção de calor que ocorre por meio da queima em sistemas de aquecimento, que se apresentam em três tipos:

- » Os queimadores atmosféricos são utilizados quando se trata de uma potência elétrica equivalente baixa, de até 35 kW. O ar é levado até a câmara de combustão pela força de sucção gerada pelo fluxo do gás, onde se misturam e a ignição é realizada eletricamente ou através de dispositivo de segurança.
- » Os queimadores com ventilador têm aplicação universal e recebem o ar para a queima com alta pressão pelo ventilador. No caso de potência térmica de até 10MW, são queimadores de bloco único com o ventilador integrado no bloco, e, no caso de uma potência maior, de até 30MW, o ventilador é instalado separadamente. A ignição também ocorre de maneiras distintas, sendo realizada através de chama incorporada no bloco e com queimador de baixa carga no caso das potências menores, enquanto que em potências maiores os queimadores de ignição são instalados separadamente. A Figura 41 apresenta uma caldeira em uma ETE.
- » Os queimadores tipo lança, com ou sem atomização de pressão do vapor (até 150MW), são adequados especialmente para lareiras de combustão curtas, instaladas, frequentemente, em um conjunto de caldeiras combinadas de carvão/óleo/gás natural.

Para utilizar a energia térmica gerada na combustão, precisa-se de uma caldeira, que se difere em caldeiras de água quente e de vapor e de acordo com suas configurações (flamotubulares, aquotubulares, de múltiplos passes, de alta ou baixa pressão).

No âmbito do aquecimento de água, também se usam caldeiras de condensação, que podem utilizar o calor latente do vapor para a geração de calor, por meio da refrigeração dos gases de escape abaixo do ponto de condensação.

Já existem queimadores e caldeiras especificamente projetados para serem utilizados com biogás.

Figura 41: Caldeira para aquecimento de um digestor.



Fonte: Rotária do Brasil.

Input e pré-requisitos técnicos: basicamente, os pré-requisitos específicos do biogás demandam as seguintes características para possibilitar uma queima segura:

- » O gás deve estar seco (umidade relativa < 60%) e limpo;
- » A porcentagem de metano deve estar acima de 50%, apresentando qualidade quase constante (variações de, no máximo, 5% no índice de Wobbe);
- » A pressão do gás não deve variar pronunciadamente;
- » Os queimadores demandam armaduras livres de metais não ferrosos (custos adicionais);
- » O teor total de compostos sulfurados não deve passar de 0,1%;
- » Eventualmente, deve-se implementar uma retenção de chama (queimadores adicionais com tubulação de gás de ignição).

Uma regulação de oxigênio não é possível para gases especiais, pois a recirculação de gás de escape ou do queimador não pode ser realizada no processamento com biogás em função LN/NR (Low Nox/Nox-reduzido).

Eficiência / Produtividade: Para as caldeiras com secagem, podem ser alcançados níveis de eficiência de até 85%, enquanto nos queimadores de condensação chega-se a valores superiores, com eficiência de até 95%.

Custos: As despesas de investimento estão entre 30 e 80 EUR/kWtérmico.

Potências nominais: A potência instalada depende do tipo de aplicação, podendo variar de 1 kW a potências maiores do que 150 MW.

Maturidade tecnológica / Difusão internacional: Os queimadores de gás apresentam uma difusão ampla, porém a utilização de biogás nesse processo demanda condições especiais. Devido a esses pré-requisitos, os produtores dos queimadores e das caldeiras devem ser contatados para informação especial sobre a aplicabilidade.

Vantagens e desvantagens: A principal vantagem das caldeiras de aquecimento e calor é relacionada aos custos, menores quando comparados aos CHPs. A limitação é que se pode produzir somente energia térmica.

4.4 Injeção de biometano nas redes de gás natural

A injeção de biometano na rede de gás natural ocorre em uma instalação especializada, que se compõe de uma estação de medição e regulação de pressão de gás, acessórios para aumento da pressão e medição de gás calibrável (quantidade, qualidade) para o condicionamento e o aumento de pressão no biometano. Os operadores da rede de gás demandam diferentes condições de qualidade do gás que, dependendo da região, devem ser reguladas na estação de introdução. Todos os componentes gasosos restantes no biogás, principalmente o dióxido de carbono (CO_2), devem ser eliminados (seção 3.2.4) para chegar a valores de 90% a 98% de CH_4 . Dependendo das regulações locais, antes da injeção, pode ser exigido ainda um aumento de valor calorífico do biometano, o que é possível através de mistura com outros gases, como propano ou butano.

Figura 42: Uso de biometano produzido na ETE Bottrop/Alemanha.



Fonte: EuWaK.

Antes da chegada à estação de separação de dióxido de carbono, são necessárias uma secagem e uma dessulfurização, pois a presença dessas substâncias pode levar à produção de subprodutos indesejáveis ao processo e à utilização do gás, tais como ácido sulfúrico, enxofre e oxigênio.

Vale ressaltar que o biometano purificado, alternativamente à injeção na rede, também pode ser engarrafado e utilizado como combustível veicular, conforme exemplo apresentado na Figura 42, no qual o biometano está sendo produzido na digestão do lodo da estação de tratamento de esgoto da cidade Bottrop (1,3 milhões de habitantes) e as diferentes oportunidades de uso de biogás foram pesquisadas em um projeto de P&D.

4.6 Referências

- AEOBIOM; 2013: European Biomass Association, SITE www.aebiom.org, publicação usada para adaptação dos esquemas: AEOBIOM Statistical Report, January 2013.
- DWA-M 361 [outubro de 2011]: Tratamento do Biogás. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- EurobservER, 2012, The state of renewable Energies in Europa, Edition 2012 <http://www.eurobserv-er.org/downloads.asp>
- EuWaK, Projeto P&D das Empresas Públicas de Água e Saneamento da Alemanha: Emschergenossenschaft & Lippeverband, na ETE da cidade Bottrop; SITE www.eglv.de/wasserportal/ueber-uns/kooperationen-und-projekte/euwak.html
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.– Basisdaten Bioenergie Deutschland, 2013.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. – Biomethan, Gülzow-Prüzen, 2012.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.– Leitfaden Biogas, Gülzow-Prüzen, 2013.
- Fraunhofer UMSICHT Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik – Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008 – Oberhausen, 2009.
- FNR: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Alemanha, esquema adaptado da sua publicação na internet, site <http://biogas.fnr.de/>
- GIZ Probiogas: Material adaptado de BTE [Beratungsteam Energie und Verfahrenstechnik, Alemanha, 2004] apresentado no curso Fundamentos de Biogás – Parte 1 11/2013, Brasília.
- Handreichung Biogasgewinnung - Nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow 2005.
- Lobato, Livia C. S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Doutorado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais UFMG. 2011.
- Technische Universität Wien – Überblick über Biogasaufbereitungstechnologien zur Produktion von Biomethan, 2012, http://www.energie-zentrum.com/pdf/biogasupgradingtechnologyreview_german1.pdf

5

ANEXOS

5.1 Anexo A: Matriz de tecnologias para geração de biogás

A matriz referente às tecnologias para a geração de biogás visa servir como base de informação para comparação de diferentes opções de produção de biogás a partir de diferentes substratos.

A partir dos quatro grupos setoriais: produção agrícola, indústria de alimentos, resíduos sólidos e tratamento de esgoto, são descritas as tecnologias-chave. A matriz conta com 21 parâmetros e características que foram levantados por especialistas internacionais, entre os quais se destacam:

- >> Premissas para escolha da tecnologia;
- >> Substratos e co-substratos;
- >> Produção específica de biogás;
- >> Escalas usuais de plantas de processamento de substrato para geração de biogás;
- >> Custo de investimento e operação;
- >> Quantidade de plantas instaladas;
- >> Tempo para implantação;
- >> Vida útil das construções e dos equipamentos;
- >> Vantagens e Desvantagens;
- >> Projeção da futura participação no mercado brasileiro.

A matriz não permite a tomada de decisões a favor ou contra uma determinada tecnologia na fase de elaboração de uma concepção e/ou de um projeto específico. Embora sejam informadas faixas mais prováveis, por exemplo, de custos ou taxas de produção de biogás, há muitos fatores e variáveis que devem ser avaliados cuidadosamente para cada caso específico.

Vale salientar que, na ausência de informações na literatura específica, foram estimados valores baseados na experiência dos autores deste documento.

	PRODUÇÃO AGRÍCOLA		INDÚSTRIA DE ALIMENTOS	
	LAGOA COM MISTURA MECÂNICA	CSTR COM MISTURA, VERSÃO BÁSICA	CSTR COM MISTURA, VERSÃO AVANÇADA	UASB (INDÚSTRIA)
Condições para emprego da tecnologia	Substratos orgânicos líquidos e pastosos, ou sólidos que se tornem líquidos no processo de biodigestão			“Efluentes sem sólidos separáveis (< 0,3 g/L), vazão > 500 m ³ /d”
Substratos	Biomassa da produção animal e vegetal com boa digestibilidade		Resíduos agroindustriais com alta carga orgânica	Efluentes com carga > 1.500 kg DBO ₅ /dia
Substâncias não orgânicas	Não aceitável			Não aplicável
Pré-tratamento	Se for necessário homogeneizar, cortar, triturar ou misturar com efluentes líquidos			Gradeamento ou filtração
Co-Substratos	Todo substrato orgânico que aumenta o rendimento de biogás e não impeça os processos biológico e mecânico			Normalmente não é aplicado
Concentração de Sólidos no reator	<15%	<20%	<20%	< 6% (fundo/pellets)
Produção específica de CH₄	10 - 300 Nm ³ CH ₄ /t	50 - 300 Nm ³ CH ₄ /t	50 - 450 Nm ³ CH ₄ /t	140 - 5.000 Nm ³ CH ₄ /t
Dimensão da planta m³/h CH₄	50 - 1.000 m ³ /h CH ₄	50 - 2.500 m ³ /h CH ₄	50 - 10.000 m ³ /h CH ₄	50 - 10.000 m ³ /h CH ₄
Investimento completo R\$/m³h CH₄ *	24.000 - 39.000 R\$/m ³	21.000 - 45.000 R\$/m ³	21.000 - 45.000 R\$/m ³ CH ₄	Extremamente específico
Custos O&M em % investimento	“Manutenção: 1% a 3% do investimento; Materiais e Seguro: 2% do investimento; Energia: 4% a 9% da energia gerada”			1% - 5% do investimento (depende de tecnologia)
Número de plantas (global)	<100 plantas	> 10.000 plantas		“800 - 1200 plantas (Alemanha 263 plantas)”
Tempo de construção	4-6 meses	4-6 meses	4-8 meses	6-9 meses
Tempo comissionamento	2-6 meses	2-6 meses	2-6 meses	2 - 3 meses
Vida útil da instalação civil	20 anos	15 - 20 anos		20 anos
Vida útil dos equipamentos	10 anos	10 anos		Controle a partir de 5 anos
Vida útil média	15 anos	15 anos		15 anos

	PRODUÇÃO AGRÍCOLA		INDÚSTRIA DE ALIMENTOS	
	LAGOA COM MISTURA MECÂNICA	CSTR COM MISTURA, VERSÃO BÁSICA	CSTR COM MISTURA, VERSÃO AVANÇADA	UASB (INDÚSTRIA)
Vantagens	<p>“Alternativa econômica agrícola; Aproveitamento de resíduos; Independência do mercado de commodities; Adequação a legislação ambiental; Possibilidade de intensificação da atividade pecuária; aumento da qualidade dos fertilizantes”</p>		<p>Aproveitamento energético de resíduos e efluentes do processamento; Adequação a legislação ambiental; Auto consumo de Energia e combustíveis e outras sinergias com indústria e agricultura [reuso de substratos tratados]</p>	
Desvantagens	<p>“Sazonalidade na produção agrícola e concorrência por área agrícola (vale somente para uso de biomassa dedicada); Custos operacionais e complexidade técnica para agricultura; Operacionalização da venda da energia gerada”</p>		<p>Complexidade logística para a indústria, O&M dentro de atividade industrial pode ser difícil, mais ainda quando o tratamento de resíduos e o setor da energia foram terceirizados.</p>	

*Condições específicas para o cálculo de custo /investimento nas áreas:

- Resíduos urbanos: custo so consideram o tratamento a partir dos digestores (não a coleta, a separação e outros tipos de pre-tratamento)
- Esgoto sanitário/ UASB: somente considera os custos da captação/transporte do biogás, sendo que o UASB ja existe.
- Lodo sanitário/ digestores: somente os custos adicionais, tendo como base a estabilização simultânea aeróbia.

RESÍDUOS MUNICIPAIS			
	DIGESTÃO ÚMIDA (CSTR, MISTURA)	DIGESTÃO SECA CONTÍNUA	DIGESTÃO SECA DESCONTÍNUA
Condições para emprego da tecnologia	Umidade > 85%, > 15.000 hab. [ca. 3.000 t/a]	Umidade < 75% > 80.000 hab. [ca. 15.000 t/a]	Umidade < 65%, > 25.000 hab. [ca. 5.000 t/a]
Substratos	Restos de alimentos [restaurantes, mercados, feiras e açougues]	"RSU em geral e qualquer outro lixo orgânico"	
Substâncias não orgânicas	Não aceitável	Parcialmente aceitável	Aceitável
Pré-tratamento	Coletado por separado e homogeneizar, triturar, e/ou misturar com efluente	Selecionar na planta, triturar, rosca transportadora para alimentar o reator, misturar com efluentes no processo	Selecionar na planta, triturar os resíduos grandes, entrar seca com carregadeiras, irrigação com inóculo
Co-Substratos	Substrato de caixa de gordura	"Efluentes líquidos e pastosos especialmente para aumentar a umidade dos substratos secos"	
Concentração de Sólidos no reator	10 - 15%	25 - 30%	35 - 45%
Produção específica de CH₄	50 - 350 Nm ³ CH ₄ /t 25 - 175 L CH ₄ /hab./d	50 - 250 Nm ³ CH ₄ /t 25 - 125 L CH ₄ /hab./d	35 - 90 Nm ³ CH ₄ /t 20 - 40 L CH ₄ /hab./d
Dimensão da planta m³/h CH₄	25 - 750 m ³ /h CH ₄	100 - 1.850 m ³ /h CH ₄	25 - 1.250 m ³ /h CH ₄
Investimento completo R\$/m³h CH₄ *	12.000 - 35.000 R\$/m ³ CH ₄	22.500 - 31.500 R\$/m ³ CH ₄	22.500 - 40.500 R\$/m ³ CH ₄
Custos O&M em % investimento	9% - 17% do investimento	9% -12% do invest.	12% - 14% do invest
Numero de plantas (global)	500 - 1.000 plantas	500 - 750 plantas	
Tempo de construção	10 - 15 meses	12 - 18 meses	9 - 12 meses
Tempo comissionamento	4 - 6 meses	3 - 6 meses	1 - 3 meses
Vida útil da instalação civil	15 - 20 anos	20 - 25 anos	
Vida útil dos equipamentos	5 - 10 anos	7 - 15 anos	
Vida útil média	10 - 15 anos	13 - 20 anos	
Vantagens	Aproveitamento energético dos resíduos úmidos e sua higienização; Redução de emissões e inconvenientes de aterros	Aproveitamento energético dos resíduos sólidos municipais com pouco prétratamento; Redução de emissões, Redução da disposição em aterros; Higienização dos resíduos,	
Desvantagens	Separação e triagem das frações orgânicas é exigente; desafio de comercialização dos fertilizantes	Investimento inicial para a planta relativamente alto; municipalidades ainda não tem experiências, estruturas para O&M	

ESGOTAMENTO SANITÁRIO		
	UASB (ESGOTO SANITÁRIO)	DIGESTOR DE LODO (CSTR)
Condições para emprego da tecnologia	ETE atendendo população > 30.000 hab.	Lodo da ETE atendendo população > 50.000 hab
Substratos	Esgoto Sanitário	Lodo primário, lodo gerado no tratamento biológico
Substâncias não orgânicas	Não aplicável	Não aceitável
Pré-tratamento	Gradeamento de < 0,8 cm, caixa de gordura e desareinamento	Adensador de lodo (decantação, flotação)
Co-Substratos	Não	Substrato de caixa de gordura, lodos fecais etc.
Concentração de Sólidos no reator	< 6% (fundo/lodo)	4% - 8 %
Produção específica de CH₄	"70 - 110 Nm ³ CH ₄ /t esgoto ** 11 - 18 L CH ₄ /hab./d ***"	"75 Nm ³ CH ₄ /t esgoto 12 L CH ₄ /hab./d"
Dimensão da planta m³/h CH₄	Não é aplicada	50 m ³ /h - 2.500 m ³ /h CH ₄
Investimento completo R\$/m³h CH₄ *	5 R\$/hab (adicionais)	30 R\$/hab.
Custos O&M em % investimento	A produção do biogás faz parte do processo de tratamento do esgoto	2% - 4% do investimento; mais faz parte do tratamento do esgoto
Numero de plantas (global)	Brasil e outros países com clima quente: 1.000 - 1.500	> 2.000
Tempo de construção	12-24 meses	12-24 meses
Tempo comissionamento	3-6 meses (sem inóculo)	3-6 meses
Vida útil da instalação civil	20 anos	20-30 anos
Vida útil dos equipamentos	Controle a partir de 5 anos	10 - 15 anos
Vida útil média	10 - 15 anos	20 anos
Vantagens	Maior eficiência energética no tratamento de esgoto, redução das cargas orgânicas com aproveitamento da energia, possibilidade de auto-consumo da energia, melhor qualidade do efluente	
Desvantagens	Informações estão sendo pesquisada dentro de projeto PROBIOGAS	Operação da ETE mais complexa, Redução do poder calorífico do lodo caso ser queimado

*Condições específicas para o cálculo de custo /investimento nas áreas:

- Resíduos urbanos: custo so consideram o tratamento a partir dos digestores (não a coleta, a separação e outros tipos de pré-tratamento)
- Esgoto sanitário/ UASB: somente considera os custos da captação/transporte do biogás, sendo que o UASB ja existe.
- Lodo sanitário/ digestores: somente os custos adicionais, tendo como base a estabilização simultânea aeróbia.

5.2 Anexo B: Matriz de tecnologias para o aproveitamento energético do biogás

A matriz referente às tecnologias para o aproveitamento energético do biogás, complementando a matriz de tecnologias de geração de biogás, visa servir de base de informação para interessados em comparar de maneira clara e direta as diferentes opções de aproveitamento energético do biogás.

Foram consideradas as três principais tecnologias de aproveitamento energético de biogás (Motores a gás estacionários, Caldeiras a gás e Injeção de biometano na rede de gás natural), levando em consideração sua maturidade, aceitação e relevância para as condições brasileiras. Para cada tecnologia, a matriz apresenta 17 características e condições necessárias para sua aplicação, que foram levantadas por especialistas internacionais, entre as quais se destacam:

- >> Conteúdo mínimo necessário de CH₄;
- >> Máximo teor de H₂S;
- >> Tamanho da planta;
- >> Maturidade tecnológica;
- >> Número de instalações em todo o mundo;
- >> Tempo de instalação e start-up;
- >> Vida útil;
- >> Custos de investimento e manutenção (Alemanha);
- >> Vantagens e desvantagens.

É importante destacar que os custos apresentados são os custos de implantação e operação das plantas na Alemanha e que, embora os autores informem faixas mais prováveis, por exemplo, de tempos de instalação e start-up, há muitos fatores e variáveis que devem ser avaliados cuidadosamente em cada caso específico.

Vale salientar que, na ausência de informações na literatura específica, foram estimados valores baseados na experiência dos autores deste documento.

	CHP	CALDEIRAS	INJEÇÃO NA REDE
Eficiência	Eficiência elétrica Motor ciclo Otto: 34 - 45 % (>300 KW) Motor ciclo Diesel 30 - 45 % Eficiência térmica 33 - 60 % Eficiência total ca. 90 %	85 - 95 %	Perda de metano de 0,1 - 8% [depende do processo]
Demanda própria de energia	-	-	0,06 - 0,33 kWhel/Nm ³ biogás bruto [depende do processo]
Teor mínimo de CH₄	45% para motores ciclo Otto 45% - 75%	> 50% Vol %	35% para viabilizar a purificação a 85% - 99%
Teor máximo de Enxofre (S)	50% - 80%	< 0,1 Vol %	< 30 mg/ m ³ n [biogás]
Teor máximo de H₂S	0,15 Vol %	0,1 Vol %	< 5 mg/ m ³ n [biogás] [não para todos os procedimentos]

	CHP	CALDEIRAS	INJEÇÃO NA REDE
Teor máximo de oxigênio (O₂)	não especificado	< 3,0 Vol %	< 0,5 - 3,0 Vol %
Teor máximo de compostos orgânicos (com silício)	< 5 - 10 mg/ m ³ n (biogás)	-	sem requisitos
Teor da umidade relativa	50% - 80%	< ponto de orvalho temp. solo	< 60% / < ponto de orvalho temp. Solo
Operação isolada (ilhamento) possível?"	Sim	só em caso de inceneradores/ queimadores atmosféricos	Sim [p.ex. enchimento em cilindros]
Tamanho da planta	10 kW _{el} - > 1 Mw _{el} [tecnicamente] > 150 kW _{el} [econômicamente]	1 kW bis >150 MW	300 - 3.000 Nm ³ /h CH ₄
Número de plantas no mundo	> 10.000	> 10.000	500 - 1.000
Tempo de instalação	Tempo de Entrega 3 - 4 Meses Montagem/Inst. 1 - 2 Semanas	Tempo de Entrega 0,5 - 4 Meses Montagem/Inst. 0,5 - 2 Semanas	3 - 6 Meses
Tempo de comissionamento	2 - 3 Dias	1 - 2 Dias	1 Mês
Vida útil	35.000 bis 60.000 horas de operação	Não há experiência para determinar a vida útil, estimativa 10 anos	15 Anos
Custos de investimento (Alemanha)	Ciclo Otto: 1.200 Euros/kW para 100 kW 600 Euros/kW para 600 kW Ciclo Diesel: 1.400 Euros/kW para 50 kW 800 Euros/kW para 100 kW 450 Euros/kW para 250 kW	30 - 80 Euros /kW term.	dependendo da capacidade e do processo da planta: 4.000 - 5.000 €/Nm ³ /h biogás bruto para 200 Nm ³ /h biogás bruto; 2.600 - 3.000 €/Nm ³ /h biogás bruto para 500 Nm ³ /h biogás bruto; 1.900 - 2.000 €/Nm ³ /h biogás bruto para 1.000 Nm ³ /h biogás bruto
Custos O&P (em % de Investimento)	0,005 a 0,03 Euros/kW _{el} + para Motor Ciclo Diesel até 10 % óleo diesel	1-3 % do Investimento	12 - 19% [600 - 950 €/Nm ³ biogás bruto/a]
Vantagens	Cogrador pode ser utilizado como gerador de emergência	"Preços baixos; Menor manutenção Geração de vapor possível"	Energia de alta qualidade armazenável
Desvantagens	Preços altos Manutenção cara Revisão geral após 5 - 8 anos	Somente energia térmica é utilizável	Custos de investimento elevados não econômico p/ pequenas plantas]; Tecnologia complexa e especializada; Não é possível o aproveitamento de calor para o aquecimento do biodigestor



Por meio da: **giz** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Ministério das Cidades

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PÁTRIA EDUCADORA

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7958-039-0



9 788579 580390

