

ETE

GUIA TÉCNICO
DE APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DE BIOGÁS
EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO



ETE

GUIA TÉCNICO
DE APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DE BIOGÁS
EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO

Coletânea de publicações do PROBIOGÁS
Série Aproveitamento Energético de Biogás
em Estações de Tratamento de Esgoto

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.

Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás ; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH [GIZ] ; autores, Bruno Silveira ... [et al.]. – Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2015.

183 p. : il. – [Aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto ; 1]

ISBN 978-85-7958-041-3

1. Biogás – saneamento ambiental – guia técnico - Brasil. 2. Digestão anaeróbia – guia técnico - Brasil. 3. Biogás – produção e utilização. 4. Biogás – aspectos tecnológicos. 5. Energia – fontes alternativas. I. Ministério das Cidades. II. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH [GIZ]. III. Silveira, Bruno. IV. Título. V. 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

Grupo de Trabalho composto por: Bruno Silveira (SANASA); Carlos Chernicharo (UFMG); Carolina Cabral (Rotária do Brasil); Caroline Suedos (SANASA); Christoph Platzer (Rotária do Brasil); Gilson Silva (Ministério das Cidades); Gustavo R. C. Possetti (Sanepar / ISAE-FGV); Heike Hoffmann (Rotária do Brasil); Hélinah Cardoso Moreira (GIZ); Humberto Belina Adamatti (CAESB); Marcelo Miki (SABESP); Mônica da Silva (CAESB); Renato Takahashi (SeMAE Rio Preto); Rosane Miki (SABESP); Sebastian Rosenfeldt (Rotária do Brasil); Valéria de Seixas Ferreira Araújo (COPASA); Victor Bustani Valente (GIZ); Waldo Villani (SeMAE São José do Rio Preto)

Coordenação do material

Hélinah Cardoso Moreira (GIZ) e Christoph Platzer (Rotária do Brasil)

Revisão Técnica

Carolina Cabral (Rotária do Brasil); Carlos Chernicharo (UFMG); Christoph Platzer (Rotária do Brasil); Gustavo R. C. Possetti (SANEPAR/ISAE-FGV); Hélinah Cardoso Moreira (GIZ); Sebastian Rosenfeldt (Rotária do Brasil)

Revisão Ortográfica

Wagner Santos

Apoio Técnico

Carlos Folytynek (Fokal Equipamentos Industriais Ltda)
Union Instruments GmbH
Höntzsch GmbH

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 PROBIOGÁS

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.

BIOGÁS

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

APRESENTAÇÃO DESTE GUIA

O Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) é produto de uma das iniciativas do PRO-BIOGÁS no setor de saneamento ambiental, notadamente voltada para o esgotamento sanitário. O Guia foi concebido por um grupo de trabalho multidisciplinar composto por profissionais de prestadoras de serviço de saneamento brasileiras, consultores especializados e pesquisadores, juntamente com representantes do Ministério das Cidades brasileiro e da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*.

Na concepção e elaboração do Guia, foram utilizados, mediante anuência da Associação Alemã de Gestão Hídrica, Efluentes e Resíduos (*Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. – DWA*), os seguintes guias técnicos alemães:

- » DWA M 363 – Origem, tratamento e utilização de biogás;
- » DWA M 212 – Equipamento técnico de digestores anaeróbios em ETEs;
- » DWA M 361 – Tratamento de biogás.

Publicações brasileiras, incluindo livros, artigos científicos, teses de doutorado, normas técnicas e legislações, além de experiências dos autores, também foram adotadas para fundamentar o documento, sobretudo para adaptá-lo ao contexto nacional.

Dessa maneira, o **Guia em questão contempla diretrizes para a concepção e para a elaboração de projetos de aproveitamento energético de biogás em ETEs no Brasil**. Para tanto, o documento foi estruturado em doze capítulos, que abrangem a origem do biogás e suas características, os processos anaeróbios de tratamento de esgoto e lodo, equipamentos de uma planta de biogás e os potenciais usos do biogás de ETEs.

Os capítulos 1, 2, 3 e 4 são dedicados à contextualização sobre o tema biogás no setor de saneamento, aos fundamentos sobre digestão anaeróbia e sobre as principais tecnologias para produção de biogás em ETEs, bem como às características e valores típicos de quantidade e qualidade do biogás proveniente de reatores UASB alimentados com esgoto sanitário e de digestores de lodo.

Os capítulos 5, 6 e 7 abordam aspectos técnicos referentes aos sistemas de coleta, de transporte e de armazenamento de biogás, incluindo dispositivos para seu manejo, monitoramento e queima.

Por sua vez, os capítulos 8 e 9 apresentam os potenciais usos do biogás de ETEs e seus respectivos requisitos de qualidade. Nesse sentido, são reportados diferentes métodos de tratamento do biogás, bem como as principais tecnologias de conversão de energia movidas a biogás.

Já os capítulos 10 e 11 contemplam os aspectos de segurança e as principais legislações ligadas ao aproveitamento energético do biogás de ETEs.

O capítulo 12, por fim, discorre sobre as oportunidades, os desafios e as perspectivas do uso do biogás de ETEs no Brasil.

Logo, este Guia reúne informações técnicas que possibilitam uma gestão mais eficiente do biogás oriundo de ETEs brasileiras e que, consequentemente, subsidiam a disseminação e o aprimoramento dos serviços de saneamento no país de forma sustentável.

SUMÁRIO

16	1 INTRODUÇÃO
----	--------------

18	2 A ORIGEM DO BIOGÁS
18	2.1 Preliminares
18	2.2 Esgoto e lodo como insumos para a produção de biogás
22	2.3 Fundamentos sobre digestão anaeróbia
25	2.4 Descrição dos modelos de processos anaeróbios
27	2.5 Fatores que influenciam a digestão anaeróbia

33	3 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ETEs
33	3.1 Reatores UASB
53	3.2 Digestores de lodo

63	4 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS
63	4.1 Principais componentes
64	4.2 Propriedades físicas e químicas

66	5 TRANSPORTE, MANOBRA E MONITORAMENTO DO BIOGÁS
66	5.1 Tubos e purgas
68	5.2 Tanque para remoção de sedimentos e de condensados
69	5.3 Dispositivos de proteção contra sobrepessão e vácuo
71	5.4 Válvulas para controle de vazão
71	5.5 Válvulas corta-chamas
72	5.6 Medições do biogás

78	6 ESTRUTURA DE ARMAZENAMENTO DE BIOGÁS
78	6.1 Formas de instalação do gasômetro
78	6.2 Medição do nível de enchimento do gasômetro
78	6.3 Armazenamento de biogás para utilização em caldeiras
80	6.4 Armazenamento de biogás para uso em motores a gás
81	6.5 Métodos de armazenamento de biogás
83	6.6 Sistemas de alta pressão

85	7 QUEIMADORES
85	7.1 Tipos de queimadores
87	7.2 Instalação e distâncias de segurança
87	7.3 Ignição e monitoramento da chama

88	8 TRATAMENTO DO BIOGÁS
88	8.1 Generalidades
89	8.2 Requisitos de qualidade conforme a utilização
93	8.3 Métodos de tratamento

113	9 UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS
114	9.1 Caldeira a gás
114	9.2 Secagem de lodo
116	9.3 Cogeração de eletricidade e calor
120	9.4 Máquinas rotativas a gás
121	9.5 Uso veicular
121	9.6 Cessão do biogás a terceiros/injeção na rede de gás natural

122	10 SEGURANÇA
122	10.1 Perigos
125	10.2 Proteção contra explosão
128	10.3 Normativas de segurança
129	10.4 Proteção contra incêndios
130	10.5 Sinalização de segurança
132	10.6 Medidas para segurança em plantas de biogás
140	10.7 Inspeções
143	10.8 Monitoramento
144	10.9 Avaliação e gestão de perigos
145	10.10 Gestão de incidentes, emergências e danos

147	11 LEGISLAÇÃO
-----	----------------------

148	12 OPORTUNIDADES, DESAFIOS E PERSPECTIVAS SOBRE O USO DE BIOGÁS DE ETES NO BRASIL
-----	--

154	13 REFERÊNCIAS
-----	-----------------------

161	14 ANEXOS
161	14.1 ANEXO A: Diagramas de Fluxo simplificado - Exemplos
164	14.2 ANEXO B: Legislação

LISTA DE FIGURAS

- 22 **2.1:** Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.
- 26 **2.2:** Balanço esquemático de DQO, ao longo do processo de degradação anaeróbia.
- 28 **2.3:** Influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento de archaeas metanogênicas.
- 33 **3.1:** Diagrama esquemático de reator UASB.
- 34 **3.2:** Fotos de reatores UASB: (a) interior; (b) cobertura; (c) visão aérea de reatores UASB.
- 36 **3.3:** Representação esquemática das rotas de conversão de DQO e dos fluxos de metano em reatores UASB.
- 37 **3.4:** Curva típica de vazão de biogás em função do tempo, na ausência de eventos de chuvas, para quatro reatores UASB alimentados com esgoto sanitário pouco concentrado.
- 40 **3.5:** Acúmulo de areia na caixa de distribuição de efluente dos reatores UASB.
- 40 **3.6:** Remoção de resíduos na caixa de distribuição de efluente dos reatores UASB.
- 40 **3.7:** Foto de um desarenador aerado com retirada simultânea de gordura.
- 42 **3.8:** Dispositivo de remoção de espuma na campânula de biogás.
- 42 **3.9:** Fluxograma do sistema de remoção de espuma testado na ETE Laboreaux.
- 43 **3.10:** Calhas de remoção de espuma com ajuste de nível implantadas na ETE Jacuípe II: (a) vista superior; (b) vista interna do reator.
- 44 **3.11:** Foto da camada de espuma espessa e sólida nos separadores trifásicos.
- 44 **3.12:** Foto da obstrução da tubulação de coleta de biogás devido à presença de espuma.
- 44 **3.13:** Foto do separador trifásico rompido por conta da obstrução, pela espuma, da tubulação de saída do biogás.
- 45 **3.14:** Foto de procedimento de verificação da estanqueidade do reator UASB a partir da injeção de fumaça.
- 46 **3.15:** Foto da câmara de gás de um reator UASB impermeabilizada com Polibrid.
- 47 **3.16:** (a) Foto da parede interna do reator UASB com sinal de corrosão na interface líquido-ar; e (b) Foto da parte superior da canaleta de concreto do efluente tratado do reator UASB comprometida pela corrosão.
- 47 **3.17:** (a) Foto da canaleta de concreto sem impermeabilização, após corrosão; e (b) Foto da canaleta de concreto recuperada e impermeabilizada.

- 48 **3.18:** [a] Foto da canaleta de concreto sem impermeabilização, após corrosão; e [b] Foto da canaleta de concreto recuperada e impermeabilizada.
- 50 **3.19:** Foto de um procedimento manual de desobstrução das tubulações de entrada de esgoto sanitário de um reator UASB.
- 54 **3.20:** Fotos de digestores de lodo: [a] forma oval na ETE Wass- mansdorf - Alemanha; [b] ETE Neckarsulm - Alemanha; [c] Serviços Ambientais de Ribeirão Preto S/A [ETE Ribeirão Preto]; [d] SABESP [ETE Franca]; [e] SABESP [ETE Suzano].
- 55 **3.21:** Balanço de massa e energia em digestor anaeróbio.
- 62 **3.22:** Captação de gás no topo do digestor com proteção contra partículas.
- 67 **5.1:** Foto de uma junta de expansão (à esquerda) e de um registro (à direita) incorporados a um gasoduto.
- 68 **5.2:** Diagrama esquemático de um filtro de cascalho e/ou de cerâmica para remoção simultânea de sedimentos e de condensados.
- 68 **5.3:** Foto de um separador de sedimentos com dreno para condensado.
- 69 **5.4:** Foto de uma válvula reguladora de pressão (ao centro) instalada em um gasoduto (em amarelo).
- 70 **5.5:** Selo hidráulico como regulador hidráulico de sobrepressão e subpressão.
- 75 **5.6:** Medidores de vazão de biogás: a) e b) Tipo Vórtex; c) tipo mássico por dispersão térmica.
- 76 **5.7:** Medidor de composição de biogás.
- 79 **6.1:** Padrão de produção de biogás com alimentação [semi]contínua.
- 80 **6.2:** Padrão de produção de biogás com alimentação única de lodo bruto.
- 80 **6.3:** Padrão de produção de biogás com duas alimentações de lodo.
- 82 **6.4:** Gasômetro com membrana e carga de peso/ lastro.
- 82 **6.5:** Gasômetro com tubos infláveis [com lastro].
- 82 **6.6:** Tanque de biogás com membrana dupla submetida a ar comprimido.
- 82 **6.7:** Reservatório de biogás não pressurizado.
- 83 **6.8:** Foto do gasômetro: [a] de membrana dupla da ETE Arrudas - Belo Horizonte; [b] de tubos infláveis da ETE industrial Carl Macher - Alemanha; [c] e [d] com membrana e lastro da ETE Taunusstein - Alemanha.
- 86 **7.1:** Foto de Queima- dores: [a] aberto; [b] enclau- surado; [c], [d] semi-enclau- surado; [e] Dampers de flare enclausurado.
- 89 **8.1:** Necessidade de tratamento conforme o uso final.
- 94 **8.2:** Montagem de gasômetro com biodessulfurização interna - ETE Jacuípe II - Bahia.
- 95 **8.3:** Biodessulfurização em biopercolador - ETE de Augsburg - Alemanha.

97	8.4: Remoção de H ₂ S por carvão ativado – ETE de Augsburg – Alemanha.
100	8.5: Métodos de tratamento do biogás para a separação do CO ₂ .
101	8.6: Fluxograma de processos: Adsorção com modulação de pressão com quatro unidades de adsorção.
103	8.7: Fluxograma de processos: lavagem com água pressurizada e regeneração.
104	8.8: Fluxograma de absorção física com solventes orgânicos.
105	8.9: Fluxograma de absorção química com solventes orgânicos.
106	8.10: Impurezas removidas pela membrana.
109	8.11: Remoção de Siloxanos por carvão ativado – ETE de Augsburg – Alemanha.
113	9.1: Utilização de Biogás.
114	9.2: Caldeira a biogás.
116	9.3: Esquema da transferência de calor de [a] secadores diretos; e [b] secadores indiretos.
118	9.4: Diagrama esquemático do funcionamento de uma turbina a gás.
119	9.5: Foto do sistema de geração distribuída de energia elétrica da ETE Ouro Verde/Foz do Iguaçu movido a biogás.
124	10.1: Diagrama ternário da faixa explosiva de misturas de metano/ ar/dióxido de carbono e misturas de metano/ar/ nitrogênio.
128	10.2: Exemplo de proteção contra descargas atmosféricas para um gasômetro.
144	10.3: Análise de Perigos e Riscos.
161	14.1: Exemplo de diagrama de fluxo simplificado – planta de biogás com gasômetro de baixa pressão no fluxo principal.
162	14.2: Exemplo de um diagrama de fluxo simplificado – planta de biogás com gasômetro não pressurizado no fluxo principal.
163	14.3: Exemplo de um diagrama de fluxo simplificado – biodigestor com gasômetro de baixa pressão em paralelo.

LISTA DE TABELAS

19	2.1: Principais características físicas e químicas do esgoto sanitário e suas contribuições per capita.
21	2.2: Origem e descrição dos lodos gerados no tratamento de esgotos sanitários.
21	2.3: Taxas de produção e características típicas de lodos.
38	3.1: Relações uni- tárias de produção de meta- no, de biogás e de energia em reatores UASB tratando esgoto sanitário.
55	3.2: Indicadores de produção de energia em digestores de lodo primário e secundário a partir da DQO aplicada.

56	3.3: Produção de biogás conforme a modalidade de lodos ativados.
60	3.4: Propriedades e produção de biogás específica de substratos relevantes.
63	4.1: Composição típica de biogás em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário e digestores de lodo.
65	4.2: Características de diferentes tipos de gases.
65	4.3: Características de diferentes tipos de gases.
74	5.1: Visão geral de vantagens e desvantagens de diferentes tecnologias de medição de vazão [volume] de biogás.
77	5.2: Parâmetros a serem monitorados em uma planta de aproveitamento de biogás.
81	6.1: Influência do modo de operação de equipamentos de utilização de biogás sobre o dimensionamento de gasômetros.
89	8.1: Requisitos de qualidade conforme a utilização.
90	8.2: Especificação do Biometano[1] pela Resolução ANP nº 8 de 2015.
110	8.3: Processos de dessulfurização.
111	8.4: Indicação da necessidade de remoção de compostos em função do processo de tratamento.
112	8.5: Comparação das tecnologias em operação comercial para purificação de biogás.
115	9.1: Características de secadores diretos e indiretos.
117	9.2: Comparação entre motores a gás de ciclo Otto e Diesel.
119	9.3: Eficiências elétricas de diferentes tipos de plantas de cogeração.
119	9.4: Eficiências térmicas de diferentes tipos de plantas de cogeração.
122	10.1: Efeitos do dióxido de carbono.
123	10.2: Efeitos do sulfeto de hidrogênio.
130	10.3: Sinalização de segurança.
131	10.4: Sinalização de segurança – Continuação.
132	10.5: Classificação de Inflamabilidade de Materiais.
141	10.6: Inspeções antes da entrada em operação.
142	10.7: Inspeções periódicas.
164	14.1: Normativas básicas nacionais e internacionais.
168	14.2: Legislação ambiental
174	14.3: Legislações referentes à energia elétrica e ao gás.
181	14.4: Legislações referentes à segurança.
182	14.5: Legislações referentes ao composto.

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

SÍMBOLO/ABREVIATURA	DESCRIÇÃO
ATEX	Francês: " <i>Atmosphère explosible</i> ". A abreviatura indica as diretivas europeias para proteção contra explosões 94/9/CE e 1999/92/CE.
CHP	Planta de cogeração de energia elétrica e calor
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão (0°C e 1 atm)
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
DWA	Associação Alemã de Gestão Hídrica, Efluentes e Resíduos (<i>Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.</i>)
EPT	Equivalente populacional total
ETE	Estação de tratamento de esgoto sanitário
LAP	Lavagem com água pressurizada
LEO	Limite de exposição ocupacional
Nm³	Normal metro cúbico. Representa o volume de gás equivalente a 1 m ³ em CNTP (0°C e 1 atm).
NL	Normal litro. Representa o volume de gás equivalente a 1 L em CNTP (0°C e 1 atm).
NTK	Nitrogênio total Kjeldahl
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PEAD	Poliétileno de alta densidade
Plansab	Plano Nacional de Saneamento Básico
ppm	Partes por milhão
ppmv	Partes por milhão em volume = 10 ⁻⁶
PSA	Adsorção com modulação de pressão (<i>Pressure Swing Adsorption</i>)
PVC	Policloreto de vinil
SSV	Sólidos suspensos voláteis
SSV_{vfl}	Sólidos suspensos voláteis no substrato afluente
SSV_{degrad}	Sólidos suspensos voláteis degradados
TA	Tanque de aeração
UASB	Reatores de fluxo ascendente e manta de lodo (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>)
WI	Índice de Wobbe inferior
WS	Índice de Wobbe superior

1

INTRODUÇÃO

No Brasil, o setor de saneamento ainda carece de significativos avanços, sobretudo no que diz respeito ao tratamento de esgotos sanitários. De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, menos de 40% do esgoto sanitário gerado no território brasileiro é tratado (SNIS, 2013). Por isso, nos últimos anos, as diretrizes para a universalização dos serviços de saneamento no país têm sido amplamente debatidas.

O Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab) compila essas diretrizes e indica que o governo brasileiro pretende investir, até o ano de 2033, mais de 500 bilhões de reais no setor de saneamento, em especial nos segmentos de coleta e tratamento de esgotos sanitários (BRASIL, 2013). Isso tem possibilitado a discussão crescente sobre as estratégias para a promoção do saneamento ambiental.

Assim, além da necessidade de ampliação dos índices de tratamento de esgoto, devem-se maximizar, continuamente, a eficiência operacional de plantas e a eficácia da remoção da carga poluidora, salvaguardando o destino ambientalmente correto e sanitariamente seguro de subprodutos, bem como a viabilidade financeira dos investimentos. Nesse contexto, os sistemas anaeróbios de tratamento de esgoto encontram grande potencial de aplicação.

As diversas características favoráveis dos sistemas anaeróbios, em relação aos sistemas aeróbios mecanizados, têm contribuído para sua disseminação no país, particularmente no que diz respeito aos reatores de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB – *upflow anaerobic sludge blanket*). Dentre suas características, destacam-se: a reduzida demanda de área, o baixo consumo de energia, a maior simplicidade operacional, a baixa produção de sólidos, o reduzido custo de implantação e a possibilidade de operação com elevados tempos de retenção de sólidos e baixos tempos de detenção hidráulica. Os sistemas anaeróbios de tratamento de esgoto são compatíveis, ainda, com as condições climáticas brasileiras, as quais são predominantemente tropicais e caracterizadas por elevadas temperaturas. Além disso, o tratamento anaeróbio do esgoto possibilita a obtenção de subprodutos que podem ser reaproveitados, como o biogás, um composto que pode ser utilizado para fins energéticos.

Não obstante, em um cenário com crescentes restrições ambientais quanto aos métodos de disposição de resíduos e com a recente Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecida pela lei federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), a digestão anaeróbia apresenta-se, também, como uma alternativa bastante atrativa para a estabilização do lodo gerado nos processos aeróbios de tratamento de esgotos sanitários, uma vez que proporcionam a redução do volume de material a ser disposto adequadamente e também a geração de biogás.

O potencial energético do biogás está associado à energia química nele acumulada. Isso acontece, porque o biogás é majoritariamente composto por metano, uma substância inflamável, inodora, incolor, com densidade menor que a do ar e com poder calorífico inferior igual a 50 MJ/kg. Cabe destacar, no entanto, que o metano é uma gás indutor do efeito estufa e que seu potencial de aquecimento global é 25 vezes maior que o atribuído ao dióxido de carbono (IPCC, 2013). Por isso, a recuperação do biogás tem sido

promovida com o intuito de minimizar impactos ambientais e de oferecer soluções energéticas renováveis.

Dessa maneira, no contexto de uma estação de tratamento de esgoto sanitário (ETE), o uso energético do biogás está em consonância com os conceitos de produção mais limpa, com eficiência ambiental e energética, assim como está alinhado com as iniciativas necessárias para a promoção de uma economia de baixo carbono. Por isso, a recuperação de energia a partir do biogás é bastante comum em países como Alemanha, Itália e Estados Unidos. Nesses países, com condições climáticas menos favoráveis, o biogás de ETE é proveniente, principalmente, dos digestores de lodo e, portanto, a maioria das referências existentes aborda essa tecnologia.

O uso do biogás está amplamente fundamentado na literatura e pressupõe a transformação de sua energia química. Nesse sentido, o biogás pode, por exemplo, ser utilizado para gerar energia elétrica e/ou para secar termicamente lodos e escumas. Além disso, o biogás pode ser empregado como combustível veicular, industrial ou residencial. No Brasil, entretanto, a maior parte das ETEs, quando recupera o biogás, simplesmente o queima antes de lançá-lo para a atmosfera, desperdiçando o seu potencial energético e seus eventuais benefícios econômicos, sociais e ambientais.

Em vista do aproveitamento do biogás encontrar-se ainda nos primeiros estágios no país, observa-se, atualmente, as dificuldades de um mercado incipiente. Dentre elas, a falta de normas e guias técnicos adaptados à realidade brasileira que indiquem as soluções tecnológicas mais apropriadas para projetos de manejo e recuperação de biogás, incluindo as particularidades de sua produção, de seu tratamento e de sua utilização.

É nesse contexto de carência de informações referentes às peculiaridades do Brasil que se aplica o presente Guia.

2

ORIGEM DO BIOGÁS

2.1 Preliminares

A digestão anaeróbia é o processo de degradação biológica da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio que, dentre outros subprodutos, gera o biogás. A digestão anaeróbia ocorre em etapas sequenciais, sendo cada uma delas caracterizadas pela atividade de grupos específicos de microrganismos. Somente na última etapa, chamada metanogênese, é formado o biogás. Em uma ETE, os substratos para a produção do biogás são o esgoto e o lodo.

Vale destacar que, mesmo que a motivação principal do uso da digestão anaeróbia no setor de saneamento seja o tratamento do esgoto e/ou do lodo, a geração de biogás merece atenção especial, uma vez que está relacionada diretamente à eficiência do processo. A otimização das condições visando uma maximização da geração de biogás deve ser considerada desde a fase inicial da elaboração do projeto até a operação dos reatores anaeróbios, proporcionando assim uma melhor gestão dos processos e consequente efficientização da ETE.

A seguir, são descritas as características do esgoto e do lodo em relação ao seu aproveitamento como substratos para a produção de biogás. Detalhes adicionais sobre o assunto encontram-se nas seguintes publicações: Von Sperling (2005), Jordão (2005) e Andreoli, Von Sperling & Fernandes (2010), dentre outras.

2.2 Esgoto e lodo como insumos para a produção de biogás

2.2.1 Caracterização do esgoto sanitário

O esgoto sanitário é composto, majoritariamente, por água, que corresponde a cerca de 99,8% de sua composição volumétrica. O restante é constituído por sólidos suspensos e sólidos dissolvidos, na forma de compostos orgânicos, nutrientes, microrganismos e sólidos inertes. Os volumes, composições específicas e concentrações do esgoto dependem da região atendida e de sua respectiva disponibilidade de água, do nível socioeconômico e das atividades desenvolvidas, incluindo as industriais, além de causas como ocorrências de infiltrações na rede coletora de esgoto (Von Sperling, 2005). A Tabela 2.1 apresenta, resumidamente, as principais características físicas e químicas do esgoto sanitário, bem como suas respectivas contribuições per capita.

Tabela 2.1: Principais características físicas e químicas do esgoto sanitário e suas contribuições per capita.

PARÂMETRO	CONTRIBUIÇÃO PER CAPITA (g/hab.d)		CONCENTRAÇÃO		
	FAIXA	TÍPICO	UNIDADE	FAIXA	TÍPICO
Sólidos Totais	120 - 220	180	mg/L	700 - 1350	1100
Em suspensão	35 - 70	60	mg/L	200 - 450	350
<i>Fixos</i>	7 - 14	10	mg/L	40 - 100	80
<i>Voláteis</i>	25 - 60	50	mg/L	165 - 350	320
Dissolvidos	85 - 150	120	mg/L	500 - 900	700
<i>Fixos</i>	50 - 90	70	mg/L	200 - 550	400
<i>Voláteis</i>	35 - 60	50	mg/L	200 - 350	300
Sedimentáveis	-	-	mL/L	10 - 20	15
Matéria orgânica					
DBO ₅	40 - 60	50	mg/L	250 - 400	300
DQO	80 - 120	100	mg/L	450 - 800	600
DBO _{última}	60 - 90	75	mg/L	350 - 600	450
Nitrogênio total	6,0 - 10,0	8,0	mgN/L	35 - 60	45
Nitrogênio orgânico	2,5 - 4,0	3,5	mgN/L	15 - 25	20
Amônia	3,5 - 6,0	4,5	mgNH ₃ / - N/L	20 - 35	25
Nitrito	~0	~0	mgNO ₂ / - N/L	~0	~0
Nitrato	0,0 - 0,2	~0	mgNO ₃ / - N/L	0 - 1	~0
Fósforo	0,7 - 2,5	1,0	mgP/L	4 - 15	7
Fósforo orgânico	0,2 - 1,0	0,3	mgP/L	1 - 6	2
Fósforo inorgânico	0,5 - 1,5	0,7	mgP/L	3 - 6	5
pH	-	-	-	6,7 - 8,0	7,0
Alcalinidade	20 - 40	30	mgCaCO ₃ /L	100 - 250	200
Metais pesados	~0	~0	mg/L	traços	traços
Compostos orgânicos tóxicos	~0	~0	mg/L	traços	traços

Fonte: Arceivala [1981], Pessoa & Jordão [1995], Qasim [1985], Metcalf & Eddy [1991], Cavalcanti et al. [2001] e Von Sperling [2005].

Além dos parâmetros listados na Tabela 2.1, a concentração de sulfato (SO_4^{2-}) no esgoto também tem muita relevância para o tratamento anaeróbio, uma vez que a produção de sulfeto de hidrogênio (H_2S) ocorre a partir da redução do sulfato. As concentrações desse, no esgoto, variam entre 50 e 100 mg/L, segundo Singh & Viraraghavan (1998 *apud* Glória, 2009), e entre 20 e 50mg/L, segundo Metcalf & Eddy (2003).

Quando a digestão anaeróbia do esgoto sanitário ocorre em um reator UASB, gera-se, como subproduto, o biogás. A produção do biogás, nesse caso, depende, principalmente, da concentração e da composição da matéria orgânica presente no esgoto, da temperatura em que o processo está sendo mantido e das características do reator. Vale ressaltar que o reator UASB também é utilizado para o tratamento de efluentes industriais com alta concentração de matéria orgânica advinda, por exemplo, de efluentes da indústria alimentícia. Essa aplicação é muito comum em países da Europa.

Em condições estáveis de operação, o reator UASB é capaz de remover entre 60 e 70% da DQO do esgoto sanitário e a produção específica teórica máxima de gás metano (CH_4) é de $0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}_{\text{remov}}$. No entanto, as produções específicas de campo (reais) são significativamente inferiores, conforme será discutido na seção 3.1.2.

Para cumprir a legislação ambiental, o esgoto sanitário, depois do tratamento em reatores UASB, normalmente necessita de um tratamento secundário, de forma a reduzir a matéria orgânica remanescente e, caso necessário, minimizar a concentração de nutrientes como o nitrogênio e o fósforo. Em alguns casos, ainda se faz necessária a etapa de desinfecção.

2.2.2 Caracterização do esgoto sanitário

Para poder ser usado como substrato na digestão anaeróbia, o lodo deve apresentar elevadas concentrações de matéria orgânica biodegradável. Isso se aplica principalmente aos lodos que são gerados pela decantação primária, no processo de tratamento de esgoto, e aos lodos secundários formados no tratamento biológico aeróbio. Comparado aos lodos primários, os lodos secundários são predominantemente compostos de biomassa, ou seja, células bacterianas que cresceram como resultado do processo de conversão biológica. A Tabela 2.2 descreve a adequação dos lodos formados na ETE como substrato para digestão anaeróbia, e a Tabela 2.3 apresenta valores típicos de produção de lodos no Brasil.

Os lodos são caracterizados pelos parâmetros sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST), que resultam da conversão da DQO do esgoto em lodo (Tabela 2.3). O conteúdo de matéria orgânica do lodo é caracterizado pelos parâmetros sólidos totais voláteis (STV) e sólidos suspensos voláteis (SSV). Segundo Andreoli, Von Sperling & Fernandes (2010), os lodos a serem digeridos, tipicamente, têm entre 75 e 80% SV/ST e os lodos digeridos têm entre 60 e 65% SV/ST, sendo o adensamento prévio do lodo um requisito importante para o digestor. A Tabela 2.3 mostra as características típicas de diferentes lodos.

Em condições controladas, o digestor reduz em torno de 50% do teor de SV do lodo sanitário (lodo primário e biomassa sem estabilização prévia) e a produção específica de metano situa-se entre $0,72$ e $1,12 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}_{\text{removida}}$ (Metcalf & Eddy, 2003).

Tabela 2.2: Origem e descrição dos lodos gerados no tratamento de esgotos sanitários.

TIPO DO LODO	ETAPA DO TRATAMENTO	ADEQUAÇÃO PARA A DIGESTÃO DO LODO
Lodo primário não estabilizado biologicamente	Esgoto permanecendo de 1 a 2 horas no decantador primário ou caixa de gordura e tanque com limpeza frequente (dias)	Os compostos orgânicos presentes no lodo primário apresentam <i>alto valor energético</i> , substrato ideal para digestão anaeróbia.
Lodo secundário (biomassa) não estabilizado biologicamente	Lodo ativado do tipo convencional Biofiltro aeróbio de alta carga	Nos lodos gerados (biomassa) no tratamento com alta carga (baixo tempo de retenção de sólidos), os compostos orgânicos absorvidos ainda não estão digeridos, apresentando <i>alto valor energético</i> para a digestão anaeróbia.
Lodo primário estabilizado biologicamente	Tanque séptico, Tanque Imhoff, reator UASB, RAC (Reator Anaeróbio Compartimentado <i>Baffled</i>), entre outros Lodo ativado de aeração prolongada, reatores de baixa carga e lagoas de tratamento	Estabilização anaeróbia: O tempo de 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. Estes lodos <i>não são aptos</i> como substratos para a digestão.

Fonte: Adaptado de Andreoli, Von Sperling & Fernandes (2010); Norma alemã DWA M 363 (2010).

Tabela 2.3: Taxas de produção e características típicas de lodos.

ORIGEM NO SISTEMA	RELAÇÃO SV/ST	KG SST/KG DQO APLICADA	%ST LODO ADENSADO
Lodo primário – Decantador primário	0,75 – 0,80	0,35 – 0,45	4 – 8
Lodo de excesso – Lodos ativados convencionais	0,70 – 0,80	0,25 – 0,35	2 – 6
Lodo de excesso – Lodos ativados com aeração prolongada	0,65 – 0,55	0,50 – 0,55	2 – 6

Fonte: Adaptado de Andreoli, Von Sperling & Fernandes (2010).

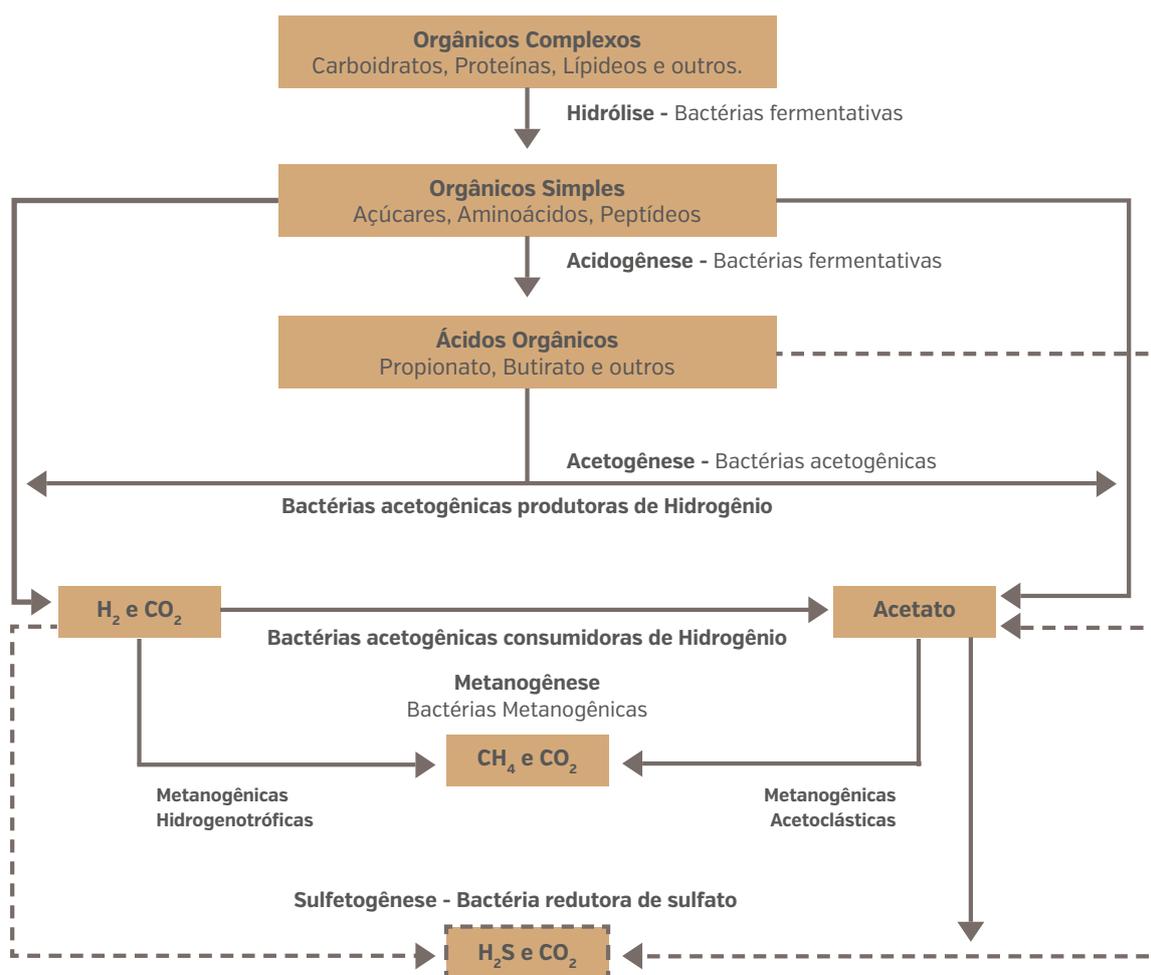
2.3 Fundamentos sobre digestão anaeróbia

Esta seção resume os fundamentos biológicos e bioquímicos das etapas da digestão anaeróbia. Mais detalhes, especialmente relacionados ao tratamento anaeróbio de esgoto, encontram-se em Chernicharo (2007).

A digestão anaeróbia pode ser considerada como um ecossistema em que diversos grupos de microrganismos (pertencentes aos domínios de *Bactérias* e de *Archaeas*) trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, dióxido de carbono, água, gás sulfídrico e amônia (Figura 2.1), recuperando, assim, a energia para o próprio crescimento, ou seja, formando o lodo anaeróbio.

Conforme ilustrado na Figura 2.1, o processo de digestão anaeróbia é subdividido em 5 etapas: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese, Metanogênese e Sulfetogênese. A Hidrólise e Acidogênese são realizadas pelas mesmas bactérias e consideradas como uma fase. A Sulfetogênese ocorre somente na presença dos sulfatos, e, nessa situação, compete com a Metanogênese, diminuindo a produção do metano.

Figura 2.1: Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.



Fonte: Chernicharo [2007].

A conversão de substrato em biogás ocorre com a participação de três grupos principais de microrganismos: (i) bactérias fermentativas, acidogênicas; (ii) bactérias sintróficas, acetogênicas; e (iii) arqueias metanogênicas. Há, ainda, um grupo opcional de bactérias e arqueias sulforedutoras. Conforme será explicado em seguida, cada grupo tem comportamento fisiológico diferente e funções específicas na cadeia da degradação.

2.3.1 Hidrólise e Acidogênese

Na primeira fase, ocorre a **solubilização da matéria orgânica**, ou seja, a quebra de *bio-polímeros*, que são os compostos orgânicos complexos presentes nos substratos.

Para a **hidrólise**, as bactérias liberam enzimas que convertem os carboidratos complexos em monômeros e açúcares; e as proteínas em aminoácidos e os lipídeos (gorduras), depois de sua emulsificação, em ácidos graxos. Em paralelo, as mesmas bactérias atuam na **fermentação, ou seja, na acidogênese** dos produtos obtidos, formando moléculas menores.

As bactérias fermentativas ocorrem em ambiente natural em grande quantidade e são as primeiras a atuar na etapa sequencial da degradação do substrato e, conseqüentemente, podem se beneficiar energeticamente mais que os microrganismos nas etapas seguintes. O processo da acidificação pode começar já na rede coletora ou quando o lodo com alto teor de material orgânico permanece certo tempo em condições anaeróbias. Como todos os processos biológicos, o processo de acidificação é acelerado em temperaturas elevadas.

Dessa forma, a etapa acidogênica só será limitadora do processo completo, se o material a ser degradado não for facilmente hidrolisável, como nos substratos com alto conteúdo de celulose, pectina, proteínas complexas e lipídeos ou gorduras, bem como no uso de lodo anteriormente estabilizado (Tabela 2.2).

2.3.2 Acetogênese

Essa fase depende da atividade de dois grupos de bactérias acetogênicas: os **produtores de hidrogênio**, que convertem os compostos orgânicos anteriormente gerados em acetato, liberando hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2); e os **consumidores de hidrogênio** (Figura 2.1) que produzem o acetato a partir de H_2 e CO_2 .

Segundo Chernicharo (2007), a coexistência de bactérias produtoras e consumidoras de hidrogênio exige a manutenção de baixas concentrações de hidrogênio e, além disso, sua produção poderá ser inibida pelo acúmulo do produto acetato.

Vale ressaltar que as bactérias acetogênicas, quando comparadas às outras na cadeia, têm uma taxa de crescimento muito baixa e pouco rendimento celular. Segundo Bischofsberger et al. (2005), sua recuperação em reatores de lodo, em condições mesofílicas, demora mais que 5 dias.

2.3.3 Metanogênese

A etapa seguinte, a metanogênese, consome o hidrogênio e o acetato, porém o excesso de acidez também inibe este processo. Assim como a produção de metano normalmente indica o bom funcionamento da acetogênese, a diminuição na produção (causada, por exemplo, pela competição com as bactérias sulforedutoras, seção 2.3.4) tem como resultado, necessariamente, o acúmulo elevado de hidrogênio (talvez também de acetato) e a inibição da acetogênese.

No final da cadeia de degradação anaeróbia nos reatores, desenvolvem-se duas funções primordiais: a produção do biogás, possibilitando, assim, a remoção do carbono orgânico da fase líquida; e, ao mesmo tempo, a manutenção das condições necessárias para a produção dos próprios substratos, promovendo baixa pressão parcial do hidrogênio e acetato no meio líquido, e resultando em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Esses microrganismos são altamente sensíveis a inibições.

Existe uma relação quase simbiótica entre os microrganismos acetogênicos e metanogênicos que exige manter, constantemente, a proximidade entre eles. Devido às características de seus substratos, as arqueias metanogênicas têm crescimento limitado e ainda são extremamente sensíveis, pois, na presença de oxigênio, são tóxicas e necessitam de um pH neutro ou ligeiramente alcalino, sendo facilmente inibidas, por exemplo, pela presença de sulfeto, ácidos orgânicos ou desinfetantes.

2.3.4 Sulfetogênese

Esse processo tem importância quando os substratos, esgoto e lodo sanitários contêm certas quantidades de sulfato (SO_4^{2-}), sulfito (SO_3^{2-}) ou outros compostos sulfurados.

As sulforedutoras (grupo versátil de bactérias e *archaeas*) utilizam compostos sulfurados, principalmente sulfato, para oxidar, bioquimicamente, compostos orgânicos (ácidos orgânicos, açúcares, glicerol, etanol, aminoácidos e acetato), produzindo os gases sulfeto de hidrogênio (H_2S) e CO_2 , ou, no caso da degradação incompleta, H_2S e compostos orgânicos de menor complexidade.

Na presença de compostos sulfurados, entretanto, as bactérias sulforedutoras competem com todos os compostos orgânicos formados na cadeia (Figura 2.1) e reduzem o rendimento da formação de biogás. Adicionalmente, o H_2S inibe as arqueias metanogênicas.

A sulfetogênese é mais eficiente na remoção de DQO do que a metanogênese (Chernicharo, 2007), o que resulta na redução do rendimento de metano, o produto com valor energético. Além disso, o gás sulfídrico, produto da sulfetogênese, causa problemas de corrosão, de maus odores e de toxicidade no ambiente dos reatores. Vale ressaltar que os substratos com baixa concentração de compostos sulfurados em relação à concentração de DQO permitem que o processo de digestão anaeróbia ocorra de acordo com as etapas apresentadas na Figura 2.1, sem competição significativa à metanogênese.

2.4 Descrição dos modelos de processos anaeróbios

Modelos de processos anaeróbios são ferramentas fundamentais para o desenho de reatores, permitindo concluir, entre outros, sobre a eficiência do tratamento, assim como sobre o volume e a concentração de biogás.

2.4.1 Balanço de DQO e potencial de degradação do substrato

Modelos de processos biológicos são baseados, principalmente, no parâmetro DQO, que é o equivalente de oxigênio necessário para oxidar a matéria orgânica por meios químicos. Sua aplicação para os diferentes tipos de matéria orgânica envolvidos nos processos biológicos possibilita, por exemplo, a comparação quantitativa entre os diversos produtos e subprodutos da conversão de matéria orgânica em biogás, chamado balanço de DQO.

Isso torna necessário que os parâmetros usados para a caracterização do teor da matéria orgânica (STV, SSV) da biomassa formada nos processos e da massa sólida do substrato devam ser convertidos por seu equivalente de DQO. A norma Alemã ATV-A 131 para projetos de ETEs de lodo ativado de grande porte propõe, para a concentração de SSV do esgoto bruto, o fator de $1,45 \text{ g}_{\text{DQO}}/\text{g}_{\text{SSVesgoto}}$, enquanto a produção de lodo em excesso (ou biomassa) no sistema de lodo ativado com idade de lodo de 16 dias é calculado com $0,67 \text{ g}_{\text{DQObiom}}/\text{g}_{\text{DQOremov}}$.

Nesta base, o **balanço de DQO**, por exemplo, diferencia na forma quantitativa a DQO dos substratos entre os três principais destinos do processo anaeróbio:

- » **Conversão de DQO em biogás:** especificamente o CH_4 , que conta com a energia bioquímica.
- » **Conversão de DQO em biomassa:** corresponde ao crescimento dos microrganismos que degradam a matéria orgânica e formam o lodo anaeróbio.
- » **Permanência de DQO no efluente:** DQO não degradável anaeróbiamente, produtos intermediários (ácidos orgânicos) e biomassa não retida no reator.

No balanço, a massa de DQO que entra com o esgoto e/ou com o lodo é igual à soma das massas de DQO convertidas em metano, de DQO convertida em biomassa anaeróbia, e de DQO presente no efluente.

Uma característica importante a ser considerada nos modelos é o potencial de degradação específico do substrato, que precisa ser analisada com ensaios laboratoriais (Chernicharo, 2007). Existem 3 frações principais de DQO: (i) compostos facilmente degradáveis, que entram diretamente na cadeia da digestão anaeróbia; (ii) compostos de difícil degradação, que, antes de sua metabolização, necessitam de uma adaptação dos microrganismos; e, por último, (iii) compostos orgânicos que são impossíveis de serem degradados biologicamente, sendo orgânicos inertes ou recalcitrantes.

Figura 2.2: Balanço esquemático de DQO, ao longo do processo de degradação anaeróbia.

Considerando essas condições, a Figura 2.2 sumariza, de forma esquemática, o balanço de DQO ao longo do processo de degradação anaeróbia. Conforme mostrado, apenas uma parcela da DQO_{total} é realmente convertida em substratos a degradar. Dessa parcela, uma parte ainda permanece no esgoto ou no lodo como ácidos orgânicos e outra parte de substrato é removida, sendo convertida em biogás.



Fonte: Chernicharo [2007].

Aplicado ao tratamento anaeróbio, o balanço de DQO é usado, principalmente, para calcular a geração específica de biogás do processo. Para o tratamento de esgoto sanitário em reatores UASB, são consideradas também as possíveis perdas de DQO, ou seja, a massa de DQO que falta no balanço, e saiu, por exemplo, como metano dissolvido no efluente (seção 3.1.2).

2.4.2 Cinética dos processos da degradação anaeróbia

A degradação biológica é baseada na recuperação da energia bioquímica pelos microrganismos degradadores, que crescem e formam biomassa ou lodo. Quando comparados com os processos que ocorrem na presença de oxigênio, os processos no meio anaeróbio permitem pouca recuperação da energia, e o valor energético do substrato diminui ao longo da degradação. Dessa forma, o processo anaeróbio completo normalmente é governado pela metanogênese.

O crescimento da biomassa anaeróbia (Y) resulta, para cada espécie, do valor energético específico do substrato e da carga de substrato removida. Ainda inclui outros fatores, por exemplo, o decaimento celular. De modo geral, o valor energético do substrato depende de seu potencial de degradação e do nível energético com que entra na cadeia de degradação. Segundo Lettinga *et al.* (1996 *apud* Chernicharo, 2007), por exemplo, açúcares têm Y de 0,12 a 0,15 $gSSV_{anaer}/gDQO_{remov}$, enquanto substratos já acidificados têm Y menor, na faixa entre 0,015 e 0,050 $gSSV_{anaer}/gDQO_{remov}$.

A taxa máxima de crescimento celular corresponde ao tempo que uma espécie necessita para se duplicar, o qual é influenciado, especificamente, para cada espécie e, principalmente, pela concentração do substrato. Dessa maneira, essa taxa depende da carga específica em que um substrato pode ser digerido com velocidade máxima e da concentração específica do substrato, na qual os microrganismos em questão chegam a 50% do crescimento máximo.

O tempo mínimo da residência celular (θ_c) define, para cada microrganismo, o tempo de permanência no sistema necessário para se multiplicar uma vez. O microrganismo que não permanece esse tempo será varrido do sistema, conduzindo à falha do processo. As bactérias acetogênicas e as arqueias metanogênicas, devido as suas baixas taxas de crescimento, exigem elevado tempo de residência celular e, assim, definem o tempo mínimo de permanência necessário da biomassa associada no sistema.

No tratamento anaeróbio de esgoto em reatores UASB, em que a retenção da biomassa (seção 3.1) é uma das características principais, o tempo da residência celular é praticamente independente da detenção hidráulica. Em relação ao volume do esgoto a tratar, os reatores UASB são extremamente compactos, permitindo tempos de residência celular suficientemente elevados ($\theta_c > 30$ dias) para estabilizar a biomassa formada.

No digestor, o tempo de detenção do lodo a tratar é igual ao tempo de residência celular da biomassa formada ($\theta_c > 20$ dias; condição mesofílica), permitindo a estabilização anaeróbia em conjunto. Digestores do lodo são compactos em relação à carga orgânica aplicada (lodos concentrados).

2.5 Fatores que influenciam a digestão anaeróbia

Além de suas capacidades cinéticas específicas, os microrganismos associados nos reatores anaeróbios são particularmente suscetíveis às condições ambientais e suas interações requerem que seja mantido um balanço delicado do sistema. A seguir, são comentadas as principais influências e os requisitos a serem respondidos em caso de problemas identificados.

2.5.1 Temperatura do processo anaeróbio

Dos fatores físicos que afetam a velocidade de reações bioquímicas, a temperatura é o mais importante. Para o crescimento microbiano, são diferenciadas as seguintes faixas:

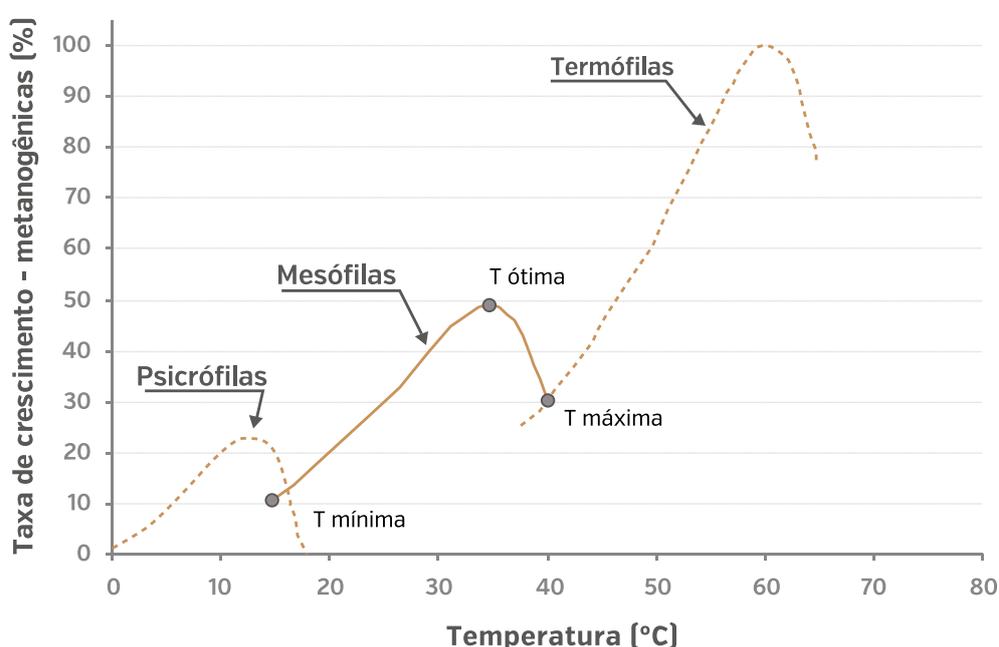
- » Faixa psicrófila: menor que 20°C;
- » Faixa mesófila: entre 20 e 40°C;
- » Faixa termófila: maior que 40°C.

As **bactérias fermentativas**, segundo Bischofsberger *et al.* (2005), chegam à sua taxa máxima de crescimento (100%), nas condições termofílicas, entre 50 e 55°C, enquanto, nas condições mesofílicas, encontram o ótimo (65% de taxa máxima) entre 30 e 40°C. A faixa mais estreita nas condições termofí-

licas significa maior sensibilidade, ou seja, neste caso, uma pequena alteração da temperatura influencia de forma significativa a eficiência.

As **arqueias metanogênicas** são ainda muito mais sensíveis à influência da temperatura. A Figura 2.3 mostra que as espécies termofílicas, que se encontram menos abundantes nos ambientes naturais, chegam à sua taxa máxima de crescimento (100%) a 60°C, enquanto em condições mesofílicas chegam perto de 50% dessa taxa nas temperaturas entre 32 e 36°C. Nos limites da faixa mesófila, abaixo de 28°C e em torno de 40°C, os reatores operam com menos de 30% da eficiência máxima.

Figura 2.3: Influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento de archaeas metanogênicas.



Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997).

Aplicando a teoria anteriormente descrita ao tratamento anaeróbico de esgoto e lodo de ETEs, pode ser observado que: o processo mesofílico, mantido em torno de 35°C, estabelece condições ótimas para o consórcio de microrganismos, e, diferente da situação termofílica, pequenas alterações não influenciam a sua eficiência.

O processo termofílico, aplicado entre 50 e 55°C (Bischofsberger et al., 2005), é mais eficiente, porém tem a desvantagem da maior sensibilidade e assim necessidade de maior controle. Esta deve ser compensada com um volume específico superior dos reatores, equalizando a vantagem teórica de volumes menores. Em comparação ao processo mesofílico, o substrato pode ser convertido de 20 a 30% a mais de volume do biogás. Por outro lado, porém, o biogás tem maior concentração de CO₂ e menos metano.

2.5.2 Interações de pH, alcalinidade e ácidos orgânicos

Mesmo que esses três fatores estejam relacionados, sendo igualmente importantes, o valor de pH serve como indicador principal para o controle da estabilidade de operação.

Segundo Chernicharo (2007), a faixa ótima de pH para manter a atividade de **arqueias metanogênicas** é relativamente estreita, entre 6,8 e 7,5, enquanto as **bactérias fermentativas** têm sua faixa ótima de pH entre 5,0 e 6,0, tendo tolerância para valores de pH de até 4,5. Essa diferença causa um dos principais problemas operacionais: a diminuição do valor de pH acelera a atividade de bactérias fermentativas, enquanto os consumidores de seus produtos, que são muito mais lentos, são inibidos pelo aumento de acidez.

Elevada acidez em reatores anaeróbios representa um dos principais problemas, que podem ser provocados por uma série de razões, mas necessariamente reflete uma condição de instabilidade e desequilíbrio das atividades dos microrganismos associados.

A sobrecarga orgânica e o excesso de substratos de fácil degradação, por exemplo, resultam no acúmulo de ácidos orgânicos produzidos na acidogênese, inibindo as bactérias acetogênicas e, assim, a metanogênese.

A sobrecarga hidráulica pode causar o arraste de biomassa, situação da qual as bactérias da acidogênese conseguem se recuperar mais rapidamente em função de sua maior taxa de crescimento. Isso resulta na acumulação de ácidos orgânicos, limitando, assim, ainda mais a recuperação de microrganismo da acetogênese e da metanogênese.

Uma característica especial de reatores anaeróbios é a sua vedação, necessária para captar o biogás produzido, o que resulta na dissolução de produtos gasosos na fase líquida. Entre esses produtos, o dióxido de carbono (CO_2), quando dissociado em ácido carbônico (HCO_3^- e H^+), tem efeito ácido. Se esse efeito não for tamponado pela alcalinidade, torna-se necessária a dosagem de alcalinizante.

Como alcalinizante para os processos anaeróbios, Bischofsberger *et al.* (2005) recomendam o uso do hidróxido de sódio (NaOH), visto que alcalinizantes com carbonatos (como Na_2CO_3) aumentam a pressão de CO_2 no sistema e, por isso, exigem dosagem elevada.

Chernicharo (2007) comenta que o uso de cálcio (cal virgem CaO ; cal hidratado Ca(OH)_2) traz o perigo de este ser convertido em carbonato de cálcio (CaCO_3), um produto inerte cujo acúmulo no fundo de reator causa sérios problemas operacionais. No caso da baixa concentração de CO_2 no meio líquido, a cal aumentaria o pH, podendo ser tão prejudicial para o processo quanto o pH baixo.

Bischofsberger *et al.* (2005) comentam que é necessário considerar a concentração de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) no substrato também para a alcalinidade, visto que o amônio (NH_4^+) liberado forma, com o CO_2 dissolvido, bicarbonato de amônia, aumentando assim a alcalinidade.

No caso dos digestores, o adensamento prévio do lodo afluente tem o efeito de aumentar relativamente a alcalinidade. O uso de lodos estabilizados (Tabela 2.2) também pode tamponar substratos com pouca alcalinidade. Por outro lado, o lodo sanitário tem uma concentração consideravelmente alta de NTK. Para evitar um efeito tóxico da amônia (seção 2.5.4), é recomendado não ultrapassar a concentração de sólidos totais de 80 g/L (8%), porém quando o teor de amônia é baixo, a concentração por chegar até 10% (Bischofsberger *et al.*, 2005).

No caso de tratamento anaeróbio de esgoto e lodo de ETEs, vale ressaltar que a operação com cargas relativamente equilibradas normalmente garante um equilíbrio entre produção e consumo de ácidos orgânicos e, conseqüentemente, o pH pode ser mantido entre 6,8 e 7,5. Caso contrário, é recomendado reduzir a carga orgânica (DQO), dosar alcalinizante ou aumentar a alcalinidade com co-substratos.

2.5.3 Concentração da matéria orgânica de substratos

No caso de **esgoto sanitário** e de outros efluentes com baixo teor de sólidos, a **concentração** de matéria orgânica se caracteriza **por meio da DQO**.

UASB/esgoto doméstico: A produção específica de biogás está diretamente relacionada às concentrações de DQO de fácil degradação. Baixas concentrações de DQO podem resultar em problemas de separação entre a fase sólida e a líquida, aumentando o perigo da perda de gás dissolvido com o efluente final. Por outro lado, concentrações acima de 3.000 mg DQO/L aumentam o perigo de inibição do processo por subprodutos ácidos e podem dificultar a separação entre a fase sólida e a gasosa (Bischofsberger et al., 2005).

A qualidade do esgoto influencia também na formação de grânulos anaeróbios, fenômeno restrito aos reatores UASB. Segundo Bischofsberger et al. (2005), a granulação é favorecida quando: (i) o substrato tem baixa concentração de sólidos suspensos; (ii) o efluente entra no reator ainda com pouca conversão de DQO em ácidos orgânicos (<30 a 50% de DQO_{total}); e (iii) a vazão não sofre grandes variações. No tratamento de esgoto, pode se tornar impossível manter essas condições e, segundo Chernicharo (2007), a floculação da biomassa anaeróbia também possibilita sua retenção no reator UASB.

No caso da **digestão anaeróbia de lodos** e outros substratos com elevado teor de sólidos, a **concentração** de matéria orgânica se caracteriza por meio de seu **teor de sólidos totais (ST) e sua relação com a fração orgânica SV (Sólidos Voláteis)**.

Digestor/lodos de esgoto: A concentração de sólidos voláteis (seção 2.2.2) forma a base do dimensionamento dos processos e também está relacionada à produção do biogás. Segundo Bischofsberger et al. (2005), o lodo a ser digerido pode ter concentrações de sólidos totais de até 10%, quando não apresentar elevada concentração de amônia.

Bischofsberger et al. (2005) discutem a necessidade de uma desintegração prévia do lodo (destruição da biomassa formada pelas células bacterianas) por processos mecânicos, térmicos ou químicos. Com isso, a geração de metano aumenta em 20 a 50%, embora possam ser identificados outros efeitos. Dependendo do processo usado, pode ser promovida uma higienização do lodo ou ser combatida a ocorrência de espumas no digestor. Por outro lado, os gastos e a carga elevada no lixiviado do lodo digerido (especialmente de nitrogênio) não têm justificado esse investimento atualmente.

2.5.4 Concentração de nutrientes nos substratos

Esgoto e lodo têm uma composição equilibrada de macro e micronutrientes e também concentrações adequadas aos microrganismos anaeróbios, pois estes, devido ao seu lento crescimento, demandam pequenas quantidades de nutrientes.

Chernicharo (2007) comenta que a relação de DQO:N:P para a biomassa anaeróbia crescer varia entre 350-1.000:5:1; ou seja, o esgoto sanitário pode ser tratado anaerobiamente sem suplementações. Dependendo das exigências locais, pode se tornar necessária a remoção de N e P após o tratamento anaeróbio. Portanto, faz-se mais importante considerar o efeito de nutrientes acumulados nos sistemas anaeróbios e analisar possíveis problemas relacionados.

Nitrogênio: sua presença depende dos compostos proteicos ou ureia (parâmetro NTK) e é o nutriente principal para o crescimento da biomassa. A amônia, que necessariamente resulta do processo de hidrólise, proporciona um efeito tampão por meio de formação de bicarbonato de amônia (seção 2.5.2), aumentando o pH no meio líquido. Entretanto, tanto o íon amônio (NH_4^+) quanto a amônia livre (NH_3), quando presentes em elevadas concentrações, podem se tornar inibidores conforme discutido na próxima seção.

Fósforo: assim como o nitrogênio, o fósforo é importante para o crescimento da biomassa e está presente em excesso no esgoto. A presença de elevadas concentrações de fósforo em um meio ligeiramente básico ($\text{pH} > 8,0$) pode causar a precipitação não controlada de MAP (Magnésio-Amônio-Fosfato), fenômeno documentado até agora principalmente em digestores do lodo e relacionado à presença de altas concentrações de magnésio no substrato. O resultado é um precipitado não solúvel, que diminui o volume do reator e dificulta a mistura. A retirada desse precipitado é um trabalho complicado que requer a parada do reator.

Cálcio: em concentrações elevadas (no substrato ou por dosagem como alcalinizante, seção 2.5.2), o cálcio pode ter um efeito parecido com o causado pelo fósforo, sendo que, nesse caso, a alta pressão de CO_2 favorece a precipitação de CaCO_3 . Segundo Bischofsberger *et al.* (2005), substratos com concentrações superiores a $100 \text{ mg}_{\text{Ca}}/\text{L}$ são críticos, condição geralmente não presenciada no Brasil. Apesar disso, altas concentrações de DQO no substrato em relação a baixos valores de pH (nos substratos ou meio líquido do reator) favorecem a precipitação de carbonatos de cálcio no reator.

2.5.5 Inibição e Toxicidade

A **inibição** representa uma **redução reversível** da atividade de microrganismos, enquanto o **efeito tóxico é irreversível**, exigindo o crescimento de uma nova população microbiana. Compostos inibidores e tóxicos podem estar **presentes no substrato** ou serem **liberados no próprio processo**.

Certas substâncias servem como micronutrientes (sódio, cálcio, potássio, magnésio, ferro, cromo, manganês, selênio, iodo, chumbo, molibdênio, níquel, arsênio) e somente em concentrações elevadas, ou em interação com

outras condições, têm um efeito tóxico. Relacionado ao tratamento anaeróbio na ETE, as substâncias mais críticas são o **oxigênio**, o **nitrogênio amoniacal**, os **compostos sulfurados**, os **ácidos orgânicos** e os **metais pesados**.

Oxigênio: As bactérias responsáveis pela hidrólise e acidogênese são facultativas, ou seja, suas vias metabólicas possibilitam recuperar energia tanto na presença quanto na ausência de oxigênio. As quantidades de oxigênio que podem entrar no reator com o substrato são rapidamente consumidas por essas bactérias, garantindo a ausência de oxigênio. Para as arqueias metanogênicas, porém, a presença de oxigênio pode ser tóxica. Ressalta-se, no entanto, que concentrações traço de oxigênio (condição microaerofílica) podem ser toleradas.

Compostos sulfurados: Estão presentes em maiores concentrações nos esgotos que recebem contribuições de fábricas de levedura, celulose, viscoso, curtumes, entre outros. O problema ocasionado pela presença desses compostos nos reatores anaeróbios decorre da competição com as metanogênicas pelo acetato, com efeito de diminuição de pH e inibição da acetogênese. Outro efeito é a toxicidade do produto H_2S , presente na fase gasosa ou dissolvido na fase líquida. Segundo Bischofsberger *et al.* (2005), a representatividade do H_2S como uma das formas de enxofre aumenta significativamente com a redução do pH. Com pH igual a 6,0, cerca de 90% do enxofre está presente na forma de H_2S , enquanto com pH igual a 8,0, há redução para somente 10%. A concentração de H_2S no biogás pode ser utilizada também como indicador. Concentrações acima de 3% sinalizam início de um processo inibidor e medidas corretivas devem ser tomadas, por exemplo, por meio de: (i) aumento do pH no reator; (ii) precipitação do H_2S com $FeCl_3$; (iii) redução da carga orgânica volumétrica para recuperar a eficiência de redução de DQO; e (iv) adição de co-substrato livre de compostos sulfurados para aumentar a relação DQO/ SO_4^{2-} acima de 10. Vale ressaltar que o H_2S é menos solúvel em temperaturas altas e, em condições termofílicas, tem menor efeito inibitório.

Ácidos orgânicos: seu acúmulo no reator indica problemas de equilíbrio entre a acidogênese e a metanogênese, tendo efeitos inibitórios com relação à acetogênese. O efeito depende do pH, sendo que, segundo Bischofsberger *et al.* (2005), com pH igual a 8,0, somente 0,1% de ácidos orgânicos entram na dissociação (liberação de H^+), já com pH de 6,0, o percentual passa para 90%. Nesse caso, as medidas para evitar a toxicidade do processo são: (i) aumentar o pH; e (ii) reduzir a carga orgânica aplicada a fim de reduzir a concentração dos ácidos acumulados.

Amônia: Esgotos e lodos sanitários com concentrações de sólidos voláteis inferiores a $8g_{sv}/L$ normalmente não têm efeito inibitório de amônia.

Na cadeia do processo anaeróbio, as arqueias metanogênicas acetoclásticas são mais afetadas por inibição. Além dos possíveis efeitos descritos do oxigênio, nitrogênio amoniacal, compostos sulfurados e ácidos orgânicos, existe uma série de substâncias tóxicas para os microrganismos, como: cianetos, herbicidas, desinfetantes, fenóis e hidrocarbonetos clorados, mas estes geralmente não estão presentes em concentrações tóxicas no esgoto sanitário e tampouco no lodo. Finalmente, é importante ressaltar que todos os microrganismos têm a capacidade de se adaptar a certas concentrações de substâncias tóxicas. Assim, os microrganismos podem se adaptar a problemas operacionais de ETEs normalmente causados por cargas súbitas e elevadas.

3

PRINCIPAIS TECNOLOGIAS PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ETES

A seguir, são apresentadas as principais características dos reatores UASB para o tratamento de esgoto sanitário e dos digestores anaeróbios para o tratamento de lodos gerados em ETEs. Entre as tecnologias anaeróbias, essas duas destacam-se pelo potencial de geração de biogás. Para aprofundamento no assunto, sugere-se a leitura dos livros de Chernicharo (2007), Jordão & Pessôa (2005), e Andreoli, Von Sperling & Fernandes (2010).

3.1 Reatores UASB

Entre os sistemas de tratamento anaeróbio de esgotos, destacam-se os reatores UASB. Cabe ressaltar que existem variações desses reatores, sobretudo quanto a suas características construtivas. Nesse sentido, têm-se, por exemplo, os reatores anaeróbios de leito fluidizado (RALF), os quais são amplamente utilizados no Estado do Paraná.

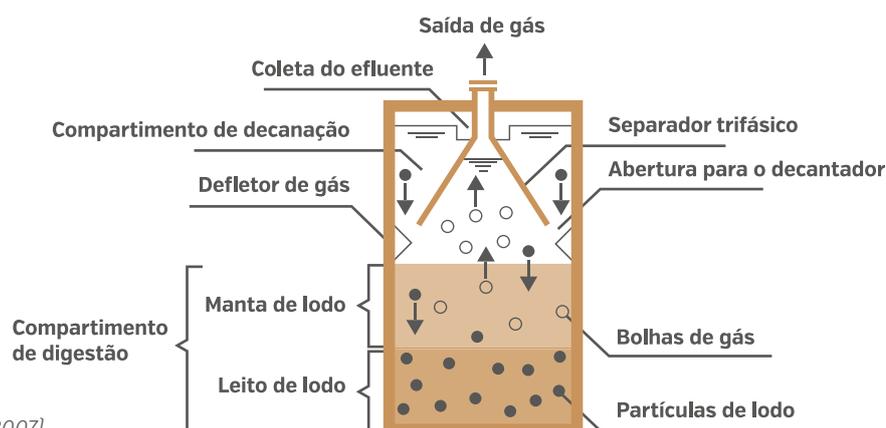
A característica hidrodinâmica dos reatores UASB permite a retenção de biomassa, possibilitando, portanto, elevado tempo de retenção celular com baixo tempo de detenção hidráulica do efluente, tipicamente entre 6 e 10 horas. Sua eficiência típica referente à remoção de carga orgânica (DQO) é de 60 a 70%. Uma característica específica dos reatores UASB é a elevada concentração do metano no biogás por ele produzido, o qual varia entre 60 e 85% v/v.

3.1.1 Funcionamento do reator UASB

Os reatores UASB tratam o esgoto sanitário necessariamente submetido a uma etapa prévia de tratamento preliminar, visando à remoção de sólidos grosseiros (detritos) e areia. As unidades que compõem o tratamento preliminar (grades, peneiras e desarenadores) devem ser objeto criterioso de projeto, a fim de garantir a efetiva remoção dos detritos que são prejudiciais ao funcionamento dos reatores. A NBR 12209:2011 traz recomendações importantes acerca do projeto destas unidades.

Esse reator anaeróbio reúne as funções de decantador primário, reator biológico, decantador secundário e digestor da biomassa formada. Uma representação esquemática de um reator UASB pode ser observada na Figura 3.1.

Figura 3.1: Diagrama esquemático de reator UASB.



Fonte: Adaptado de Chernicharo [2007].

O esgoto afluente entra em um reator UASB continuamente por meio de um sistema de distribuição no fundo do reator e passa em fluxo ascendente pelo leito e manta de lodo, onde ocorre a digestão anaeróbia, favorecida pelo contato e mistura intensiva do substrato (esgoto sanitário com a matéria orgânica) com a biomassa (lodo).

A manta de lodo é composta por microrganismos, que formam flocos suspensos ou grânulos densos. Nessa forma, pode-se desenvolver uma concentração de 40 a 100 g_{ST}/L . O efeito da floculação da biomassa resulta em características favoráveis à sedimentação e permite sua permanência no reator com tempo de retenção celular suficientemente elevado ($\theta_c > 30$ dias) para estabilizar a biomassa formada.

Depois da degradação anaeróbia da matéria orgânica, os produtos – (i) o efluente tratado, (ii) o biogás; e (iii) a biomassa gerada – devem ser separados. A biomassa, em sua maior parte, é mantida na parte inferior do reator por adesão nos flocos (*pellets*) e sedimentação. Uma parte da biomassa pode ser arrastada com o efluente junto com as bolhas de gás até a parte superior do reator, onde se encontra o separador trifásico.

No entorno e acima do separador trifásico, configura-se o compartimento de decantação, onde a biomassa mais pesada é removida do efluente líquido e retornada ao compartimento de digestão, conforme mostrado na Figura 3.1. Observa-se que as partículas mais leves são perdidas junto com o efluente final. As bolhas de gás sobem na fase líquida até encontrarem a interface líquido-gás, presente no interior do separador trifásico. Nessa interface as bolhas se desprendem, formando uma fase gasosa, o biogás.

Tal atmosfera apresenta fluxo de saída por meio de tubulações, que devem conduzir o biogás a algum tipo de tratamento e/ou aproveitamento. As bolhas de gás que se formam verticalmente abaixo das aberturas do separador trifásico precisam ser desviadas para evitar que passem pelas mesmas aberturas, criando turbulências no compartimento de decantação. Para tanto, colocam-se obstáculos que funcionam como defletores de gás abaixo das aberturas (Van Haandel & Lettinga, 1994). Para maiores detalhes construtivos sobre esses reatores, recomenda-se a literatura de Van Haandel & Lettinga (1994) e Chernicharo (2007).

As Figuras 3.2 (a), (b) e (c) ilustram, por sua vez, um conjunto de reatores UASB instalados no Brasil.

Figura 3.2: Fotos de reatores UASB: [a] interior; [b] cobertura; [c] visão aérea de reatores UASB.



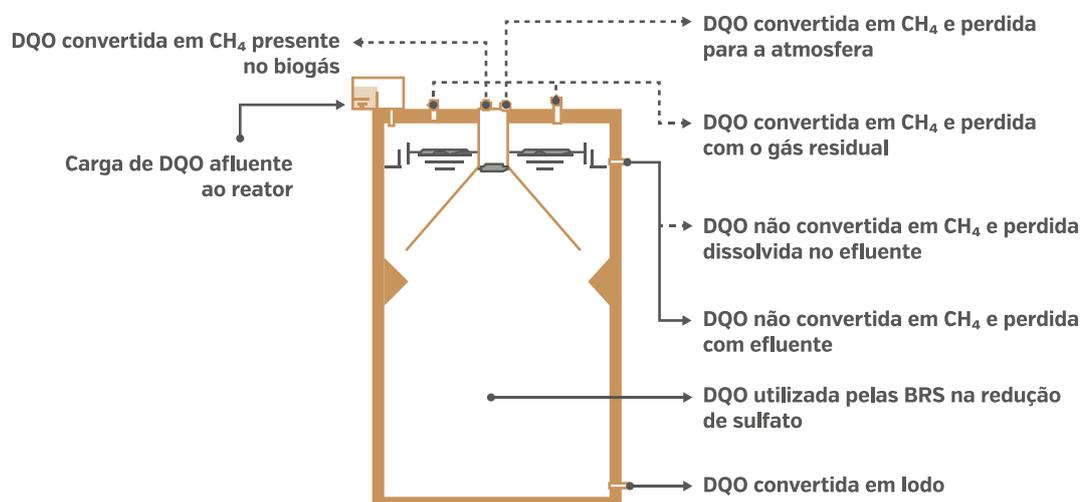


3.1.2 Balanço de DQO no reator UASB e taxa de produção de biogás

No balanço de DQO (seção 2.4.1), é necessário considerar todas as vias de transferência. A Figura 3.3 ilustra as rotas de conversão de DQO e os fluxos de metano em reatores UASB, resultando em 4 parcelas principais de DQO:

- » **DQO convertida em biogás/metano:**
 - » Metano presente no biogás captado;
 - » Metano dissolvido no efluente, dependente principalmente da concentração de DQO no afluente e da temperatura;
 - » Metano escapando com o gás residual, na captação de biogás, etc.
- » **DQO convertida em lodo/biomassa:**
 - » Biomassa retida no reator;
 - » Biomassa carregada no efluente, por exemplo, por causa da carga hidráulica elevada, acidez ou outras inibições.
- » **DQO usada para a redução de sulfato, em caso de concentrações elevadas;**
- » **DQO residual no efluente:**
 - » DQO inerte;
 - » Subprodutos (ácidos orgânicos).

Figura 3.3: Representação esquemática das rotas de conversão de DQO e dos fluxos de metano em reatores UASB.



Fonte: Adaptado de Lobato (2013).

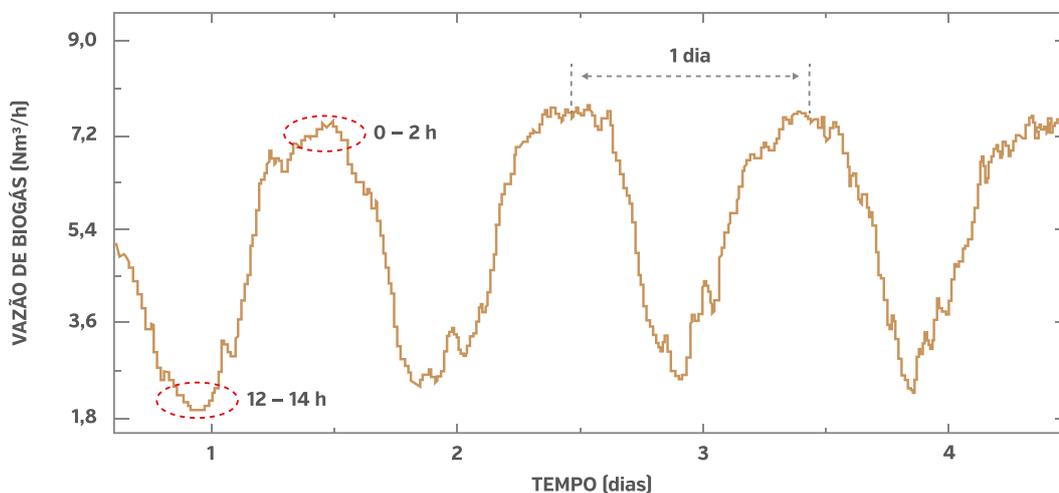
Dessas vias, a mais difícil para controlar e verificar é a parcela do metano que sai do sistema dissolvida no eflúente. Essa parcela pode ser significativa quando a concentração de DQO no afluente é muito baixa.

Por um lado, o metano tem baixa solubilidade em água e, portanto, pode ser rapidamente separado da fase líquida em reatores UASB. Por outro lado, o dióxido de carbono e o sulfeto de hidrogênio são muito solúveis, saindo do reator parcialmente como gás e também dissolvidos no eflúente líquido (Chernicharo & Stuetz, 2008; Souza *et al.*, 2010).

*Contudo, em reatores UASB tratando esgoto doméstico, tem sido observada a supersaturação do metano na fase líquida, o que, segundo os cálculos baseados na lei de Henry, pode levar a concentrações entre 15 e 50% de metano na fase líquida (Van Haandel & Lettinga, 1994). Os valores de perda de metano observados na prática normalmente variam entre 14% (Keller & Hartley, 2003), 36 a 41% (Souza *et al.*, 2010) e 50% (Agrawal *et al.*, 1997 e Pierotti, 2007). Normalmente, essa perda aumenta com a carga hidráulica aplicada, mas depende também de fatores como: temperatura e pressão parcial do gás no interior do reator, bem como tamanho da superfície líquida do reator. Devido à complexidade das análises em escala real, ainda existem bastantes dúvidas sobre os valores reais das perdas de metano juntamente com o eflúente.*

Possetti *et al.* (2013) mensuraram a produção de metano em reatores UASB em escala real. Os resultados mostram que a produção de biogás segue um comportamento temporal variável, periódico e não-estacionário, o qual depende criticamente das variações na vazão e da concentração do esgoto durante o dia, sofrendo influências por eventos de chuva. A Figura 3.4 apresenta uma curva típica de vazão de biogás em função do tempo, na ausência de eventos de chuvas, para quatro reatores UASB alimentados com esgoto sanitário pouco concentrado.

Figura 3.4: Curva típica de vazão de biogás em função do tempo, na ausência de eventos de chuvas, para quatro reatores UASB alimentados com esgoto sanitário pouco concentrado.



Fonte: Adaptado de Possetti et al. (2013).

Estudos de comparação entre as estimativas de produção de biogás e os resultados de medições foram recentemente realizados por Silva et al. (2014). Esses estudos reportam que a quantidade de energia estimada pelos métodos existentes é, em média, maior que aquela realmente disponível para uso. Isso acontece porque tais métodos não consideram as perdas de metano, assim como algumas importantes rotas de conversão de DQO durante o tratamento anaeróbico do esgoto.

Como o modelo proposto por Lobato (2011) contempla as quantidades de metano dissolvidas no meio líquido, assim como as perdas na forma de gases residuais e as perdas relacionadas à redução de sulfato, ele expressa de forma mais verossímil os fenômenos físicos, químicos e biológicos inerentes aos reatores UASB, fazendo com que os resultados obtidos a partir de sua aplicação apresentem menor desvio em relação aos valores mensurados.

Por isso, recomenda-se que as tomadas de decisão inerentes à recuperação do biogás sejam baseadas em resultados de medições e que, se porventura tal prática não for exequível, o modelo proposto por Lobato (2011) seja utilizado. Além disso, sugere-se que a análise de incertezas também seja realizada com o intuito de quantificar as limitações e os riscos inerentes aos projetos.

Diferentes relações unitárias foram obtidas a partir de simulações de cenários e da aplicação do modelo proposto por Lobato (2011). Dessa forma, consideraram-se três situações que acarretam em potenciais de recuperação de metano diferentes: (i) pior situação; (ii) situação típica; e (iii) melhor situação. A pior situação, na qual o potencial energético é menor, refere-se a sistemas operando com esgoto mais diluído, concentrações de sulfato maiores, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano. A melhor situação, em que o potencial energético é maior, refere-se a sistemas operando com esgoto mais concentrado, menores concentrações de sulfato, maior eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de metano. Para a situação típica, foram utilizados valores intermediários para os dados de entrada. Os resultados dessas simulações estão sumarizados na Tabela 3.1.

Essas relações unitárias são apenas valores de referência. Para a estimativa mais acurada das taxas de produção de biogás e de metano em reatores UASB alimentados com esgoto sanitário, sugere-se a utilização do programa computacional intitulado ProBio – Programa de Estimativa de Produção de Biogás em Reatores UASB. A versão 1.0 do ProBio é gratuita e está disponível para download nos seguintes endereços eletrônicos: www.desa.ufmg.br/software.html e www.sanepar.com.br.

Cabe destacar, ainda, que o governo brasileiro, por intermédio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, e o governo alemão, por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, estão conduzindo um projeto que visa a conceber uma base de dados experimental sobre a produção e as características do biogás oriundo de reatores UASB em dez estações de tratamento de esgoto espalhadas pelo país. As campanhas de medição foram iniciadas em 2014 e devem ser concluídas no segundo semestre de 2015.

Tabela 3.1: Relações unitárias de produção de metano, de biogás e de energia em reatores UASB tratando esgoto sanitário.

RELAÇÃO UNITÁRIA	UNIDADE	PIOR SITUAÇÃO			SITUAÇÃO TÍPICA			MELHOR SITUAÇÃO		
		MÁX.	MÍN.	MÉDIA	MÁX.	MÍN.	MÉDIA	MÁX.	MÍN.	MÉDIA
Volume unitário de CH ₄ produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	9,9	3,6	6,8	13,3	7,4	10,2	16,7	11,1	13,7
	NL.m ⁻³ esgoto	81,7	16,7	42,2	103,7	34,8	64,2	134,6	51,8	81,3
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	154,1	66,0	113,4	185,8	124,2	158,3	219,1	173,9	196,0
Volume unitário de biogás produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	14,1	5,2	9,8	17,7	9,9	13,6	20,8	13,9	17,1
	NL.m ⁻³ esgoto	116,7	23,8	60,3	138,3	46,4	85,6	168,3	64,8	101,6
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	220,1	94,3	162,0	247,8	165,6	211,1	273,9	217,4	245,0
Potencial energético unitário	kWh.m ⁻³ esgoto	0,8	0,2	0,4	1,0	0,3	0,6	1,3	0,5	0,8
	kWh.kgDQO _{remov} ⁻¹	1,5	0,7	1,1	1,9	1,2	1,6	2,2	1,7	2,0
	kWh.Nm ⁻³ biogás	7,0	7,0	7,0	7,5	7,5	7,5	8,0	8,0	8,0
	kWh.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
	MJ.m ⁻³ esgoto	2,9	0,6	1,5	3,7	1,2	2,3	4,8	1,9	2,9
	MJ.kgDQO _{remov} ⁻¹	5,5	2,4	4,1	6,7	4,5	5,7	7,9	6,2	7,0
	MJ.Nm ⁻³ biogás	25,1	25,1	25,1	26,9	26,9	26,9	28,7	28,7	28,7
MJ.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	0,4	0,1	0,2	0,5	0,3	0,4	0,6	0,4	0,5	

Fonte: Lobato (2011).

3.1.3 Aspectos críticos relativos a projeto, construção e operação de reatores UASB que influenciam a produção e a captura de biogás

Generalidades

Mesmo sendo uma tecnologia bastante difundida e com grande aplicabilidade no Brasil, os reatores UASB ainda apresentam algumas limitações de projeto, construção e operação que devem ser discutidas.

Muitos dos problemas referentes aos reatores UASB têm suas origens nas fases iniciais da concepção de projeto, bem como na construção de tais unidades. A ausência de uma previsão de procedimentos operacionais adequados, nessa fase de concepção, certamente leva a dificuldades operacionais futuras. A solução desses problemas pode levar a novos investimentos financeiros, dispêndios e prejuízos à operação.

Nesse sentido, são apresentados, a seguir, alguns aspectos que interferem na eficiência da produção de biogás e na eficácia de sua captura.

Tratamento preliminar: remoção de sólidos grosseiros e de gordura

Uma unidade que merece grande atenção na etapa de concepção de ETES é o tratamento preliminar. É imprescindível a efetiva remoção de sólidos grosseiros antes que os esgotos sejam encaminhados aos reatores UASB. No caso particular desses reatores, os problemas operacionais advindos da não remoção (ou remoção inadequada) de sólidos grosseiros podem colocar em risco todo o funcionamento do sistema de tratamento, uma vez que esses materiais podem afetar, negativamente, tanto a distribuição do esgoto afluente no fundo do reator quanto a geração e a acumulação de um lodo de características ruins, de baixa atividade e de difícil remoção. A preocupação com a entrada excessiva de sólidos de maiores dimensões nos reatores UASB é tão grande que muitos dos novos projetos consideram a implantação de peneiras com abertura de 2 a 6 mm, a fim de reduzir ao máximo esses problemas operacionais. Conforme a NBR 12209/2011, para vazões de esgoto acima de 100 L/s, é definido o uso de peneiras com abertura igual ou inferior a 6 mm.

Outro aspecto muito importante do tratamento preliminar é a remoção adequada da areia, mesmo em eventos de vazão elevada, especialmente chuvas. Também em relação a esse aspecto, a NBR 12209:2011 define uma taxa mais conservadora de aplicação hidráulica superficial, exatamente com o propósito de garantir maior eficiência de remoção de areia nos desarenadores.

Caso não haja a devida remoção dos resíduos sólidos, existirá uma possibilidade constante de ocorrerem obstruções nas tubulações internas de distribuição de fluxo dos reatores anaeróbios, criando, dessa maneira, fluxos preferenciais e/ou zonas mortas, que interferem significativamente na eficiência dos reatores UASB assim como na produção do biogás. Sem a existência de um sistema de tratamento preliminar eficiente, a areia e os resíduos contidos no esgoto bruto certamente ocupariam, nos reatores UASB, o espaço destinado à biomassa bacteriana.

O investimento na implantação de um tratamento preliminar eficiente, para a devida remoção de areia, sólidos grosseiros e finos, minimizam esses problemas.

As Figuras 3.5 e 3.6 ilustram o acúmulo de areia e de resíduos em caixas distribuidoras de efluente de reatores UASB.

Figura 3.5: Acúmulo de areia na caixa de distribuição de efluente dos reatores UASB.



Figura 3.6: Remoção de resíduos na caixa de distribuição de efluente dos reatores UASB.



Adicionalmente, os problemas operacionais advindos da não remoção (ou remoção inadequada) de gordura podem ser de elevada magnitude, uma vez que esses materiais podem propiciar o acúmulo excessivo de espuma no interior dos coletores de gases, dificultando a liberação destes e exigindo dispositivos especiais para a sua remoção periódica. Embora a implantação de uma unidade de remoção de gordura a montante de reatores UASB ainda não seja prática comum, os problemas operacionais que vêm ocorrendo em unidades já implantadas têm despertado a atenção dos projetistas, em relação à previsão de inclusão dessa unidade em novos projetos de reatores UASB. A Figura 3.7 apresenta uma foto de um desarenador aerado com remoção simultânea de gordura, uma solução muito comum em ETEs da Alemanha, porém ainda pouco utilizada no Brasil.

Figura 3.7: Foto de um desarenador aerado com retirada simultânea de gordura.



Distribuição do esgoto no reator

Em relação à distribuição de esgoto nos reatores, a Norma NBR 12209:2011 estabelece os requisitos necessários conforme o item 6.4.7. Um cuidado que deve ser observado é em relação às caixas de distribuição de esgoto. Esses dispositivos devem ser projetados de modo a não favorecer fluxos preferenciais, bem como não devem permitir a sedimentação de materiais sólidos.

Carga hidráulica volumétrica

A carga hidráulica volumétrica aplicada ao reator UASB tem grande influência sobre a eficiência de tratamento. Cargas hidráulicas elevadas provocam o arraste de lodo e a perda da biomassa, fato que leva à diminuição da eficiência do tratamento, tanto com relação à qualidade do efluente quanto com relação ao grau de estabilização do lodo. Em casos extremos, o tempo de permanência da biomassa no reator pode ser inferior a sua taxa de crescimento.

Chernicharo (2007) recomenda tempos de detenção hidráulica da ordem de 8 a 10 horas, referentes à vazão média, para reatores UASB operados a temperaturas em torno ou superiores a 20°C. Referente à vazão máxima, o tempo de detenção hidráulica deve ser superior a 4 horas.

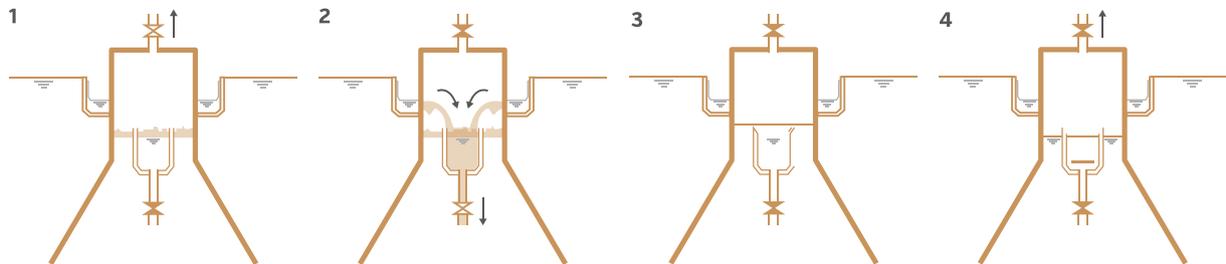
Separador trifásico

Uma das partes mais críticas de um reator UASB é o separador trifásico. A confecção de separadores trifásicos com materiais que apresentam alta resistência pode minimizar eventuais paradas para manutenção, reduzindo os riscos de acidentes, bem como a perda da capacidade de captura de biogás e aproveitamento energético. Na implantação de muitos reatores UASB, os separadores trifásicos são feitos de lona plástica e um item que merece especial destaque refere-se à amarração final. Não se deve permitir a concentração de tensões em pontos isolados da lona, caso contrário, esse material rasgará, prejudicando a sedimentação de partículas e o direcionamento do fluxo de biogás para o interior do separador. O escape de biogás para o compartimento de decantação dificultará a sedimentação de sólidos, deteriorando a qualidade do efluente, e ocasionará o incremento das emissões fugitivas de metano e de sulfeto de hidrogênio para a atmosfera, representando, ainda, perda de potencial energético.

Remoção de escumas

Outro aspecto importante a ser observado é a formação da espuma, tanto que a Norma NBR 12209:2011 cita a necessidade de se instalarem dispositivos de retirada de espuma. A Figura 3.8 apresenta a configuração de um dispositivo de remoção de espuma, que atua por meio do controle do nível do líquido dentro da campânula e o recolhimento da espuma por meio de calhas, conforme proposto por Chernicharo *et al.* (2009).

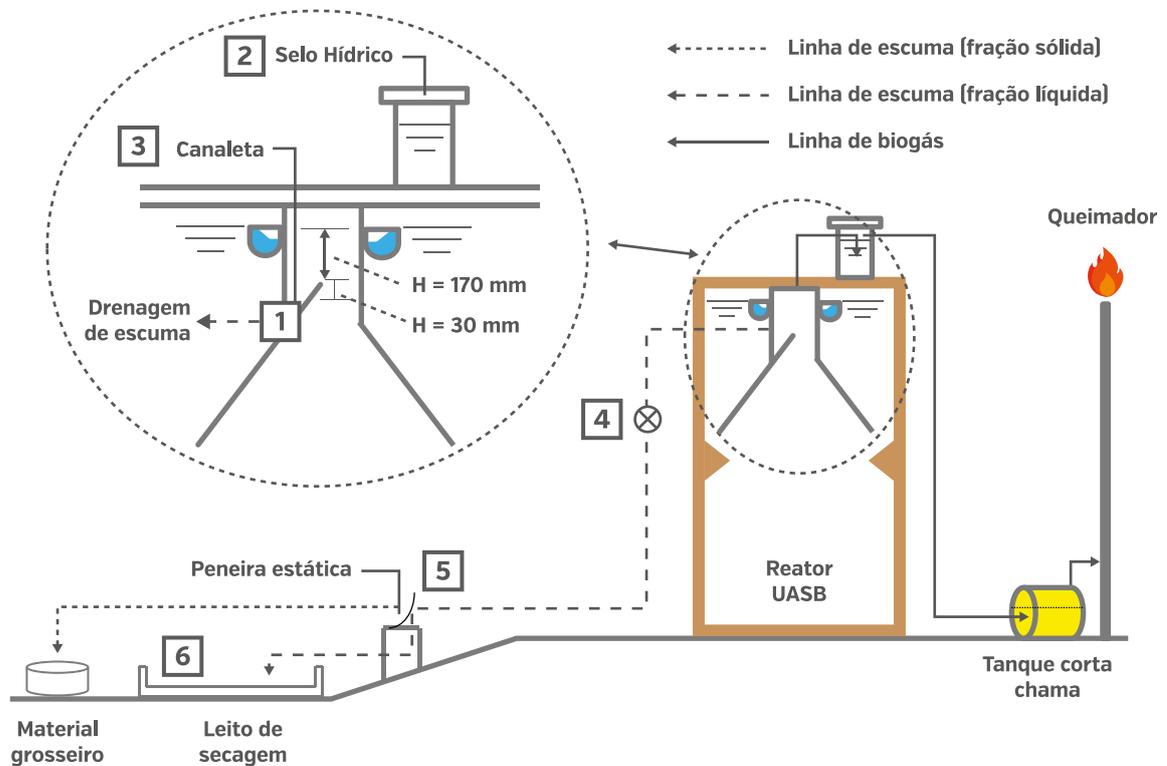
Figura 3.8: Dispositivo de remoção de espuma na campânula de biogás.



Fonte: Chernicharo et al. [2009].

Figura 3.9: Fluxograma do sistema de remoção de espuma testado na ETE Laboreaux.

Exemplos e informações complementares sobre mecanismos de remoção de espuma em reatores UASB podem ser encontrados em Rosa et al. (2013), que apresentam os trabalhos desenvolvidos na ETE Laboreaux (Itabira-MG) com dispositivo hidrostático de remoção (Figura 3.9), e em Rosenfeldt et al. (2015) que apresentam o desenvolvimento de calhas adaptadas, implantadas recentemente na ETE Jacuípe II (Feira de Santana-BA) (Figura 3.10).



Fonte: Rosa et al. [2013]

Legenda: [1] interface espuma-biogás; [2] selo hídrico; [3] canaleta de espuma; [4] válvula de espuma; [5] peneira estática; [6] leito de secagem.

Figura 3.10: Calhas de remoção de espuma com ajuste de nível implantadas na ETE Jacuípe II: (a) vista superior; (b) vista interna do reator.



Fonte: *Rotária do Brasil*, 2015.

Outra possibilidade para se reduzir a formação de espuma é a remoção da gordura no início do processo de tratamento. Na etapa de remoção de areia, pode ser instalada uma caixa de areia aerada e, com isso, atingir-se uma redução da gordura afluenta ao reator UASB, por flotação. Embora essa possibilidade se apresente, em princípio, como bastante factível, ainda faltam resultados comprobatórios da eficácia dos dispositivos de remoção de gordura no início do processo de tratamento nas ETES brasileiras.

Vale ressaltar que a formação da espuma pode contribuir para a obstrução das válvulas de segurança presentes nos separadores trifásicos, levando, em alguns casos, à ruptura dos separadores e das tubulações de biogás, e, caso não haja a remoção periódica da espuma, tem-se o risco de tal material se tornar mais espesso, criando uma camada impermeável, que comprometerá a coleta do biogás na parte superior das campânulas. As Figuras 3.11, 3.12 e 3.13 ilustram a espuma presente no reator e os problemas ocasionados pela obstrução de tubulações decorrentes de seu acúmulo no reator.

A inexistência ou ineficiência dos dispositivos de remoção de espuma implicará na necessidade de limpezas corretivas periódicas no reator, as quais são extremamente trabalhosas.

Figura 3.11: Foto da camada de espuma espessa e sólida nos separadores trifásicos.



Figura 3.12: Foto da obstrução da tubulação de coleta de biogás devido à presença de espuma.



Figura 3.13: Foto do separador trifásico rompido por conta da obstrução, pela espuma, da tubulação de saída do biogás.



Grande parte dos reatores UASB já construídos no Brasil não preveem a instalação de dispositivos de remoção de espuma, o que obriga a interrupção da operação da referida unidade para a realização da limpeza. Outros projetos preveem a remoção de espuma por meio de tampas de visita instaladas na parte superior das campânulas, que possibilitam a geração de odores e risco de segurança operacional durante sua abertura. Tal procedimento leva a uma perda significativa de gás, além do perigo operacional por produzir atmosfera explosiva em determinadas condições.

Para a retirada da espuma, um bom dispositivo será aquele que pode ser operado sem paralisar a operação do reator UASB. O tratamento da espuma pode ser realizado em peneiras e/ou trituradores, visando a seu encaminhamento ao desaguamento do lodo.

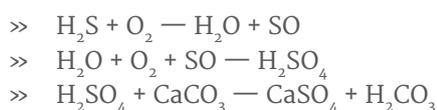
Estanqueidade e corrosão dos reatores

É essencial que, antes da partida do sistema, sejam realizados testes de pressão e estanqueidade das linhas de coleta de biogás, separadores trifásicos e tampas de inspeção, visto que isso pode evitar problemas futuros, como vazamento de gases, riscos de explosão, perdas significativas do potencial energético, emissões difusas de gases de efeito estufa (metano) e de odores, além de reclamações por parte dos consumidores. A realização de testes simples, como a injeção de fumaça no interior dos reatores trifásicos, ou de testes mais elaborados, como a pressurização intencional dos reatores, podem contribuir significativamente na detecção de vazamentos e na prevenção dos problemas mencionados anteriormente. A Figura 3.14 ilustra um procedimento para verificação da estanqueidade dos reatores com auxílio de fumaça.

Figura 3.14: Foto de procedimento de verificação da estanqueidade do reator UASB a partir da injeção de fumaça.



Uma reação que comumente ocorre na interface líquido/ar dos reatores anaeróbios é a liberação do gás sulfídrico formado na digestão anaeróbia e sua interação com o oxigênio atmosférico, com posterior conversão bioquímica em ácido sulfúrico. Este, por sua vez, é altamente agressivo ao concreto, já que interage com o carbonato de cálcio presente em sua composição, formando o sulfato de cálcio, o que inevitavelmente compromete características físicas, químicas e estruturais do concreto, promovendo a sua dissociação. Tal reação química pode ser mais bem compreendida da seguinte maneira:



De modo a evitar o comprometimento das estruturas em concreto presente nos reatores anaeróbios, é aconselhável que, durante o processo construtivo de tais unidades, assim como dos canais e canaletas de efluentes, caso adotadas estruturas em concreto, sejam escolhidos materiais que ofereçam alta resistência, baixa porosidade e cura adequada, minimizando o aparecimento de fissuras e possíveis vazamentos de biogás na superfície das estruturas de concreto. É ainda aconselhável que a superfície de tais estruturas seja impermeabilizada por meio da utilização de material polimérico resistente a ácidos, que apresente coeficientes de dilatação iguais ou superiores ao do concreto. Tal impermeabilização agirá como uma barreira química ao ataque do ácido sulfúrico, além de acompanhar a dilatação do concreto, mantendo assim sua integridade. A Figura 3.15 ilustra uma câmara de gás impermeabilizada com revestimento protetivo de poliuretano elastomérico flexível (*Polibrid*).

Figura 3.15: Foto da câmara de gás de um reator UASB impermeabilizada com Polibrid.



Fonte: COPASA [ETE Nova Contagem].

Figura 3.16: (a) Foto da parede interna do reator UASB com sinal de corrosão na interface líquido-ar; e (b) Foto da parte superior da canaleta de concreto do efluente tratado do reator UASB comprometida pela corrosão.

O item 6.4.19 da NBR 12209:2011 destaca a importância de aspectos construtivos relativos ao concreto e à estanqueidade do reator. Para garantir essa estanqueidade, recomenda-se adotar os devidos cuidados, como a determinação do fator água/cimento do concreto, a adição de aditivos químicos no próprio concreto, a adoção de resinas de impermeabilização de aplicação superficial nas paredes internas do reator UASB, entre outros.

A agressão às estruturas em concreto também poderá ser minimizada optando-se pela execução de projetos que visem a reduzir a geração de turbulências no meio líquido e/ou ressaltos hidráulicos, minimizando, assim, o desprendimento do gás sulfídrico. Nas Figuras 3.16 (a) e (b), é possível visualizar a corrosão das estruturas em concreto devido à liberação do gás sulfídrico do meio líquido.

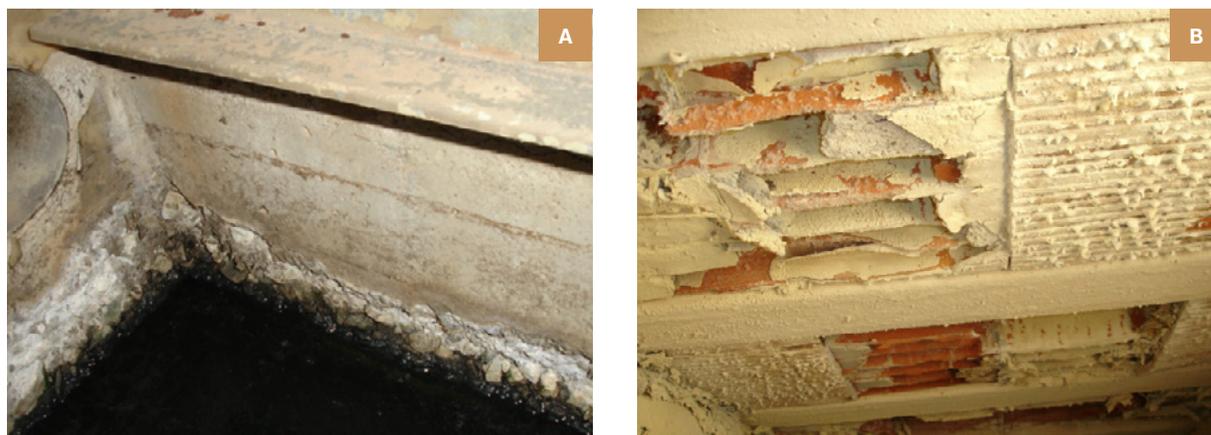


Figura 3.17: (a) Foto da canaleta de concreto sem impermeabilização, após corrosão; e (b) Foto da canaleta de concreto recuperada e impermeabilizada.

No caso das estruturas em concreto que já sofreram ataque e tiveram suas características e resistência comprometidas, faz-se necessário a descontaminação de toda a área contaminada, com sua posterior recuperação e impermeabilização, conforme bem exemplificam as Figuras 3.17 (a) e (b).



Figura 3.18: (a) Foto da canaleta de concreto sem impermeabilização, após corrosão; e (b) Foto da canaleta de concreto recuperada e impermeabilizada.

Especial atenção deve ser dada às unidades subsequentes, que também estão sujeitas às agressões do meio e devem receber proteção anticorrosiva, ou, de preferência, serem fabricadas em aço inox, fibra de vidro, PEAD ou demais materiais que ofereçam resistência. Nas Figuras 3.18 (a) e (b), é possível visualizar os problemas relacionados à corrosão em unidades próximas aos reatores UASB.



Diante dos problemas apresentados, é apropriado melhorar a estanqueidade e a resistência à corrosão dos materiais utilizados no processo construtivo dos reatores UASB, inclusive dos canais e caixas de passagem até o pós-tratamento, além da vistoria, recuperação estrutural (se necessária) e impermeabilização das mesmas, de modo a se evitar o comprometimento das estruturas em concreto (por ação de ácidos e gases presentes no meio), assim como o escape do biogás através de fissuras ou eventuais lacunas que possam existir na superfície e nas laterais de tais unidades de tratamento.

Tamponamento e captação do biogás

Geralmente, a parte superior dos coletores de gases apresenta uma série de aberturas para inspeção e limpeza. Comumente, uma parcela significativa do biogás gerado escapa involuntariamente por esses pontos. A vedação adequada dessas aberturas é fundamental para realizar a coleta eficiente do biogás gerado.

O material do sistema de fechamento deve resistir à radiação solar, ao ambiente corrosivo e à sobrepressão no interior das câmaras de gás do reator, geralmente em torno de 1.500 Pa (0,15 mca).

A quantidade de pontos e dimensionamento das tubulações de coleta do biogás, junto aos separadores trifásicos, deve ser projetada com a mínima perda de carga possível, evitando-se passagens estreitas e direcionamentos internos longos entre a geração e os pontos de coleta.

Uma preocupação a ser atendida em reatores UASB é a checagem da existência de rotas de fuga preferenciais do biogás nas mais diversas situações, por exemplo:

- >> Caso haja fuga de biogás em um dos separadores, as outras unidades não devem ser afetadas por rotas preferenciais para esse separador defeituoso. Esse tipo de situação ocorre quando há uma tubulação única, sem nenhum dispositivo de controle, captando, simultaneamente, o gás de vários separadores trifásicos.
- >> A própria tubulação de quebra de espuma com jato de água não pode representar uma possível rota de fuga de biogás.

Tais medidas minimizarão as perdas do biogás na superfície dos reatores, bem como o comprometimento das lajes superiores dos reatores anaeróbios, caso sejam fechados.

Em alguns tipos de reatores UASB, sobretudo em RALFs, podem-se encontrar dificuldades para guiar o biogás de forma passiva até queimadores e/ou gasômetros. Nesses casos, a captação do biogás pode ser realizada com o auxílio de sopradores ou de compressores radiais, acionados por motores elétricos, desde que o processo seja controlado e seguro. Para tanto, os sopradores devem ser à prova de explosão (possuir certificação ATEX) e permitir a extração servo-controlada do biogás em função de seu consumo e, sobretudo, a partir das leituras automáticas e simultâneas dos teores de oxigênio e de metano. Isso porque a extração ativa do biogás deve ser realizada de modo a evitar a sua contaminação com ar e, conseqüentemente, a formação de misturas explosivas no interior de gasodutos e de gasômetros.

Recuperação do biogás dissolvido no meio líquido

Um assunto que vem recebendo merecido destaque é a constatação da existência de metano dissolvido no efluente do reator UASB. Como ainda não há recomendações práticas de como recuperar esse metano dissolvido no efluente, pode-se prever, futuramente, a instalação de dispositivos de dissipação e captação do metano, sendo interessante prever as devidas conexões em “T”, válvulas e juntas, de modo a receberem essas estruturas. Devem-se estimar, ainda, as cotas do nível de líquido, de modo a alimentar a unidade de tratamento após o reator UASB. Esses acessórios têm custo relativamente reduzido, sendo interessante prever sua instalação antes da partida da ETE, já que, durante a operação propriamente dita, pode ser trabalhoso.

Normalmente, após a passagem do esgoto pelo reator UASB, ainda se faz necessário um pós-tratamento, por exemplo, com o filtro biológico percolador, lodos ativados e lagoas de estabilização, sendo usualmente utilizada uma caixa distribuidora de vazão. Esse tipo de unidade pode ser uma fonte de maus odores, devido à liberação do H_2S . Recomenda-se, para essa unidade, o seu devido confinamento, de forma a possibilitar a coleta dos gases residuais emitidos a partir da fase líquida, bem como o próprio metano originalmente dissolvido no efluente do reator UASB, que se desprende nessa unidade, devido à turbulência. Levando-se em conta a presença de H_2S , essas unidades devem ser projetadas de modo a resistir à corrosão. Os gases coletados nessas estruturas podem ser direcionados para a unidade aeróbia de pós-tratamento do efluente do reator UASB, ou para biofiltros, visando ao tratamento dos gases odorantes.

Rotinas operacionais

A eficiência dos processos anaeróbios de alta taxa relaciona-se, principalmente, à concentração, à atividade da biomassa e ao regime de mistura e padrão de fluxo do reator, bem como aos fatores ambientais (temperatura, pH, alcalinidade, entre outros).

As principais atividades operacionais inerentes aos reatores UASB devem consistir no controle do tempo de detenção de sólidos, na prevenção do acúmulo de sólidos suspensos inertes (areia) em seu interior, bem como no estabelecimento de rotinas periódicas de descarte de lodo excedente e de remoção de espuma.

A previsão dos devidos dispositivos de controle automatizado e monitoramento do reator UASB diminui muito a operação rotineira, favorecendo atividades de gestão e otimização do processo.

Em relação à fase líquida do tratamento, deve-se checar, periodicamente, se as tubulações de entrada estão obstruídas e realizar-se a limpeza, conforme ilustrado na Figura 3.19. Em relação à saída de efluente, deve-se checar se as canaletas estão limpas, sem sólidos incrustados. Caso não haja acesso do operador a essas áreas, devem-se prever dispositivos de limpeza no projeto ou, dependendo do caso, drenar o reator para inspeção. Ou seja, deve-se checar e desobstruir tanto a entrada quanto a saída de esgoto, de modo a evitar fluxos preferenciais.

Figura 3.19: Foto de um procedimento manual de desobstrução das tubulações de entrada de esgoto sanitário de um reator UASB.



Fonte: COPASA (ETE Onça, Minas Gerais).

Em relação à fase sólida, deve-se monitorar a altura da manta de lodo e realizar descartes periódicos do lodo para desaguamento, de modo a evitar o acúmulo excessivo, bem como a retirada do lodo a ponto de comprometer a produção de biogás e a degradação da matéria orgânica.

Outro aspecto relevante a ser mencionado refere-se ao intervalo de tempo de remoção da espuma, que não pode ser muito longo, de modo a permitir que o material comece a endurecer na parte inferior das campânulas. São desejáveis, então, intervalos de limpeza semanais ou quinzenais, sendo que, no caso dos dispositivos de remoção hidrostática da espuma, descritos anteriormente, podem ser necessários descartes ainda mais frequentes (p. ex. duas vezes por semana), a depender das características do esgoto afluente ao reator.

No que tange à etapa de operação e acompanhamento dos reatores UASB, é de suma importância que sejam monitorados, de forma contínua, os principais parâmetros mencionados no capítulo 2, tendo em vista que estes podem servir como indicadores da digestão anaeróbia.

Inspeções periódicas nos separadores trifásicos também se fazem necessárias, principalmente quando estes não se encontram expostos, o que possibilita verificar eventuais rupturas e pontos de comprometimento. Tais inspeções ainda requerem especial atenção, já que essas unidades são enquadradas como espaços confinados pela NR33, requerendo, portanto, procedimentos e equipamentos de segurança adequados à realização de atividades por trabalhadores em seu interior.

O controle e o monitoramento da vazão do biogás gerado devem ser realizados continuamente. Variações bruscas de vazão podem sugerir a presença de vazamentos no corpo do separador trifásico ou mesmo nas tubulações de coleta, assim como a ocorrência de distúrbios no processo de digestão anaeróbia, que, inevitavelmente, geram perda da capacidade de produção do biogás e do seu potencial aproveitamento energético.

Taxa de infiltração e contribuições de águas pluviais às redes coletoras

A produção do biogás é diretamente dependente da conversão da carga orgânica afluente aos reatores anaeróbios. Tanto a taxa de infiltração quanto a inserção clandestina de água pluvial na rede coletora podem reduzir a concentração da matéria orgânica afluente à estação, ocasionando queda na produtividade do biogás. Nesse contexto, o emprego de materiais, juntas e técnicas apropriadas durante a etapa construtiva das redes coletoras, assim como a inspeção de pontos críticos ao longo da rede, podem contribuir significativamente no que diz respeito à redução das taxas de infiltrações, bem como as contribuições de águas pluviais durante períodos chuvosos.

Programas de conscientização da população atendida e programas de fiscalização das novas ligações residenciais também podem minimizar o lançamento de águas pluviais clandestinas à rede coletora, uma vez que, não raramente, ocorrem episódios em que moradores, visando facilitar e minimizar os custos de construção, acabam unificando as redes de águas pluviais com a rede interna de esgoto, o que inevitavelmente traz impactos a todo o sistema de tratamento de esgotos, além de quedas na produção do biogás.

Em estações que sejam alimentadas por extensas redes coletoras, tendo inclusive estações elevatórias de recalque distribuídas ao longo destas, recomenda-se que, se possível, seja realizado um monitoramento individual por trecho recalçado, assim como a aferição da vazão de contribuição de cada uma dessas elevatórias. Tais medidas facilitariam na identificação de trechos da rede coletora com maior taxa de infiltração e/ou contribuição de águas pluviais, facilitando o trabalho dos agentes de fiscalização, no que

tange à manutenção e também aos programas de conscientização junto à população atendida.

Incorporação de subprodutos ao esgoto sanitário

Um item essencial na concepção da ETE é a verificação de eventuais recebimentos de caminhões limpa fossa. Como esse tipo de material já sofreu uma estabilização, a introdução dessa carga em um reator UASB não traria benefícios, sendo mais interessante o tratamento em uma unidade específica para remoção de sólidos grosseiros e seu devido encaminhamento para a unidade de desaguamento de lodo.

Em sistemas mais complexos, como reatores UASB associados a Lodos Ativados, há contribuições de vazão que retornam ao começo do processo, como o clarificado das unidades de desaguamento e adensamento de lodo. Em sistemas de lodos ativados, o descarte do excesso de lodo também pode ser direcionado para o reator UASB, de forma a sofrer uma redução adicional de remoção de sólidos voláteis, bem como o próprio adensamento. Para esse fluxo, é interessante quantificar a vazão e a própria concentração de sólidos em suspensão total, tanto para o controle do reator UASB quanto para o controle do sistema de lodos ativados, de modo a monitorar a idade do lodo.

Uma questão operacional que muitas vezes aparece após a instalação de uma ETE é o recebimento de lodo de ETA. Como normalmente as ETEs vêm sendo equipadas com poucos dispositivos de controle e monitoramento, não ocorre uma avaliação crítica do recebimento desse material com base em dados reais. Cabe, então, fazer essa avaliação do ponto de vista meramente teórico e conceitual.

A principal vantagem a favor da disposição de lodo de ETA em ETEs, via sistema de coleta de esgotos sanitários, seria a de se concentrar os investimentos de equipamentos de tratamento, bem como os custos operacionais envolvidos, principalmente no que se refere à mão de obra.

A primeira crítica a essa abordagem refere-se à ausência da devida quantificação da carga de sólidos produzida na ETA, por se tratar de um resíduo que não recebe o devido monitoramento de vazão e teor de sólidos, quando são lançados no sistema coletor de esgoto. Essa carga de sólidos, constituída em sua maior parte por sólidos fixos, normalmente tem a sua remoção em ETAs por meio de métodos em batelada, que acumulam o lodo gerado nos decantadores em grandes intervalos de tempo (15 a 30 dias), e o descarregam no sistema de coleta de esgotos em questão de horas, sendo o comportamento desse lodo de ETA no sistema de coleta difícil de ser previsto. Espera-se que esse lodo de ETA, em algum momento, contribua com sua carga de sólidos na entrada da ETE. Entende-se que este material irá, de alguma forma, sofrer uma nova sedimentação e compactação no reator UASB, tomando o lugar da biomassa ativa, responsável pela degradação da matéria orgânica, bem como pela produção de biogás. Caso haja contribuições repentinas e concentradas em um curto intervalo de tempo, como as que ocorrem nos lançamentos de lodo de ETA, pode ocorrer um carreamento (perda) indesejável da biomassa contida no reator anaeróbio, caso a carga de sólidos lançada seja significativa. E, no caso de lançamento contínuo de lodo de ETA no sistema de coleta de esgotos sanitários, deve-se checar a influência dessa carga de sólidos sobre a qualidade do lodo no reator UASB.

Como ainda não há uma série de respostas para esses questionamentos, referentes ao lodo de ETA, aliados ainda a um maior aprofundamento no próprio balanço de massa entre a carga de DQO afluente e a produção de biogás em reatores UASB de escala real, recomenda-se extrema cautela na decisão de recebimento de lodo de ETA em reatores UASB.

O que se quer prevenir é a adoção de uma solução do problema do lançamento do lodo de ETA em curto prazo, sem a devida avaliação das consequências técnicas e econômicas. Para os projetos de aproveitamento de biogás, deve ser salientado que, do ponto de vista qualitativo, o lodo de ETA acaba contribuindo de forma negativa no balanço energético, pois contribui para a diminuição do tempo de detenção celular do reator UASB.

3.2 Digestores de lodo

Os digestores de lodo são utilizados em ETES, principalmente, para a estabilização de lodos primários e secundários, oriundos do tratamento de esgotos. A estabilização reduz o volume de lodo a ser encaminhado à disposição final e possibilita o aproveitamento da energia bioquímica, convertida em biogás.

Em países de clima frio, a captação do biogás era, desde o início, economicamente interessante, para fornecer o combustível necessário para o aquecimento dos digestores. Hoje, a produção de energia a partir do biogás tornou-se realidade. Assim, por exemplo, nas ETES na Alemanha, 80% do biogás formado nos digestores em 2013 (Statistisches Bundesamt *et al.*, 2015) foi utilizado para gerar energia elétrica, 10% para a geração de energia térmica e/ou acionamento direto de bombas e compressores. O restante do biogás foi vendido ou perdido.

Os digestores de lodo correspondem, com a tecnologia CSTR (Continuous Flow Stirred Tank Reactor), a reatores de mistura contínua. Isso significa que o tempo de detenção hidráulica corresponde ao tempo de retenção celular.

O aquecimento dos digestores de lodo representa uma alternativa economicamente viável e o uso de co-substratos torna-se uma opção interessante para aumentar a produção específica de biogás nas ETES.

3.2.1 Funcionamento dos digestores de lodo

Os digestores convencionais destinam-se preferencialmente à estabilização de resíduos com elevada concentração de material particulado. Assim, a hidrólise desses sólidos pode se tornar a etapa limitante de todo o processo de digestão anaeróbia. Por sua vez, a taxa de hidrólise é afetada por diversos fatores, podendo-se destacar: a temperatura, o tempo de detenção hidráulica, a composição do substrato e o tamanho das partículas.

Na prática, os digestores anaeróbios são dimensionados com tempo de detenção acima do ótimo, de forma a compensar eventuais problemas operacionais como a flutuação do volume de lodo produzido, a ineficiência do sistema de mistura, a variação de temperatura ambiente, e o assoreamento por acúmulo de material inerte (Andreoli; Von Sperling & Fernandes, 2010).

Levando em consideração que os digestores em ETEs são dimensionados por meio do tempo de detenção hidráulica e que a carga orgânica do lodo a ser estabilizado é relativamente baixa, os digestores em ETEs têm capacidade para receber cargas orgânicas adicionais, permitindo, assim, a co-digestão (ver seção 3.2.3). Nesses casos, deve ser observada a carga orgânica volumétrica ($\text{kg}_{\text{sv}}/\text{m}^3.\text{d}$), parâmetro este que caracteriza a quantidade de sólidos voláteis em relação ao volume do digestor.

Mesmo que o tipo de construção em forma ovoide (Figura 3.19 (a)) possua uma série de vantagens com relação à mistura, retenção de calor e captação de biogás, a construção em forma de cilindro é a mais comum, por ter um custo de construção significativamente mais econômico.

A eficiência e a estabilidade do processo de digestão anaeróbia são variáveis diretamente relacionadas às características do lodo que alimenta o digestor. O lodo bruto, que chega ao digestor anaeróbio, é uma mistura complexa de materiais com as características determinadas pela área de esgotamento atendida e o processo de tratamento adotado na ETE (Andreoli; Von Sperling & Fernandes, 2010).

A Figura 3.20 apresenta digestores de lodo instalados em ETEs na Alemanha e no Brasil.

Figura 3.20: Fotos de digestores de lodo: (a) forma oval na ETE Wassmansdorf - Alemanha; (b) ETE Neckarsulm - Alemanha; (c) Serviços Ambientais de Ribeirão Preto S/A [ETE Ribeirão Preto]; (d) SABESP [ETE Franca]; (e) SABESP [ETE Suzano].



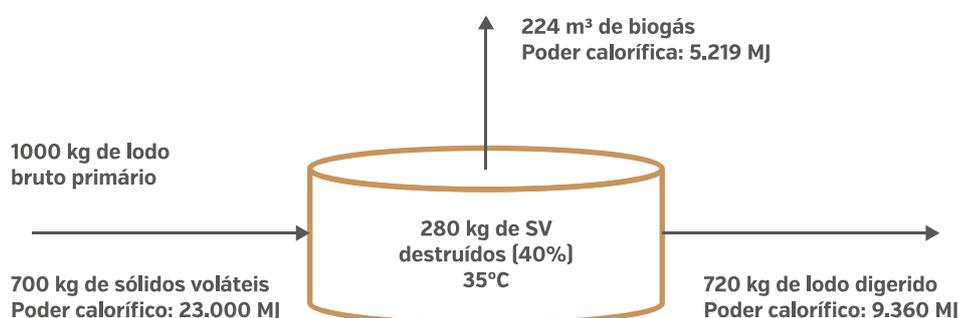
3.2.2 Balanços de sólidos, DQO e energia

O digestor é alimentado de forma contínua, ou quase contínua, e o lodo é mantido no seu interior por um determinado período, chamado tempo de detenção.

O poder calorífico do lodo bruto varia entre 11 e 23 MJ/kgST, dependendo do tipo de lodo e da concentração de sólidos voláteis. O lodo digerido tem um poder calorífico inferior variando entre 6 e 13 MJ/kgST, devido à menor concentração de sólidos voláteis.

A Figura 3.21 apresenta um balanço típico de massa e energia em um digestor anaeróbio.

Figura 3.21: Balanço de massa e energia em digestor anaeróbio.



- Poder calorífico do lodo bruto: $23 \text{ MJ/kg} \times 1.000 \text{ kg} = 23.000 \text{ MJ}$
- Quantidade de sólidos voláteis destruídos: $700 \text{ kg} \times 0,4 = 280 \text{ kg de SV}$
- Quantidade de lodo digerido: $1.000 - 280 = 720 \text{ kg}$
- Poder calorífico do lodo digerido: $13 \text{ MJ/kg} \times 720 \text{ kg} = 9.360 \text{ MJ}$
- Produção de biogás: $0,8 \text{ m}^3/\text{kgSV destruído}$
- Volume de biogás produzido: $280 \text{ kg} \times 0,8 = 224 \text{ m}^3$
- Poder calorífico do biogás: $23,3 \text{ MJ/m}^3 = 5.219 \text{ MJ}$

Fonte: Andreoli; Von Sperling & Fernandes (2010).

A partir dos balanços de DQO e energia apresentados anteriormente, podem ser estabelecidos indicadores de produção específica de energia, conforme mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Indicadores de produção de energia em digestores de lodo primário e secundário a partir da DQO aplicada.

ETAPA NO PROCESSO DE TRATAMENTO	CARGA ESPECÍFICA [g DQO/hab.d]	EQUIV. ENERGÉTICO [kWh/hab.d]	%	POTENCIAL ENERGÉTICO [kWh/hab.d]
DQO Esgoto Bruto	120	0,420	100	
DQO Decantador primário [1,5h]	40	0,140	33	0,245 [parcialmente acessível]
DQO Lodo de excesso [LA 16d]	30	0,105	25	
DQO oxidada com aeração ao CO ₂	40	0,140	33	0,175 [não utilizável]
DQO efluente final [inertes]	10	0,035	8	

Fonte: Hartwig, Gerdes & Schrewe (2010), atualizado aplicando ATV-A 131 da Alemanha.

Nota: valores estabelecidos para uma ETE típica alemã, na qual o tratamento ocorre por meio de lodo ativado com idade de lodo de 16 dias e digestor anaeróbio para tratar o lodo primário e secundário.

3.2.3 Taxas de produção de biogás

Os volumes diários de biogás produzido são importantes no dimensionamento de plantas de aproveitamento de biogás. Na digestão anaeróbia de lodo, a produção específica teórica é de 0,8 m³/kg de sólidos orgânicos voláteis, o que corresponde a uma produção de biogás de cerca de 25 L/(hab.d) (Andreoli; Von Sperling & Fernandes, 2010). Têm-se verificado, no Brasil, valores de produção de biogás entre 12 e 17 L/hab.d.

Tabela 3.3: Produção de biogás conforme a modalidade de lodos ativados.

Na Tabela 3.3, é apresentada a influência do tipo de tratamento por lodos ativados sobre a taxa de produção de biogás.

MODO DE OPERAÇÃO DO TRATAMENTO BIOLÓGICO	CARGA ORGÂNICA DO TRATAMENTO PRIMÁRIO E REATOR DE LODO ATIVADO	VOLUME ESPECÍFICO DE BIOGÁS ESPERADO EM L/(hab.d)	
		VALOR MÉDIO	FAIXA DE VARIAÇÃO
Idade do lodo no tanque de aeração (TA) θ_c = 8 d (nitrificação no verão, ou desnitrificação parcial)	Entrada no reator de lodo ativado 35g DBO ₅ /(hab.d) (tratamento primário de grande porte)	20,7	16,5 - 25,0
Idade do lodo (TA) θ_c = 15 d (alta intensidade de nitrificação e desnitrificação o ano inteiro)	Entrada no reator de lodo ativado 35g DBO ₅ /(hab.d)	18,3	14,5 - 22,0
Idade do lodo (TA) θ_c = 15 d	Entrada no reator de lodo ativado 48g DBO ₅ /(hab.d) [pré-tratamento de curto tempo de detenção hidráulica]	13,2	10,5 - 15,9
Idade do lodo (TA) θ_c = 15 d	Entrada no reator de lodo ativado 60g DBO ₅ /(hab.d) [sem tratamento primário]	7,8	6,2 - 9,4
Sistema de lodo ativado com aeração prolongada com θ_c = 25 d	Entrada no reator de lodo ativado 60g DBO ₅ /(hab.d) [sem tratamento primário]	4,4	3,5 - 5,3

Fonte: DWA-M 363 (2010).

A produção real observada depende de uma série de fatores, entre eles os fatores ambientais (vide seção 2.4), a constituição do lodo e o volume absoluto do digestor. A constituição do lodo a ser digerido, principalmente a fração de matéria orgânica biologicamente degradável, depende das substâncias que compõem os esgotos (por exemplo, fração de efluentes industriais), do tipo de processo de tratamento de esgoto (ver Tabela 3.3), do volume de águas pluviais que é tratado juntamente na estação de tratamento e de variações anuais. Embora haja uma relação entre o volume do digestor, a vazão do lodo afluente e a carga de matéria orgânica, as condições de processo dependem, também, do tamanho absoluto do respectivo reator. A distribuição do volume total do reator em um ou mais digestores é uma variável preponderante. Muitas vezes, é possível obter melhores resultados em reatores maiores.

Os volumes diários de biogás produzido são importantes no dimensionamento de unidades de aproveitamento de biogás. Especial importância assumem a vazão de biogás, a qual pode ser relacionada ao equivalente populacional total ou à quantidade de matéria orgânica afluenta; e a taxa de produção de biogás, calculada com base no volume de biogás produzido, no volume de reação do digestor e no respectivo tempo de digestão.

Recomenda-se que a determinação do potencial energético utilizável deve considerar, fundamentalmente, os valores mais baixos do volume de biogás esperado. Para um tratamento correspondente à linha 1 da Tabela 3.3, por exemplo, um volume de biogás específico de 16,5 L/(hab.d) deve ser utilizado.

Quando for aproveitada unicamente a energia térmica do biogás, devem ser utilizados os mais baixos valores esperados para o dimensionamento da capacidade de armazenamento de biogás. Caso a instalação inclua motores a gás ou plantas de cogeração, a capacidade de armazenamento deve levar em conta os mais elevados valores esperados, mesmo que esses valores sejam esperados apenas em determinadas fases do ano (vários meses).

Estações com taxas específicas de biogás acima de 25 L/(hab.d) só devem ser dimensionadas se os respectivos resultados tiverem sido medidos em um horizonte de vários anos de operação.

3.2.4 Controle operacional

A seguir, são apresentados os cuidados a serem tomados durante a partida de digestores anaeróbios e durante sua operação.

Partida da operação

De acordo com Jordão *et al.* (2005), para a partida operacional de um digestor de lodo, deve ser realizada uma série de atividades, destacando-se:

- » **Fase I – Preparação**
 - » Verificação da estanqueidade de todas as tubulações ligadas ao digestor de lodo, considerando também o gasoduto;
 - » Verificação da estanqueidade das aberturas do digestor de lodo;
 - » Verificação dos equipamentos de segurança contra sobrepressão e subpressão;
 - » Verificação dos níveis de enchimento dos acessórios com selo hídrico;
 - » Iniciação do funcionamento do sistema de aquecimento do digestor por um tempo suficiente que permita alcançar as condições padrão.
- » **Fase II – Alimentação**
 - » Alimentação com lodo ou sobrenadante de outro digestor;
 - » Aquecimento do digestor cheio até alcançar a temperatura do projeto e manter a mesma;
 - » Alimentação com lodo não estabilizado, preferencialmente proveniente da decantação primária, visando a uma carga de 0,08 kg de sólidos voláteis por m³ de volume do biodigestor.

» **Fase III – Manutenção e controle**

- » Manutenção de uma mistura adequada no período inicial de 20 dias;
- » Monitoramento da temperatura, da alcalinidade total, dos ácidos voláteis e do pH da fase líquida;
- » Monitoramento da concentração de metano e do dióxido de carbono no biogás a ser gerado, bem como da sua vazão;
- » Aumento gradativo da carga até o nível estabelecido no projeto, assegurando a manutenção de condições favoráveis, sendo previsto para o 50° ao 60° dia após a partida.

Quando não há lodo ou sobrenadante de outro digestor como inóculo disponível, o digestor deve ser enchido com esgoto bruto.

No caso de ocorrência de espuma ou desestabilização do processo indicado por meio do monitoramento, deve ser reduzida a carga ou ser adicionado um lodo maduro de outro digestor de lodo como inóculo.

Temperatura

A digestão de lodo pode ser realizada tanto no regime termofílico quanto no mesofílico, sendo que a condição comumente utilizada é a mesofílica.

Objetivando otimizar a hidrólise do material particulado, os digestores convencionais são normalmente aquecidos, sendo usuais temperaturas de operação na faixa de 32 a 38°C. A fase de hidrólise se processa muito lentamente quando os digestores são operados a temperaturas inferiores a 20°C.

Embora sejam necessários para a operação na condição mesofílica também no Brasil, o isolamento e o aquecimento não estão sendo realizados nos poucos digestores existentes, com exceção da ETE Barueri e da ETE Arrudas. O aquecimento pode ser realizado mediante serpentinas, trocadores de calor externos, ou injeção de vapor quente com baixa pressão. Outra solução usada na ETE Ribeirão Preto, por exemplo, é o aquecimento do lodo antes de sua entrada no digestor. Para ambos os casos, a energia térmica pode advir do calor gerado no CHP.

A ausência de isolamento e aquecimento dos digestores anaeróbios deve ser considerada durante a elaboração dos projetos, determinando tempos de detenção hidráulica maiores, em torno de 40 dias.

Potencial Hidrogeniônico (pH)

A digestão pode ocorrer com pH entre 6,0 e 8,0, embora, na prática, devido ao efeito tampão de bicarbonatos, sulfetos e amônia, o pH mantenha-se próximo à neutralidade. O pH ótimo para o processo anaeróbio é 7,0, com o ácido acético não ionizado exercendo efeito inibidor em pH ácido e a amônia não ionizada (NH_3) sendo tóxica em pH alcalino.

Adensamento de lodo

O adensamento de lodo tem uma função fundamental para a definição e para o tamanho dos digestores, já que o dimensionamento é feito diretamente através do tempo de detenção hidráulica. Portanto, um lodo com 3% de sólidos exige o dobro do tamanho do digestor que um lodo de 6%. Fica evidente que a decisão sobre a forma de adensamento influencia muito no custo total do projeto.

Recomenda-se que a concentração de sólidos na alimentação do digestor esteja entre 4 e 8%, podendo atingir valores superiores, desde que as condições de alimentação e mistura permitam. Concentrações de sólidos inferiores a 2,5% tendem a reduzir a eficiência do digestor.

Mistura

Para a mistura dos reatores cilíndricos, estabeleceram-se nos últimos anos:

- >> Bombas externas de recirculação;
- >> Bomba parafuso interna de recirculação; e
- >> Injeção/recirculação de biogás.

Formação de espuma

A espuma, que não deve ser confundida com escuma, também pode causar sérios problemas operacionais, sendo a principal causa de entupimento do gasoduto. Portanto, uma possível formação de espuma deve ser monitorada.

Na Alemanha, foi observada a formação de espuma especialmente em casos de co-substratos de fácil degradação com taxas expressivas de geração específica de biogás, por exemplo, gorduras, quando as cargas desses co-substratos superaram a capacidade do digestor. Outras possíveis causas podem ser:

- >> Teor de sólidos totais muito elevado;
- >> Alto teor de tensoativos;
- >> Alta viscosidade da fase líquida.

Quando ocorre a formação de espuma, sugere-se a redução da alimentação do co-substrato causador. Outra possibilidade é a alteração da forma de alimentação. Uma alimentação melhor distribuída durante o dia reduz o risco de formação de espumas.

3.2.5 Co-digestão

A co-digestão refere-se ao tratamento simultâneo de certas quantidades de material orgânico de diferentes fontes em um só biodigestor. Isso pode exigir uma adaptação técnica, bem como um novo licenciamento. Os objetivos da co-digestão são:

- >> Aproveitar a capacidade de um digestor existente, visto que digestores normalmente possuem um potencial enorme não utilizado;
- >> Otimizar as condições técnicas do processo (melhoria da estrutura do substrato, da relação C:N, da estabilidade do pH);
- >> Responder a uma demanda de energia elétrica; e
- >> Responder a uma demanda de utilização local de biogás (aquecimento ou geração de vapor).

A situação mais comum é o uso do lodo do tratamento de esgoto como substrato principal, misturado com uma porção menor de outro substrato, ou, ainda, com uma variedade de outros substratos. O uso de um co-substrato normalmente melhora a produção de biogás. Taxas típicas de adição de co-substratos em digestores de lodos variam de 5 a 20%. A adição de co-substratos pode resultar em um aumento na produção de biogás de 40 a 200% (Braun, 2002).

Deve-se tomar cuidado, entretanto, com a seleção dos substratos compatíveis, de forma a aumentar a produção de metano e evitar aqueles que possam inibir sua geração.

O volume de co-substrato adicional pode afetar o tempo de detenção no digestor anaeróbio. Tempos de detenção mais longos permitem que os substratos sejam digeridos por completo, o que maximiza a produção de biogás e minimiza odores.

Na co-digestão, a regra é que se obtenham as taxas de produção de biogás dos respectivos componentes do substrato. O uso de misturas de materiais bem balanceadas e a aplicação de processos otimizados permitem obter taxas de produção de biogás por volume do reator mais elevadas do que a digestão com substrato único.

A Tabela 3.4 apresenta as taxas teóricas de biogás conforme o substrato utilizado. Substâncias críticas, do ponto de vista higiênico e sanitário, tais como o conteúdo de caixas separadoras de gordura, material flotado, conteúdo de rúmen e resíduos de cozinhas comerciais, requerem cuidados especiais.

Em casos particulares, pode ser necessária a verificação desses valores, por meio de experimentos e análises, com base nas características do projeto e local de instalação.

Tabela 3.4: Propriedades e produção de biogás específica de substratos relevantes.

SUBSTRATO	SS EM %	SSV EM %SS	N _{TOTAL} EM %SS	C/N	CONTEÚDO DE CARBONO EM %SS	PRODUÇÃO ESPECÍFICA DE METANO EM NL/kg _{SSVafi} **
Grãos de cereais	87	98				370
Batatas	22	94				380
Resíduo do destilado de maçã	2 - 3,7	94 - 95		6		330
Resíduo do destilado de batata	12 - 15	90	9	6	48	370

SUBSTRATO	SS EM %	SSV EM %SS	N _{TOTAL} EM %SS	C/N	CONTEÚDO DE CARBONO EM %SS	PRODUÇÃO ESPECÍFICA DE METANO EM NL/kg _{SSVafI} **
Grãos destilados de cereais	4 - 6	95	8			380
Resíduo do destilado do melaço	10,5	71,2				350 - 400
Soro do leite	4,3 - 6,5	80 - 92	1,1	27		350 - 400
Leite integral	13	95				450 - 500
Ricota	22	95				400 - 450
Restos de pão	65	97				400
Resíduos de mercado	5 - 20	76 - 90	4	15		300 - 400
Resíduos de sementes oleaginosas	92	97	1,4	41	57,5	450 - 550
Farelo de canola	88	93	5,6	8		450 - 500
Glicerol	100	99			39	350
Material flotado [abatedouro]	5 - 24	83 - 98	6			600 - 800
Resíduos de caixa de gordura	2 - 70	69 - 99	0,1 - 3,6			600 - 700
Farinha de carcaças			8 - 12	2,5 - 5		500 - 600
Farinha de sangue	90	80	12	4	48	450 - 520
Resíduos de alimentos	9 - 37	74 - 98	0,6 - 5,0	15 - 21	0,04 - 0,18	400 - 500

* C/N = Relação - Carbono - Nitrogênio; ** Normal Litro

Fonte: DWA-M 380 [2009].

3.2.6 Captação do biogás no digestor de lodo

Figura 3.22: Captação de gás no topo do digestor com proteção contra partículas.

A captação de biogás no digestor é consideravelmente mais simples do que em reatores UASB, sendo normalmente feita em um só ponto. A proteção da tubulação do gás contra espumas é importante.



Somente a título de exemplificação do potencial de geração de energia, apresenta-se a estimativa a seguir, levando-se em conta que o potencial de cada implantação depende das condições locais. Um UASB com uma produção de aproximadamente 12L/hab.d com 79% de metano ou um digestor com uma produção de 15 L/hab.d com 62% de metano tem um teor de energia de aproximadamente 34 kWh/hab.ano, ou 13kWhel/hab.ano. Para uma ETE com população equivalente de 30.000 habitantes, estima-se uma produção de energia de 50 kW, enquanto para uma ETE com população equivalente de 100.000 hab., pode-se chegar a uma potência de aproximadamente 165 kW, com base de 7884 horas de uso por ano e um valor de eficiência elétrica de 38%. Atualmente, está sendo desenvolvido um estudo que demonstra a viabilidade econômica do uso efetivo dessa energia para ETES acima de 100.000 hab.(PROBIOGÁS, 2015).

4

CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás é uma mistura de gases gerados durante a digestão anaeróbia da matéria orgânica, cuja composição depende das condições físico-químicas no interior do digestor (pH, alcalinidade, temperatura) e da presença de outros ânions, como o sulfato e o nitrato (Noyola; Morgan-Sagastume & López-Hernández, 2006).

4.1 Principais componentes do biogás

O biogás de reatores UASB é geralmente constituído por metano em alto teor (70 a 80% v/v) e, em menor concentração, por gás carbônico, devido à grande solubilidade desse composto gasoso no líquido (Van Haandel & Lettinga, 1994).

Concentrações menores de outros compostos também estão presentes no gás, conforme pode ser observado na Tabela 4.1.

O menor teor de CO_2 no biogás de reatores UASB indica que a maior parte desse gás permanece no efluente como íons bicarbonato. Para digestores de lodo com elevadas concentrações de matéria orgânica, o conteúdo de CO_2 normalmente é mais alto (20 a 35%) e a fração de nitrogênio é menor (cerca de 2%) (Agrawal; Harada & Okui, 1997).

Em alguns casos, o biogás pode conter siloxanos, formados a partir da degradação anaeróbia de materiais comumente encontrados em cosméticos, desodorantes, aditivos de alimentos e alguns sabões. Durante a combustão de biogás contendo siloxanos, pode ocorrer a formação de depósitos contendo sílica (SiO_2) ou silicatos (Si_xO_y), e, ainda, cálcio, enxofre, zinco e fósforo. Esses depósitos minerais provocam incrustações com vários milímetros de espessura e devem ser removidos por meio de métodos físicos, químicos ou mecânicos (Chernicharo & Stuetz, 2008).

Tabela 4.1: Composição típica de biogás em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário e digestores de lodo.

COMPONENTE	UNIDADE	BIOGÁS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO SANITÁRIO	BIOGÁS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE LODO
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	ppm	1.000 a 5.000	500 - 1.500
Enxofre total [S]	mg/ Nm_3		20 - 2.500
Halogênios	mg/ Nm_3		0 - 100
Cloro [Cl]	mg/ Nm_3		1 - 5
Flúor [F]	mg/ Nm_3		1 - 5
Poeira/partículas [$< 10 \mu\text{m}$]	mg/ Nm_3		N.E.
Total de compostos orgânicos com silício	mg/ Nm_3		< 40
Compostos aromáticos	mg/ Nm_3		< 10 em 100% CH_4
Umidade relativa	%		90 - 100
Teor de oxigênio [O_2]	% em vol.	0 - 2	0 - 1

COMPONENTE	UNIDADE	BIOGÁS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO SANITÁRIO	BIOGÁS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE LODO
Metano [CH ₄]	% em vol.	60 - 85	60 - 70
Dióxido de carbono [CO ₂]	% em vol.	5 - 15	20 - 40
Monóxido de carbono [CO]	% em vol.	0 - 0,3	-
Nitrogênio [N ₂]	% em vol.	2 - 25*	0 - 2
Hidrogênio [H ₂]	% em vol.	0 - 3	0 - 1,5
Amônia [NH ₃]	% em vol		< 0,05
Número de metano	-		> 100
Poder calorífico superior [PCS]	kWh/Nm ₃	6,6 - 9,4	6,6 - 7,7
Poder calorífico inferior [PCI]	kWh/Nm ₃	6,0 - 8,5	6,0 - 7,0
Índice de Wobbe	kWh/Nm ₃	7,0 - 13,4	7,0 - 9,1

[*] A elevada fração de nitrogênio no biogás de reatores anaeróbios deve-se ao N₂ dissolvido no esgoto doméstico afluente ao reator.

Fonte: adaptado de Rands et al. (1981); Noyola, Capdeville & Roques (1988); Agrawal, Harada & Okui (1997); Bohn (2001 apud Belli et al., 2001); Pagliuso, Passig & Villela (2002); Barbosa & Stuetz (2005); Usepa (2005); Noyola, Morgan-Sagastume & López-Hernández (2006); Rasi, Veijanen & Rintala (2007); DWA-M 361 (2011).

4.2 Propriedades físicas e químicas do biogás

Na Tabela 4.2, são apresentadas as principais características físicas e químicas de um biogás (com 60% de metano), comparadas ao gás natural e ao gás de síntese.

O potencial energético do biogás está relacionado com a quantidade de metano em sua composição, fator determinante para o seu poder calorífico. O poder calorífico inferior do metano é 35,9 MJ.Nm⁻³ e o do biogás com 60% de metano é 21,5 MJ.Nm⁻³, correspondendo a 67% do poder calorífico inferior do gás natural (Tabela 4.3).

Tabela 4.2: Características de diferentes tipos de gases.

PARÂMETRO	UNIDADE	GÁS NATURAL	GÁS DE SÍNTESE	BIOGÁS (60% CH ₄)
Poder calorífico inferior*	MJ.m ⁻³	31,8	16,1	21,5
	kcal.m ⁻³	7.600	3.846	5.134
Densidade	kg.m ⁻³	0,82	0,51	1,21
Índice de Wobbe [inferior]	MJ.m ⁻³	39,9	22,5	19,5
Velocidade máxima de chama	m.s ⁻¹	0,39	0,7	0,25
Requisito teórico de ar	m ³ ar. m ⁻³ gás	9,53	3,83	5,71
Concentração máxima de CO ₂ após combustão	% [v]	11,9	13,1	17,8
Ponto de condensação	°C	59	60	60-160

[*] Refere-se ao calor de combustão menos o calor de vaporização do vapor de água presente no gás.

Fonte: Wellinger & Lindberg (2000 apud Lobato, 2011).

Tabela 4.3: Características de diferentes tipos de gases.

COMBUSTÍVEL	MJ.kg ⁻¹	MJ.Nm ⁻³	kWh.Nm ⁻³	EQUIVALÊNCIA COM O METANO
Metano	50,0	35,9	10,0	1,0
Gás natural	45,1	31,8	8,8	0,9
Biogás típico (60% CH ₄)	30,0	21,5	6,0	0,6
Butano	45,7	118,5	32,9	3,3
Propano	46,4	90,9	25,2	2,5
Metanol*	19,9	15.900	4.415,4	442,9
Etanol*	26,9	21.400	5.942,8	596,1
Gasolina*	45,0	33.300	9.247,4	927,6
Diesel*	42,1	34.500	9.580,7	961,0

[*] MJ.m⁻³ e kWh.m⁻³

Obs.: Nm³: volume e condições padrão de temperatura e pressão: 0°C e 1 atm.

Fonte: Adaptado de Constant et al. [1989 apud Noyola, Morgan-Sagastume & López-Hernández, 2006] e Lobato [2011].

5

TRANSPORTE, MANOBRA E MONITORAMENTO DO BIOGÁS¹

5.1 Tubos e purgas

1: Fluxogramas exemplos, com os equipamentos principais de uma planta de biogás, podem ser visualizados no Anexo A.

Os tubos condutores de biogás, também chamados de gasodutos, devem ser devidamente identificados. Esses tubos devem ser, preferencialmente, aéreos, conforme recomenda a norma NBR12209:2011, e devem ser fabricados em aço inoxidável ou em plástico apropriado.

Devido à maior resistência à corrosão, deve-se utilizar, preferencialmente, o aço AISI316Ti (EN 1.4571) no lugar do aço AISI 304 (EN 1.4301). A espessura mínima das paredes de tubos de aço inoxidável deve seguir as prescrições da norma ISO 4200 Série A (DIN EN 12255-1, guia técnico ATV-DVWK-M 275).

Os tubos de polietileno de alta densidade (PEAD), apesar de serem plásticos, são considerados apropriados para o guiamento do biogás, diferentemente dos tubos de policloreto de vinila (PVC). No caso de utilização de tubos plásticos, deve-se atentar para o risco de incêndio e, por isso, devem-se empregar tubos condutores com resistência elétrica menor que 10⁹ Ohm. Além disso, como tubos plásticos normalmente apresentam baixa estabilidade estrutural, é importante instalar um número suficiente de suportes para mantê-los suspensos, de modo a evitar curvaturas e pontos indesejáveis de acúmulo de água condensada. O emprego de tubos de PEAD deve considerar o coeficiente de expansão térmica de 0,20 mm/(m.K), principalmente quando o tubo não for assentado em valas.

Os trechos de tubo entre possíveis fontes de ignição e as válvulas corta-chamas devem ser à prova de explosão e devem suportar uma pressão de, no mínimo, 6 bar (mínimo PN6).

De modo geral, os tubos condutores de biogás devem apresentar as seguintes resistências:

- >> Mecânicas: tensões mecânicas, induzidas por deformação; variação térmica; vibrações; entre outras. Devem estar previstas no projeto dos gasodutos e devem ser compensadas por meio da instalação de liras² de dilatação e juntas de expansão;
- >> Térmicas: os gasodutos devem atender a requisitos de proteção contra incêndio, em especial quando forem constituídos por materiais plásticos;
- >> Químicas: os gasodutos devem ser resistentes à ação corrosiva de compostos ácidos provenientes, por exemplo, da combinação entre sulfeto de hidrogênio e água.

No dimensionamento dos gasodutos, deve-se:

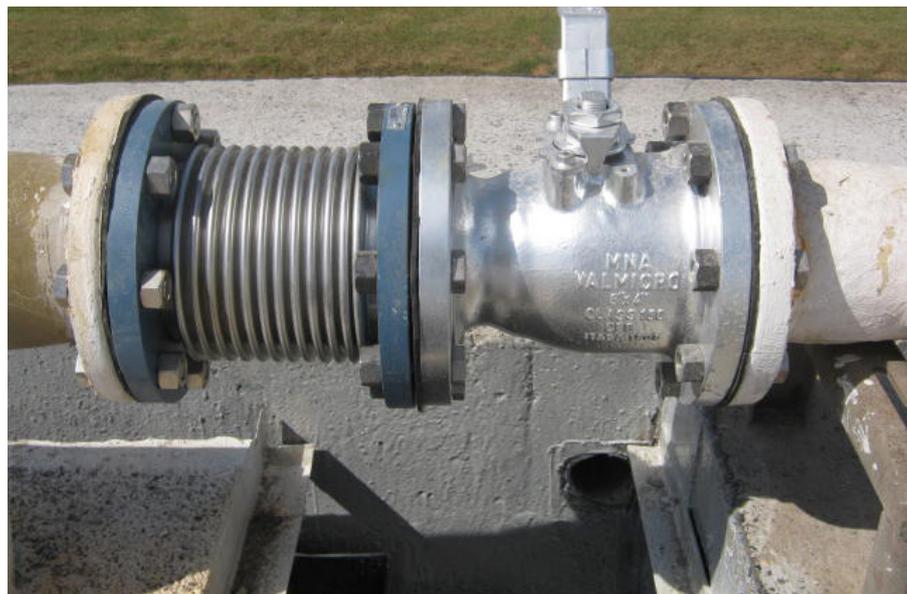
- >> garantir que as velocidades para guiamento passivo do biogás (sem soprador) variem entre aproximadamente 3 m/s (média) e 5 m/s (valor máximo);
- >> adotar o diâmetro mínimo dos tubos de 50 mm (NBR 12209:2011);
- >> prever que uma alimentação intermitente dos reatores anaeróbios com esgoto ou lodo pode causar picos de geração de biogás;

2: As “liras” são desvios na tubulação feitos com curvas a 90° e funcionam como “molas” para garantir a boa expansão e contração das tubulações. Maiores informações em: http://www.tigre.com.br/enciclopedia/artigo/49/solu%C7%D5es_tigre_para_sistemas_prediais_de_%C1gua_quente

- >> observar que o acionamento de equipamentos que consomem biogás pode causar quedas de pressão por um curto intervalo de tempo, provocando o eventual desligamento desses equipamentos. Portanto, o sistema de coleta e de transporte de biogás deve permitir certa variação de pressão operacional, de modo a evitar o acionamento desnecessário das proteções de sobrepresão e subpressão;
- >> visar à menor perda de carga possível inerente ao guiamento do biogás até queimadores ou sistemas de recuperação energética;
- >> assegurar que as eventuais conexões entre trechos de tubos sejam realizadas de modo a garantir o confinamento do biogás no interior do gasoduto.

A Figura 5.1 ilustra uma junta de expansão instalada em um gasoduto contendo um registro, componente tipicamente acionado durante a manutenção de reatores anaeróbios.

Figura 5.1: Foto de uma junta de expansão (à esquerda) e de um registro (à direita) incorporados a um gasoduto.



O biogás, via de regra, é saturado de vapor d'água, resultando na ocorrência de condensação. Dessa forma, durante a instalação dos gasodutos, esses devem ser inclinados em direção a pontos em que o condensado possa ser eliminado adequadamente (pontos de purga ou dreno). Os pontos de purga devem possibilitar a eliminação do condensado do sistema com segurança, ou seja, sem escape de biogás. Dispositivos automáticos para remoção do condensado podem ser instalados nos pontos mais baixos dos gasodutos. Nesse sentido, pode-se acoplar, por exemplo, ao ponto de purga, um tubo sifonado com nível de coluna de água maior que a pressão dinâmica de guiamento do biogás.

É desejável, ainda, que o gasoduto seja dotado de pontos que permitam a retirada de amostras de biogás, bem como que possibilitem a inspeção e a limpeza dos trechos de tubo que o compõem.

5.2 Tanque para remoção de sedimentos e de condensados

Figura 5.2: Diagrama esquemático de um filtro de cascalho e/ou de cerâmica para remoção simultânea de sedimentos e de condensados.

Figura 5.3: Foto de um separador de sedimentos com dreno para condensado.

Para a remoção de partículas grosseiras presentes no biogás, é recomendável o uso de filtros de cascalho. Devido ao resfriamento passivo do gás ao passar pelo filtro, pode-se retirar, simultaneamente, água condensada no filtro. Para tanto, pode-se, por exemplo, instalar um dreno no ponto mais baixo do filtro conectado a uma válvula e/ou a um tubo sifonado com nível de coluna de água maior que a pressão dinâmica de guiamento do biogás. Esses filtros podem ser retrolavados por meio de conexões para tal fim. Manômetros devem ser instalados antes e depois dos filtros para controlar a perda de carga e para identificar eventuais entupimentos dos filtros.

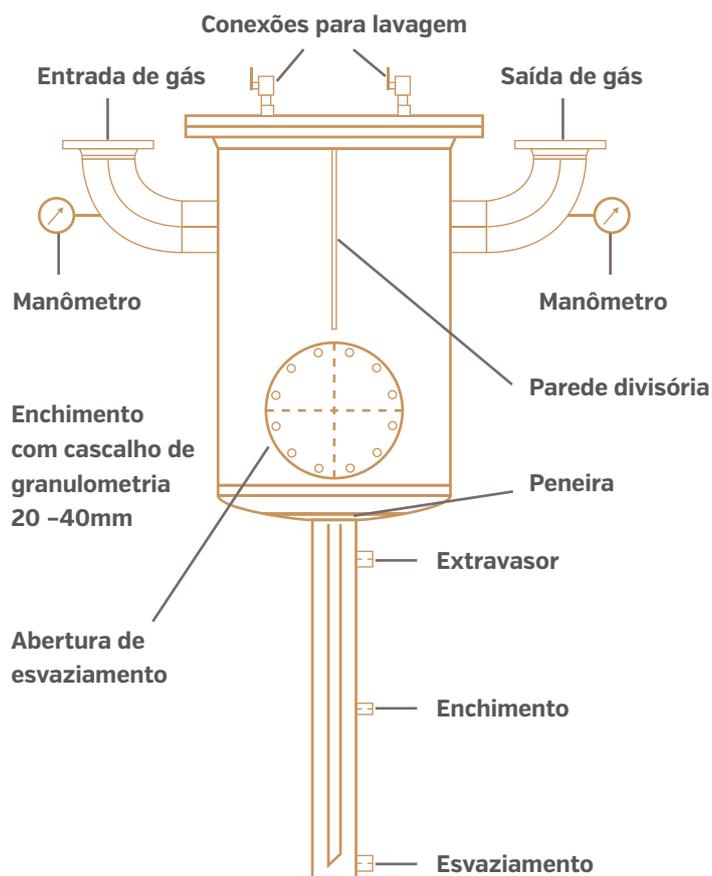
Para a remoção de partículas finas, podem ser usados filtros de cerâmica, cuja operação é similar aos filtros de cascalho.

Os filtros de cascalho e de cerâmica são particularmente importantes para digestores de lodo, por auxiliarem na contenção de espumas.

A Figura 5.2 apresenta um diagrama esquemático desses filtros, que possibilitam a remoção simultânea de sedimentos e de condensados. Por sua vez, a Figura 5.3 apresenta um tanque separador de sedimentos com dreno para condensados.



Fonte: DWA-M 212 (2008).



5.3 Dispositivos de proteção contra sobrepessão e vácuo

Dispositivos de proteção contra sobrepessão e subpessão (vácuo) devem ser instalados nos gasodutos que derivam de reatores anaeróbios.

No uso de dispositivos de proteção contra sobrepessão, deve-se observar que, primeiro, deve ser acionado o dispositivo instalado junto ao gasômetro e, depois, aquele instalado no reator UASB ou no digestor de lodo. Só em caso de pressões ainda mais elevadas é que os demais dispositivos devem ser acionados, por exemplo, o selo hídrico. O ajuste do dispositivo de proteção contra sobrepessão dos reatores anaeróbios se orienta pela pressão dinâmica, devendo sua pressão estar aproximadamente 1.500Pa (0,15 mca) acima da pressão dinâmica máxima permitida no reator UASB e/ou no digestor de lodo.

Em gasômetros não pressurizados, os dispositivos de proteção contra sobrepessão do gasômetro e do reator anaeróbio devem ser dimensionados juntamente com o fabricante do gasômetro. Os equipamentos de segurança contra sobrepessão e subpessão devem garantir que o funcionamento permaneça intacto, mesmo que sejam acionados uma vez.

Um manômetro deve ser instalado no topo do reator anaeróbio considerado, em local apropriado. Além de monitorar a pressão operacional, ele deve funcionar como um dispositivo de indicação de sobrepessão e vácuo, disparando operações de emergência, entre elas: o desligamento de sopradores de gás e/ou de dispositivos autoaspirantes, ou a interrupção do sistema de transporte de gás por meio de uma válvula de fecho rápido.

Dispositivos de vedação normalmente fechados são recomendados para tal fim, uma vez que garantem a segurança da instalação em caso, por exemplo, de interrupção do fornecimento de energia elétrica.

A Figura 5.4 apresenta uma válvula reguladora de pressão acoplada a uma válvula corta-chama.

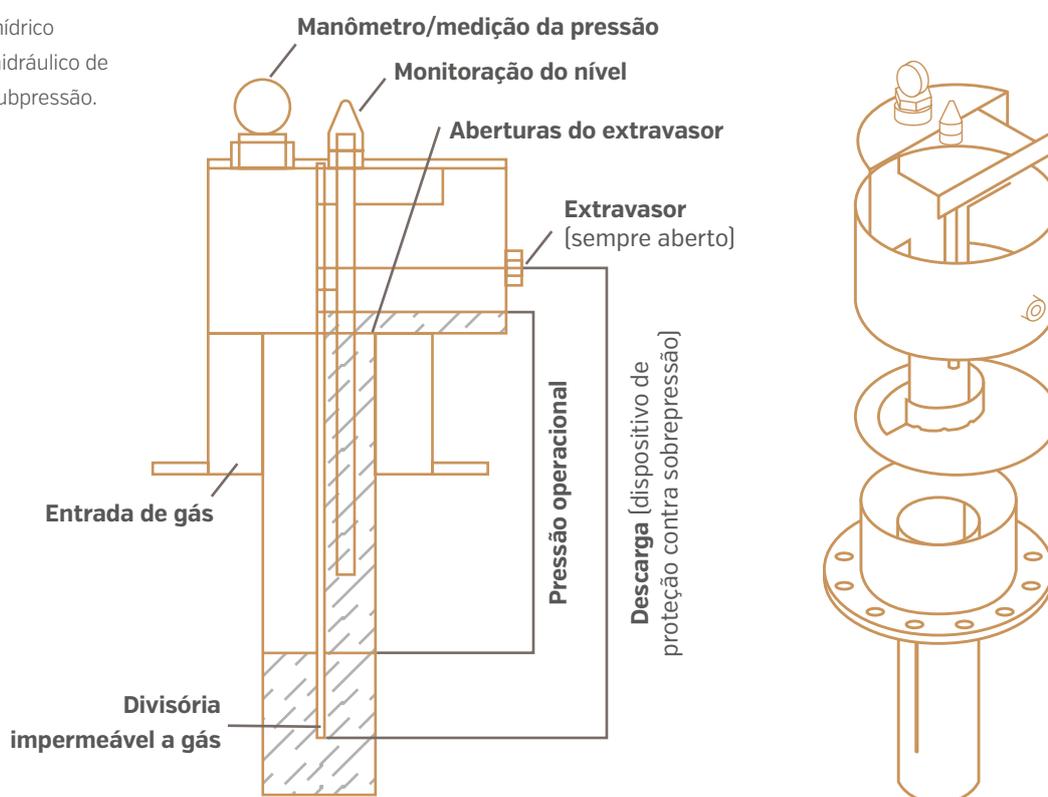
Figura 5.4: Foto de uma válvula reguladora de pressão (ao centro) instalada em um gasoduto (em amarelo).



O selo hídrico (Figura 5.5) é um dispositivo que pode atuar como válvula de sobrepressão e subpressão. Trata-se de um dispositivo de segurança hidráulico que oferece, em comparação a outros sistemas, a vantagem da elevada segurança aliada ao rápido tempo de resposta.

Na parte interior do selo hídrico, ocorre uma diferença de nível de água correspondente à pressão do biogás no interior do reator anaeróbio. Quando a pressão operacional se eleva, a diferença do nível da água se eleva até a pressão de segurança. Se o aumento da pressão continua, ocorre a expulsão de biogás. Na expulsão, o líquido selante é comprimido no tanque de compensação. Uma vez reduzida a pressão abaixo da pressão de expulsão, o líquido volta sem perdas e, dessa forma, a pressão de segurança é preservada após o acionamento.

Figura 5.5: Selo hídrico como regulador hidráulico de sobrepressão e subpressão.



Fonte: DWA M 212 [2008].

Em caso de subpressão, ocorre uma diferença contrária ao nível do líquido. Quando a subpressão assume valores inferiores àqueles predefinidos, situação possível apenas em avarias ou erros de operação, a água é “sugada” e é estabelecida uma ligação com a atmosfera para neutralizar a subpressão. Para restaurar a função após a reação do dispositivo de segurança à subpressão, o líquido selante deve ser reabastecido.

Para permitir o controle da reação do dispositivo de proteção contra sobrepressão e vácuo, recomenda-se instalar, no coletor de água, uma sonda

de nível com alarme, possibilitando a rápida identificação de situações nas quais há fuga de biogás por falta de selamento. Se essas medidas não forem executadas, é possível que, no gasoduto, se forme uma mistura explosiva contendo biogás e ar. O nível do líquido selante deve ser verificado regularmente e completado quando necessário.

Dispositivos de proteção contra sobrepressão e subpressão diferentes dos aqui citados podem ser instalados, desde que cumpram funções de proteção equivalentes.

5.4 Válvulas para controle de vazão

Os gasodutos devem ser dotados de dispositivos de controle de vazão, também chamados de registros, os quais devem ser instalados em locais que permitam o isolamento de, pelo menos, reatores anaeróbios, gasômetros e ambientes fechados (por exemplo, sala de medição de biogás).

É necessário que esses registros possam ser facilmente operados com segurança, permitindo isolar os diferentes trechos do gasoduto. É desejável a instalação de, pelo menos, um registro por reator anaeróbio considerado, o qual deve possibilitar o isolamento de sua respectiva câmara de gás.

Os registros mais utilizados são as válvulas de gaveta e borboleta. Em tubos com diâmetro nominal de até DN 50, frequentemente, são utilizadas válvulas esfera. As válvulas borboleta empregadas devem ser dotadas de batente.

Devem ser empregadas válvulas de ferro fundido nodular ou aços de qualidade superior. Não é permitido o uso de válvulas de ferro fundido cinzento. Assim, os registros devem ser constituídos por materiais resistentes ao potencial de corrosão do biogás.

Os registros são dispositivos que não oferecem completa vedação aos gases. Para que não ocorra a penetração de gás durante reparos em componentes do sistema ou trechos do gasômetro, não se devem utilizar os registros como única forma de bloqueio. Para a vedação completa, devem-se prever, no projeto, equipamentos de fechamento com vedação para gases, tais como válvulas de duplo fechamento com sistema de purga ou selos hídricos dimensionados conforme a pressão operacional máxima.

5.5 Válvulas corta-chamas

Os trechos de gasodutos situados a montante de equipamentos de consumo de biogás ou a montante de equipamentos que representam uma fonte potencial de ignição devem ser dotados de válvulas corta-chamas. Esse componente de segurança deve ser inspecionado por uma assistência autorizada pelo fabricante e o comprovante de verificação de funcionamento deve estar disponível na ETE.

Válvulas corta-chamas são capazes de, em caso de falhas, proteger as áreas de formação e/ou de armazenagem de biogás contra chamas que eventualmente se propagem pelo gasoduto a partir de sopradores e/ou de equipamentos de consumo de biogás, tais como queimadores e motores de combustão interna.

As válvulas corta-chamas podem ser classificadas em termos da proteção que oferecem:

- » Proteção contra deflagração (ou proteção contra explosão);
- » Proteção contra detonação;
- » Proteção contra combustão contínua.

Normalmente, os dispositivos de proteção contra combustão contínua não são empregados em reatores anaeróbios.

Nas válvulas corta-chamas com proteção contra deflagração e detonação, a energia térmica das chamas é neutralizada em uma malha metálica até a sua extinção. Por sua vez, válvulas corta-chamas com proteção contra detonação possuem, à frente dessa malha, um abafador capaz de reduzir a energia da pressão de uma eventual chama.

Para que uma deflagração ou detonação ocorra em um gasoduto, é necessária a presença de uma mistura explosiva de biogás e oxigênio. Uma deflagração inicial sempre se torna uma detonação após um percurso muito curto, a partir do ponto de origem. As ondas de impacto associadas originam pressões bastante elevadas que ocasionam em grandes estragos.

Para combater a propagação de uma deflagração/detonação com eficácia, é necessário instalar uma válvula corta-chamas o mais próximo possível do equipamento que consome o biogás e que potencialmente pode gerar uma chama ou ignição. A distância máxima admissível entre a fonte de ignição e a válvula corta-chamas deve ser verificada junto ao fabricante. A determinação exata das dimensões e posição das válvulas corta-chamas é uma difícil tarefa nas fases de projeto. Por isso, recomenda-se utilizar válvulas corta-chamas com proteção contra detonação caso possam garantir a segurança da planta, independentemente do local de instalação e por um custo adicional justificável.

As válvulas corta-chamas podem apresentar problemas em sua operação pela ocorrência de sedimentos e de condensados. A manutenção e verificação regular dessas válvulas, portanto, deve ser incluída no plano operacional da ETE. Levando isso em conta, devem-se eleger o local de instalação e as opções para facilitar sua montagem e desmontagem. Para válvulas corta-chamas instaladas entre flanges, devem-se utilizar compensadores e peças de desmontagem. As válvulas corta-chamas de carcaça oferecem a vantagem de a malha poder ser inspecionada sem a necessidade de remoção do dispositivo do gasoduto. Registros devem ser instalados a montante e a jusante das válvulas corta-chamas, para que as atividades de manutenção sejam realizadas de forma segura e para que se evite a entrada de ar no gasoduto.

5.6 Medições do biogás

5.6.1 Medição da pressão do biogás

É recomendada, minimamente, a medição da pressão do biogás no interior das câmaras de gás dos reatores anaeróbios e do gasômetro. Sugere-se, ainda, monitorar a pressão do biogás nos gasodutos antes e depois de filtros, com o intuito de identificar eventuais falhas e/ou entupimentos. A medição da pressão do biogás pode auxiliar na identificação de subpressão não admissível nas operações de remoção do lodo flutuante e de fundo dos reatores anaeróbios. A descarga de lodo exige que o gasômetro esteja suficientemente cheio para que o biogás nele contido possa fluir de volta e

compensar a redução do volume da câmara de gás dos reatores anaeróbios. Caso contrário, com o gasômetro vazio, ocorreria uma queda de pressão não permitida, o que ocasionaria a penetração de ar no sistema.

Os elementos ou dispositivos mecânicos para medição de pressão se dividem, basicamente, em dois grupos (Bega *et al.*, 2011):

- > elementos mecânicos de medição direta de pressão: neles, a pressão é medida por meio da comparação com a pressão exercida por uma coluna de líquido com densidade e altura conhecidas. Os manômetros de tubo em “U” e de tubo inclinado servem como exemplos desse tipo de equipamento;
- > elementos mecânicos elásticos de medição de pressão: deformam-se em função da pressão exercida sobre eles pelo fluido sujeito à medição. São exemplos: diafragma, fole, tubo de Bourdon, elemento espiral e elemento helicoidal.

Para salvaguardar a integridade dos elementos mecânicos elásticos, torna-se necessário impedir o contato direto do biogás com o elemento de medição. Nesse caso deve-se utilizar selos de proteção (Bega *et al.*, 2011), os quais podem ser feitos com líquido de menor ou maior densidade que o biogás, ou por meio da utilização de uma membrana/diafragma instalada entre o biogás e o elemento de medição.

Os manômetros podem ser analógicos ou digitais. Caso seja possível integrá-lo a um sistema supervisão, recomenda-se, então, a instalação de transmissores de pressão, os quais podem ser classificados em pneumáticos ou eletrônicos (Bega *et al.*, 2011). Ambos os transmissores se baseiam em elementos mecânicos elásticos. Os transmissores pneumáticos utilizam, como transdutores, o sistema bocal-obturador ou bico-palheta. Por sua vez, os transmissores eletrônicos utilizam um elemento primário mecânico elástico combinado com um transdutor elétrico, o qual gera um sinal elétrico padronizado, correspondente à pressão mensurada. Assim, os transmissores eletrônicos de pressão podem ser classificados nos seguintes tipos: equilíbrio de forças, resistivos, magnéticos, capacitivos, extensométricos e piezelétricos (Bega *et al.*, 2011). Em medições de biogás, tem-se destacado o desempenho dos transmissores de pressão capacitivos, por conta de sua robustez, acurácia e sensibilidade.

5.6.2 Medição da vazão [volume] do biogás

É recomendada a medição de vazão de biogás por reator anaeróbio, devendo ser instalada com *by-pass* (NBR 12209:2011).

Entretanto, a forma de medição da vazão de biogás, sua acurácia e precisão devem ser definidas em função da destinação do biogás. No caso de utilização para a geração de energia térmica, por exemplo, o custo com a medição pode ser reduzido. Na aplicação em uma planta de cogeração de calor e energia elétrica, incidem maiores custos de medição se forem exigidos requisitos relativos ao balanço energético e à possibilidade de se observar o processo (obtenção dos dados e sua transferência para uma central de controle ou sistema de controle de processos). Maiores custos também serão

necessários em processos de transferência de custódia, tais como, a injeção de biometano em redes de distribuição de gás.

Cabe destacar que a medição da vazão de biogás pode ser útil para o monitoramento das condições operacionais dos reatores anaeróbios, bem como para a definição de estratégias para seu manejo.

Diferentes tecnologias podem ser utilizadas para mensurar a vazão e/ou o volume do biogás. Os principais tipos e suas vantagens e desvantagens são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Visão geral de vantagens e desvantagens de diferentes tecnologias de medição de vazão [volume] de biogás.

TIPO	VANTAGENS	DESvantagens
Medidor ultrassônico	<ul style="list-style-type: none"> » Bons resultados em baixa pressão » Sem partes móveis 	<ul style="list-style-type: none"> » Longa distância linear de medição necessária [15 vezes o diâmetro] » Alto custo
Medidor vórtex	<ul style="list-style-type: none"> » Sem partes móveis » Alta acurácia » Resistente à corrosão » Baixa perda de carga 	<ul style="list-style-type: none"> » Longa distância linear de medição necessária [20 vezes o diâmetro] » Baixa rangeabilidade* » Medições em CNTP necessitam de medições complementares de temperatura e pressão
Medição por meio de pressão dinâmica	<ul style="list-style-type: none"> » Alta durabilidade » Pouca influência de gases sujos » Variações de pressão não têm influência negativa na acurácia 	<ul style="list-style-type: none"> » Trabalha melhor em alta pressão » Grande esforço de calibração » Erro de 1,5 a 5% » Para o cálculo de Nm³, a densidade do gás é necessária » Longa distância de medição
Fluidistor	<ul style="list-style-type: none"> » Sem partes móveis » Alta acurácia » Baixo custo » Fácil de limpar, manusear e trocar 	<ul style="list-style-type: none"> » Cálculo complexo de Nm³ » Erro de 1,5% » Sensível a vibrações no biogás causadas, por exemplo, por compressores pistão
Medidor de turbina	<ul style="list-style-type: none"> » Baixo custo de investimento » Tecnologia de medição simples 	<ul style="list-style-type: none"> » Depósitos causam problemas » Partes móveis podem emperrar » Manutenção intensiva e onerosa » Baixa resolução
Medidor mássico por dispersão térmica	<ul style="list-style-type: none"> » Fácil instalação » Medição direta de Nm³/massa » Medição precisa até em flutuações de pressão » Baixo custo de investimento » Alta rangeabilidade* » Baixa perda de carga » Recomendado para controle de processo e levantamento de potenciais 	<ul style="list-style-type: none"> » Sensível a umidade e partículas do gás » Longa distância linear de medição necessária [15 vezes o diâmetro] » Calibração necessita de gás padrão » Não recomendado para transferência de custódia

* Razão entre os valores máximo e mínimo da faixa de medição

Fonte: Adaptado de IEA Bioenergy (2013) e experiências próprias.

A seguir pode-se visualizar o medidor de vazão tipo vórtex e o mássico por dispersão térmica (Figura 5.6 a; b e c).

Figura 5.6: Medidores de vazão de biogás: a) e b) Tipo Vórtex; c) tipo mássico por dispersão térmica.



Fonte: a) Höntzsch GmbH.

5.6.3 Medição da composição do biogás

É recomendado o monitoramento regular da composição do biogás, em especial do teor de CH_4 , uma vez que ele define seu potencial de recuperação energética. Além disso, a composição do biogás é um parâmetro útil para a supervisão e controle do processo de degradação anaeróbia. Uma queda no teor de metano pode representar, por exemplo, o choque de carga orgânica ou de inibição do processo anaeróbio, indicando a necessidade de verificação de possíveis alterações no substrato (esgoto ou lodo). O teor de CO_2 também pode ser monitorado para auxiliar no controle operacional do processo, assim com os teores de H_2S e de O_2 . O interesse na medição do teor de O_2 está associado ao fato de que sua combinação com o CH_4 pode gerar uma mistura explosiva. Isso pode acontecer se as câmaras de gás e/ou os gasodutos dos reatores UASB ou dos digestores de lodo forem contaminados com ar. Atividades de manutenção, falhas em procedimentos operacionais, a falta de estanqueidade e o manejo equivocado de registros são causas comuns de contaminação do biogás com ar e, consequentemente, com O_2 . Apesar dos teores das substâncias supracitadas poderem ser avaliados com elevada acurácia em laboratórios mediante o uso, por exemplo, de cromatógrafos gasosos, atualmente é possível determiná-los em tempo real com o auxílio de equipamentos portáteis e/ou com analisadores de processo. Nesse sentido, os sensores ópticos com feixe duplo operando na faixa do infravermelho vêm sendo utilizados com sucesso nas determinações dos teores de CH_4 e de CO_2 . Por sua vez, as células eletroquímicas vêm sendo empregadas com sucesso na medição dos teores de H_2S e O_2 .

Na figura 5.7, pode-se visualizar um medidor de composição de biogás que utiliza os métodos supracitados.

Figura 5.7: Medidor de composição de biogás.



Fonte: Union Instruments GmbH

5.6.4 Medição de parâmetros relevantes para a operação de uma planta de aproveitamento de biogás

Tabela 5.2: Parâmetros a serem monitorados em uma planta de aproveitamento de biogás.

A Tabela 5.2 sumariza os principais parâmetros que devem ser determinados a fim de supervisionar a produção de biogás em uma ETE. Nela, são apresentadas as frequências sugeridas de monitoramento e a importância de sua determinação.

PARÂMETRO	FREQUÊNCIA	COMENTÁRIOS
Vazão do substrato	Continuamente, em tempo real	É de fundamental importância o monitoramento contínuo das vazões afluentes aos reatores UASB e aos digestores de lodo.
Caracterização de novos substratos (pH, TKN, sólidos totais, sólidos voláteis)	Pontual, quando há novo substrato	No caso de reatores UASB, devem ser avaliados aportes extras de substratos, por exemplo, de lodo de tanque séptico, lixiviado de aterro sanitário, dejetos de banheiros químicos, lodo de ETA. Quando o digestor de lodo for receber novos co-substratos, estes devem ser caracterizados, para evitar desestabilização do processo.
Biodegradabilidade anaeróbia de novos substratos (Teste BMP - Potencial Biometanogênico)	Pontual, quando há novo substrato	Quando o reator UASB ou o digestor de lodo for receber novos co-substratos, deve ser verificado o potencial de degradação anaeróbia dos mesmos. Testes BMP são usualmente utilizados para esse propósito.
Vazão de biogás	Continuamente, em tempo real	Pode indicar instabilidade do processo anaeróbio. Subsidiaria decisões com relação a investimentos para plantas de aproveitamento de biogás.
Qualidade do biogás (CH ₄)	Continuamente, em tempo real e quando há aproveitamento de biogás	O conhecimento do teor de CH ₄ é importante quando se planeja ou já existe o aproveitamento de biogás. Mudanças no teor de CH ₄ podem indicar instabilidade do processo.
Qualidade do biogás (H ₂ S, CO ₂ e O ₂)	Continuamente, em tempo real e quando há aproveitamento de biogás	Parâmetros auxiliares para controle de processo. O teor de O ₂ é importante para identificar eventuais formações de misturas explosivas motivadas por contaminação do biogás com ar. Sua medição é importante, sobretudo, para reatores UASB.
Temperatura do biogás	Continuamente, em tempo real	Parâmetro de fácil medição e para controle de processo. Útil para expressar a produção de biogás em CNTP.
Pressão do biogás	Continuamente, em tempo real	Parâmetro de fácil medição e para controle de processo. Útil para expressar a produção de biogás em CNTP.
Temperatura no reator anaeróbio	Continuamente, em tempo real	A temperatura deve ser medida, obrigatoriamente, no caso de digestores de lodo que trabalham no regime mesofílico e apresentam sistema de aquecimento e/ou revestimento térmico. Recomenda-se, também, a medição da temperatura em reatores UASB e no caso de digestores de lodo em condições psicrófilas.
DQO do substrato	2 a 4 vezes por semana	Útil para a avaliação da eficiência de degradação da matéria orgânica
Sólidos totais e voláteis do substrato	2 a 4 vezes por semana	Útil para a avaliação da eficiência de degradação da matéria orgânica. Nos digestores de lodo, a determinação é necessária para controle de bombeamento e mistura.
pH do substrato	2 a 4 vezes por semana	Recomenda-se no caso de digestores de lodo e de reatores UASB.

Fonte: Adaptado de IEA Bioenergy (2013) e experiências dos autores.

6

ESTRUTURA DE ARMAZENAMENTO DE BIOGÁS³

3: Fluxogramas exemplos, com os equipamentos principais de uma planta de biogás, podem ser visualizados no Anexo A.

O armazenamento do biogás torna-se indispensável no caso de seu aproveitamento energético, sendo que o tipo e o porte do gasômetro dependem, fundamentalmente, da forma de aplicação do biogás. Quando a planta tem somente queimador de biogás, a instalação de um gasômetro pode ser desnecessária. Contudo, quando é demandada a queima eficiente do biogás e/ou é cogitada a possibilidade de seu futuro uso energético, deve ser prevista a instalação de um gasômetro.

Como existem diversas opções de utilização do biogás, não é possível estabelecer uma forma de mensuração do volume de armazenamento amplamente válida.

6.1 Formas de instalação do gasômetro

Os gasômetros podem ser instalados em linha, em relação ao fluxo principal de biogás, ou em paralelo.

A principal desvantagem da instalação do gasômetro em paralelo é que o biogás gerado, cuja qualidade pode variar significativamente, pode afluir diretamente aos equipamentos consumidores, causando falhas. A falta de homogeneização do biogás gerado torna essa opção expressamente não recomendável em ETEs com plantas de cogeração, nas quais se deve adotar a instalação em linha, no gasoduto principal.

A instalação do gasômetro no fluxo principal exige a construção de uma tubulação de by-pass, que permite a utilização do biogás ou, alternativamente, o envio para o queimador durante trabalhos de reparo.

A possibilidade de formação de uma atmosfera explosiva no interior do sistema de tubulação de gás depende da interação do gasômetro com o sistema de utilização do gás. Caso haja a possibilidade de formação dessa atmosfera no sistema de tubulação de gás e no gasômetro, devido à penetração de ar, é necessário tomar medidas adicionais de proteção contra explosões.

6.2 Medição do nível de enchimento do gasômetro

O nível de enchimento do gasômetro deve ser indicado e monitorado. Um alarme deve ser ativado sempre que o nível do volume máximo admissível for excedido ou se o nível cair significativamente, ficando abaixo do volume residual estipulado.

6.3 Armazenamento de biogás para utilização em caldeiras

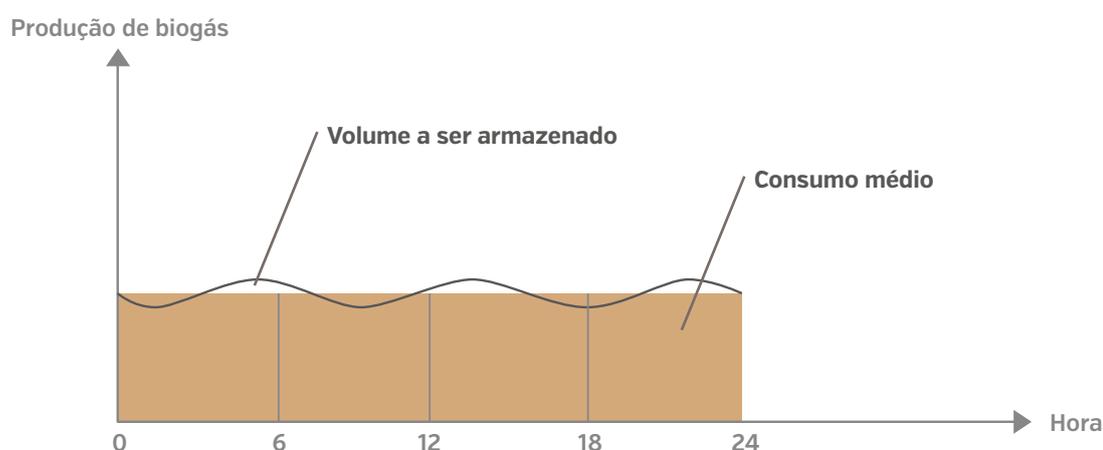
Se o biogás for utilizado exclusivamente em caldeiras, com o intuito de fornecer calor ao digestor anaeróbio e às instalações da planta, o porte do gasômetro geralmente independe das instalações consumidoras, uma vez que o calor necessário normalmente alimenta o digestor ou as instalações continuamente, durante 24 horas. A produção de biogás e o tamanho do gasômetro dela resultante dependem, quase exclusivamente, da operação da unidade de tratamento anaeróbio, mais especificamente da forma de alimentação do reator.

Além da dependência da forma de operação, a quantidade e qualidade do biogás gerado podem oscilar em função de:

- >> diferentes quantidades de lodo;
- >> diferentes teores de SS e SSV; e
- >> diferentes substratos com tempos de degradação distintos.

Figura 6.1: Padrão de produção de biogás com alimentação (semi)contínua.

No caso de digestores anaeróbios de lodo de grande porte, geralmente é praticada a alimentação contínua ou semicontínua, proporcionando uma produção de biogás mais estável e uma equivalência com relação à demanda de consumo de biogás (Figura 6.1).



Fonte: DWA M 363 (2010).

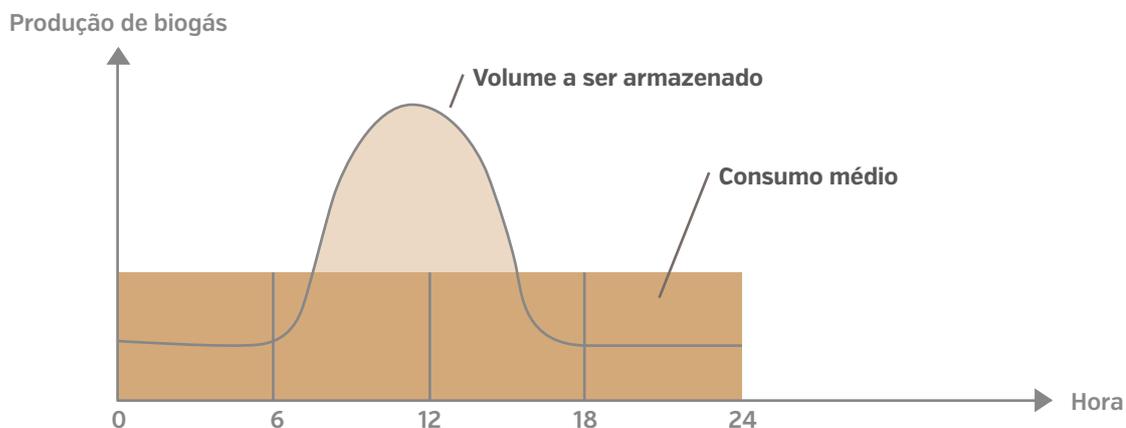
Quanto mais parecidas as características de produção e de consumo, menor pode ser a capacidade de armazenamento do gasômetro. Ainda assim, o volume de armazenamento deve corresponder a cerca de 30 a 50% do volume diário de biogás gerado, permitindo, assim, que as oscilações de produção do biogás sejam compensadas.

Já em digestores anaeróbios menores, em que a introdução de lodo bruto é realizada normalmente uma única vez por dia, assim como em reatores UASB, a geração de biogás pode variar significativamente durante o dia (Figura 6.2).

No exemplo de pequenos digestores anaeróbios com alimentação única durante o dia, observa-se uma produção de biogás acelerada após a alimentação. Essa fase de produção mais acentuada pode durar cerca de 4 a 5 horas, seguida por uma queda acentuada da produção. A geração de biogás nesse período pode representar entre 70 e 80% da produção diária, sendo o percentual restante (20-30%) gerado mais ou menos uniformemente nas demais horas do dia.

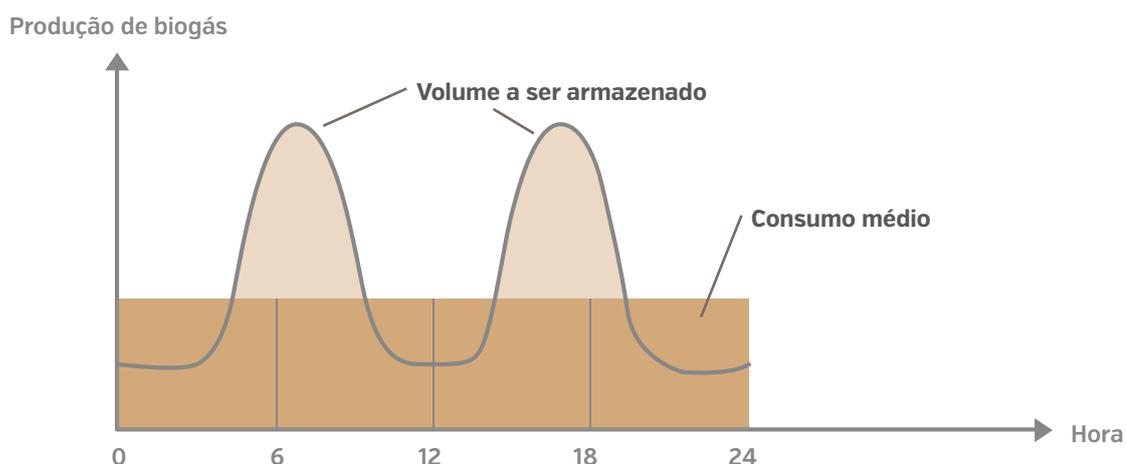
Na Figura 6.3, mostra-se o padrão típico de produção de biogás em digestores com duas alimentações de lodo ao dia.

Figura 6.2: Padrão de produção de biogás com alimentação única de lodo bruto.



Fonte: DWA M 363 (2010).

Figura 6.3: Padrão de produção de biogás com duas alimentações de lodo.



Fonte: DWA M 363 (2010).

O biogás excedente em relação ao consumo das caldeiras deve ser armazenado para garantir a operação adequada dessas, visando à rentabilidade das instalações. Quando o gasômetro não apresenta capacidade compatível, o biogás excedente em relação ao volume de armazenamento necessita ser enviado para o queimador. Nesse caso, ocorreria falta de biogás durante o dia e ele precisaria ser substituído por outros combustíveis.

6.4 Armazenamento de biogás para uso em motores a gás

O volume de armazenamento do biogás a ser utilizado em motores e turbinas se orienta pelas dimensões e características operacionais da planta de biogás.

A Tabela 6.1 apresenta modos de operação preferenciais e distintos, os quais normalmente podem ocorrer simultaneamente, e mostra também os fatores de influência mais importantes. Influências específicas existem em dependência dos motores e turbinas a gás efetivamente selecionados e de seus rendimentos térmicos, bem como de inúmeros fatores específicos da situação e do local.

Tabela 6.1: Influência do modo de operação de equipamentos de utilização de biogás sobre o dimensionamento de gasômetros.

TIPO DE UTILIZAÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	INFLUÊNCIA SOBRE O VOLUME DO GASÔMETRO
Geração de energia elétrica	Carga básica	<ul style="list-style-type: none"> » Sem influência » Menor escala do equipamento de utilização do biogás » Armazenamento somente para compensar oscilações
	Pico de energia elétrica	<ul style="list-style-type: none"> » Influência significativa » Maior escala ou número dos equipamentos de uso de biogás » Armazenamento para maiores demandas a serem atendidas em curtos períodos de operação do componente de uso de biogás
	Energia de emergência	<ul style="list-style-type: none"> » Influência significativa » Escala dos componentes conforme a demanda de energia de emergência » Armazenamento para demanda de energia de emergência
Geração térmica	Carga básica	<ul style="list-style-type: none"> » Sem influência » Menor escala do equipamento de uso de biogás » Armazenamento somente para compensar oscilações
	Pico de carga	<ul style="list-style-type: none"> » Influência significativa » Integração de componentes adicionais » Armazenamento da demanda temporária
Geração de ar comprimido	Carga básica	<ul style="list-style-type: none"> » Sem influência » Menor escala do equipamento de uso de biogás » Armazenamento somente para compensar oscilações

Fonte: DWA M 363 [2010].

Valores medidos de ampla validade são praticamente inexistentes, em vista da grande variedade de estratégias de utilização do biogás e combinações com tratamentos de lodo. Por essa razão, deve-se utilizar, analisando-se caso a caso, uma técnica gráfica de curvas cumulativas ou um procedimento de cálculo tabular, a fim de determinar o volume de armazenamento necessário conforme a flutuação da quantidade de biogás.

Devem ser verificados e considerados, caso existam, registros de períodos suficientemente longos ou prognósticos precisos relativos à geração de biogás ao longo do tempo. Imprecisões nesse ponto repercutem posteriormente em desvios apresentados pela operação na prática em relação às estimativas de planejamento para o dimensionamento. Para não colocarem em risco o prognóstico da viabilidade econômica do aproveitamento do biogás, recomenda-se incluir, nos parâmetros, margens de segurança satisfatórias.

6.5 Métodos de armazenamento de biogás

Os sistemas e o armazenamento de biogás adotam costumeiramente as seguintes faixas de pressão:

- » Não pressurizado (normalmente exige soprador para o consumo): 0 kPa a 0,1 kPa (1 mbar);

- >> Baixa pressão: 1 kPa a 5 kPa (10 a 50 mbar);
- >> Alta pressão: 0,1 MPa a 1 MPa (1 a 10 bar).

Em função da reduzida compressão do gás em baixa pressão e do armazenamento não pressurizado, nessa faixa de pressão, devem ser utilizados gasômetros infláveis. Tanques de alta pressão, ao contrário, têm volume invariável e armazenam o biogás comprimido com pressões variáveis.

Para pequenas e médias plantas de biogás, recomenda-se a utilização de armazenamento sem pressão ou de gasômetros de baixa pressão.

O armazenamento sob alta pressão é viável somente em plantas de grande porte. Pressões acima de 1 MPa são utilizadas apenas para combustíveis de veículos, uma vez que, nesse caso, é necessário armazenar grandes quantidades de gás no menor volume possível.

O avanço tecnológico levou a uma grande variedade de tipos de gasômetros com membranas impermeáveis, que podem ser classificados conforme a função e construção, como a seguir:

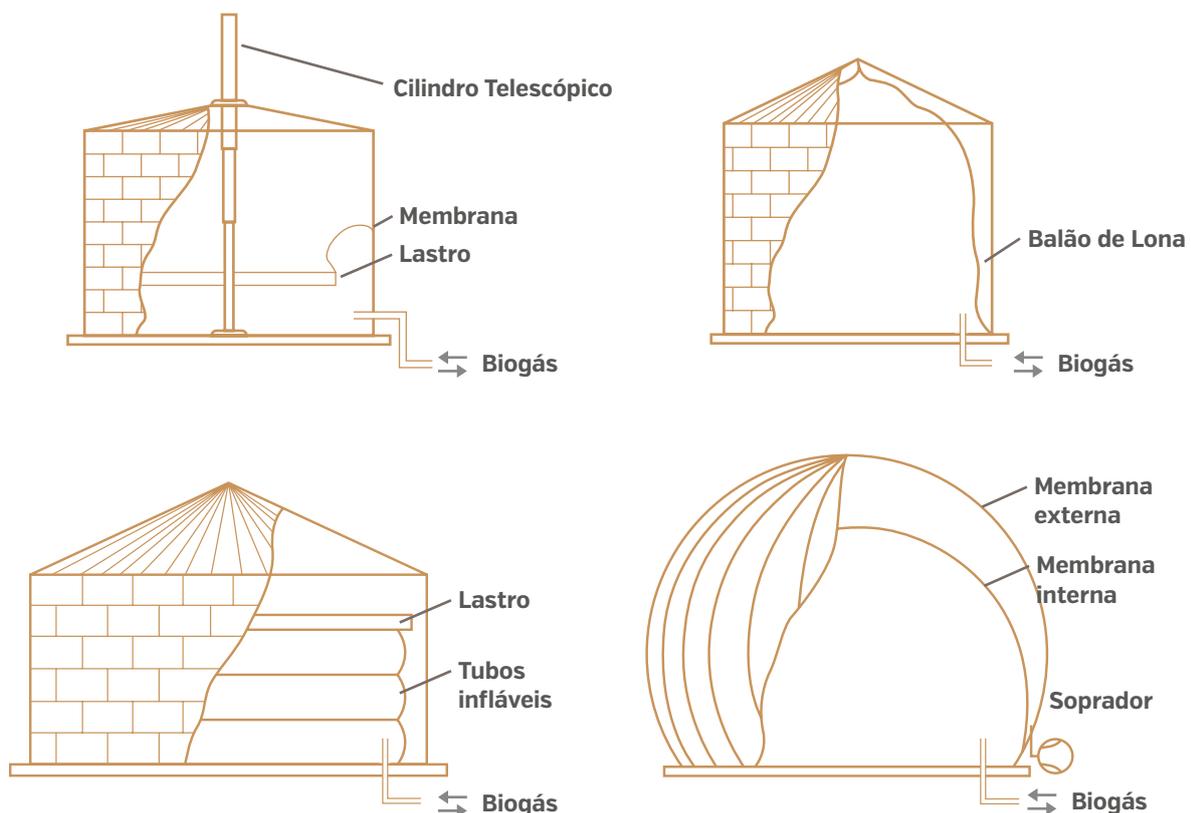
Figura 6.4: Gasômetro com membrana e carga de peso/lastro.

Figura 6.5: Gasômetro com tubos infláveis (com lastro).

Figura 6.6: Tanque de biogás com membrana dupla submetida a ar comprimido.

Figura 6.7: Reservatório de biogás não pressurizado.

- >> **Tanque de biogás de baixa pressão, p. ex.**
 - >> Membranas com lastro (Figura 6.4);
 - >> Colchões infláveis com lastro (Figura 6.5); ou
 - >> Membrana dupla com contra-pressão por meio de ar comprimido (Figura 6.6).
- >> **Tanque de biogás não pressurizado, p. ex.**
 - >> Balão de lona (Figura 6.7); ou
 - >> Colchões infláveis (como a Figura 6.5, porém sem lastro).



Fonte: DWA-M 363 [2010].

A Figura 6.8 apresenta alguns gasômetros instalados em plantas do Brasil e da Alemanha.

Figura 6.8: Foto do gasômetro: [a] de membrana dupla da ETE Arrudas – Belo Horizonte; [b] de tubos infláveis da ETE industrial Carl Macher – Alemanha; [c] e [d] com membrana e lastro da ETE Taurusstein – Alemanha.



Fonte: COPASA [ETE Arrudas]

As formas construtivas da estrutura externa dos gasômetros abrangem uma ampla variedade de materiais e de técnicas de fabricação, que podem ser combinadas de diferentes formas com os tipos funcionais apresentados anteriormente. A seguir, é apresentada uma listagem completa dos diferentes tipos construtivos de estruturas externas:

- >> Impermeável a gás com chapas de aço soldadas;
- >> Impermeável a gás com chapas de aço parafusadas;
- >> Chapas de aço ligadas por dobras;
- >> Armação de aço revestido;
- >> Estrutura de concreto armado;
- >> Conjunto de membrana dupla;
- >> Estrutura integrada à edificação principal.

A partir da combinação entre o tipo funcional e estrutural, pode ser determinada a estratégia a ser utilizada no que tange às inspeções e à segurança operacional. A classificação de segurança do gasômetro tem impacto significativo sobre a classificação de segurança de toda a planta de biogás e de seus equipamentos de segurança.

6.6 Sistemas de alta pressão

Regimes não contínuos de uso do biogás requerem um gasômetro com maior volume. Em determinados casos, são necessários grandes volumes de armazenamento para compensar essas variações. Não é possível compensar essas variações de forma rentável com uso de gasômetros de baixa pressão e gasômetros não pressurizados, uma vez que estes requerem grandes áreas.

Tais casos exigem o emprego de gasômetros de alta pressão que armazenam biogás até pressões de 10 bar. Normalmente, são empregados reservatórios cilíndricos ou esféricos, que devem ser inspecionados por uma entidade autorizada em intervalos regulares e antes de entrarem em operação.

Para garantir a operação segura de um sistema de alta pressão de gás, é preciso instalar, a montante, um gasômetro adicional de baixa pressão com a função de amortecimento. O biogás a ser armazenado é sugado do gasômetro de baixa pressão por compressores e enviado de forma comprimida para o tanque de alta pressão para armazenamento. A retirada do gás do gasômetro de alta pressão se dá por uma linha de alívio, da qual o gás normalmente é alimentado de volta aos equipamentos consumidores por meio da recirculação pelo gasômetro de baixa pressão.

O controle da compressão do gás para o armazenamento ou para o alívio, antes de ser encaminhado ao consumo, é realizado pelo nível de enchimento do gasômetro de baixa pressão.

7

QUEIMADORES⁴

4: Fluxogramas exemplos, com os equipamentos principais de uma planta de biogás, podem ser visualizados no Anexo A.

Os queimadores, chamados usualmente de *flares*, são indispensáveis em todas as estações de tratamento de esgoto com etapa anaeróbia, seja ela realizada em reatores do tipo UASB, seja em digestores de lodo. Em ETEs sem unidade de aproveitamento energético, a instalação de um queimador de biogás visa à redução do impacto ambiental e de odores. Quando há unidades consumidoras de biogás, por exemplo, conjuntos motor-gerador ou caldeiras, o queimador deve ser instalado para o caso de produção de biogás em excesso, que pode ocorrer temporariamente em virtude de falhas operacionais, trabalhos de manutenção ou redução do consumo.

Os queimadores devem ser dimensionados para comportar uma capacidade correspondente ao volume máximo de biogás gerado. A NBR 12209 “Elaboração de Projetos Hidráulico-Sanitários de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários – Revisão 2011” estabelece o uso de dois queimadores para ETEs com capacidade acima de 250 L/s de vazão média de esgoto e sem aproveitamento do biogás.

7.1 Tipos de queimadores

Existem três tipos de queimadores: aberto, enclausurado (fechado) e semi-enclausurado.

A vantagem dos queimadores do tipo aberto é que seu correto funcionamento pode ser verificado visualmente através da chama aparente. Além disso, apresentam menores custos que os queimadores enclausurados. Suas desvantagens são a maior área de exclusão devido à radiação provocada pela chama e as menores eficiências de queima.

Em queimadores enclausurados, a chama fica confinada dentro de uma câmara de combustão, usualmente em aço carbono, com isolamento térmico por fibra cerâmica que permite temperaturas internas da ordem de 1.000°C e temperatura externa da parede de aço menor que 80°C.

O semi-enclausurado combina características dos dois queimadores anteriormente mencionados: dispensa usualmente o isolamento, apresenta uma câmara de combustão de menores dimensões que as enclausuradas e, em alguns modelos, a chama é visível. Não possui controle da temperatura na câmara de combustão e o baixo tempo de residência resulta em menor eficiência na destruição dos gases. Por impossibilitar a análise das emissões, sua eficiência não pode ser medida.

Figura 7.1: Foto de Queimadores: [a] aberto; [b] enclausurado; [c], [d] semi-enclausurado; [e] Dampers de flare enclausurado.



Fonte: Cortesia C-DEG/FOKAL.

7.2 Instalação e distâncias de segurança

A norma NBR 12.209 da ABNT de 1992 ainda previa uma distância de segurança entre o queimador e digestor e/ou gasômetro de no mínimo 30 metros, a distância mínima até qualquer outro edifício devia ser de 20m. A nova redação desta norma de 2011 não se posiciona quanto a este assunto.

Os queimadores devem ser instalados de forma que suas chamas, gases e componentes quentes não ofereçam risco às pessoas. Os requisitos e recomendações de segurança são:

- » A chama e a saída de gases e fumaça devem estar a uma altura mínima de 3m;*
- » A área compreendida pelo raio de 5m do queimador deve estar livre de vegetação (arbustos, árvores). O queimador do tipo enclausurado deve ser instalado a no mínimo 5m de distância de edifícios e vias de trânsito. Queimadores de chama aberta normalmente exigem maiores distâncias.*

7.3 Ignição e monitoramento da chama

A utilização de sistema de ignição ou uma chama piloto assegura o acendimento da corrente de biogás em qualquer circunstância. Ele é de especial importância em situações como a partida da ETE, quando a geração de gás é nula ou intermitente, ou quando a liberação de gases para o queimador ocorre em situações imprevisíveis como a parada de um gerador ou um sistema de secagem de lodo. Conforme indicado, existem dois sistemas de ignição, a ignição por velas de ignição ou um queimador piloto que assegura que sempre há chama no queimador.

Os queimadores pilotos poderão utilizar biogás quando a pressão disponível for superior a 15 mbar. Caso não seja possível, uma alternativa é o uso de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), que pode ser empregado de forma intermitente para minimizar o consumo.

O monitoramento da chama do piloto, mediante termopar, constitui segurança adicional e possibilita programar seu acendimento remoto e automático, no caso da chama apagar.

Outra forma possível é o ignitor composto por velas de ignição robustas e de longa durabilidade, as quais devem ter supressão de interferência. Para o controle da chama, podem ser empregados termopares ou sensores ópticos. O controle do acionamento do flare deve ser realizado de acordo com o nível de gás do gasômetro.

Já que o acendimento direto da chama de queimadores elevados (sem piloto) é influenciado grandemente pelo vento e pela velocidade de saída do gás, deve se cuidar muito mais do correto funcionamento no caso da ignição eletrônica.

Em todos os casos, o uso de anteparos contra vento e protetores contra chuva é recomendado para melhoria do acendimento e do monitoramento.

Em queimadores enclausurados e semi-enclausurados, o ignitor direto, com GLP ou biogás, é uma solução adequada embora seja recomendável sua validação numa análise de riscos.



TRATAMENTO DO BIOGÁS

8.1 Generalidades

O biogás contém, em sua composição, metano, dióxido de carbono e uma variedade de contaminantes, como sulfeto de hidrogênio e outros compostos sulfurados, vapor d'água, siloxanos, amônia e compostos orgânicos voláteis (COVs), cuja presença e composição dependem do tipo de substrato a partir do qual o biogás foi gerado.

Conforme aponta Lobato (2011), o biogás pode ser recuperado para diversos fins, tais como:

- >> Combustível em caldeiras, fornos e estufas em substituição aos outros tipos de combustíveis;
- >> Geração de eletricidade para uso local ou venda para a rede da concessionária de energia;
- >> Cogeração de eletricidade e calor; e
- >> Combustível alternativo visando à injeção na linha de gás natural ou ao aproveitamento como combustível veicular.

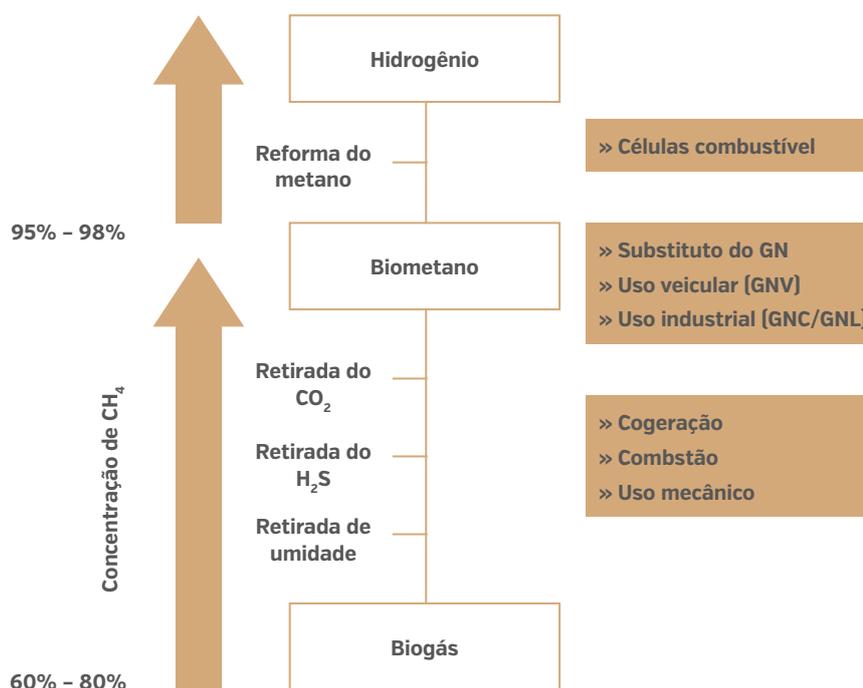
Para sua utilização, é necessário projetar tecnologias que tratem o biogás até o nível exigido pelo tipo de aproveitamento. De modo geral, existe uma diferença clara entre a utilização de biogás e de biometano.

O biogás, depois da remoção das principais impurezas como umidade, siloxanos e, principalmente, H_2S , pode ser utilizado para a produção de energia elétrica (CHP) e energia térmica (aquecer, secar, resfriar). Já o biometano é o resultado de uma purificação muito mais exigente (Figura 8.1) e pode ser utilizado como substituto do gás natural veicular (GNV), sendo necessária, ainda, uma compressão e posterior armazenamento. Atualmente, não é permitida a injeção de biometano oriundo de ETEs na rede de gás natural no Brasil, apenas como uso experimental ou específico (vide Resolução ANP N°8, de 30.01.2015). Porém, esta pode vir a ser uma opção futura.

Na seleção da tecnologia de conversão, é necessário que se observe, além do poder calorífico, da produção e composição do biogás, outras propriedades, como a presença de umidade, pressão, contaminantes, gases inertes e gases ácidos, esses últimos responsáveis pela corrosão precoce dos equipamentos e emissão de poluentes. Portanto, se a qualidade do gás bruto não atender aos requisitos para o aproveitamento energético do biogás, será necessário algum tipo de tratamento. Esse tratamento poderá ser menos sofisticado, no caso de usos mais simples, como a combustão direta, com a simples remoção de condensado; como em casos bastante complexos, quando se deseja uma aplicação como biometano. Na Figura 8.1, pode-se visualizar a necessidade de tratamento conforme o uso final.

Para o caso de estações de tratamento de esgoto no Brasil, é provável que a principal forma de aproveitamento do biogás seja a secagem de lodo (uso térmico – baixa exigência de purificação) ou a geração de energia elétrica no CHP (exigência mais elevada na purificação), ainda com a opção de aproveitamento de uma parcela de energia térmica.

Figura 8.1: Necessidade de tratamento conforme o uso final.



Fonte: Valente, Victor [2015].

8.2 Requisitos de qualidade conforme a utilização

Para os usos principais em ETEs, devem ser atendidos os requisitos apresentados na Tabela 8.1.

Tabela 8.1: Requisitos de qualidade conforme a utilização.*

*Variável de acordo com os requisitos dos fabricantes das tecnologias de conversão energética. Valores da tabela são somente indicativos.

COMPONENTE	QUEIMA PARA A GERAÇÃO DE CALOR	OPERAÇÃO DE MÁQUINAS A GÁS ESTACIONÁRIAS	
		MOTOR A GÁS (CHP)	MOTOR A GÁS COM CATALISADOR (CHP)
Enxofre total [S]	< 1000 ppm	N.E.	N.E.
Sulfeto de hidrogênio [H ₂ S]	-	< 560 ppm/10 kWh	< 8 ppm/10 kWh
Halogênios	-	< 100 mg/10 kWh	< 20 mg/10 kWh
Cloro [Cl]	-	< 50 mg/10 kWh	N.E.
Flúor [F]	-	< 50 mg/10 kWh	N.E.
Poeira/partículas [< 10 µm]	livre do ponto de vista técnico	sem sólidos	sem sólidos
Total de compostos orgânicos com silício	-	< 5 - 10 mg/Nm ³	0 mg/Nm ³
Compostos aromáticos	-	N.E.	N.E.
Umidade relativa	< ponto de orvalho temp. solo	50% - 80%	< 50%
Teor de oxigênio [O ₂]	< 3% em vol.	N.E.	N.E.

COMPONENTE	QUEIMA PARA A GERAÇÃO DE CALOR	OPERAÇÃO DE MÁQUINAS A GÁS ESTACIONÁRIAS	
		MOTOR A GÁS (CHP)	MOTOR A GÁS COM CATALISADOR (CHP)
Metano [CH ₄]	> 50% em vol.	> 45% em vol.	> 45% em vol.
Número de metano	s. req.	Espec. fabricante	Espec. fabricante
PCS	s. req.	N.E.	N.E.
PCI	> 5 kWh/Nm ₃	4,5 - 7 kWh/Nm ₃	4,5 - 7 kWh/Nm ₃
Amônia [NH ₃]	-	< 50 mg/10 kWh	< 50 mg/10 kWh
Temperatura do gás	-	<40°C	< 40°C
Pressão operacional	8 - 25 mbar	> 20 - 80 mbar	> 20 - 80 mbar
Hidrogênio [H ₂]	-	N.E.	N.E.

s. req.: Sem requisitos;

N.E.: Não especificado;

Fonte: Adaptado de DWA-M 361 [2011].

Tabela 8.2: Especificação do Biometano^[1] pela Resolução ANP n° 8 de 2015.

Embora a injeção de biometano proveniente de estações de tratamento de esgoto de forma comercial na rede ainda seja proibida no Brasil, foi estabelecida pela a resolução ANP n° 8 de 30 de janeiro de 2015 a especificação de biometano oriundo de resíduos orgânicos agrossilvopastoris, destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. A resolução ainda determina as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializam o produto em todo o território nacional. Os cuidados com relação à compressão, distribuição e revenda de biometano são os mesmos do gás natural.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE		MÉTODO		
		REGIÃO NORTE URUCU	DEMAIS REGIÕES	NBR	ASTM	ISO
Metano	% mol.	90,0 a 94,0 ^[2]	96,5 mín.	14903	D1945	6974
Oxigênio máx.	% mol.	0,8	0,5	14903	D1945	6974
CO ₂ máx.	% mol.	3,0	3,0	14903	D1945	6974
CO ₂ +O ₂ +N ₂ máx.	% mol.	10,0	3,5	14903	D1945	6974
Enxofre Total máx. ^[3]	mg/m ^{3[5]}	70	70	15631	D5504	6326-3, 6326-5, 19739
Gás Sulfídrico [H ₂ S] máx.	mg/m ^{3[5]}	10	10	15631	D5504 D6228	6326-3, 19739
Ponto de orvalho de água a 1 atm máx.	°C	-45	-45	15765	D5454	6327, 10101-2, 10101-3, 11541 ^[4]

[1] O Biometano deve ser isento de partículas sólidas ou líquidas, devendo ser usado um filtro de 0,2 µm no produtor e 1,0 µm no revendedor varejista. **[2]** A especificação de 90,0 a 94,0% mol de metano deve ser seguida somente nas localidades da Região Norte abastecidas pelo gás natural de Urucu. **[3]** A odorização do Biometano, quando necessária, deverá atender à norma ABNT NBR 15616. **[4]** O ponto de orvalho da água deve ser calculado por meio da norma ISO 18453, quando se usar método para a determinação do teor de água. **[5]** mg/m³ = ppm.

Fonte: ANP [2015].

8.2.1 Queima para geração de calor

Para ser utilizado em caldeiras, o biogás deve apresentar um teor mínimo de metano de 50%. Caldeiras são, em geral, aptas para o uso de biogás como combustível, contudo devem ser observadas algumas condições operacionais, por exemplo, a temperatura mínima da caldeira e a temperatura mínima de recirculação acima do ponto de orvalho.

Recomenda-se que o teor de compostos de enxofre do biogás seja inferior a 1.000 ppm, caso contrário, deve ser previsto um tratamento preliminar, conforme as tecnologias descritas na seção 8.3.1.

8.2.2 Utilização em motores estacionários

Ainda que variem ligeiramente conforme o fabricante, os requisitos para a utilização de biogás como combustível em motores a gás são essencialmente semelhantes.

A temperatura máxima do biogás não deve exceder 40°C, para não prejudicar a vida útil das membranas da linha de controle e regulação de gás e não afetar a temperatura da mistura de ar e gás e, conseqüentemente, o desempenho do motor.

O poder calorífico inferior deve estar situado entre 4,5 kWh/Nm³ e 7 kWh/Nm³ (45% a 70% de CH₄, e o restante de CO₂), sendo possível compensar oscilações do poder calorífico inferior de ±1%/30s (conforme o fabricante) por sistemas de regulação. No caso de variações mais lentas do poder calorífico do biogás, são também admissíveis maiores variações quanto à faixa citada acima. Se em uma planta existirem ou estiverem planejadas diferentes fontes de geração de biogás com qualidade muito heterogênea, devem-se consultar os fabricantes dos motores sobre a faixa de variação permitida e a oscilação da qualidade admissível ao longo do tempo.

A umidade relativa do biogás não deve ultrapassar 80% para garantir uma distância segura do ponto de orvalho. Essa diferença do ponto de orvalho deve ser respeitada especialmente na linha de controle e regulação de gás, para evitar condensação. A remoção do condensado deve ser suficiente para que este não penetre em partes críticas do sistema, tais como a linha de controle e regulação de gás, e o compressor.

Conforme a origem do biogás, ele pode conter gases nocivos e concentrações significativas de H₂S. Isso pode resultar, por exemplo, na formação de ácido sulfúrico no bloco do motor, ocasionando, assim, a corrosão dos mancais de deslizamento, bem como a redução da vida útil do óleo.

Devem-se respeitar os valores-limite especificados pelos fabricantes dos motores para determinados componentes do gás. Os valores mais comuns são apresentados na Tabela 8.1.

Na operação com catalisador, devem ser mantidos valores mais baixos, de acordo com a Tabela 8.1. Nesse caso, existem diferenças significativas dos valores-limite admissíveis indicados pelos fabricantes de motores, fato a ser considerado ainda na fase de planejamento. Assim, conforme a prescrição, o tratamento do gás e/ou o aumento da pressão, por exemplo, podem ser estritamente obrigatórios ou inteiramente dispensáveis. Isso deve ser considerado cuidadosamente, já que tem impacto considerável sobre os custos operacionais e de investimento.

A pressão de gás exigida na linha de gás é de 20 a 80 mbar, conforme as perdas de pressão que caracterizam a linha. Em muitos casos, é possível dispensar a pressurização após o gasômetro de baixa pressão pela escolha de uma linha de controle e regulagem de gás de porte suficientemente grande. Visto que equipamentos de pressurização envolvem alto custo de investimento, substanciais custos operacionais e significam riscos adicionais ao sistema, deve-se, conforme a viabilidade, priorizar o uso de uma linha de gás de maior diâmetro, em vez da adoção de tais equipamentos. A princípio, não existe essa possibilidade em sistemas sem pressão.

As oscilações de pressão devem ser limitadas a 10 mbar/s com 80 mbar de pressão de admissão.

8.2.3 Microturbina a gás

Geralmente, as microturbinas a gás devem cumprir perfis específicos de requisitos, conforme o gás combustível. Esses requisitos devem ser observados na operação com o biogás. O biogás, cuja temperatura não pode exceder 50°C, deve ser fornecido à microturbina a gás com o respectivo poder calorífico inferior e com pressão dependente do teor de metano, para que a potência de combustão seja constante (DWA, 2011). O poder calorífico superior deve estar entre 3,8 e 8,3 kWh/Nm³, sendo admissíveis variações de ±10% do poder calorífico (DWA, 2011). Dessa forma, o biogás utilizado nas microturbinas a gás pode apresentar um teor de metano de 35 a 75% e uma variação de concentração de ±5%. Caso os valores do metano variem mais que essas faixas admissíveis, é necessário indicar um novo índice de combustível para a microturbina a gás.

O biogás não pode apresentar teor de umidade (vapor d'água) superior a 1,6% em volume (T = 50°C, 70% de CH₄). O condensado deve ser completamente eliminado antes da injeção na microturbina, e o teor de CO₂ não deve ultrapassar 50% em volume. Outros valores a cumprir incluem: poeira, partículas (<10 µm, 20 ppm em peso), siloxanos (5 ppb em vol.), hidrogênio (1 a 2% em vol.) e teor de óleo (2 ppm em massa) (DWA, 2011).

Cada fabricante tem uma indicação específica quanto aos valores-limite de siloxanos. Se por um lado há fornecedores que prescrevem a remoção completa dos siloxanos, outros poderão afirmar que, devido a diferenças estruturais (turbina com câmara de combustão), suas turbinas toleram os níveis usuais de siloxanos contidos no biogás, uma vez que os produtos residuais da combustão se precipitam apenas na parte de exaustão (silenciador, etc.), podendo ser removidos por limpezas regulares.

Altas concentrações de sulfeto de hidrogênio não afetam microturbinas a gás. No entanto, para os compressores e o sistema de escape da turbina, pode ser observado um valor máximo de emissão. Por exemplo, na Alemanha, esse teor corresponde a 200 ppm de H₂S de acordo com a regulação Alemã para controle da qualidade do ar (Alemanha, 2002).

8.2.4 Geração de biometano

Independente do uso do biometano, recomenda-se o beneficiamento do biogás para a remoção de impurezas como umidade, CO₂, H₂S e siloxanos, de modo a evitar problemas de corrosão e incrustação nos equipamentos (Urban *et al.*, 2009). Assim, os autores sugerem as seguintes etapas para remoção de compostos do biogás:

- >> Separação grosseira de sulfeto de hidrogênio, dentro do próprio digestor ou em sistema próprio para este fim;
- >> Remoção de concentrações traço de sulfeto de hidrogênio;
- >> Separação de dióxido de carbono e outros componentes do biogás;
- >> Remoção da umidade do biogás, sendo esta etapa realizada antes da separação do dióxido de carbono, quando a tecnologia de remoção de CO₂ utilizar um processo a seco.

8.3 Métodos de tratamento do biogás

8.3.1 Remoção de sulfeto de hidrogênio

O biogás pode conter sulfeto de hidrogênio (H₂S) em uma concentração volumétrica de até 7.000 ppm. A reação do sulfeto de hidrogênio com a água origina o ácido sulfúrico, que exige elevada resistência à corrosão dos materiais utilizados no biodigestor. Para aumentar a durabilidade dos componentes do sistema e atender aos requisitos de qualidade dos fabricantes de plantas de cogeração e aquecedores, é necessário que a quantidade de sulfeto de hidrogênio seja reduzida.

Os processos de remoção de H₂S ou dessulfurização podem ser biológicos, químicos ou físicos, sendo a escolha do processo, ou combinação de processos, definida em função do uso do biogás tratado. Esses processos podem ser aplicados visando à separação grosseira de sulfeto de hidrogênio, dentro do próprio digestor, no gasômetro ou em sistema próprio para este fim, ou a remoção fina (concentrações traço) de sulfeto de hidrogênio.

8.3.1.1 Remoção de sulfeto de hidrogênio por microaeração

A microaeração de biodigestores anaeróbios é conseguida pela injeção de ar sob condições controladas. Trata-se de um método barato e eficiente para se reduzir as concentrações de H₂S no biogás, sendo muito popular, sobretudo, em plantas de biogás agrícolas. A tecnologia está sendo analisada atualmente em um projeto P&D da COELBA com a EMBASA, na ETE de Feira de Santana/BA. Essa técnica se baseia na oxidação biológica aeróbia do H₂S a enxofre elementar (S₀) e sulfato (SO₄⁻⁴), em função da temperatura e do pH. A maioria dos microrganismos que oxidam sulfeto usa o CO₂ para suprir suas necessidades de carbono. Tais microrganismos crescem na superfície do lodo ou na estrutura do digestor e não necessitam de inoculação ou adição de nutrientes, visto que existem em quantidades suficientes no digestor, com o oxigênio necessário sendo suprido pela introdução de ar, utilizando-se bomba ou micro compressor. O processo exige a dosagem exata de ar, mesmo quando a vazão de gás bruto oscila e, por isso, a alimentação de ar no sistema deve ser monitorada, para que não se atinjam limites que ofereçam risco de explosão e nem limites que comprometam possíveis usos em função da presença de oxigênio no biogás. Além disso, no caso de realização de dessulfurização no topo do digestor de lodo, deve-se tomar cuidado para que as condições anaeróbias sejam mantidas, de forma a evitar a inibição do processo de digestão. Como variável de controle dessa alimentação de ar, pode-se utilizar a medição do teor de H₂S. Como os ácidos gerados nesse processo podem causar corrosão no gasômetro, exige-se a utilização de materiais adequados.

De forma geral, segundo Polster & Brummack (2005), as condições básicas dessa técnica são: oxigênio (por injeção de ar), superfície de fixação para as bactérias, tempo de detenção e turbulência suficientes na zona de dessulfurização, e disponibilidade de nutrientes (na superfície de contato com o substrato).

Em termos de qualidade, os resultados obtidos, em geral, são adequados para a queima em motores estacionários a gás, desde que não ocorram grandes oscilações nas concentrações de enxofre. No entanto, esse tratamento não é adequado quando se visa a obter qualidade de gás natural, pois resulta no incremento das concentrações de N_2 e O_2 no biogás, ambas de difícil eliminação (FNR, 2012).

Figura 8.2: Montagem de gasômetro com biodessulfurização interna - ETE Jacuípe II - Bahia.

Na Figura 8.2, pode-se observar um exemplo de montagem de gasômetro com sistema de biodessulfurização interna, sendo a rede verde a estrutura e a superfície de fixação para as bactérias.



Fonte: Rotária do Brasil.

8.3.1.2 Dessulfurização físico-química por dosagem de ferro

A formação do sulfeto de hidrogênio pode ser consideravelmente reduzida se, durante o processo de digestão anaeróbia, forem adicionados compostos de ferro. Essa tecnologia é bastante utilizada nos digestores na Alemanha, já que se combina com a eliminação de fósforo por precipitação com sais férricos. A dosagem destes ocorre na forma de sal, solução ou hidróxido de ferro, sendo adequados para este fim os cloretos de ferro $FeCl_2$ e $FeCl_3$, o sulfato de ferro (II), o sulfato de ferro (III) e o $Fe(OH)_3$. Durante a reação do ferro com o sulfeto de hidrogênio, formam-se sulfetos não solúveis que são removidos do digestor junto com o lodo e o biossólido. A adição de compostos de ferro presta-se à dessulfurização primária, sendo uma prática amplamente disseminada e frequentemente aplicada nos casos em que não pode haver entrada de ar no biogás, pois não há aporte de O_2 e N_2 no biogás tratado. No caso de elevados padrões de pureza, deve-se instalar um processo de dessulfurização secundária a jusante. O investimento, de custo relativamente baixo, se dá pela instalação de um tanque de alimentação e equipamento de dosagem, todavia, dependendo da quantidade de sais de ferro adicionada, pode haver elevados custos operacionais.

Os produtos de precipitação utilizados podem atingir o meio ambiente através do lodo digerido ou do biossólido. Os sais de ferro encontrados no

mercado contêm metais pesados em maior ou menor grau, em função do seu processo de fabricação, devendo-se observar este aspecto na compra dos aditivos. Vale ressaltar que soluções de sais de ferro são prejudiciais à saúde e poluentes às águas, devendo-se utilizar bombas resistentes a ácido, proteger tubulações e tanques de armazenamento contra a corrosão e cumprir as normas relativas ao manuseio de produtos perigosos.

Os hidróxidos de ferro são também utilizados para o tratamento de biogás. O reagente é comercializado na forma de pó, granulado e massa pastosa e contém, além de hidróxido de ferro (comumente 70%), outros componentes, como o carbonato de cálcio (aprox. 20%) e o dióxido de silício (aprox. 10%). O teor de Fe^{3+} é de, no mínimo, 37%. O pó pode ser adquirido em sacas ou em *big bags*, sendo possível, também, armazená-lo em maiores quantidades nos silos. Uma importante vantagem é que o produto não é perigoso, não poluindo a água, e não transferindo sais neutros para os biossólidos.

8.3.1.3 Biodessulfurização em reator de biopercolação

Tipicamente, a biodessulfurização é realizada em um biopercolador contínuo, com microrganismos especialmente selecionados para essa finalidade. O gás bruto entra pela base da coluna de lavagem e sai pelo topo. Esse sistema é composto de um tanque de plástico adequado (p. ex., polipropileno) com fundo plano e teto cônico. O tanque apresenta, em seu interior, uma grelha plástica integrada, sobre a qual se encontra o *meio suporte*, que deve ter uma superfície específica grande. Os microrganismos são imobilizados sobre esse *meio suporte* e alimentados regularmente com os nutrientes necessários. Conforme o caso, isso é possível pela introdução de lodo diluído ou filtrado, ou lodo estabilizado anaerobicamente, obtido do digestor de lodo. São utilizados microrganismos do gênero *Thiobacillus* (*Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus ferrooxidans*). Essas bactérias utilizam o dióxido de carbono como fonte de carbono e, na presença de oxigênio, são capazes de oxidar o sulfeto de hidrogênio em sulfato e outros compostos de enxofre. A demanda de oxigênio é suprida pelo ar ambiente, o qual pode ser injetado por um soprador regulável. Como há injeção de ar, esse método não é adequado para produção de biometano. O processo é basicamente o mesmo que o descrito em 8.3.1.1.

Figura 8.3:

Biodessulfurização em biopercolador – ETE de Augsburg – Alemanha.



Fonte: Rotária do Brasil.

8.3.1.4 Dessulfurização físico-química com óxido de ferro, hidróxido de ferro ou óxido de zinco

O sulfeto de hidrogênio reage facilmente com o óxido de ferro, o hidróxido de ferro e o óxido de zinco e forma sulfeto de ferro ou de zinco, respectivamente. Esse processo é frequentemente denominado de *esponja de ferro*, pois pode ser usada palha de aço coberta com ferrugem para formar o leito da reação. No entanto, a palha de aço tem uma área superficial relativamente pequena, o que resulta em baixa capacidade de ligação para o sulfeto. Por esta razão, cavacos de madeira impregnados com óxido de ferro têm sido usados preferencialmente como material do leito de reação, uma vez que têm maior relação superfície/volume. O óxido ou o hidróxido de ferro também podem estar ligados à superfície de *pellets* feitos de lama vermelha (Ryckebosch *et al.*, 2011). A eliminação do H_2S se dá pela ligação do enxofre com o ferro em colunas de dessulfurização e a regeneração, com utilização de ar. O resultado da eficiência desse tratamento depende de diversos fatores no gás bruto, tais como o tempo de detenção, a velocidade do fluxo e a concentração do sulfeto de hidrogênio. Normalmente, esse processo de dessulfurização pode ser aplicado 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, menores que 20 ppm. Conforme o estado da arte dessa tecnologia, comprovou-se a eficácia da coluna simples de dessulfurização com regeneração simultânea por adição de ar (2 a 3%). Nesse dessulfurizador, o biogás passa pela massa de tratamento de baixo para cima. No topo, ocorre a aplicação de massa de dessulfurização em intervalos regulares; e na parte inferior, a massa carregada pode ser retirada no cone aquecido do dessulfurizador.

O óxido de zinco (ZnO) provoca a adsorção química do sulfeto de hidrogênio, que é eliminado na forma de sulfeto de zinco. Esse processo opera em temperaturas de 200 a 400°C, utilizando o ZnO na forma de *pellets* no leito absorvente. Como não é possível regenerar os *pellets* saturados, estes devem ser substituídos e dispostos de forma ambientalmente correta, já que o óxido de zinco é classificado como substância perigosa ao meio ambiente. Este também pode separar outros compostos de enxofre, como sulfeto de carbonila (COS) e mercaptanos, desde que estes sejam hidrolisados para H_2S , o que pode ocorrer com adição de CuO ou Al_2O_3 ao ZnO. As desvantagens desse processo são os elevados custos do absorvente e as altas temperaturas de operação do processo.

8.3.1.5 Dessulfurização com soda cáustica ou físico-química

Na dessulfurização com soda cáustica, o biogás a ser tratado é impelido em contrafluxo no interior de uma coluna de lavagem preenchida com *meio suporte*. A solução de lavagem contém soda cáustica, que reage com o sulfeto de hidrogênio para formar sulfito ou sulfato de sódio. Além de eliminar o sulfeto de hidrogênio, a soda cáustica também elimina parcialmente o dióxido de carbono através da formação de carbonatos e bicarbonatos. Esse processo é utilizado, principalmente, para elevadas concentrações de H_2S e sua eficácia já foi comprovada amplamente na indústria. A soda cáustica é uma substância corrosiva e, portanto, devem-se cumprir as normas relativas ao manuseio de produtos perigosos.

8.3.1.6 Dessulfurização físico-química com adsorção por carvão ativado

O processo de dessulfurização com adsorção por carvão ativado pode ser utilizado em escala comercial até uma carga máxima de aproximadamente

500 ppm no gás bruto, podendo proporcionar um grau de pureza do gás tratado inferior a 1 ppm, e ocorre, preferencialmente, a uma temperatura entre 10 e 70°C. É um processo frequentemente instalado a jusante de outros processos de dessulfurização visando à limpeza fina.

A coluna de adsorção é constituída por um recipiente cheio de carvão ativado especialmente impregnado. O recipiente é normalmente construído em aço inoxidável (qualidade AISI 316Ti, para meios agressivos), ou, opcionalmente, em plástico. O H_2S é convertido em enxofre elementar pela oxidação na estrutura porosa do carvão ativado, e suas moléculas são adsorvidas nos microporos do carvão, levando à remoção de H_2S do biogás. Deve-se evitar a penetração de condensado no filtro de carvão ativado, o que pode ser obtido pela remoção da umidade antes da entrada nessa unidade. Para a proteção do filtro contra a saturação, recomenda-se que o sistema de tratamento seja construído com dois filtros consecutivos de carvão ativado instalados em linha.

A dessulfurização com carvão ativado impregnado por iodeto de potássio (KI) deve ocorrer na presença de oxigênio e água. Por essa razão, o carvão ativado não pode ser utilizado para eliminar o enxofre do biogás isento de ar sem que se realize a adição de oxigênio. Uma desvantagem desse processo são os elevados custos operacionais devidos à onerosa regeneração (com vapor a uma temperatura superior a 450°C) ou à disposição final do carvão ativado saturado. Devido aos elevados custos operacionais, esse processo deve ser aplicado somente para a dessulfurização fina.

O carvão ativado impregnado com carbonato de potássio (K_2CO_3) também não deve ser utilizado para a dessulfurização fina do biogás isento de oxigênio. A remoção do H_2S ocorre em temperaturas superiores a 50°C, em presença de vapor d'água e oxigênio (Hofmann *et al.*, 2005). Embora os custos de investimento sejam reduzidos, os custos operacionais são bastante elevados, não sendo, portanto, adequado à dessulfurização grossa.

O uso de carvão ativado impregnado com permanganato de potássio ($KMnO_4$) no recheio do filtro permite reduzir a concentração de H_2S a 5 mg/m³. Esse processo não exige a injeção de ar e seu custo de investimento é reduzido. Em função dos elevados custos operacionais, porém, esse processo só deve ser utilizado para a dessulfurização fina (Hofmann *et al.*, 2005).

Figura 8.4: Remoção de H_2S por carvão ativado – ETE de Augsburg – Alemanha.



Fonte: Rotária do Brasil.

8.3.2 Remoção de umidade

O vapor d'água deve ser removido do biogás a fim de proteger os componentes de processamento de gás contra desgaste e danos e atender às exigências dos estágios de purificação seguintes, sendo que a quantidade de água e vapor d'água que o biogás pode absorver está condicionada à sua temperatura. No biodigestor, a umidade relativa do biogás é de 100% (completamente saturado), e a retirada de água do biogás se dá pelos seguintes processos: secagem por condensação, secagem por adsorção (gel de sílica, carvão ativado) e secagem por absorção (desidratação por glicol). Esses processos são explicados, resumidamente, a seguir (FNR, 2012).

8.3.2.1 Resfriamento

Esse é o processo mais utilizado e baseia-se no princípio da separação do condensado pelo resfriamento do biogás abaixo do ponto de orvalho. A desumidificação do biogás é realizada, em geral, por meio de um processo de resfriamento do gás e posterior remoção do condensado. Para isso, o gás é conduzido através de um trocador de calor carregado com um fluido de arrefecimento, o qual flui em direção contrária ao gás, absorvendo o calor presente no fluxo e arrefecendo o gás a uma temperatura de aproximadamente 5°C. Isso ocasiona a redução até um nível inferior ao ponto de orvalho e, como consequência, a umidade presente no gás é condensada, permitindo a remoção da umidade. Após o resfriamento, eleva-se novamente a temperatura do gás para temperaturas operacionais. Entretanto, não volta a ocorrer a condensação do gás, pois, em função da baixa umidade do gás, após a eliminação do condensado, seu ponto de orvalho é reduzido. Uma alternativa ao resfriamento do gás é seu aquecimento para obter uma desumidificação até determinado grau.

Também é possível diminuir a temperatura do gás utilizando um refrigerador de lavagem que utiliza água como refrigerante. Com essa técnica, a água resfriada é pulverizada diretamente no gás em sentido contrário ao seu fluxo, proporcionando a diminuição da temperatura e consequente condensação, o que leva à purificação do gás. O condensado em excesso é eliminado do sistema. Esse processo deve ser seguido pelo reaquecimento do gás.

Em muitos casos, é possível realizar o processo de resfriamento e desumidificação do gás a baixo custo, utilizando a condensação natural em uma superfície com temperatura mais baixa. Entre outras formas, isso é atingido com gasômetros externos que, devido ao tempo de detenção e gradientes de temperatura, ocasionam a condensação, em parte de grande intensidade. Esse método pode ser utilizado com restrições com filtros de seixo e filtros finos. É possível obter efeitos semelhantes utilizando tubos subterrâneos ou tubulações mais longas, embora devam ser incluídas estruturas para aumentar o tempo de retenção.

Filtros de carvão ativado ou adsorção com modulação de pressão exigem apenas a desumidificação do gás por resfriamento.

O resfriamento do biogás é frequentemente realizado na tubulação de gás. Se a tubulação for instalada com certa inclinação, o condensado é recolhido em um purgador de vapor, localizado no ponto mais baixo da tubulação, sendo que, em tubulações enterradas, o resfriamento é ainda maior. Para que o biogás possa ser resfriado, porém, é necessário que a tubulação

de gás seja suficientemente longa. Além do vapor contido no condensado, também são eliminadas do biogás substâncias como gases solúveis em água e aerossóis. O acesso aos purgadores de vapor deve ser facilitado, uma vez que devem ser esvaziados regularmente, além de sua instalação ser obrigatoriamente à prova de congelamento. O resfriamento adicional pode ser obtido por meio da transferência por água fria, pois, conforme afirmam Urban, Girod & Lohmann (2009), esse método permite pontos de orvalho de 3 a 5°C e a redução do conteúdo de vapor d'água para até 0,15% em volume (teor original: 3,1% em volume, 30°C, pressão do meio). Se o gás for comprimido previamente, a extração do condensado é ainda mais eficiente. Esse processo representa o estado da arte para a subsequente combustão de gases.

8.3.2.2 Adsorção

Os métodos de adsorção para a secagem de gases e de ar comprimido são amplamente utilizados em processos industriais. São empregados como material adsorvente a sílica, o gel de óxido de alumínio e as peneiras moleculares, sendo possível alcançar altos índices de secagem do biogás com esses métodos. Os adsorventes utilizados são instalados em um leito fixo e operados alternadamente a uma pressão de 6 a 10 bar. Os materiais de adsorção saturados podem ser regenerados a quente ou a frio.

Esses processos de secagem são utilizados, por exemplo, para ajustar o teor de umidade do biometano após secagem por resfriamento, e garantir que este atinja qualidade equivalente à do gás natural, antes de sua injeção nos gasodutos.

8.3.2.3 Absorção

A desidratação por glicol, utilizada originalmente no tratamento de gás natural, é um processo físico de absorção em que o biogás flui em uma torre absorvedora em contracorrente a uma solução de glicol ou trietilenoglicol e são removidos do gás bruto tanto o vapor quanto os hidrocarbonetos superiores. Na desidratação por glicol, a regeneração se dá pelo aquecimento da solução de lavagem a 200°C, temperatura que provoca a vaporização dos materiais estranhos. Em termos econômicos, essa técnica é indicada para fluxos mais elevados (500 m³/h) e possibilita a injeção de biogás na rede de distribuição como opção de uso (FNR, 2012).

8.3.3 Remoção de gás carbônico

A remoção de CO₂ é o principal passo na transformação do biogás para o biometano, promovendo o aumento do poder calorífico. Dessa forma, é possível atingir o índice de Wobbe, que é um importante parâmetro de qualidade para uso do biometano como substituto do gás natural, seja para injeção na rede de gás natural, seja para uso como combustível veicular. Ela também pode ser utilizada, por exemplo, como etapa intermediária para a produção de hidrogênio, visando ao uso em célula de combustível.

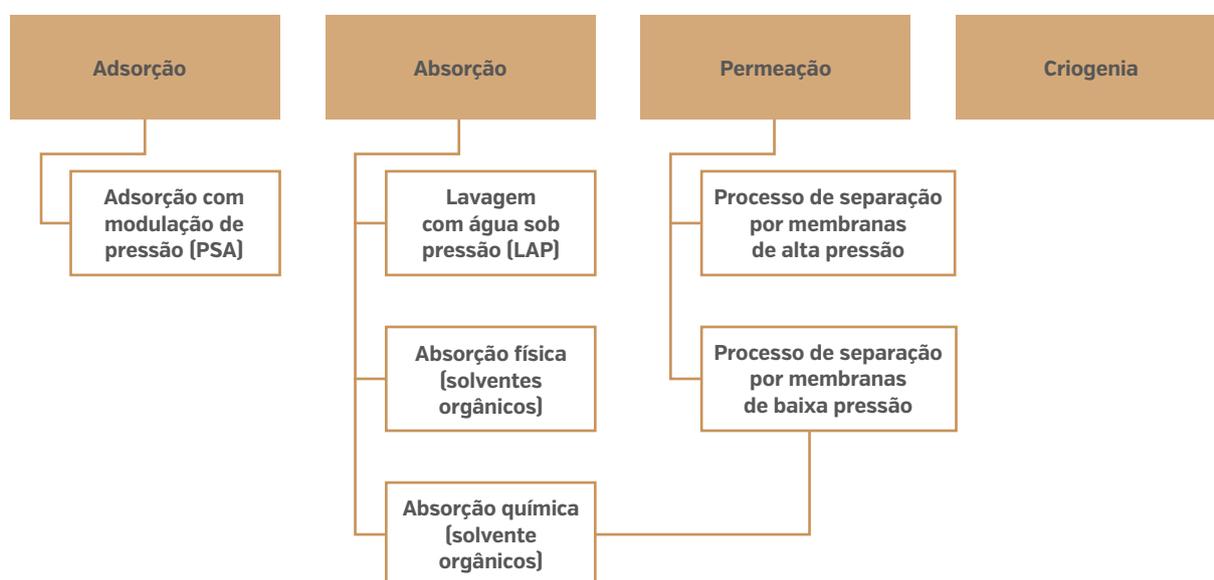
Conforme ilustrado na Figura 8.3, as principais tecnologias para separação de metano e dióxido de carbono seguem os princípios de: adsorção, absorção, permeação ou criogenia.

Com relação às tecnologias de absorção, estas podem utilizar solventes líquidos como água, glicóis e aminas e são conhecidas como, respectivamente, **lavagem com água pressurizada (LAP)**, **absorção física com solventes orgânicos** e **absorção química com solventes orgânicos (aminas)**, enquanto a tecnologia de adsorção é conhecida como **adsorção com modulação de pressão (PSA)**.

Já a tecnologia de permeação ou separação por membranas pode ser classificada de duas formas: membranas de alta pressão (25 a 40 bar) e de baixa pressão (9 bar).

Embora várias dessas tecnologias também possam remover moderadas concentrações de contaminantes, a maioria delas irá requerer a redução, por meio de um estágio de pré-purificação, de elevadas concentrações de contaminantes como vapor d'água, H₂S e siloxanos (adaptado de Urban *et al.*, 2009).

Figura 8.5: Métodos de tratamento do biogás para a separação do CO₂.



Fonte: BEIL (2008).

8.3.3.1 Adsorção com modulação de pressão (PSA)

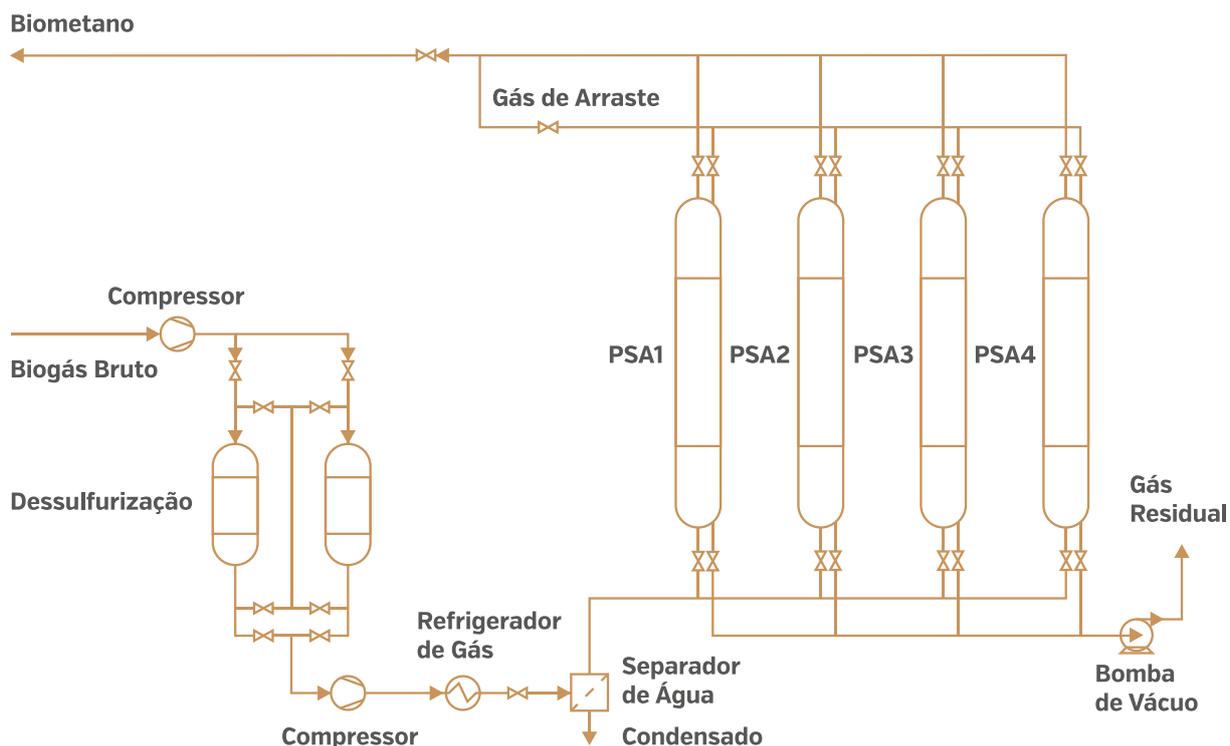
Esse é um método a seco que separa gases via propriedades físicas, pela interação entre as moléculas do biogás e um material adsorvente. O processo se baseia na adsorção reversível do CO₂, podendo ocorrer, também, a retenção de outros componentes do biogás, tais como H₂O, H₂S, N₂ e O₂. Além dessa retenção, há a possibilidade de acumulação de potenciais substâncias concomitantes do biogás, tais como hidrocarbonetos superiores e compostos de silício. Esse processo conta com ampla variedade de materiais adsorventes para a retenção desses componentes do biogás.

Na unidade de PSA, os materiais adsorventes são colocados em colunas que, por sua vez, são arranjadas sequencialmente de acordo com a qualidade requerida para o biogás, conforme pode ser observado na Figura 8.4.

Esses materiais são altamente porosos, com elevadas áreas específicas e têm habilidade de reter, de forma seletiva, um ou mais componentes da mistura de gás sob variação de pressão, de acordo com o tamanho da partícula. O desenvolvimento da ciência dos materiais, nas últimas décadas, foi bastante intenso. O resultado disso foi a descoberta de muitos materiais

Figura 8.6: Fluxograma de processos: Adsorção com modulação de pressão com quatro unidades de adsorção.

porosos, desde os zeólitos e materiais mesoporos, até as mais diversas superfícies em carvões ativados e, ultimamente, polímeros coordenados por elevada área superficial. Assim, os materiais absorventes que têm sido utilizados e desenvolvidos no sistema PSA são carvões ativados, zeólitos naturais e sintéticos, aluminas ativadas, adsorventes poliméricos, titanossilicatos, sílica gel e peneiras moleculares.



Fonte: ISET (2008).

Segundo Grande (2012), pode-se afirmar que o material adsorvente é o aspecto técnico principal da unidade de PSA, pois todas as condições operacionais e o modo de operação dependem da escolha inicial do adsorvente. Assim, o material selecionado deve satisfazer pelo menos um dos dois critérios:

- >> Ter uma maior seletividade para o CO_2 do que para o CH_4 ;
- >> Os poros do adsorvente podem ser ajustados de maneira que o CO_2 (diâmetro cinético de 3,4 Å) possa facilmente penetrar na estrutura do material adsorvente, enquanto o CH_4 (diâmetro cinético de 3,8 Å), caracterizado por moléculas maiores, têm limitações de tamanho para difundir através destes.

Outro tópico importante para a seleção de materiais adsorventes do PSA, quando utilizado para a produção de biometano, é a presença de contaminantes no biogás, como CO_2 , H_2S e H_2O . Em quase todos os adsorventes, o H_2S é irreversivelmente adsorvido conforme comentado anteriormente, tendo que ser removido antes do processo de PSA. Quando são empregados

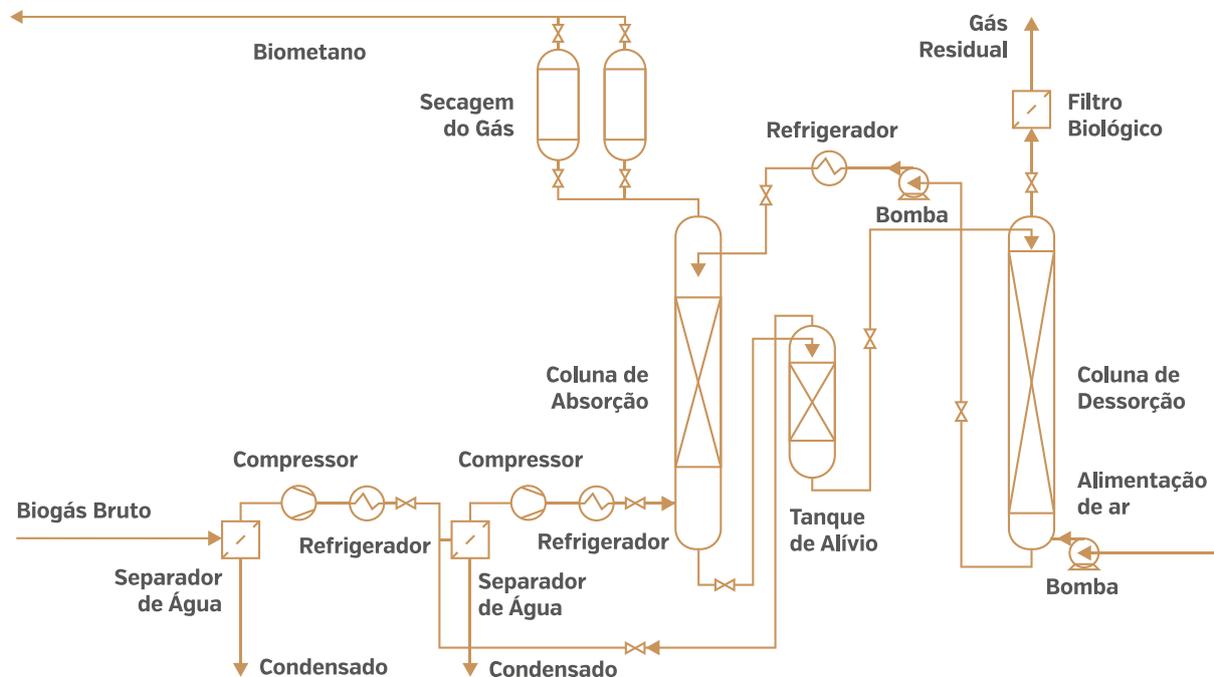
materiais carbonosos, é possível remover H_2O , juntamente com CO_2 . No entanto, com uso de zeólitos isso não é possível.

O ciclo de uma coluna de PSA consiste, basicamente, em quatro fases: pressurização, alimentação, despressurização e purga. Durante a fase de alimentação, a coluna é alimentada com biogás bruto pressurizado na faixa de 4 a 10 bar. O dióxido de carbono é adsorvido no leito da coluna, enquanto o metano passa pela coluna sem ser retido. Quando o leito está saturado com dióxido de carbono, a entrada é fechada e a fase de despressurização é iniciada. A pressão é reduzida à pressão ambiente ou menor para dessorver o dióxido de carbono do adsorvente, e o gás rico em dióxido de carbono é evacuado da coluna, iniciando-se a purga. Como a coluna no início dessa fase estava preenchida com biogás bruto, ocorre perda de metano com o dióxido de carbono dessorvido. Devido à necessidade de regeneração da coluna de PSA, quando se requer produção contínua do sistema, são empregadas colunas em paralelo. Assim, enquanto uma coluna é alimentada com biogás para a remoção seletiva de CO_2 , as outras estão sendo regeneradas. Para reduzir as perdas de metano, as colunas são geralmente interconectadas, de forma que a vazão de gás existente em uma coluna é usada durante a despressurização para a pressurização de outra coluna, na fase de equalização da pressão. Assim, para fins de projeto, consideram-se as seguintes características no sistema PSA: pressão de alimentação, pressão de purga, material adsorvente, tempo de ciclo e interconexões entre colunas, dentre outras.

8.3.3.2 Lavagem com água pressurizada (LAP)

A lavagem com água pressurizada (LAP) é um processo de tratamento de biogás por adsorção que usa a água como meio adsorvente, conforme ilustrado na Figura 8.5. Esse processo se baseia na absorção reversível do CO_2 e de outros componentes ácidos e alcalinos pela água. Nele, o biogás é comprimido, normalmente em duas etapas, a uma pressão de 7 a 10 bar e alimentado na parte inferior de uma coluna com *meio suporte*, sendo a água injetada em contracorrente. O *meio suporte* utilizado na coluna de absorção tem a função de criar uma grande superfície de contato entre o biogás e a água, e, assim, para os compostos como CO_2 , H_2S e NH_3 , além de partículas e microrganismos eventualmente presentes no gás bruto que se dissolvem na água, enquanto o metano sai pela parte superior da coluna de absorção. Isso acontece porque esses compostos (CO_2 , H_2S e NH_3) são mais solúveis em água do que o metano. Como esse processo também remove H_2S , a princípio não há necessidade de remoção prévia deste, no entanto, como o metano se encontra saturado de água, este requer tratamento complementar para a remoção da umidade. Por outro lado, a água que sai da coluna de absorção é rica em CO_2 e contém uma fração de CH_4 , sendo encaminhada para um tanque, onde a pressão é reduzida e o dióxido de carbono e metano liberados e recirculados para a entrada do compressor, onde serão tratados em conjunto com o biogás bruto. Existem dois tipos de processos de LAP, sendo um sem regeneração da coluna de adsorção e outro com regeneração da coluna de absorção.

Figura 8.7: Fluxograma de processos: lavagem com água pressurizada e regeneração.



Fonte: ISET (2008).

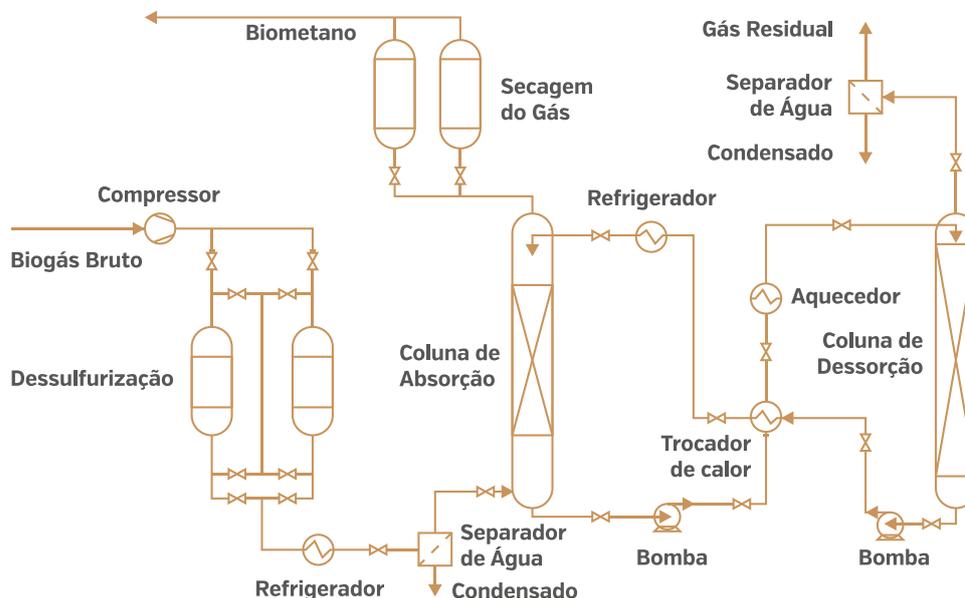
8.3.3.3 Absorção física com solventes orgânicos

Nesse processo de absorção, são usados solventes orgânicos como polietileno glicol para absorção de dióxido de carbono, ao invés de água, como é possível perceber na Figura 8.6. Os nomes comerciais de solventes orgânicos utilizados são Selexol® e Genosorb®, e nesses solventes, tal como na água, o dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio são mais solúveis do que o metano e, assim, o lavador físico orgânico funciona da mesma forma que o lavador com água, porém com regeneração da solução. A principal diferença entre a água e os solventes orgânicos é que o CO_2 e o H_2S são muito mais solúveis nos solventes do que na água e, dessa forma, a planta de beneficiamento de biogás que utiliza solventes pode ser menor do que a que utiliza água, para a mesma capacidade de tratamento. Embora seja possível remover H_2S com esse processo, recomenda-se uma etapa de pré-tratamento para remoção deste composto, visto que o processo de regeneração do solvente orgânico contendo H_2S dissolvido na solução demanda muita energia. Recomenda-se, também, por razões econômicas, que o biogás seja seco.

Nesse processo, a solução de lavagem precisa ser regenerada e o gás de escape, com percentual de metano de 1 a 2%, submetido a tratamento.

Do ponto de vista energético, esses processos exigem uma quantidade de energia ligeiramente superior à utilizada na lavagem com água sob pressão e na adsorção com modulação de pressão (FNR, 2012).

Figura 8.9: Fluxograma de absorção química com solventes orgânicos.



Fonte: ISET (2008).

No passado, essa técnica era pouco usada na Alemanha e demais países europeus, mas, hoje, o número de plantas de tratamento de biogás com aminas vem crescendo, sobretudo na Alemanha. Tal tratamento é usado preferencialmente para fluxos volumétricos menores e em locais com fontes de calor baratas (FNR, 2012).

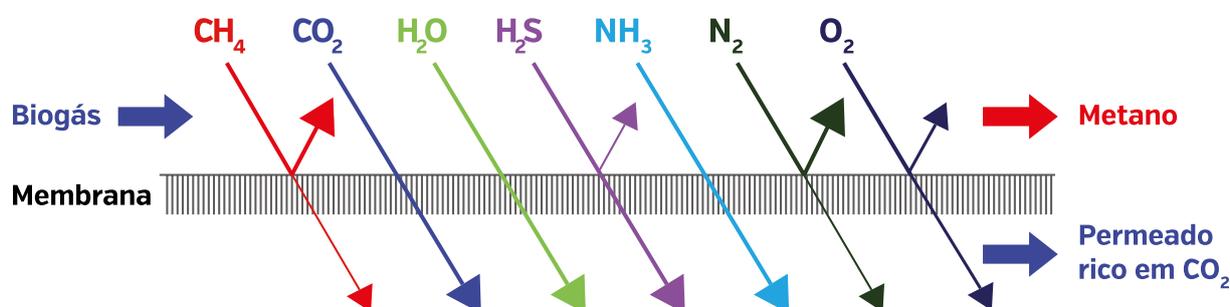
Caso o gás bruto apresente concentrações de gás inerte bastante reduzidas, é possível atingir concentrações de metano superiores a 98%. O tratamento demanda entre 0,06 e 0,15 kWh/Nm³ de energia elétrica em relação ao gás bruto. Além do mais, deve-se alimentar o processo com 0,5 a 0,8 kWh/Nm³ de energia térmica (em relação ao gás bruto) com um nível de temperatura entre 120 e 160°C.

8.3.3.5 Processo de separação por membranas

O processo de separação por membranas realiza a separação do metano e demais componentes do gás com base nas velocidades de difusão distintas que as diferentes moléculas de gás apresentam em função do seu tamanho, retendo, preferencialmente, o metano em função do seu tamanho, enquanto o dióxido de carbono permeia pela membrana.

De modo geral, os processos de separação por membranas distinguem-se em **alta pressão a seco** e **baixa pressão a úmido**, sendo que, até o momento, apenas o método a seco tem relevância na prática. Essas membranas a seco são feitas de materiais permeáveis ao CO₂, H₂O e NH₃ e parcialmente permeáveis ao H₂S e O₂, enquanto o N₂ e CH₄ ficam retidos. Assim, durante a separação do CO₂, também são removidos vapor de água, hidrogênio e parte do oxigênio (Figura 8.8).

Figura 8.10: Impurezas removidas pela membrana.



Fonte: Harasek; Michael, 2009.

Normalmente, para a separação do CO_2 do biogás bruto pelo sistema de membranas, antes da compressão, são removidos a água, de modo a prevenir a condensação durante a compressão do biogás; e o sulfeto de hidrogênio, pois este não é suficientemente separado por membranas. Nos casos em que há concentrações significativas de amônia, siloxanos e carbonos orgânicos voláteis, esses compostos também são comumente removidos antes do sistema de membranas, sendo também comum instalar um filtro de partículas para proteger o compressor e as membranas. Caso exista metano residual no fluxo do permeado, é necessário realizar o pós-tratamento do gás residual. Além disso, é possível a combinação do processo de separação por membrana e criogênico.

A eficiência de todo o processo depende principalmente da membrana usada: a seletividade da membrana, sua permeabilidade, tempo de vida, temperatura de operação e faixa de umidade são os fatores que determinam o desempenho do processo de purificação de membranas. Assim, a pureza do gás pode ser ajustada pelo tipo de membrana, sua superfície, a velocidade do fluxo e o número de estágios de separação. Na prática, normalmente, são utilizados processos multiestágios.

O biogás é comprimido na faixa de 6 a 20 bar, sendo que a pressão que é usada depende das necessidades específicas do local, bem como do projeto e da fabricação da unidade de membranas. O sistema de membranas é projetado de diferentes formas, dependendo do fabricante e das membranas que este emprega no sistema (Bauer, 2013).

De modo geral, os projetos mais comuns no mercado seguem umas das seguintes configurações:

- >> Único estágio de membranas: este não inclui recirculação de biogás e, assim, há menor consumo de energia para compressão. No entanto, a perda de metano será maior e é importante usar, nesse caso, membranas com alta seletividade.
- >> Dois estágios de membranas: este apresenta maior recuperação de metano do que a configuração anterior. O gás que passa pelo primeiro estágio da membrana é removido do sistema, enquanto o gás que passa pela segunda membrana é recirculado para o compressor, a fim de minimizar o escape de CH_4 para a atmosfera, o que representa aumento no consumo de energia.

- » Três estágios de membranas: nessa configuração, o gás que não passa pela primeira membrana, recebe polimento na segunda membrana para se obter um produto com alta pureza, enquanto o gás que passa pela primeira coluna recebe polimento numa terceira membrana, de modo a minimizar a concentração de CH_4 no *off-gás* e o volume de gás recirculado para o compressor.

Com relação aos aspectos operacionais, a disponibilidade de uma unidade de purificação de membranas é comumente garantida pelos fabricantes como acima de 95%. Além disso, a disponibilidade também pode ser garantida pela redundância de componentes chaves, o que irá incidir sobre os custos de investimento. Com relação à vida útil das membranas, esta é estimada entre 5 e 10 anos. Já o consumo de energia elétrica é determinado principalmente pelo consumo de energia do compressor. De acordo com os fabricantes, uma demanda de 0,20 a 0,30 kWh/m³ pode ser garantida para a maioria das aplicações e independe do tamanho da unidade. No entanto, para estimar o consumo de energia para uma aplicação específica, deverão ser considerados parâmetros como perda de metano, área de membrana instalada, pressão aplicada, grau de remoção de CO_2 e, conseqüentemente, a concentração de metano no biometano produzido.

8.3.3.6 Processo de separação criogênica

Nesse processo, o biogás é comprimido mediante elevada pressão, em múltiplos estágios, e resfriado em temperaturas de -55 a -110°C , permitindo a separação de CH_4 e de CO_2 . O gás é resfriado, a princípio, à temperatura de -55°C por trocadores de calor e, em seguida, a pressão é alterada e a temperatura diminui para -110°C . Ao final do processo, a fase gasosa com teor de metano superior a 97% é aquecida antes de sair do sistema de tratamento.

Para evitar problemas, como o congelamento, há necessidade prévia de remoção de vapor d'água e sulfeto de hidrogênio (Persson, 2003).

O tratamento criogênico de gás abrange a retificação (liquefação de gases), que origina o CO_2 líquido, e a separação a temperaturas baixas, que ocasiona o congelamento do CO_2 (FNR, 2006). Ambos os processos são bastante complexos e exigem a prévia dessulfurização e secagem do gás. Ressalta-se que, especialmente em aplicações de biogás, esses processos não foram testados na prática. O maior problema é o elevado consumo de energia, porém a alta qualidade do gás que se visa a alcançar e as pequenas perdas de metano (<0,1%) justificam o aprimoramento futuro dessa tecnologia (FNR, 2012).

8.3.4 Remoção dos siloxanos

A remoção de siloxanos do biogás é uma exigência relativamente nova e poucos estudos foram realizados neste campo até o momento. Tecnologias atuais para a remoção de siloxanos do biogás são principalmente os processos que usam materiais adsorventes, como carvão ativado, sílica gel, zeólitos e peneiras. Como alternativa, a absorção usando lavador físico orgânico, utilizando como solvente Selexol®, e refrigeração-condensação também são tecnologias disponíveis para este fim (Schweigkofler & Niessner 2001; Wheless & Pierce, 2004).

Para prevenir os possíveis danos descritos na seção 5.1, ou para satisfazer os valores-limite dentro dos quais os fabricantes de motores concedem

garantia ao equipamento, o biogás deve ser tratado antes de ser utilizado, caso contenha siloxano em concentrações significativas. Do ponto de vista unicamente econômico, porém, o tratamento para eliminação do siloxano é recomendável também para aumentar os intervalos de manutenção das unidades de aproveitamento de biogás.

Os fabricantes de motores prescrevem limites de 5 a 10 mg/Nm³. Esses valores são significativamente inferiores quando o motor é operado com catalisadores de oxidação. Caso a concentração supere esses valores, a remoção é obrigatória e traz benefícios econômicos (Hohmann, 2004 e Rossol; Schmelz & Hohmann, 2003).

8.3.4.1 Adsorção por carvão ativado

Para a adsorção dos siloxanos, é utilizado um reservatório preenchido com carvão ativado especial. De forma geral, os carvões ativados são capazes de se ligar ao siloxano, contudo sua capacidade de ligação é bastante restrita. Segundo Rossol, Schmelz & Hohmann (2003), podem ser atingidos valores de gás natural da ordem da exatidão de detecção, em torno de 0,1 mg/m³. No processo, a adsorção ocorre em conflito com outras substâncias do gás (p. ex., halogênios).

A regeneração de carvão ativado com siloxanos é bastante onerosa. Os carvões ativados são utilizados para eliminar o siloxano em concentrações relativamente baixas e como filtro de proteção (p. ex., antes da adsorção com modulação de pressão). Se não houver determinadas concentrações-limite que exijam o uso de carvão ativado impregnado (p. ex., agregação adicional de sulfeto de hidrogênio, etc.), do ponto de vista econômico, é suficiente o uso do carvão ativado “normal”, de menor custo.

Conforme a vazão de biogás a ser tratada e as respectivas frações de siloxanos no gás, é possível dimensionar e confeccionar os filtros com intervalos de manutenção definidos. A saturação do filtro de carvão ativado leva à perda da eficácia desse filtro e a proteção contra essa situação pode ser melhorada pelo uso de um sistema de tratamento com dois filtros de carvão ativado consecutivos. De qualquer forma, um intervalo de manutenção de no mínimo seis meses é recomendado e, assim, é possível substituir o carvão ativado na manutenção anual do equipamento de gás. Para os trabalhos no equipamento de carvão ativado, devem-se definir e cumprir as respectivas medidas de segurança recomendadas para trabalhos em equipamento de gás, pois o carvão ativado removido continua emitindo gás, devendo, assim, ser armazenado em um local seguro. Devem-se, ainda, tomar precauções para evitar a penetração de condensado do tanque no carvão ativado.

Na Figura 8.10 é possível visualizar o remoção de siloxanos por carvão ativado.

8.3.4.2 Resfriamento

O resfriamento a temperaturas de 3 a 12°C tem como efeito secundário a remoção dos compostos de siloxano. Normalmente, os processos de resfriamento não garantem uma remoção de siloxano que proporcione concentrações <5 mg/m³ no gás puro. O pré-resfriamento, associado ao processo de carvão ativado, é recomendável, pois os compostos de siloxano removidos junto com o condensado aliviam a etapa do carvão ativado, permitindo intervalos de manutenção mais prolongados.

Figura 8.11: Remoção de Siloxanos por carvão ativado – ETE de Augsburg – Alemanha.



Fonte: Rotária do Brasil.

8.3.4.3 Congelamento (método criogênico)

O congelamento permite remover com segurança os siloxanos do biogás, porém o grau de remoção depende da redução de temperatura, como demonstram os seguintes dados da literatura técnica:

- » -25°C → capacidade de remoção de cerca de 26% (Persson; Jönsson & Wellinger, 2006)
- » -30°C → capacidade de remoção de cerca de 27% (Hagmann, 2008)
- » -70°C → capacidade de remoção de cerca de 99% (Persson; Jönsson & Wellinger, 2006; e Rossol; Schmelz & Hohmann, 2003).

A eficiência máxima possível varia, conforme as ligações e o nível de temperatura, de aproximadamente 26% a eficiência acima de 99% (Persson; Jönsson & Wellinger, 2006; e Rossol; Schmelz & Hohmann, 2003). Assim, no congelamento, que ocorre no mínimo na faixa de -25 a -30°C , deve-se observar a formação de gelo nos componentes utilizados. Porém, a remoção quase completa dos siloxanos só é atingida quando a temperatura é reduzida a -70°C . Isso se explica pelo fato de que somente a essas baixas temperaturas se pode garantir a condensação e o congelamento dos diversos compostos de siloxano, os quais apresentam diferentes volatilidades.

8.3.4.4 Lavagem

Os siloxanos também podem ser absorvidos através de lavagem com misturas líquidas de hidrocarbonetos. A técnica, que permite atingir taxas de remoção de até 60%, se realiza pela passagem do fluxo de biogás através de solventes (Hagmann, 2008). Esse método, porém, não corresponde ao atual estado da arte em função da sua baixa eficiência e do risco de mistura do solvente com o fluxo de gás. Em geral, as soluções de lavagem necessitam de disposição final, pois o seu tratamento de recuperação é demasiado oneroso.

8.3.5 Remoção de oxigênio, nitrogênio e compostos orgânicos halogenados

O oxigênio e nitrogênio não são removidos nos processos de lavagem com água pressurizada ou lavagem física com solventes. No processo de absorção com aminas, deve-se evitar a entrada desses compostos, visto que o N₂ não é absorvido, podendo ocasionar a diluição do gás resultante, enquanto o O₂ pode afetar de forma irreversível o desempenho do processo pela oxidação das aminas.

As unidades de PSA com avançados adsorventes cinéticos têm capacidade de remover parcialmente o oxigênio e o nitrogênio, enquanto as unidades de PSA com configurações mais complexas de leitos adsorventes podem remover ambos os compostos, porém com incremento do custo de investimento. Já o sistema de membrana pode remover parcialmente apenas o oxigênio, enquanto o nitrogênio fica retido, juntamente com o metano.

Com relação à remoção de compostos orgânicos halogenados, ela pode ocorrer pelo emprego de métodos de adsorção ou absorção por hidrocarbonetos alifáticos superiores (lavagem com óleo). No caso de remoção avançada de hidrocarbonetos halogenados do biogás, podem ser empregados, por exemplo, os métodos utilizados para a separação de CO₂ descritos anteriormente.

8.3.6 Comparação dos processos de tratamento do biogás

Com base nas tecnologias aqui descritas, são apresentadas algumas tabelas comparativas. Na Tabela 8.3, são destacados aspectos como a eficiência de remoção de H₂S, de acordo com a tecnologia de dessulfurização adotada, dentre outros.

Tabela 8.3: Processos de dessulfurização.

PROCESSO	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	INSUMOS INDIRETOS		INJEÇÃO DE AR	PUREZA EM PPMV	PROBLEMAS
		CONSUMO	ELIMINAÇÃO			
Biodessulfurização no digestor ou gasômetro [injeção de ar]	++	++	++	Sim	50 - 2.000	Falta de exatidão no controle do processo
Biodessulfurização Externa [filtro biol. percolador]	-	+	+	Sim	50 - 100	Falta de exatidão no controle do processo
Lavador biológico de gás	-	-	+	Não	50 - 100	Complexidade elevada
Precipitação de sulfeto	0	--	0	Não	50 - 500	Processo lento
Dessulfurização química interna	0	--	--	Sim	1 - 100	Efeito purificador reduzido drasticamente
Carvão ativado	0	--	-	Sim	< 5	Eliminação do carvão ativado

++ muito vantajoso, + vantajoso, 0 neutro, - desvantajoso, -- muito desvantajoso.

Fonte: FNR, 2012.

Tabela 8.4: Indicação da necessidade de remoção de compostos em função do processo de tratamento.

Na Tabela 8.4, apresenta-se uma correlação entre as impurezas presentes no biogás e as tecnologias de tratamento para a remoção destas. Por sua vez, na Tabela 8.5, faz-se um balanço das tecnologias para remoção de CO₂, enfatizando fatores como: necessidade de remoção prévia de H₂S, pressão operacional requerida, demanda de calor (poder calorífico) ou temperatura para geração do processo, demanda por produtos químicos e por energia elétrica, perda de metano e o conteúdo de metano no biogás.

	TUBULAÇÃO NO SOLO COM PURGADOR DE VAPOR	ADSORÇÃO PARA SECAGEM	RESFRIAMENTO	FILTRO DE GÁS	COMPRESSOR	ÓXIDO DE FERRO	DOSAGEM DE FERRO SIMULTÂNEA	BIODESSULFURIZAÇÃO	ÓXIDO DE ZINCO	SODA CÁUSTICA	CARVÃO ATIVADO	CRIOGENIA (CONGELAMENTO)	MEMBRANA	DWA/PSA	LAP	ABSORÇÃO FÍSICA (ABSORVENTES ORGÂNICOS)	ABSORÇÃO QUÍMICA (ABSORVENTES ORGÂNICOS)
Enxofre total (S)						x	x	x	x	x	x	x	[x]	[x]	[x]	[x]	[x]
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)						x	x	x	x	x	x	x	[x]	[x]	x	x	[x]
Halogênios										x	x		[x]				
Cloro (Cl)						[x]				x	[x]		[x]				
Flúor (F)						[x]				x	[x]		[x]				
Poeira/partículas (<10 µm)			x	x			[x]			[x]	[x]			[x]	x	x	
Total de compostos orgânicos com silício		[x]	[x]								x	x		[x]			
Compostos aromáticos			[x]								x	[x]		[x]			
Umidade absoluta	x	x	x	x	[x]							x	[x]	[x]		x	
Teor de oxigênio (O ₂)													x	x			
Metano (CH ₄)													x	x	x	x	x
Número de metano													x	x	x	x	x
PCS													x	x	x	x	x
PCI													x	x	x	x	x
Índice de Wobbe													x	x	x	x	x
Dióxido de carbono (CO ₂)										[x]			x	x	x	x	x
Nitrogênio (N)														x			
Amônia (NH ₃)	[x]		[x]	[x]							x	x	x		x	x	x
Temperatura do gás	x		x		[x]	[x]						x			[x]		[x]
Pressão operacional					x								x	x	x	x	
Hidrogênio (H ₂)													x				

x = indicado, [x] = indicado com restrições

Fonte: FNR, 2012.

Tabela 8.5: Comparação das tecnologias em operação comercial para purificação de biogás.

PARÂMETRO	LAVADOR C/ÁGUA	LAVADOR C/SOLVENTES	ABSORÇÃO QUÍMICA C/AMINAS	PSA	TECNOLOGIA DE MEMBRANAS
Conteúdo típico de metano no biometano gerado [vol%]	95 - 99	95 - 99	> 99	95 - 99	95 - 99
Conteúdo de metano [%]	98	96	99,96	98	80 - 99,5
Perda de metano [%]	2	4	0,04	2	0,5 - 20
Pressão normal do biometano [bar(g)]	4 - 8	4 - 8	Atmosférica	4 - 7	4 - 7
Demanda de energia elétrica [kWh/m ³ biometano]	0,46	0,49 - 0,67	0,27	0,46	0,25 - 0,43
Demanda de calor e nível de temperatura p/regeneração de solventes [°C]	Não	Médio 70 - 80	Alto 120 - 160	Não	Não
Remoção prévia de compostos de enxofre	Depende	Sim	Sim	Sim	Sim
Demanda de insumos (produtos químicos)	Agente anti-incrustante, agente de secagem	Solvente orgânico	Solução de amina	Carbono ativado, zeólitos	Não
Faixa de variação parcial de carga permitida [%]	50 - 100	50 - 100	50 - 100	85 - 115	50 - 105
Número de plantas de referência da tecnologia	Alto	Baixo	Médio	Alto	Baixo

Fonte: Adaptado de Urban, Girod & Lohmann, [2009]; TUV [2012].

9

UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS

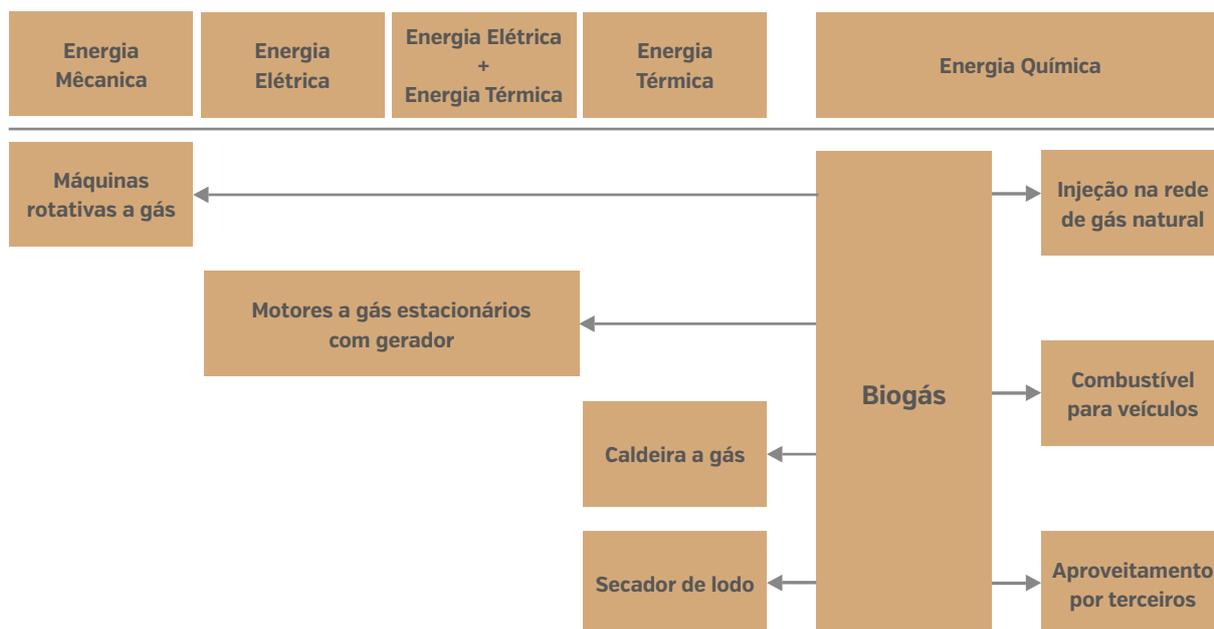
5: 60% v/v de CH_4

A utilização do biogás como vetor energético secundário é recomendável do ponto de vista ambiental e econômico. O PCI de um biogás “típico”⁵ é de 21,5 MJ/Nm³ (seção 4.2), próximo ao do gás natural, que apresenta PCI de 37,5 MJ/Nm³. A perda de biogás, sua não utilização, ou sua simples queima, portanto, deve ser a exceção, caso não haja uma alternativa de uso mais nobre.

A seguir, serão apresentadas algumas das principais alternativas para utilização do biogás em ETEs. Não será abordado o aproveitamento energético de biogás por meio de células de combustível, uma vez que, mesmo fora do Brasil, esse aproveitamento ainda é muito raro. Informações detalhadas sobre as tecnologias abordadas e demais tecnologias podem ser encontradas no Guia Prático do Biogás (FNR, 2012).

Resumidamente, a energia química do biogás pode ser utilizada, após o tratamento adequado, diretamente como combustível em veículos ou, em hipótese, injetado na rede. Como apresentado na Figura 9.1, a energia química pode também ser transformada em energia térmica, elétrica e mecânica por meio de máquinas a gás e caldeiras.

Figura 9.1: Utilização de Biogás.



Fonte: *Elaboração própria.*

A seguir, são apresentadas as principais formas de utilização do biogás em ETEs. Deve-se decidir, caso a caso, a melhor opção de aproveitamento, levando-se em conta os aspectos econômicos e ambientais. Para isso, recomenda-se a elaboração de um projeto energético específico para o local, o qual deve abranger diferentes modos de operação, como carga básica, pico de carga e energia de emergência. Alguns cenários de aproveitamento de biogás e determinação da escala mínima de viabilidade foram estudados por Valente (2015).

Necessariamente, o gás não aproveitado deve ser retirado do sistema de forma adequada e segura, passando pelo queimador de gás.

9.1 Caldeira a gás

Em caldeiras a gás (Figura 9.2), a conversão de energia do biogás em calor é realizada por meio da produção de fluido quente ou vapor. Nas caldeiras, são geralmente utilizados queimadores de combustível duplos. Além do biogás, são capazes de queimar outros gases ou óleo combustível. Dessa forma, a escassez de biogás pode ser compensada por essas outras fontes de energia. A eficiência da caldeira de gás é superior a 90%.

Segundo Lobato (2011), a queima do biogás é similar à queima de um gás natural diluído. A combustão de uma mistura de gás natural e biogás demanda apenas pequenas adaptações na caldeira. Quando já está prevista a utilização do biogás como combustível principal, devem ser modificados os sistemas de alimentação e de queima, visando a compensar o teor energético do biogás inferior, em comparação ao gás natural.

Figura 9.2: Caldeira a biogás.



Dependendo do local de produção, o calor gerado pela utilização do biogás como energia é utilizado, no inverno, para o aquecimento da estrutura operacional, particularmente do biodigestor de lodo. Como o biogás se acumula continuamente, e a demanda de calor está sujeita a flutuações sazonais, ocorrem excedentes de gás. A operação dedicada de caldeira, sem a utilização externa do calor, portanto, exige que o gás excedente seja queimado por um queimador para minimizar as emissões de poluentes. A queima do excesso de gás só pode ser contornada se houver um consumidor de calor ou gás apropriado e disponível, especialmente nos meses de verão.

9.2 Secagem de lodo

Uma possibilidade muito interessante é o uso do biogás para a secagem térmica do lodo proveniente da ETE, visando, primordialmente, à redução do volume e à higienização do material e, conseqüentemente, aos custos atrelados ao seu transporte e disposição final. Dependendo das condições, o lodo seco também pode ser utilizado como combustível.

Existem, no mercado, vários equipamentos disponíveis para secagem térmica de lodo de ETE. Esses equipamentos são classificados, principalmente, de acordo com a forma de transferência de calor, que pode ser: direta, indireta, radiante e mista. Nos secadores diretos, o ar quente entra em contato direto com o lodo e a transferência de calor se dá por convecção. Nos indiretos, a transferência de calor ocorre por meio do contato do lodo com superfícies aquecidas por: ar quente, vapor ou óleo térmico; e a troca de calor é realizada por condução. Nos secadores radiantes ou infravermelhos, a troca de calor se dá por radiação (David, 2002).

Os principais tipos de secadores térmicos de lodo são:

- >> secadores rotativos diretos e indiretos,
- >> secadores de esteira diretos,
- >> secadores de caçamba diretos com misturadores internos, e
- >> secadores solar-térmicos.

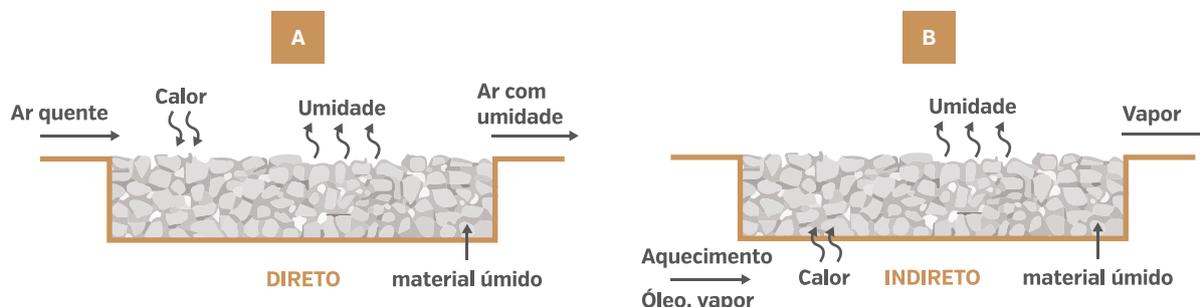
Dependendo do tipo do secador, o biogás pode ser utilizado como fonte de calor direta ou indiretamente ou por meio de radiação em pisos térmicos, no caso de secadores solar-térmicos. Esses pisos térmicos têm sido apontados como alternativas para a secagem e a higienização de lodos em ETEs de pequeno e médio porte (Possetti *et al.*, 2012). Um projeto energético deve incluir, então, a análise de alternativas de uso do biogás durante o ano todo.

A classificação em secador direto e indireto refere-se ao processo de transferência de calor. Na Tabela 9.1, são apresentadas as características principais desses dois tipos de secadores.

Tabela 9.1: Características de secadores diretos e indiretos.

SECADOR DIRETO	SECADOR INDIRETO
Contato direto dos gases quentes com os sólidos, para aquecê-los e remover a água neles presente.	O calor é transferido ao material úmido mediante a condução numa parede metálica.
As temperaturas de secagem podem atingir 750°C.	As temperaturas das superfícies podem ultrapassar 540°C, no caso dos secadores aquecidos pelos produtos de combustão.
Nas temperaturas do gás abaixo do ponto de ebulição, o teor de vapor no gás influencia a velocidade de secagem e o teor final de umidade no sólido. Com as temperaturas do gás acima do ponto de ebulição, o teor de vapor do gás tem um pequeno efeito retardador sobre a velocidade de secagem e o teor final de umidade.	São convenientes para secar sob pressão reduzida e em atmosferas inertes, com o objetivo de permitir a recuperação de solventes e impedir a ocorrência de misturas explosivas ou a oxidação de materiais que se decompõem com facilidade.
Quanto mais baixo for o teor final de umidade, maior será o consumo de combustível por m ³ evaporado.	A recuperação de poeira e de material pulverulento pode ser efetuada de maneira mais satisfatória.
A eficiência aumenta com o aumento da temperatura do gás afluente.	O fato de não acontecer contato direto do meio de secagem e o lodo constitui uma vantagem quanto à geração de gases e odores.
Devido à necessidade de grandes volumes de gás para fornecer todo o calor, o equipamento de coleta de poeira pode ser muito grande e caro, quando se operam sólidos em pequenas partículas.	

Figura 9.3: Esquema da transferência de calor de (a) secadores diretos; e (b) secadores indiretos.



Fonte: Lobato [2011].

Além da transferência de calor, há uma diferenciação de secadores de lodo conforme a pressão operacional, o agente de secagem utilizado, a forma construtiva, o modo de operação, entre outros.

Com relação ao modo de operação, dividido em contínuo ou em batelada, o sistema de secagem de lodo deve ser escolhido conforme a quantidade de material a ser processado. Park *et al.* (2007 *apud* Lobato, 2011) indicam a operação em batelada para uma taxa de geração de material a ser seco entre 20 a 50 kg/h. Na faixa de 50 a 1.000 kg/h podem ser adotados os dois modos de operação, já quando a taxa for superior a 1.000 kg/h, deve-se optar por secadores contínuos.

Para a secagem de lodo, o principal parâmetro a ser considerado, em termos energéticos, é a energia necessária para evaporação da água no lodo. De modo geral, a quantidade de energia necessária para evaporar a água contida no lodo é da ordem de 800 a 1.000 kcal/kg de água evaporada (David, 2002). Isso equivale a cerca de 900 a 1.200 kWh para cada metro cúbico de água evaporada.

9.3 Cogeração de eletricidade e calor

9.3.1 Motores a gás

Os conjuntos motogeradores a gás podem gerar, simultaneamente, as energias elétrica e térmica, por isso, são chamados, também, de unidades de cogeração de eletricidade e calor. O uso comum de energia elétrica e calor leva a uma alta taxa de utilização da energia primária.

Motores a gás de ciclo Otto são utilizados em pequenas, médias e grandes plantas. Os motores aspirados são alimentados com uma mistura de biogás e ar, por meio da linha do controle e regulagem de gás, sendo que, em motores com turbocompressor, essa mistura é comprimida antes da entrada no cilindro. A admissão de uma maior quantidade de combustível no cilindro resulta no aumento do desempenho do motor. São utilizados quase que exclusivamente motores de quatro tempos.

Conforme as características locais, os motores a gás podem compensar a indisponibilidade de biogás utilizando propano ou gás natural. Se o número de metano do gás substituto for muito diferente do número de metano do biogás, ocorrerá uma redução do desempenho. Assim, a mudança de biogás (número de metano 134) para gás natural (número de metano 90) é relativamente simples. Quando for utilizado o propano (número de metano 33) como gás substituto, será registrada uma redução significativa de energia entre 25 e 40%. No caso do gás butano, percebem-se propriedades ainda menos favoráveis.

Os motores a gás de ciclo Diesel predominam em plantas de grande porte. Ao contrário dos motores a gás do ciclo Otto, que realizam a ignição externamente por meio de uma vela, os motores de ciclo Diesel realizam a ignição da mistura de ar e biogás por meio de uma pequena quantidade de óleo diesel, chamado de óleo de ignição. A quantidade de óleo de ignição consumida corresponde a, aproximadamente, 2 a 10% daquela necessária em motores a diesel convencionais, tendo eficiência mecânica superior à dos motores a gás de ciclo Otto. Na falta de biogás, o motor pode ser comutado para operar unicamente com diesel.

A eficiência de conversão de energia depende do tamanho do motor e da carga. Operando com carga nominal, esses motores são capazes de converter entre 33 e 40% da energia primária em energia elétrica, conversão ligeiramente menor do que na operação com gás natural. Cerca de 50% da energia primária do biogás é convertida em energia térmica útil, e operando com uma carga parcial, a eficiência diminui significativamente. Nos últimos anos, foi possível elevar a eficiência mecânica desses motores pelo uso de sensores de detonação e pela otimização do ponto de ignição, entre outras técnicas.

Na Tabela 9.2, são apresentadas as principais características dos motores ciclo Otto e Diesel.

Tabela 9.2: Comparação entre motores a gás de ciclo Otto e Diesel.

	MOTOR A GÁS DE CICLO OTTO	MOTOR A GÁS DE CICLO DIESEL
Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> » potência elétrica >1 MW, raramente abaixo de 50 kW » eficiência elétrica 34% a 42% [para potências nominais >300 kW] » vida útil: aproximadamente 60.000 horas de operação » pode ser utilizado com teores de metano a partir de, aproximadamente, 45% 	<ul style="list-style-type: none"> » 2 a 5% de óleo de ignição para combustão » potência elétrica de, aproximadamente, 340 kW » vida útil: aproximadamente 35.000 horas de operação » eficiências elétricas 30 a 44% [eficiência em torno de 30%, somente em plantas pequenas]
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> » em qualquer planta de biogás; aplicação comercial mais provável em plantas de maior porte 	<ul style="list-style-type: none"> » em qualquer planta de biogás; aplicação comercial somente em plantas de menor porte
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> » construído especialmente para o uso com gás » os limites de emissões são respeitados ao máximo [possibilidade de exceder os limites de formaldeído] » exige pouca manutenção » eficiência total superior à de motores com ignição a compressão 	<ul style="list-style-type: none"> » uso de motores comuns a baixo custo » eficiência elétrica maior em comparação aos motores a gás do ciclo Otto em faixas inferiores de potência
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> » investimento ligeiramente superior ao do motor com ignição a compressão » maiores custos devidos à fabricação em escala reduzida » eficiência elétrica menor que a de motores com ignição à compressão em faixas inferiores de potência 	<ul style="list-style-type: none"> » a carbonização dos bicos injetores ocasiona a elevação das emissões de gases de exaustão [NOx] e manutenção mais frequente » não existem motores desenvolvidos especificamente para o biogás » eficiência total menor que a de motores a gás do ciclo Otto » exige o uso de um combustível adicional [óleo de ignição] » a emissão de poluentes frequentemente excede os valores-limite da TA Luft » vida útil curta

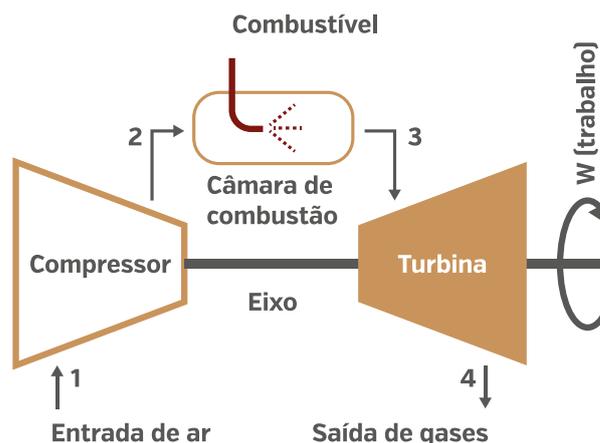
	MOTOR A GÁS DE CICLO OTTO	MOTOR A GÁS DE CICLO DIESEL
Particularidades	» exige um radiador de emergência para evitar superaquecimento em situações de pouca demanda de calor » o controle de potência depende da qualidade do gás, sendo possível e recomendável	» exige um radiador de emergência para evitar superaquecimento em situações de pouca demanda de calor » o controle de potência em depende da qualidade do gás, sendo possível e recomendável
Formas construtivas	» como equipamento separado e independente instalado em edifício ou em construção compacta em contêiner	» como equipamento separado e independente instalado em edifício ou em construção compacta em contêiner

Fonte: Adaptado de FNR (2010).

9.3.2 Turbinas

As turbinas ou microturbinas a gás são formadas, basicamente, por um compressor, uma câmara de combustão e a turbina em si, como mostra a Figura 9.4. Essencialmente, elas funcionam da seguinte forma: o ar é injetado pela admissão da turbina. Em seguida, por meio de uma fileira de palhetas, o ar sofre elevada compressão (compressor), ocasionando o aumento da temperatura. Em seguida, analogamente a um motor do ciclo Otto, o ar é misturado ao combustível e a combustão é disparada por uma vela de ignição (câmara de combustão). A combustão provoca a expansão abrupta da mistura ar/combustível, o que permite realizar trabalho mecânico no estágio seguinte da turbina. Parte da energia de rotação da turbina é utilizada para alimentar o compressor na admissão da turbina, outra parte movimenta um gerador para a produção de eletricidade. A energia térmica de combustão, portanto, primeiro é convertida em energia mecânica e em seguida em energia elétrica.

Figura 9.4: Diagrama esquemático do funcionamento de uma turbina a gás.



Fonte: MSPC, 2015.

As eficiências elétrica e térmica das diferentes tecnologias de conversão do biogás em eletricidade e calor variam de acordo com a sua potência nominal. Quanto maior a potência elétrica instalada, maior a eficiência de conversão elétrica e, conseqüentemente, menores as eficiências térmicas. As eficiências elétrica e térmica das principais máquinas de cogeração de acordo com suas capacidades estão descritas na Norma Alemã DWA A-216 (2013), nos anexos A.4 e A.5 e estão resumidas nas Tabelas 9.3 e 9.4.

Tabela 9.3: Eficiências elétricas de diferentes tipos de plantas de cogeração.

TIPO DE PLANTA DE COGERAÇÃO	CAPACIDADE EM kW _{el}				
	1,3 – 30	34 – 50	51 – 100	101 – 250	>250
Motor de ignição a compressão (Diesel)	-	36 – 37	37 – 40	40 – 43	43 – 45
Motor do ciclo Otto	25 – 32	30 – 34	32 – 38	36 – 39	37 – 43
Microturbina a gás	26 [24] ¹	26 [24] ¹	29 [27] ¹	33 [31] ¹	-

1: Os valores entre parênteses consideram as perdas pela compressão do biogás.

Fonte: DWA, 2013.

Tabela 9.4: Eficiências térmicas de diferentes tipos de plantas de cogeração.

TIPO DE PLANTA DE COGERAÇÃO	CAPACIDADE EM kW _{el}				
	≤30	34 – 50	51 – 100	101 – 250	>250
Motor de ignição a compressão (Diesel)	-	37 – 50	37 – 39	38 – 40	37 – 41
Motor do ciclo Otto	59 – [70] ¹	53 – 65	39 – 56	46 – 53	39 – 52
Microturbina a gás	59	-	56	52	-

1: Valores entre parênteses: trocador de calor de condensação para gás de exaustão ligado a jusante.

Fonte: DWA, 2013.

A geração de energia elétrica e autoconsumo na própria ETE é uma opção bastante difundida no mundo. Em ETEs com uma demanda significativa de eletricidade, por exemplo, quando há unidades de tratamento com aeração por equipamentos eletromecânicos, a eletricidade gerada provavelmente será completamente consumida na unidade. Nesses casos, o modelo de geração de eletricidade e autoconsumo é uma opção atrativa que deve ser considerada. Em ETEs com sistemas exclusivamente anaeróbios de tratamento e, conseqüentemente, um baixo consumo de eletricidade, existem mecanismos previstos na Resolução 482 da ANEEL que viabilizam a compensação da energia excedente gerada por outras unidades, desde que elas estejam inscritas no mesmo CNPJ. A Figura 9.5 ilustra uma imagem da ETE Ouro Verde/Foz do Iguaçu, que foi a primeira planta de biogás a partir do esgoto a gerar energia elétrica e a fornecê-la para a rede de distribuição da concessionária local.

Figura 9.5: Foto do sistema de geração distribuída de energia elétrica da ETE Ouro Verde/Foz do Iguaçu movido a biogás.



Na maioria dos casos, a unidade de geração de eletricidade em uma ETE deve funcionar em paralelo à rede, sendo injetada na rede pública apenas a eletricidade que excede a demanda da ETE. Há casos raros de plantas de cogeração que operam isoladas da rede (*ilhamento*) e cedem o excedente a determinados consumidores.

Em regime de **geração contínua**, para o atendimento de uma carga básica, o modo de operação dos motores a gás se orienta pela produção média de biogás. Na modalidade de **geração na ponta**, a energia é gerada durante certas horas do dia, podendo trazer benefícios econômicos. Durante essas horas do dia, a geração de energia elétrica é aumentada, aproveitando ao máximo a capacidade de armazenamento de biogás e capacidades adicionais de máquinas de reserva. Com a respectiva redundância e o fornecimento do gás substituto, a planta de cogeração pode também assumir o **fornecimento de energia de emergência**. Para a avaliação segura da capacidade emergencial, o plano de energia elétrica de emergência deve considerar apenas os equipamentos indispensáveis para a operação em caso de emergência. Além disso, deve-se garantir uma partida segura do grupo motogerador.

Para o aumento do grau de eficiência energética e a viabilidade econômica, sugere-se o aproveitamento do calor residual disponível. O calor pode ser aproveitado no aquecimento do digestor anaeróbio de lodo, do próprio lodo ou em sua secagem após estabilização. O calor residual gerado permite uma faixa de temperatura de 90 a 100°C. Já a temperatura da exaustão dos motores a gás oferece temperaturas de 500°C, o que permite também a geração de vapor. A separação em circuitos de água de refrigeração distintos permite controlar a captação da energia térmica conforme os requisitos do consumidor de calor.

Vale salientar que, em uma planta com aproveitamento da parcela de energia térmica, pode ocorrer, temporariamente, uma demanda reduzida de calor. Nesse caso, inicialmente, o sistema de aproveitamento de energia térmica do gás de escape é desativado. Se ainda assim houver uma produção de calor excedente, deve ser garantida a refrigeração emergencial do motor, para evitar danos. Essa situação, no entanto, deve ocorrer apenas em casos excepcionais.

9.4 Máquinas rotativas a gás

No acionamento direto de máquinas rotativas, a energia mecânica do motor a gás é transmitida diretamente ao eixo de acionamento da máquina acionada. São poupadas as perdas que normalmente seriam causadas pelo gerador e motor elétrico, as quais podem chegar a 15%. Conforme o caso, no entanto, uma unidade de reserva elétrica deve ser disponibilizada por razões de redundância. Quando se prevê o aproveitamento da energia térmica do motor a gás, deve ser prevista uma caldeira a gás para a eventual ocorrência de avarias.

Em caso de ETEs, podem ser acionados os sopradores para aeração do sistema de lodo ativado e bombas. O controle do motor a gás oferece a vantagem de permitir uma forma simples para realizar a variação das rotações da máquina. Com isso, pode-se, por exemplo, alterar a vazão dos sopradores e bombas para atender às necessidades momentâneas.

Além dessa solução, são também conhecidas as geminadas, em que um gerador e uma máquina são conectados à máquina a gás por um eixo e operados alternada ou simultaneamente. Assim, é possível operar o motor a gás a plena carga, mesmo que a máquina rotativa fique trabalhando somente com carga parcial, sendo que o gerador absorve o excesso de energia, aumentando, assim, a eficiência.

Outra possibilidade de aproveitamento energético de biogás é a combinação de um motor a gás com um compressor de uma bomba de calor. Sua vantagem é que o calor residual do motor a gás pode ser aproveitado no circuito de calor da bomba de calor. Isso permite atingir temperaturas preliminares muito mais altas do circuito de aquecimento quando comparadas às das bombas de calor elétricas.

9.5 Uso veicular

O uso de biogás como combustível de veículos demanda sua purificação até o biometano. Esse tratamento é feito em várias etapas, como apresentado no capítulo 8. Além da remoção do sulfeto de hidrogênio, deve ser removido o dióxido de carbono, o que aumenta significativamente os custos de investimento e operação.

É possível utilizar o biometano em motores a gasolina ciclo Otto que, em parte, já vêm de fábrica convertidos para o uso com gás natural, como também em motores a gás ciclo Diesel. Em ambos os casos, pode-se, durante a viagem, comutar entre o modo de operação a gás e o modo com combustíveis líquidos. O biometano é armazenado comprimido (cerca de 250 bar) em tanques adequados instalados no veículo.

9.6 Cessão do biogás a terceiros/injeção na rede de gás natural

Satisfeitas as condições locais, o biogás pode ser cedido a terceiros localizados nas imediações da planta de biogás, para o seu aproveitamento. A decisão de tratar ou não o biogás deve ser discutida com a parte que receberá o gás, levando em conta os aspectos técnicos e econômicos.

Vale salientar que ainda é vedada a injeção de biometano proveniente de ETEs, de forma comercial, na rede (ver seção 8.2)

10

SEGURANÇA

Nesta seção, são apresentados os perigos relacionados à operação de sistemas de biogás, bem como as medidas que devem ser tomadas para reduzir os riscos de ocorrência de acidentes.

10.1 Perigos

Devido à sua composição e suas propriedades, o biogás tem um grande potencial de perigo. Acidentes devidos à exposição do gás durante trabalhos em poços e canais e na manutenção de plantas de biogás podem ocasionar graves danos à saúde e, em casos extremos, até a morte.

Os perigos relacionados à manipulação do biogás são:

- >> asfixia por expulsão do ar ou por componentes gasosos com ação asfixiante, bem como riscos à saúde por determinados componentes do gás; e
- >> explosão pela formação de misturas gasosas explosivas.

Levando-se em consideração esses perigos, os equipamentos devem ser construídos, operados e monitorados conforme os princípios técnicos de segurança.

10.1.1 Perigo de asfixia e ação tóxica dos componentes do biogás

A expulsão de ar de espaços fechados pode ocasionar a carência de oxigênio. A proporção de oxigênio no ar em condições normais é de 21% e existe risco à saúde se essa concentração for reduzida para um nível abaixo de 17%. Se a concentração do oxigênio no ar inalado for menor que 14%, existe o risco de asfixia e de morte.

Já o dióxido de carbono, um gás inodoro, pode causar a paralisia do sistema respiratório, ocasionando convulsões, desmaios e queda da pressão sanguínea. Na Tabela 10.1, são apresentados os efeitos do dióxido de carbono em diferentes concentrações. A elevada concentração de dióxido de carbono no biogás, portanto, representa um grave perigo de intoxicação.

Tabela 10.1: Efeitos do dióxido de carbono.

CONCENTRAÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO NO AR [mg/m ³]	EFEITO
9.100	Limite de exposição ocupacional (valor do LEO conforme a TRGS 900)
59.000	Suportável durante, no máximo, 1 hora
98.000	Fatal após ½ hora
177.000	Morte entre 5 e 10 min.

Observações: 19.646 mg/m³ = 1% em vol.; O biogás de uma estação de tratamento de esgoto doméstico com 35% em vol. de CO₂ tem, portanto, uma concentração de dióxido de carbono de 687.610 mg/m³!

Fonte: DWA-M 363 [2010].

Outro componente tóxico do biogás é o sulfeto de hidrogênio. O H_2S ocorre em concentrações elevadas, principalmente, no biogás proveniente de esgotos domésticos. Tipicamente, o sulfeto de hidrogênio se caracteriza pelo odor de ovo podre, porém, em elevadas concentrações e longas exposições, o odor ocasiona a perda do olfato das pessoas expostas. Isso representa um grande perigo, pois o odor deixa de atuar como advertência. Após inalado junto com o ar, o sulfeto de hidrogênio tem efeito tóxico no metabolismo celular. Os efeitos do sulfeto de hidrogênio se encontram resumidos na Tabela 10.2.

Tabela 10.2: Efeitos do sulfeto de hidrogênio.

CONCENTRAÇÃO DO SULFETO DE HIDROGÊNIO NO AR [mg/m^3]	EFEITO
0,15	Limiar de detecção do odor
15	Recomendado como limite de exposição ocupacional
100	Odor desagradável
100 - 200	Irritação dos olhos e das mucosas das vias respiratórias
300 - 425	Acima dessa concentração, o H_2S não é mais percebido pelo olfato; causa dores de cabeça e vertigem
425 - 700	Cólicas, sudorese excessiva, falta de ar, perturbação do senso de orientação
1.010	Concentração letal LC50 em 1 hora
Acima de 1.200	Morte instantânea

Observações: $15.300 mg/m^3 = 1\%$ em vol.; O biogás de uma estação de tratamento de esgoto doméstico com 0,2% em vol. de H_2S tem, portanto, uma concentração de sulfeto de hidrogênio igual a $3.060 mg/m^3$!

Fonte: DWA-M 363 [2010].

Pressupondo que o biogás gerado em uma estação de tratamento de esgoto doméstico tenha uma composição média de 35% de CO_2 e 0,2% de H_2S , essas concentrações de CO_2 e H_2S serão, respectivamente, 76 e 204 vezes superiores aos respectivos valores limites estabelecidos pela legislação de segurança de trabalho na Alemanha. Uma pessoa que permanecesse em um ambiente preenchido por esse biogás teria poucas chances de sobrevivência.

A proteção à saúde contra essas substâncias deve se concretizar, principalmente, por medidas de cunho técnico e organizacional. Somente quando tais medidas tiverem sido efetivamente implementadas, é que se deve optar pela utilização de EPI (máscara de proteção), para complementar a proteção contra os riscos. A avaliação de acidentes mostrou que as causas se devem menos a fatores como deficiências técnicas do que a fatores relacionados à organização e ao comportamento das pessoas atuantes na área exposta aos gases.

10.1.2 Perigo de explosão

A ocorrência de uma explosão exige que as duas pré-condições a seguir sejam satisfeitas:

- » Presença de uma mistura combustível/ar explosiva; e
- » Presença de uma fonte de ignição com energia suficiente.

Existindo uma fonte de ignição, o perigo de explosão pode ocorrer se:

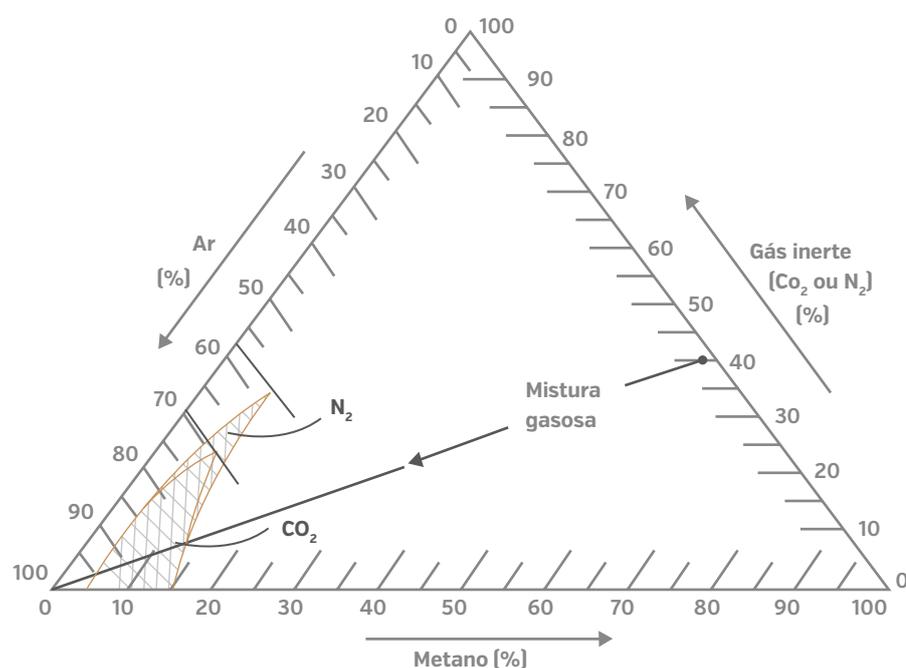
- >> Quantidades suficientes de gás proveniente de unidades operando com sobrepressão penetram em ambientes fechados;
- >> Quantidades suficientes de ar penetram em unidades operando com subpressão do sistema de gás, que, em condições normais, é hermeticamente fechado, formando misturas explosivas; e
- >> Misturas gasosas explosivas são sugadas (por exemplo, em aterros sanitários pela sucção excessiva do aterro).

Apesar de conter metano, gás inflamável, o biogás isoladamente não possui propriedades explosivas. Para a formação de uma mistura explosiva, o metano e o ar devem se combinar em uma determinada faixa de concentração. Os extremos desse intervalo são os limites inferior e superior de *explosividade*, e o intervalo em si é denominado faixa explosiva, sendo que não é possível ocorrerem explosões fora da faixa explosiva. Para iniciar o processo de combustão, o ar deve ser injetado controladamente acima do limite superior de explosividade. Abaixo do limite inferior, a mistura é tão pobre que não é inflamável nem explosiva.

O sulfeto de hidrogênio e o monóxido de carbono são capazes de aumentar a faixa explosiva. O dióxido de carbono, o nitrogênio e o vapor d'água têm o efeito de tornar o ambiente inerte, neutralizando a explosividade. Como o vapor d'água se condensa e é extraído pela refrigeração, somente o dióxido de carbono e o nitrogênio são tomados como gases inertes para determinar os limites de explosividade.

A faixa explosiva de misturas gasosas é representada por diagramas ternários. A Figura 10.1 exibe um diagrama ternário que indica as faixas explosivas para uma mistura gasosa composta de metano, ar e dois gases inertes: dióxido de carbono e nitrogênio.

Figura 10.1: Diagrama ternário da faixa explosiva de misturas de metano/ar/dióxido de carbono e misturas de metano/ar/nitrogênio.



Fonte: DWA-M 363 [2010].

A faixa explosiva do metano misturado ao ar é entre 4,4% em vol. (limite inferior de explosividade) e 16,5% em vol. (limite superior de explosividade). O aumento da proporção de gás inerte ocasiona um estreitamento da faixa explosiva, a qual se anula a uma concentração de 58% de ar. Nessa condição os limites superior e inferior de explosividade se igualam. Para saber se uma mistura gasosa é explosiva, basta plotar as proporções volumétricas do metano, ar e gás inerte, para obter o ponto de intersecção no diagrama ternário. Uma mistura gasosa será considerada explosiva somente se o ponto de intersecção situar-se na faixa explosiva. Através da taxa de adição de ar, também é possível determinar a variação das proporções volumétricas que devem sofrer os componentes para que a mistura se torne explosiva.

A Figura 10.1 apresenta o caso de uma mistura gasosa não explosiva, composta de 55% de metano, 40% de dióxido de carbono e 5% de ar. Ao aumentar gradativamente a proporção de ar na mistura, o limite explosivo é atingido quando o metano apresenta, aproximadamente, a concentração de 11,5%, o dióxido de carbono 7,5% e o ar 81%.

Da Figura 10.1, depreendem-se os limites de segurança das proporções volumétricas em que **não** se constata explosividade da mistura gasosa:

- >> Acima de 16,5% de metano, proporção de ar indiferente;
- >> Abaixo de 4,4% de metano, proporção de ar indiferente;
- >> Abaixo de 58% de ar (11,6% de oxigênio), proporções de metano e gás inerte indiferentes;
- >> Acima de 86% de gás inerte, proporção de ar indiferente.

10.2 Proteção contra explosão

Em virtude da grande importância da proteção contra explosão e incêndio e dos elevados custos implicados em caso de acidente, deve-se considerar esse aspecto ainda na fase de projeto. Devem-se contratar profissionais qualificados para a elaboração preliminar de um projeto de proteção contra explosão e incêndio.

Em áreas em que tipicamente existe a possibilidade de ocorrência de atmosfera com risco de explosão, antes da colocação em funcionamento, devem-se estipular medidas de proteção adequadas e encarregar uma pessoa qualificada.

Via de regra, deve-se evitar, ao máximo possível, a ocorrência de atmosferas com risco de explosão por meio de medidas de proteção, tais como a ventilação e a vedação dos equipamentos. No caso de pontos em que se não pode evitar completamente a possibilidade de atmosfera com risco de explosão, devem-se medir e demarcar suficientemente as áreas sujeitas à explosão nas imediações de locais de saída de gás (p. ex., saída de gás de dispositivos de segurança). Devem-se implementar, nessas áreas, medidas para suprimir fontes de ignição. Os raios são uma importante fonte de ignição e, por isso, deve ser instalado um sistema de proteção contra descargas atmosféricas. O tipo de sistema de proteção depende da classe de proteção contra raios exigida, considerando as condições do local. A classificação em uma determinada classe de proteção e a qualificação do sistema de proteção contra descargas atmosféricas instalado devem ser verificados e atestados por um especialista.

Na realização de reparos na planta, são necessárias medidas adicionais de segurança, que devem ser definidas caso a caso por uma instrução de trabalho ou autorização.

Devido à grande variedade de configurações possíveis das plantas de biogás e às condições locais diversas, este guia técnico não apresenta pormenores sobre cada área com risco de explosão.

Os resultados da avaliação de risco devem ser registrados em um documento de proteção contra explosão e o zoneamento deve ser documentado em um plano de zonas com risco de explosão. Ambos os documentos devem estar disponíveis antes da colocação de equipamentos em funcionamento ou para equipamentos existentes.

10.2.1 Classificação de zonas com risco de explosão

As zonas com risco de explosão devem ser classificadas de acordo com a probabilidade e a duração da ocorrência de atmosferas explosivas, conforme apresentado a seguir:

- >> Zona 0 – Compreende áreas em que uma atmosfera explosiva e perigosa ocorre continuamente por períodos prolongados ou frequentes;
- >> Zona 1 – Compreende áreas em que, sob condições normais de operação, existe a possibilidade de ocorrência ocasional de atmosferas perigosas explosivas; e
- >> Zona 2 – Compreende áreas em que, sob condições normais de operação, a possibilidade de atmosferas perigosas explosivas normalmente não existe ou existe apenas brevemente.

A partir dessas classificações, percebe-se que a zona 0, na qual uma atmosfera perigosa e explosiva ocorre continuamente ou por período prolongado, deve ser sempre evitada.

10.2.2 Medidas de proteção

As normas de proteção contra explosão devem ser aplicadas na análise do risco de explosão, escolha e execução das medidas de proteção para evitar esse perigo. As medidas de proteção classificam-se em:

- >> Proteção primária contra explosão;
- >> Proteção secundária contra explosão; e
- >> Proteção construtiva contra explosão.

As medidas primárias de proteção contra explosão visam a evitar ou restringir a formação de atmosferas perigosas com potencial de explosão. Do ponto de vista da segurança, essas medidas devem ter prioridade.

As medidas secundárias de proteção contra explosão têm como objetivo evitar a ignição de atmosferas perigosas potencialmente explosivas. Antes da implementação dessas medidas, é necessário definir as áreas com risco de explosão.

Conforme a finalidade, distinguem-se a:

- >> Proteção interna contra explosão: interior de partes de instalações contendo gás; e
- >> Proteção externa contra explosão: ambiente em que se encontram as partes de instalações contendo gás.

A proteção contra explosão construtiva abrange medidas que restringem os efeitos de uma explosão a níveis inofensivos. O objetivo dessas medidas construtivas é, no caso de uma explosão no interior da planta de biogás, evitar consequências perigosas para o ambiente. Isso pode ser realizado por meio da construção da planta com resistência a explosões, e a utilização de dispositivos corta-chamas para a proteção de partes da planta não resistentes a explosões.

É recomendável a elaboração de um projeto de segurança para estipular as medidas de proteção.

10.2.3 Fontes de Ignição

A explosão de uma mistura gasosa explosiva só ocorre quando é fornecida uma determinada energia de ignição. Essa energia de ignição depende essencialmente da composição da mistura gasosa. Como orientação, pode-se usar a temperatura de autoignição, parâmetro que também depende da composição da mistura. A temperatura de autoignição mínima de uma mistura de ar e metano explosiva é de aproximadamente 595°C.

Entre as fontes de ignição, destacam-se:

- >> Chamas abertas (fumantes, trabalhos de corte e solda);
- >> Superfícies quentes;
- >> Faíscas por correntes elétricas (equipamentos inadequados ou defeituosos);
- >> Faíscas por carga eletrostática;
- >> Faíscas de atrito e impacto (componentes, ferramentas que produzem faíscas);
- >> Descargas atmosféricas (raios);
- >> Carga eletrostática das membranas de cobertura do biogás; e
- >> Compostos de enxofre/ferro pirofóricos.

10.2.4 Proteção contra raios

Todas as partes do sistema de aproveitamento de biogás devem ser dotadas de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Na Figura 10.2, é apresentado um exemplo para proteção contra raios, com três para-raios circundando um gasômetro.

Figura 10.2: Exemplo de proteção contra descargas atmosféricas para um gasômetro.



Fonte: HYDRO INGENIEUR (2015).

O sistema de proteção contra descargas atmosféricas deve ser projetado e instalado atendendo às exigências estabelecidas na norma NBR 5.419, de Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas.

Captore (hastes, cabos esticados, condutores em malha e elementos naturais) devem ser colocados fora de área com risco de explosão.

Condutores de descida não devem ser instalados em zonas com risco de explosão classificadas como Zona 0. Já em Zonas 1, os condutores de descida podem ser instalados, porém isolados por meio de eletrodutos anti-chama, fechados na parte superior e inferior. Em áreas com risco de explosão classificadas como Zona 2, podem ser instalados condutores de descida sem restrição.

10.3 Normativas de segurança

As principais normas de segurança com relevância para instalações de biogás em estações de tratamento de esgoto estabelecidas pelo Ministério do Trabalho e Emprego são:

- >> NR-10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade;
- >> NR-20 – Segurança e saúde no trabalho com inflamáveis e combustíveis; e
- >> NR-33 – Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados.

A NR-10 estabelece os requisitos e condições mínimas necessárias ao processo de transformação das condições de trabalho com energia elétrica nas suas diversas fases, como geração, transmissão, distribuição e consumo. Objetiva-se tornar as condições de trabalho mais seguras e salubres, garantindo a segurança e saúde de todos os profissionais envolvidos em

ações físicas, com a interferência direta ou indireta, em serviços ou instalações elétricas. Essa norma deve ser considerada nas etapas de projeto, construção, montagem, operação e manutenção das instalações elétricas.

A norma NR-20 dispõe sobre os requisitos mínimos para a gestão da segurança e saúde no trabalho contra os fatores de risco de acidentes provenientes das atividades de extração, produção, armazenamento, transferência, manuseio e manipulação de inflamáveis e líquidos combustíveis. A NR-20 ainda classifica as instalações em três classes, de acordo com a atividade exercida e a capacidade de armazenamento, de forma permanente e/ou transitória.

A NR 33 trata de segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados. Espaço confinado é *“qualquer área ou ambiente não projetado para ocupação humana contínua, que possua meios limitados de entrada e saída, cuja ventilação existente é insuficiente para remover contaminantes ou onde possa existir a deficiência ou enriquecimento de oxigênio”*. A Norma objetiva a identificação desses espaços, o reconhecimento, avaliação, monitoramento e controle dos riscos existentes, de forma a garantir, permanentemente, a segurança e a saúde dos trabalhadores que interagem direta ou indiretamente nesses espaços. Ainda são estabelecidas as responsabilidades do empregador e do trabalhador.

10.4 Proteção contra incêndios

A prevenção contra incêndios não requer o emprego de técnicas e materiais especiais. Consiste em evitar que ocorra fogo, utilizando certas medidas básicas, que envolvem a necessidade de conhecer, dentre outros, os seguintes itens:

- >> As características do fogo;
- >> As propriedades de riscos dos materiais;
- >> As causas dos incêndios; e
- >> O estudo dos combustíveis.

Caso ocorra um princípio de incêndio, mesmo existindo a prevenção de incêndios, é importante que ele seja combatido de forma eficiente, para que sejam minimizadas as suas consequências.

Em plantas de aproveitamento de biogás, os incêndios poderão ocorrer a partir das seguintes fontes:

- >> Biogás com metano como componente combustível (reatores/digestores anaeróbios, tubulação de transporte do combustível, unidades de armazenamento do combustível, etc.);
- >> Isolamentos das edificações e unidades, quando existirem;
- >> Cabos elétricos com isolamento combustível;
- >> Óleo de lubrificação dos equipamentos;
- >> Materiais inflamáveis, substâncias auxiliares ou perigosas; e
- >> Materiais de embalagem (papel usado, paletes, madeira, etc.).

A prevenção do incêndio se baseia na análise das condições que possibilitam o surgimento de um foco de incêndio.

Embora cada estado tenha sua legislação e fiscalização específica, podem ser resumidos os seguintes princípios de prevenção:

- >> Sistematização e planejamento de prevenção;
- >> Cuidado contra riscos: a planta deve ser projetada de forma que seu *layout* de operação e manutenção não induza a riscos de acidentes. A manutenção das plantas deve ser preventiva, de maneira a não existir deterioração das instalações e equipamentos levando ao risco de incêndios;
- >> Avaliação de riscos inevitáveis;
- >> Combate do risco na origem;
- >> Consideração do fator humano;
- >> Consideração do estado da arte da técnica;
- >> Eliminação ou redução de possíveis riscos; e
- >> Capacitação dos funcionários.

10.5 Sinalização de segurança

Tabela 10.3: Sinalização de segurança.

Nessa seção, são apresentadas as principais sinalizações que devem ser utilizadas em plantas de biogás. Vale salientar que os trabalhadores devem receber treinamento para compreender tais sinalizações.

Em conformidade com a norma NR-33, os espaços confinados devem ser sinalizados conforme apresentado nas Tabela 10.3 e Tabela 10.4.

SINAIS DE PROIBIÇÃO



Sinalização indicando a proibição de acesso de pessoas não autorizadas.



Sinalização indicando a proibição de produção de fogo e chamas.

SINAIS DE OBRIGAÇÃO



Sinalização de obrigação de uso de EPI para proteção de ouvido, geralmente nos ambientes em que há motores instalados.

SINAIS DE AVISO OU PERIGO



Sinalização de áreas com risco de explosão.



Sinalização de áreas com risco de superfícies quentes – geralmente nos ambientes em que há motores instalados.

PLACAS COMBINADAS



Sinalização combinada, indicando um espaço confinado, a proibição de entrada e o risco de morte – geralmente usado em tampas de visita na parte inferior de um reator anaeróbio, em tampas de visita na parte superior de um biodigestor de lodo ou em estações elevatórias.



Sinalização combinada, indicando uma zona com risco de explosão e a proibição de fumar.

Tabela 10.4: Sinalização de segurança - Continuação.

SINAIS DE SAÚDE E SALVAMENTO/EMERGÊNCIA			
	Indicação de direção a seguir.		Primeiros socorros.
	Indicação da direção de uma saída de emergência.		
	Telefone para salvamento.		Lava olhos de segurança.
	Maca.		Ducha de segurança.
SINAIS DE COMBATE A INCÊNDIO			
	Agulheta ou Carretel de Incêndio.		Escada de Combate a Incêndio.
	Extintor de Segurança.		Botoeira de Incêndio.
SINALIZAÇÃO DE GASODUTOS			
	Sinalização de perigo próximo de uma tubulação de biogás.		Identificação da tubulação de biogás, com indicação de direção de fluxo.

10.6 Medidas para segurança em plantas de biogás

Para todas as edificações, devem estar disponíveis os projetos estruturais, em que são consideradas as condições reais, no que tange à instalação de equipamentos (p. ex., misturadores) e a existência de aberturas.

Visando ao aumento da segurança contra impactos causados por colisão de veículos em unidades com riscos de explosão, podem ser implantadas medidas administrativas, como o estabelecimento de velocidade máxima nas vias de circulação ou medidas construtivas como a instalação de equipamentos anti-colisão.

As tubulações não enterradas devem possuir zonas de ruptura pré-determinadas.

No caso de isolamento térmico de unidades da planta, por exemplo, nos digestores anaeróbios de lodo, o material utilizado deve ser de “inflamabilidade normal”. Já ao redor de aberturas onde pode haver atmosferas explosivas, deve ser “não inflamável”. Essa classificação é abordada na norma europeia EM 13501-1 e na americana ASTM E-84. Os códigos das classes supracitadas de acordo com cada norma são apresentados na Tabela 10.5.

Tabela 10.5: Classificação de Inflamabilidade de Materiais.

LOCAL	NORMA	CLASSE DE INFLAMABILIDADE	
		INFLAMABILIDADE NORMAL	NÃO INFLAMÁVEL
Europa	EM 13501-1	C	B
EUA	ASTM E-84	II	I

Fonte: *Elaboração própria.*

10.6.1 Reatores hermeticamente fechados

Os reatores considerados neste item são reatores anaeróbios de tratamento de esgoto (UASB e RALF) e digestores anaeróbios de tratamento de lodo.

As aberturas de transição para tubulações, eletrodutos e passagem de eixos (p. ex., para misturadores) devem ser executadas de forma a garantir o fechamento hermético do reator. Isso pode ser realizado por meio do uso de vedações ou do princípio de selagem hídrica.

Os reatores devem possuir um dispositivo de proteção contra sobre- e subpressões. Recomenda-se o monitoramento da pressão na fase gasosa e do nível de enchimento.

10.6.1.1 Operação regular

Durante a operação regular, não existe atmosfera explosiva nos reatores hermeticamente fechados, pois a concentração de oxigênio é inferior a 11,6%.

Também não existe perigo na parte externa dos reatores, visto que, durante a operação regular, não existe emissão de biogás.

Vale salientar que não-conformidades construtivas (fissuras nas paredes ou lajes de concreto, tampas não-vedantes, etc.) podem gerar riscos mesmo no caso de operação regular.

O monitoramento contínuo do nível de enchimento deve ser vinculado a medidas preventivas. Dessa forma, um nível de enchimento acima do nível máximo estabelecido deve resultar no desligamento das bombas de

alimentação. Já no caso de nível inferior ao nível mínimo estabelecido, o que pode ocasionar o acionamento de equipamentos contra subpressão e conseqüentemente entrada de ar ambiente para o interior do reator, devem ser automaticamente desligados equipamentos não certificados para uso em áreas com risco de explosão.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Inspeções periódicas das instalações;
- >> Verificações periódicas de estanqueidade;
- >> Verificação diária de aberturas de transição (tubos, eletrodutos, eixos de equipamentos, etc.) contra vazamentos;
- >> Verificação periódica do nível de enchimento nos selos hídricos (p. ex., nos equipamentos de proteção contra sobre- e subpressão, etc.);
- >> Monitoramento *online* do nível de enchimento de reatores e da pressão de gás; e
- >> Verificação anual do funcionamento da instrumentação.

10.6.1.2 Manutenção

Durante a manutenção de reatores, podem-se tornar necessárias a abertura e a entrada de funcionários. Nesta ocasião, podem ser geradas atmosferas explosivas, portanto, devem ser evitadas fontes de ignição. Deve-se, ainda, utilizar roupa que não se carrega eletro-estaticamente e ferramentas anti-faísca. Em caso de redução de nível de enchimento de reatores a um nível inferior ao da altura de equipamentos normalmente submersíveis, estes devem ser desligados.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Antes da abertura de reatores hermeticamente fechados devem ser desligados os equipamentos instalados e a produção de biogás deve ser reduzida ao mínimo (p. ex., por redução de adição de esgoto e lodo);
- >> Em caso de conexão a outras unidades de tratamento, a linha de gás do reator que for receber manutenção deve ser isolada das demais unidades, de tal forma que não haja retorno de biogás;
- >> Durante os trabalhos, deve ser promovida ventilação adequada e permanente;
- >> Devem ser utilizados equipamentos de proteção individual que detectam pelo menos os gases metano, oxigênio, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio;
- >> Devem ser utilizadas ferramentas anti-faísca, roupa que não se carrega eletro-estaticamente e respirador artificial;
- >> Deve ser verificada, após a conclusão dos trabalhos de manutenção, a estanqueidade; e
- >> Os equipamentos instalados no interior somente devem ser re-energizados após a conclusão dos trabalhos de manutenção, quando se encontrarem em situação submersível.

10.6.1.3 Falha

Em caso de ocorrências de não-conformidades, é possível que o oxigênio entre no sistema ou, ainda, que o biogás escape. A probabilidade desse tipo

de ocorrência deve ser definida na análise de risco. Na realização adequada de procedimentos de operação e manutenção, não há fontes de ignição.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Inspeções periódicas das instalações;
- >> Realização de aterramento adequado dos componentes instalados;
- >> Instalações de proteção contra descargas atmosféricas; e
- >> Instalações de seguranças com funcionamento mecânico (p. ex., válvula de fechamento manual, etc.).

10.6.2 Gasômetro

10.6.2.1 Operação regular

Durante a operação regular, não existe atmosfera explosiva nos gasômetros, pois a concentração de oxigênio é inferior a 11,6%.

Também não existe perigo na parte externa do gasômetro, visto que, durante a operação regular, não há emissão de biogás.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Inspeções periódicas das instalações;
- >> Verificações periódicas de estanqueidade; e
- >> Monitoramento *online* de sobrepressão operacional e estabelecimento de um alarme de pressão mínima e máxima admissível.

10.6.2.2 Manutenção

A probabilidade de ocorrência de emissões de biogás durante os procedimentos de manutenção é elevada. Na realização adequada de procedimentos de manutenção não há fontes de ignição. Os impactos de uma possível ignição seriam significativos, uma vez que é provável a presença de funcionários nas proximidades e a ocorrência de danos nas instalações.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Antes da iniciação de procedimentos de manutenção devem ser fechados os gasodutos a montante e a jusante;
- >> Conforme necessário, o gasômetro deve ser esvaziado;
- >> Conforme necessário, o gasômetro deve ser *inertizado* (p. ex., com nitrogênio ou dióxido de carbono);
- >> Durante os trabalhos, deve ser promovida ventilação adequada e permanente;
- >> Devem ser utilizados equipamentos de proteção individual que detectam, no mínimo, os gases metano, oxigênio, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio; e
- >> Devem ser utilizadas ferramentas anti-faísca, roupa que não se carrega eletro-estaticamente e respirador artificial.

10.6.2.3 Falha

Em caso de ocorrências de não-conformidades, é possível que o oxigênio entre no sistema ou, ainda, que o biogás escape. A probabilidade desse tipo de ocorrência deve ser definida na análise de risco. Na realização adequada de procedimentos de operação e manutenção, não há fontes de ignição.

A entrada de ar no sistema seria detectada através do alarme de pressão inferior à mínima admissível e o escape de biogás através do alarme de pressão superior à máxima admissível.

Os impactos de uma possível ignição seriam significativos, no que tange à ocorrência de danos nas instalações. Já a presença de funcionários nas proximidades seria menos provável.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Em caso de proximidades de ambientes fechados ao redor dos gasômetros, deve ser garantida uma ventilação adequada;
- >> Componentes elétricos devem ser protegidos com selo hídrico ou se enquadrar na classificação compatível com a zona de risco; e
- >> No acionamento de alarme de pressão acima da máxima admissível, devem ser ligados sinalizadores óticos/acústicos e desligados os equipamentos elétricos.

10.6.3 Gasoduto

10.6.3.1 Operação regular

Deve ser evitada atmosfera com risco de explosão tanto dentro quanto ao redor dos gasodutos. A presença de atmosfera com risco de explosão no interior dos gasodutos pode ser evitada mantendo-se o equilíbrio entre o consumo e a produção de biogás, evitando, assim, a sucção de ar ambiente e, conseqüentemente, de oxigênio.

Para evitar atmosfera com risco de explosão ao redor dos gasodutos, deve ser garantida a estanqueidade das instalações, que deve ser confirmada periodicamente.

O interior dos gasodutos não precisa ser classificado como área de risco quando a pressão de sucção na entrada de compressores estiver sendo monitorada.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Monitoramento redundante na sucção dos compressores com desligamento emergencial;
- >> Monitoramento da pressão nos reatores hermeticamente fechados com função de alarme;
- >> Monitoramento da periculosidade do biogás no interior do gasoduto por meio da concentração de CH_4 ou O_2 com fechamento automático da alimentação de biogás;
- >> Verificação periódica da estanqueidade com espuma e detectores de gases inflamáveis;
- >> Inspeções periódicas e manutenção; e
- >> Capacitação dos operadores.

10.6.3.2 Manutenção

A probabilidade de ocorrência de emissões de biogás durante os procedimentos de manutenção é elevada. Na realização adequada de procedimentos de manutenção, não há fontes de ignição.

Vale destacar que, quando o material utilizado para a tubulação apresenta condutividade não adequada, este pode representar uma fonte de ignição em função de cargas e descargas eletrostáticas.

Os impactos de uma possível ignição em atmosfera perigosa seriam significativos, uma vez que é provável a presença de funcionários nas proximidades e a ocorrência de danos em todas as instalações.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Durante os trabalhos, junto a gasodutos abertos, deve ser promovida ventilação adequada;
- >> Devem ser utilizados equipamentos de proteção individual que detectam, no mínimo, os gases metano, oxigênio, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio;
- >> Devem ser utilizadas ferramentas anti-faísca, roupa que não se carrega eletro-estaticamente e respirador artificial;
- >> Realização de aterramento adequado dos componentes instalados;
- >> Caso necessário, os equipamentos devem ser umedecidos;
- >> Conforme necessário, os trechos afetados devem ser inertizados (p. ex., com nitrogênio) e reduzir a pressão operacional à pressão atmosférica;
- >> Intensificar as inspeções após a conclusão de manutenção; e
- >> Em caso de alteração construtiva, deve ser realizado, novamente, um teste de estanqueidade.

10.6.3.3 Falha

Em caso de ocorrências de não-conformidades, pode acontecer uma subpressão no interior do gasoduto. Se, simultaneamente, houver problemas com a estanqueidade ou falta de água nos selos hídricos, o ar ambiente pode entrar na tubulação, enquanto, com pressão positiva, o biogás escaparia para o exterior.

Na realização adequada de procedimentos de operação e manutenção, não há fontes de ignição.

Os impactos de uma possível ignição seriam significativos, no que tange à ocorrência de danos nas instalações. Já a presença de funcionários nas proximidades seria menos provável.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Promover ventilação adequada de ambientes fechados, onde passa tubulação de gás; e
- >> Componentes elétricos não devem estar montados em zonas classificadas, salvo quando apresentam certificação adequada.

10.6.4 Poço de Condensado

Os poços de remoção de condensado devem ser localizados em ambiente aberto.

Antes de abrir o poço de condensado ou de selos hídricos, deve ser realizada uma medição de gás, verificando-se a não periculosidade da atmosfera do local. Essa medida deve ser realizada somente por operadores habilitados.

10.6.4.1 Operação regular

Durante a operação regular, pode ocorrer uma atmosfera perigosa em função de erro do projeto do selo hídrico. Uma fonte de ignição geralmente não é encontrada.

O selo hídrico deve ser executado de tal forma que, depois de um vazamento do líquido de selagem decorrente de sobrepressão, ele volte para sua condição inicial.

O nível do selo hídrico no poço de condensado deve apresentar uma submersão 5 vezes superior à pressão de acionamento das válvulas contra sobrepressão. Os selos hídricos devem ser inspecionados regularmente, verificando-se o nível de enchimento.

No projeto dos poços de condensado devem ser consideradas as vazões de biogás, a pressão operacional, o comprimento e o diâmetro das tubulações.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Ventilação natural, evitando a entrada de água pluvial e de insetos;
- >> Monitoramento do nível de condensado no poço;
- >> Entrada de cabos elétricos a prova de gás;
- >> Inspeção diária;
- >> Teste de estanqueidade anual com indicadores espumantes com soprador desligado; e
- >> Manutenção preventiva.

10.6.4.2 Manutenção

É provável que, durante os procedimentos de manutenção, seja detectado biogás no ambiente. Na realização adequada de procedimentos de manutenção, não há fontes de ignição. Os impactos de uma possível ignição seriam significativos, uma vez que haverá operadores nas proximidades.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Promover ventilação adequada;
- >> Caso necessário, os equipamentos devem ser umedecidos;
- >> Devem ser utilizados equipamentos de proteção individual que detectam, no mínimo, os gases metano, oxigênio, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio;
- >> Devem ser utilizadas ferramentas anti-faísca, roupa que não se carrega eletro-estaticamente e respirador artificial;
- >> Conforme necessário, os trechos afetados devem ser inertizados (p. ex., com nitrogênio); e
- >> Após a reiniciação de operação, as inspeções devem ser intensificadas.

10.6.4.3 Falha

Em caso de ocorrências de não-conformidades, pode escapar biogás, ainda que a probabilidade dessa ocorrência seja baixa. Na realização adequada de procedimentos de operação e manutenção, não há fontes de ignição, e os impactos de uma possível ignição seriam baixos.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> As instalações elétricas devem corresponder à classificação da zona;
- >> Devem ser utilizados equipamentos de proteção individual que detectam, no mínimo, os gases metano, oxigênio, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio; e
- >> Deve ser verificado o nível de enchimento nos selos hídricos após o desligamento emergencial da planta.

10.6.5 Unidade de biodessulfurização

10.6.5.1 Operação regular

A concentração de oxigênio para a realização de biodessulfurização é significativamente inferior a 11,6%, não representando uma atmosfera com risco de explosão. Na operação regular, não pode ocorrer fuga de biogás ou entrada de ar descontrolada. Não há fonte de ignição no interior do ambiente de dessulfurização.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Verificação regular de estanqueidade do sistema de transporte de biogás;
- >> Controle da injeção de ar regulada através da vazão de biogás; e
- >> Monitoramento de teor de oxigênio no biogás.

10.6.5.2 Manutenção

Durante a manutenção, pode-se tornar necessária a abertura do ambiente de dessulfurização, onde, em função da entrada de oxigênio ou escape de biogás, pode ser formada uma atmosfera explosiva. Na realização adequada de procedimentos de operação e manutenção, não há fontes de ignição.

Os impactos de uma possível ignição seriam significativos, uma vez que haverá operadores nas proximidades.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Antes da iniciação de procedimentos de manutenção, devem ser fechados os gasodutos a montante e a jusante; e
- >> Devem ser utilizados equipamentos de proteção individual que detectam, no mínimo, os gases metano, oxigênio, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio.

10.6.5.3 Falha

Em caso de ocorrências de não-conformidades, é possível que o oxigênio entre no sistema ou, ainda, que o biogás escape.

10.6.6 Unidade Motor-Gerador (CHP)

Deve ser diferenciado entre o motor-gerador ciclo Otto e o ciclo Diesel. No caso de motor-gerador ciclo Diesel, permitindo a compensação de uma redução de poder calorífico do gás, decorrente de entrada de ar indesejada, uma atmosfera explosiva pode ocorrer de forma despercebida. Unidades de motor-gerador ciclo Otto, sem a possibilidade de compensação, resultariam em um auto-desligamento com teor em torno de 40% vol CH₄, significativamente maior que o limite superior de explosividade de 16,5% vol CH₄.

10.6.6.1 Operação regular

Durante a operação regular, não existe atmosfera explosiva, levando em consideração que, na operação com sobrepessão, não existe entrada de oxigênio para o interior do sistema.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- » Monitoramento *online* do teor de metano no biogás;
- » Monitoramento *online* do teor de metano da atmosfera no abrigo do motor-gerador, controlando a ventilação forçada e o acionamento de alarme com desligamento emergencial;
- » Instalação de válvulas corta-chama, especialmente no caso de motor-geradores ciclo Diesel;
- » Testes de estanqueidade periódica das unidades da planta;
- » Monitoramento online da pressão na alimentação do motor-gerador;
- » Acionamento, no sistema de automação, das válvulas de fechamento rápido em caso de não-conformidade;
- » Inspeções regulares no abrigo do motor-gerador.

10.6.6.2 Manutenção

Durante a realização de trabalhos de manutenção, pode ocorrer vazamento de biogás, formando uma atmosfera explosiva no abrigo do motor-gerador.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- » Fechamento da linha de alimentação de biogás, por meio de válvula situada no exterior do abrigo operacional;
- » Aguardar o resfriamento das superfícies quentes;
- » Devem ser utilizados equipamentos de proteção individual que detectam, no mínimo, os gases metano, oxigênio, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio;
- » Devem ser utilizadas ferramentas anti-faísca, roupa que não se carrega eletro-estaticamente e respirador artificial;
- » Conforme necessário, os trechos afetados devem ser *inertizados* (p. ex., com nitrogênio);
- » Trabalhos de manutenção devem ser realizados somente por funcionários habilitados e autorizados;
- » Testes de estanqueidade regulares na planta; e
- » Após a reiniciação da operação, as inspeções devem ser intensificadas.

10.6.6.3 Falha

Em caso de não-conformidades, a mistura de gás do motor-gerador e uma ignição poderiam propagar a chama para o gasoduto. O risco deve ser mitigado pelo fornecedor do motor-gerador, por exemplo, com a sincronização da abertura das válvulas para a câmara de combustão.

A probabilidade de ocorrência de uma atmosfera explosiva no interior do abrigo do motor-gerador é baixa em função da ventilação forçada com fator de troca suficientemente elevado.

10.6.7 Caldeira e Queimador de biogás

10.6.7.1 Operação regular

Durante a operação regular, não pode ocorrer uma atmosfera perigosa.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> Monitoramento *online* da composição de biogás;
- >> Monitoramento da chama;
- >> Controle da válvula de fechamento rápido na alimentação do queimador em caso de redução da potência de queima, podendo ser causado por redução e vazão, ou pela qualidade, detectado por redução de temperatura;
- >> Instalação de válvula corta-chama na linha de alimentação;
- >> O sistema de automatização deve prever o acionamento de válvulas de fechamento rápido em caso de ocorrência de não-conformidades; e
- >> Verificação periódica da estanqueidade do sistema de transporte de biogás.

10.6.7.2 Manutenção

Na realização adequada de procedimentos de manutenção, não há fontes de ignição. Em caso de ignição, os impactos prováveis seriam baixos.

Medidas recomendadas para redução de riscos:

- >> A válvula na linha de gás a montante do queimador deve estar fechada;
- >> Devem ser utilizados equipamentos de proteção individual que detectam, no mínimo, os gases metano, oxigênio, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio;
- >> Devem ser utilizadas ferramentas anti-faísca, roupa que não se carrega eletro-estaticamente e respirador artificial; e
- >> Conforme necessário, os trechos afetados devem ser inertizados (p. ex., com nitrogênio).

10.6.7.3 Falha

No caso de falhas, uma válvula de fechamento rápido vinculado ao monitoramento da chama permite que seja evitada a emissão de gás. Sugere-se, também, que, no sistema de supervisão, seja acionado um alarme após a ocorrência de um determinado número de tentativas não bem sucedidas de ignição.

10.7 Inspeções

O estado de segurança do sistema de biogás deve ser analisado antes e durante a operação, bem como após maiores alterações da configuração. As inspeções devem ser realizadas por profissionais capacitados.

Todas as inspeções devem ser realizadas e documentadas de forma adequada, por exemplo, por meio de protocolos de inspeção. A documentação de uma inspeção deve conter o objeto e o tipo de inspeção, o nome do inspetor e a data da sua realização. Além disso, deve apresentar um posicionamento claro se, do ponto de vista da segurança, existem ressalvas quanto à continuidade do funcionamento da planta.

Além das verificações citadas a seguir, devem-se considerar medidas de proteção contra explosão e recomendações dos fabricantes.

10.7.1 Inspeções antes da entrada em operação

A planta de biogás deve ser verificada quanto à estanqueidade antes de sua entrada em operação. Pelo menos 10% dos tubos enterrados ou soldados no local devem ser submetidos a uma inspeção por radiação antes de entrarem em funcionamento.

Antes de colocar sistemas de biogás em funcionamento, devem-se realizar, nos componentes da planta, todos os testes a frio e demais testes de funcionamento conforme indicações dos fabricantes. Isso deve ser especialmente observado no caso de equipamentos de importância para a segurança. Em seguida, todos os selos hídricos com função de proteção contra sobrepressão e subpressão devem ser enchidos, e os equipamentos de coleta de condensado devem ser esvaziados.

Após isso, deve-se encher a linha com gás inerte ou biogás. Se for empregado biogás, pode ocorrer, momentaneamente, uma atmosfera com risco de explosão no sistema de tubulação. Deve-se, portanto, garantir que a atmosfera seja eliminada com segurança. Para o processo de enchimento, deve haver uma quantidade suficiente de bocais de enchimento e registros, e deve ser considerado o enchimento de trechos parciais da linha.

As inspeções mínimas necessárias antes da entrada em operação são indicadas na Tabela 10.6. Todas as inspeções devem ser realizadas pela construtora, com supervisão de um responsável pela companhia operadora.

Tabela 10.6: Inspeções antes da entrada em operação.

OBJETO DA INSPEÇÃO	DESCRIÇÃO	INSPETOR
Sistema completo	Inspeção visual de danos, existência da documentação exigida e identificação (tubulação, áreas de risco)	Profissional qualificado
Segurança dos postos de trabalho contra explosões	Verificação da documentação, da relevância e concretização do projeto de proteção contra explosão	Profissional qualificado
Materiais e equipamentos (elétricos) em áreas sob risco de explosão	Estado adequado quanto à montagem, instalação e funcionamento	Profissional qualificado
Equipamentos de segurança	Inspeção dos equipamentos de segurança quanto à eficácia e capacidade de reação	Profissional qualificado
Registros e componentes	Qualificação (comprovação do fabricante); verificação do funcionamento dos registros	Profissional qualificado
Junções das soldas da tubulação de gás	Amostragem de, no mínimo, 10%	Empresa especializada e certificada
Tubulações de gás, inclusive registros e componentes	Inspeção da estanqueidade por detectores de gás ou ensaio de pressão	Profissional qualificado

Fonte: DWA-M 212 [2008].

Todas as inspeções também podem ser realizadas por órgãos de inspeção autorizados. A exigência de inspeção de toda a planta e sua estanqueidade não se restringe à fase de comissionamento, mas também a possíveis trabalhos de manutenção ou alterações consideráveis.

10.7.2 Inspeções periódicas

O tipo, o escopo e os intervalos das inspeções periódicas devem ser definidos com base na avaliação de risco realizada pelo empregador. A Tabela 10.7 contém dados de referência que, juntamente com as indicações dos fabricantes, servem de recomendação para a definição interna dos controles.

Todas as inspeções também podem ser realizadas por órgãos de inspeção autorizados.

Tabela 10.7: Inspeções periódicas.

OBJETO DA INSPEÇÃO	DESCRIÇÃO	PRAZO
Sistema completo	Inspeção visual para identificar danos e odor de gás	Semanalmente
Equipamentos de segurança, identificação dos equipamentos	Inspeção visual de dispositivos hidráulicos contra sub e sobrepressão; inspeção dos dispositivos de segurança e identificação dos equipamentos em relação à eficácia e ao tempo de resposta	Semanalmente/ Anualmente
Registros e componentes	Verificação do funcionamento dos equipamentos de fechamento	Mensalmente
Tubulações de gás, inclusive registros e componentes	Inspeção da vedação por detectores de gás ou agentes espumantes	Bianual
Equipamento sensor de gás	Inspeção de função	Anualmente
Gasômetro	Inspeção conforme o guia técnico DWA-M 376 "Normas de Segurança para Reservatórios de Gás de Membrana"	
Sistema de proteção contra descargas atmosféricas	Danos e corrosão dos cabos de aterramento, resistência do aterramento	Conforme a classe de proteção contra raios da instalação; no mínimo anualmente
Materiais e equipamentos (elétricos) em áreas sob risco de explosão	Estado adequado quanto à montagem, instalação e funcionamento	No máx. a cada três anos

Fonte: DWA-M 212 [2008].

As inspeções exigidas devem ser documentadas em um plano de inspeção pelo responsável pela planta.

Além das verificações quanto ao bom funcionamento dos equipamentos, a planta inteira deve ser inspecionada regularmente ou, no mínimo, a cada quatro anos. A experiência prática recomenda reduzir esse período a até 2 anos.

10.7.3 Inspeções após reparos

Após reparos realizados em componentes sujeitos à proteção contra explosão pelo fabricante, recomenda-se sua inspeção quanto à conformidade com as principais características relativas à proteção contra explosão.

10.8 Monitoramento *10.8.1 Monitoramento da composição do biogás*

A composição do biogás deve ser monitorada pela medição regular do conteúdo de metano e oxigênio (ver seção 5.6.3) conforme o plano de segurança. O teor de dióxido de carbono é uma informação adicional para avaliar o processo operacional.

A medição da concentração de gases traço pode ser feita por amostragem.

10.8.2 Monitoração do ar em edificações e poços

Para avaliar o risco oferecido pela ignição de biogás acumulado ou expelido, devem-se realizar, regularmente ou ao adentrar no local, medições do teor de metano e oxigênio nas áreas com risco de explosão, utilizando aparelhos portáteis. Dependendo do caso, pode-se prescindir da medição das concentrações de oxigênio quando forem utilizados detectores de atmosfera explosiva.

Nas edificações e outras áreas em que houver elevado risco, devem ser instalados detectores fixos dotados de alarme acústico ou luminoso que disparem ao serem atingidas determinadas concentrações de gás.

10.8.3 Medição de gases combustíveis

As concentrações de metano e de outros compostos orgânicos no biogás são obtidas pela medição do calor de reação (tonalidade térmica), gerado na combustão catalítica com ar. A aplicabilidade desse método se limita a baixas concentrações de metano (até aprox. 5%), pois tem como pré-requisito a suficiente disponibilidade de oxigênio na mistura gasosa. O método não é específico para o metano, uma vez que também detecta outros compostos orgânicos inflamáveis. É baseado nesse princípio que operam os metanômetros ou explosímetros oferecidos no mercado, utilizados para detectar atmosferas explosivas.

Concentrações mais elevadas de metano exigem um método diferente, por exemplo, por meio da determinação da condutividade térmica. A condutividade térmica do biogás é medida e comparada com a condutividade de um gás de referência. A medição da condutividade térmica do metano sofre interferência em virtude da sensibilidade cruzada em relação a outros componentes orgânicos do gás.

Por essa razão, seja em aplicações fixas ou portáteis, deve-se dar preferência aos analisadores de gases por infravermelho, especialmente dedicados à medição da concentração de metano.

Para qualquer um dos três princípios, os aparelhos podem ser equipados com sensores de valores-limite, que emitem um alarme quando determinadas concentrações são atingidas.

10.8.4 Medição do oxigênio

Na análise do oxigênio, ocorre oxidação catalítica no interior de uma célula galvânica. A energia elétrica gerada, variável conforme o teor de oxigênio, serve de parâmetro de medição, sendo esse princípio de medição utilizado principalmente em aparelhos portáteis. A célula de medição tem uma

vida útil e, por isso, deve ser substituída após certo número de medições ou quando armazenada em ambiente não isento de oxigênio.

Outro método de análise, baseado nas propriedades paramagnéticas do oxigênio, é particularmente adequado para análises contínuas em equipamentos de medição estacionários.

10.9 Avaliação e gestão de perigos

O tema perigos e riscos de acidentes em plantas de biogás deve ser tratado de maneira a permitir o uso dessa fonte de energia de forma eficaz e com menor agressividade ao meio ambiente, garantindo a segurança dos trabalhadores.

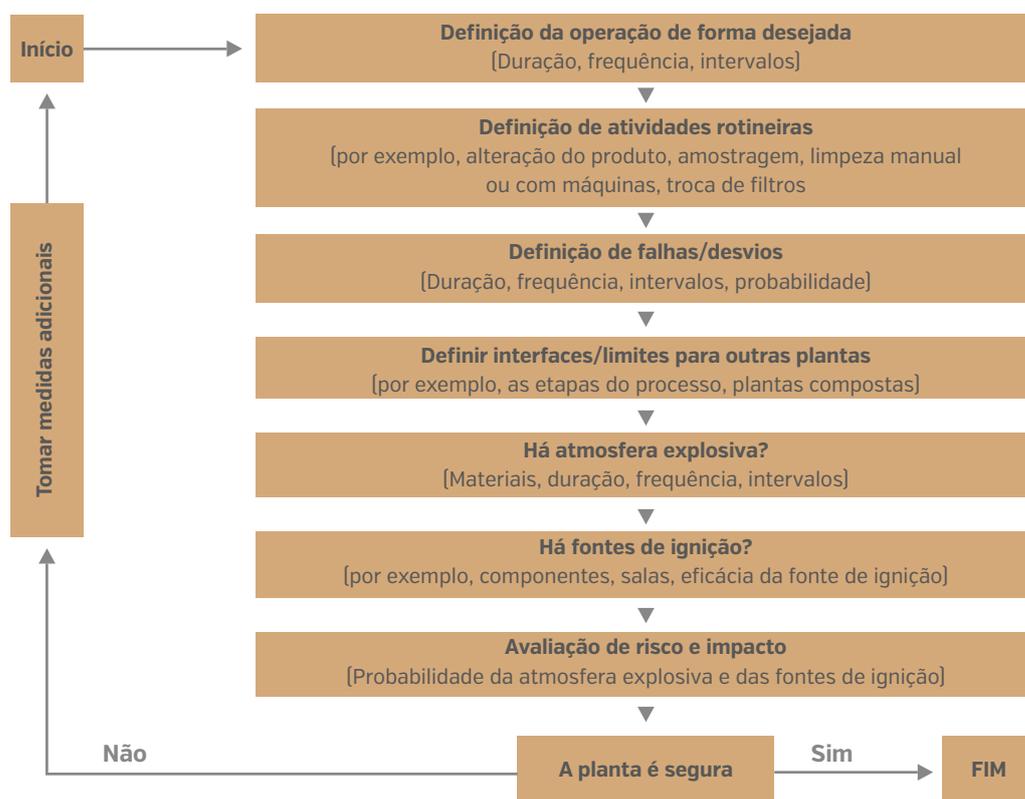
O estudo de análise e a avaliação de riscos devem ser revisados periodicamente, de maneira a identificar novas situações de risco. Assim, o aperfeiçoamento das operações realizadas é garantido, de forma que a operação das instalações seja segura e em conformidade com a legislação pertinente.

A identificação dos riscos deve utilizar a técnica qualitativa APP – Análise Preliminar de Perigo –, também conhecida como APR – Análise Preliminar de Risco –, que tem como objetivo identificar os perigos presentes nas instalações, que podem propiciar efeitos indesejáveis. Esse procedimento pode ser adotado para novas instalações ou para unidades já operadas, permitindo a realização de uma revisão dos procedimentos de segurança existentes.

A elaboração da APP inicia-se com a reunião de todos os projetos, dados e informações sobre a unidade em estudo. Pode-se basear, também, em levantamentos já realizados de plantas similares.

A APP é apresentada na Figura 10.3.

Figura 10.3: Análise de Perigos e Riscos.



Fonte: Elaboração própria.

Todo o processo de avaliação e gestão de perigos e riscos deve ser devidamente documentado. O objetivo da documentação de avaliação de segurança é fornecer um registro permanente dos resultados finais dessa avaliação, além de registrar argumentos e provas que demonstrem que os riscos associados à implementação de um sistema de segurança ou à mudança de hábitos foram reduzidos a um nível tolerável.

Além de descrever o resultado da avaliação de segurança, a documentação deve conter um resumo dos métodos utilizados, dos perigos identificados e das medidas de minimização a serem adotadas e que devem atender aos critérios de avaliação da segurança. O registro de perigos sempre deve estar incluído.

A documentação deve ser preparada com detalhamento suficiente para que qualquer pessoa, ao ler, possa entender não apenas quais decisões foram tomadas, mas também quais foram as justificativas para a classificação dos riscos como aceitáveis ou toleráveis. É importante constar, na documentação, a inclusão dos nomes das pessoas que participaram do processo de avaliação dos perigos e riscos.

Vale salientar que uma gestão eficaz defende a saúde, a segurança e o bem-estar dos trabalhadores, reduzindo riscos e aumentando a proteção contra lesões ou doenças resultantes da atividade profissional.

10.10 Gestão de incidentes, emergências e danos

O Sistema de Gestão da Segurança e Saúde do Trabalho (SGSST) inclui a organização, os processos, as instruções e a documentação da planta, garantindo assim a sua integridade operacional.

De acordo com a Resolução nº 5 da ANP (2014), um incidente é qualquer ocorrência, decorrente de fato ou ato intencional ou acidental, envolvendo:

- » Risco de dano ao meio ambiente ou à saúde humana;
- » Dano ao meio ambiente ou à saúde humana;
- » Prejuízos materiais ao patrimônio próprio ou de terceiros;
- » Ocorrência de fatalidades ou ferimentos graves para o pessoal próprio ou para terceiros; e
- » Interrupção não programada na planta.

O gerenciamento de incidentes objetiva assegurar que todas as ocorrências sejam resolvidas e os serviços sejam restaurados o mais rápido possível, de acordo com as prioridades definidas e dentro das escalas de tempo acordadas, com o mínimo impacto para a planta.

A gestão de danos começa com a prevenção da ocorrência de incidentes, o que significa a implantação do SGSST.

O levantamento de aspectos/perigos e impactos/riscos permitirá a identificação das possíveis situações de risco de acidentes e/ou emergências. Cada uma dessas situações deverá ter uma estratégia de ação que visa à mitigação dos impactos e riscos, passando a fazer parte integrante de um Plano de Emergência, sendo este composto de ações, definição de pessoal, materiais e equipamentos.

O Serviço Especializado em Engenharia de Segurança e em Medicina do trabalho – SESMT – deverá elaborar o Plano de Emergência específico da planta, que definirá ações de controle para:

- » Necessidade de atendimento para emergências médicas;
- » Extinção de incêndios, queimadas e explosões;
- » Abandono de áreas e evacuação da planta;
- » Catástrofes, inundações e soterramentos;
- » Situações de vandalismo e invasões; e
- » Liberações/derramamento de produtos danosos ao meio ambiente.

As tratativas do Plano de Emergência deverão contemplar, no mínimo, os seguintes itens:

- » Estabelecer as regras para comunicação em caso de emergência;
- » Prever um sistema de alarme, rádios e iluminação de emergência;
- » Listar o pessoal de contato e materiais emergenciais disponíveis;
- » Relacionar os endereços e telefones úteis, como: Corpo de bombeiros, Polícia com atuação ambiental, hospitais e postos de saúde;
- » Relacionar os brigadistas e coordenadores de emergências;
- » Elaborar Plano de treinamento teórico, prático e simulações;
- » Elaborar Plano de contingenciamento.

A planta deverá estar preparada para o atendimento de emergência e precisará ter, no mínimo:

- » Pessoal treinado para prestação de serviço de emergência;
- » Sistema de comunicação testado e aprovado;
- » Posto médico com equipamentos para prestar os primeiros socorros, em concordância com a legislação específica;
- » Áreas de risco devem estar equipadas com macas;
- » Extintores portáteis, hidrantes e mangueiras – sistema de combate a incêndios;
- » Iluminação de emergência e lanternas;
- » Equipamentos para resgate em altura e em espaços confinados;
- » Sistemas de contenção de produtos químicos líquidos;
- » Material absorvente de vazamentos;
- » Ambulância adequadamente equipada, em concordância com a legislação específica; e
- » Caixa de primeiros socorros.

O Plano de Emergência deverá ser aplicado, ou simulado, e, após cada teste ou incidente, deverá ser realizada uma análise através da observação das ações do procedimento de atendimento à emergência. Os treinamentos devem ser registrados e documentados.

11

LEGISLAÇÃO

O biogás perpassa diferentes áreas e sofre influência de diversos marcos legais e normas. Para fornecer uma supervisão sobre os assuntos legais, foram compiladas as principais normas e legislações aplicáveis à implantação e operação de plantas de biogás que utilizem como substrato o esgoto sanitário ou o lodo. Realizou-se uma ampla pesquisa junto aos órgãos que regulamentam os setores ambiental, elétrico, trabalhista e agropecuário. Adicionalmente, realizou-se uma busca junto às entidades que estabelecem normas para a elaboração de projetos e realização de ensaios laboratoriais.

De forma a facilitar a análise das normas e legislações, elas foram agrupadas em 5 categorias: Norma; Legislação Ambiental; Energia Elétrica e Gás; Segurança; e, Composto. Como resultado desse levantamento, essas categorias e seus conteúdos são apresentados no anexo B, com o objetivo de informar resumidamente as principais normativas aplicáveis ao tema.

12

OPORTUNIDADES, DESAFIOS E PERSPECTIVAS SOBRE O USO DE BIOGÁS DE ETEs NO BRASIL

Contextualização

Os serviços de coleta e tratamento de esgotos no Brasil devem aumentar expressivamente nas próximas duas décadas, de acordo com as metas do Plansab. O país, que hoje trata menos de 40% dos esgotos sanitários nele gerados, aumentará o índice de tratamento de esgotos para mais de 90% até 2033, caso as metas propostas no Plansab sejam atendidas. Além disso, a eficiência dos sistemas existentes e o crescente consumo energético no setor de saneamento apresentam uma série de oportunidades de melhoria. O desafio dos próximos anos não é apenas universalizar os serviços de coleta e tratamento de esgotos, mas fazê-los com qualidade e de forma sustentável.

Adicionalmente, com o aumento do rigor das legislações ambientais, o setor tende a sofrer, cada vez mais, pressão para aumentar a eficiência dos seus processos de tratamento, minimizando as emissões de gases indutores do efeito estufa e reduzindo a produção de resíduos. O resultado, possivelmente, será o advento de ETEs mais mecanizadas, e, conseqüentemente, mais *energo-intensivas*.

Em países industrializados, o biogás (subproduto do tratamento de esgotos sanitários) é amplamente utilizado, tanto para geração de energia elétrica quanto para a secagem do lodo. No Brasil, ainda não se percebe que os subprodutos podem ter valor agregado e, portanto, não são vistos como recursos energéticos que podem gerar receitas.

No Brasil, o consumo de energia elétrica representa, hoje, o segundo maior custo operacional para as prestadoras de serviço de água e esgoto, atrás, apenas, dos gastos com mão de obra (MME, 2011), sendo que, em alguns casos, esse consumo já é a maior despesa operacional. Adicionalmente, a gestão do lodo residual pode representar, em alguns casos, até 60% dos custos operacionais em uma ETE (Andreoli, Fernandes & De Souza, 2001).

Os digestores anaeróbios de lodo, assim como os reatores UASB, apresentados neste Guia, são tecnologias de tratamento que produzem biogás como um de seus subprodutos. A não utilização e a emissão do biogás na atmosfera causa impactos negativos ao meio ambiente, em especial devido ao seu potencial de aquecimento global (UNFCCC, 2014). Além disso, tal prática, normalmente, está associada a problemas de maus odores nas comunidades vizinhas às ETEs. Por outro lado, a recuperação e o aproveitamento energético do biogás pode, por exemplo, contribuir para reduzir a quantidade de lodo aterrado, gerar eletricidade e, conseqüentemente, reduzir os custos operacionais de uma ETE, além de proporcionar benefícios sociais e ambientais.

Viabilidade do uso de biogás no Brasil

Existe a crença, no setor de saneamento brasileiro, de que o uso energético do biogás é uma solução ainda para o futuro. Muitas prestadoras desse serviço alegam que a principal razão para não haver mais projetos é a falta de viabilidade financeira.

Como este é um mercado muito novo, em que parte significativa dos equipamentos são importados, o setor ainda carece de preços de referência, como é o caso de um mercado mais maduro. Mesmo assim, já existem al-

guns projetos em funcionamento, que entraram em operação nos últimos anos, e outros em fase de projeto e construção.

Em um estudo recém publicado, concluiu-se que ETes concebidas para atender entre 100.000 e 200.000 habitantes teriam condições de usar o biogás para a geração de calor e eletricidade com taxas internas de retorno entre 8 e 25%. Para ETes com capacidade para atender entre de 200.000 e 450.000 habitantes, essas taxas poderiam alcançar até 80% (Valente, 2015). Outras publicações, atualmente em finalização (PROBIOGAS, 2015b; Rosenfeld *et al.*, 2015), calculam a viabilidade para ETes com população equivalente de 100.000 habitantes. A solução com geração de energia elétrica é de 7 a 10% (dependendo da tecnologia) mais econômica nos custos anualizados do que a solução sem geração de energia (PROBIOGAS, 2015b).

A utilização de energia térmica e elétrica resulta em uma redução de custos de 15 a 20% (PROBIOGAS, 2015b), indicando que o limite de viabilidade poderá estar abaixo de 100.000 habitantes, no caso de utilização dos dois tipos de energia.

Os modelos hoje existentes consideram o uso do biogás para a geração elétrica, para a secagem do lodo ou ambos. Consequentemente, os principais custos evitados (receitas), utilizados na análise de viabilidade desses projetos, são: custo da tarifa elétrica local, e custo com o transporte e disposição final do lodo.

Apesar de não poderem ser gerenciadas diretamente pelo setor de saneamento, o conhecimento sobre essas duas variáveis é muito importante para garantir uma análise de viabilidade adequada sobre um projeto ao longo da sua vida útil.

Tarifa de energia elétrica

Um projeto que gera eletricidade a partir do biogás deve garantir que a energia produzida tenha um custo inferior ao daquela consumida da rede elétrica. É importante destacar que a tarifa paga para a concessionária de energia varia por estado ou município, portanto a viabilidade deve ser calculada caso a caso.

Quanto à tendência, acredita-se que, nos próximos anos, ocorrerá um aumento na demanda de energia elétrica no país, caso seja ratificado o cenário de fortalecimento e crescimento da economia brasileira. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia elétrica no país vai crescer 4,3% a.a., em média, nos próximos dez anos (EPE, 2014). Isso significa que, para garantir a segurança do sistema, a capacidade instalada de geração de energia elétrica terá que continuar crescendo em ritmo acelerado.

O setor elétrico, que, durante as últimas décadas, sempre contou com uma energia firme de origem hidrelétrica, um das mais baratas existentes, tem sido questionado sobre a sustentabilidade da perpetuação desse modelo. Um dos motivos é a recente crise hídrica na região Sudeste, que fez com que a geração termelétrica fosse acionada além do previsto, resultando em um aumento das tarifas de energia elétrica muito acima das expectativas do setor energético.

O aumento da tarifa não é o único efeito negativo da geração termoelétrica. Como tal geração ocorre majoritariamente a partir da transformação de combustíveis fósseis, ela apresenta uma elevada pegada de carbono. Assim, para continuar crescendo, sem aumentar as emissões de gases induto-

res do efeito estufa, o setor de energia precisará adotar medidas de incentivo à eficiência energética e geração distribuída por fontes renováveis.

Essas medidas já começaram a ser adotadas. Em 2011 e 2012, foram aprovados, respectivamente, o Plano Nacional de Eficiência Energética (BRASIL, 2011) e a Resolução nº 482 da ANEEL, que define a micro e a mini-geração distribuída, bem como fundamenta o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012). Além disso, no início de 2015, foi aprovada a Portaria nº 23, que trata do consumo de Energia Elétrica e Água em órgãos públicos, e, entre outras recomendações, fala sobre a adoção de geração própria de energia e priorização das fontes renováveis (BRASIL, 2015).

Sendo assim, considerando o cenário de retomada do crescimento econômico do país, de tendência de aumento das tarifas de energia elétrica, de ampliação das ações focadas na mitigação das emissões de gases do efeito estufa, de necessidade de aumento da eficiência nos sistemas de tratamento de esgoto e dos sinais de incentivo para geração distribuída renovável e disseminação das práticas de eficiência energética, a geração de eletricidade nas ETEs, a partir do biogás, passa a ser uma alternativa atrativa do ponto de vista financeiro e ambiental.

Condicionalmento, transporte e disposição final do lodo

Ao secar o lodo, reduz-se o seu volume, diminuindo, também, os custos com o transporte e com a disposição final do material. Além disso, a secagem térmica do lodo pode promover sua higienização, requisito imprescindível, por exemplo, para a reciclagem agrícola do material. Nesse caso, a higienização do lodo dispensa o uso de produtos químicos, como o óxido de cálcio, que é tipicamente aplicado em ETEs que adotam a estabilização alcalina prolongada para remoção de agentes patogênicos. Os custos com o transporte e com a disposição final do lodo na maioria dos municípios é definido pelas empresas que administram os aterros sanitários e podem variar bastante. O gerenciamento do lodo representa um custo operacional significativo para as ETEs.

Para uma ETE que produz um volume de lodo após o desaguamento de 0,12 a 0,15 l/hab.d (com 25% de sólidos totais) (PROBIOGAS, 2015b), é recomendável avaliar a possibilidade de secá-lo, visto que, com isso, pode-se reduzir o volume a ser depositado para 0,03 a 0,04 l/hab.d, ou seja, reduzir o volume (e custo) de transporte e disposição final em 72%.

O lodo anaeróbio seco, contendo de 70 a 90% de sólidos totais apresenta um poder calorífico inferior (PCI) de 2.000 – 3000⁶ kcal/kg, dependendo de sua composição química e de sua origem. Dessa forma, o lodo seco pode ser utilizado como substituto de combustíveis que já são empregados na geração de energia (por exemplo, o carvão vegetal que tem a mesma ordem de grandeza de PCI⁷). Assim, ao utilizar o biogás na secagem, garante-se uma redução no custo operacional com o transporte e disposição final do lodo e pode-se, ainda, gerar energia adicional.

Em 2010, o tratamento de esgoto no Brasil gerou entre 150 e 220 mil toneladas de lodo seco (Pedroza *et al.*, 2010). Considerando-se que o tratamento de esgoto atingia apenas 30% da população urbana no mesmo ano (VALENTE, 2015), espera-se um incremento expressivo na geração de lodo nos próximos anos.

Com a aprovação da Lei nº 12.305/2010, a partir de 2014, apenas a parte não aproveitável dos resíduos (rejeitos) pode ser encaminhada para aterros sanitá-

6: <http://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/10009935/4336040>

7: Lodo anaeróbio
2600 kcal/kg

rios. Isso significa que o lodo das ETEs precisa ser submetido a todos os processos possíveis de tratamento e recuperação por meio das tecnológicas disponíveis e economicamente viáveis, antes de ser depositado em um aterro sanitário.

Apesar da viabilidade econômica ser um critério que varia caso a caso, o envio de lodos para aterros já começa a ser considerado impeditivo em alguns municípios, conforme a lei supracitada. Nos outros casos, a lei tem causado um aumento expressivo do custo da disposição final.

A tendência, assim como no caso da geração de eletricidade, é a de que a utilização do biogás para a secagem térmica do lodo torne-se cada vez mais viável e necessária para a otimização de rotinas operacionais.

Qualidade dos projetos e das obras

O serviço de tratamento de esgotos, por ser um negócio intensivo em capital e de interesse público, deve apresentar retorno dentro de um horizonte de médio a longo prazo. Essa visão, bem aceita na teoria, deveria se refletir na qualidade dos projetos e das obras, o que muitas vezes não é a realidade no setor de saneamento.

Ao economizar na fase de planejamento, de execução da obra e/ou na etapa de compra de equipamentos, na maioria dos casos se está perdendo recursos com manutenção e operação ao longo da vida útil da ETE. Para projetos de biogás, essa realidade é ainda mais válida. Como a perda de gás e a parada da geração de energia afeta diretamente a geração de receita, isso precisa ser evitado para que um projeto de aproveitamento energético tenha retorno.

Os custos estimados para a execução das fases de projeto e preparação da licitação, tão importantes no alcance de um projeto de qualidade, são muitas vezes menosprezados, o que pode acabar comprometendo a qualidade dos equipamentos adquiridos e a execução da obra. A elaboração de termos de referência e de especificações técnicas contendo os requisitos mínimos apresentados neste Guia são imprescindíveis para o sucesso do projeto.

No entanto, este Guia, apesar de ser uma importante referência para o setor de saneamento e auxiliar no melhor entendimento das possibilidades tecnológicas acerca do uso do biogás em ETEs, não substitui o trabalho de uma consultoria especializada.

Para garantir a devida qualidade de um projeto, recomenda-se, portanto, que o projeto executivo e a preparação da licitação sejam realizados por uma empresa ou profissional com experiência no tema. Cabe destacar, ainda, que a capacitação técnica de projetistas e de fiscais de obra é fundamental para a disseminação da prática de aproveitamento energético do biogás de ETEs no Brasil.

Qualidade dos equipamentos

Uma das principais características dos projetos de aproveitamento energético de biogás é que seus custos de investimento são majoritariamente referentes à compra e à montagem de equipamentos. Na avaliação dos custos, portanto, é importante considerar que componentes de baixo custo de investimento podem causar altos custos de operação e manutenção. Isso é fundamental para garantir uma sustentabilidade técnica e econômica.

Dentre os equipamentos utilizados para projetos dessa natureza, os mais custosos são aqueles para converter o biogás em energia e para ar-

mazená-lo e tratá-lo. Muitos desses, por não serem fabricados no Brasil, precisam ser importados, o que torna o valor do câmbio e os impostos de importação fatores relevantes na análise econômica.

Quando se comparam equipamentos utilizados para conversão do biogás, uma variável muito relevante é o seu rendimento energético. No Brasil, existem poucas marcas que fabricam motores e turbinas exclusivos para o biogás e há ainda pouca experiência prática sobre a eficiência desses equipamentos. A maioria dos motores comercializados para biogás no país são motores adaptados e, apesar de significativamente mais baratos, apresentam eficiência inferior àquela tipicamente verificada no mercado internacional. A decisão sobre a melhor alternativa de conversão do biogás ao longo da vida útil da planta, portanto, precisa ser tomada mediante ponderação dessas características.

O mesmo se aplica aos sistemas térmicos e aos equipamentos utilizados no sistema de secagem do lodo. A eficiência térmica desses equipamentos, custos de manutenção, emissões atmosféricas e segurança precisam ser devidamente comparadas.

Na compra dos equipamentos, a existência de uma boa assistência técnica é outro fator a ser considerado. Se uma planta permanece muito tempo parada, por falta de manutenção, há perda de receita.

Qualidade da operação

A vazão do biogás produzido, como apresentado no capítulo 3, é proporcional à carga orgânica do esgoto e/ou lodo e às condições operacionais dos reatores/digestores anaeróbios. Devido às perdas que ocorrem no sistema, porém, o biogás captado dificilmente será igual àquele produzido. Assim, além de projetar e construir uma planta para otimizar a produção e a captação do biogás, é muito importante que a ETE seja bem operada para evitar a perda desse combustível e para salvaguardar as condições ótimas de sua produção.

Muitas ETEs no país ainda são operadas de forma passiva, sendo a atuação do operador limitada a resolver os problemas quando surgem. Em uma ETE com aproveitamento energético de biogás, o papel ativo do operador passa a ser essencial para a sustentabilidade financeira do projeto.

A variação da vazão de biogás captado pode alterar em mais de 100% a escala mínima de viabilidade financeira para o aproveitamento energético em uma ETE (Valente, 2015). Esse dado foi calculado utilizando-se os valores apresentados por Lobato (2011), no capítulo 3, de 17 litros de biogás por habitante por dia para uma ETE com melhores condições de operação; e de 10 litros por habitante por dia para a pior situação.

A conclusão é que, de nada adiantam projeto, obra e equipamentos de qualidade, se a ETE não apresenta índices adequados de produção de biogás, que são dependentes tanto das características do esgoto afluente quanto do projeto e das condições construtivas e operacionais da ETE. Assim, além de investir em projetos, em obras e em equipamentos de qualidade, é essencial capacitar os profissionais responsáveis pela operação das ETEs. Nesse contexto, recomenda-se que os prestadores de serviços criem programas de capacitação permanente para operadores de ETEs que contemplam sistemas de recuperação energética de biogás.

Considerações finais

O Brasil possui uma quantidade significativa de ETES com tratamento anaeróbio e ainda existem muitas ETES a serem construídas. O potencial de aproveitamento do biogás é imenso e, como apresentado, cada vez torna-se mais viável financeira e economicamente.

Considerando o atual contexto do setor de saneamento, o maior desafio para o aproveitamento energético de biogás não é técnico ou financeiro. Aqueles que até agora realizaram projetos dessa natureza declaram que a principal dificuldade encontrada foi convencer interna e externamente as suas empresas acerca da viabilidade técnica e econômica de tais projetos.

Nesse sentido, a sensibilização de todos os envolvidos no processo, desde os agentes governamentais e as instituições financeiras até os gestores e operadores nas prestadoras de serviço, é crucial para que essa alternativa seja nacionalmente fomentada e multiplicada.

Somado a isso, o intercâmbio de informação sobre os projetos em operação e a realização de pesquisas são essenciais para garantir uma maior clareza acerca dos custos e parâmetros de investimento e operação e, conseqüentemente, uma maior qualidade dos projetos e previsibilidade sobre sua viabilidade.

O Guia de Aproveitamento Energético de Biogás em ETES é um importante passo rumo à melhoria na qualidade do diálogo e padronização dos projetos dessa natureza. Espera-se que a sua publicação facilite a realização de mais projetos de aproveitamento energético de biogás em ETES no Brasil.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, Lalit Kumar; HARADA, Hideki; OKUI, Hiroyuki. **Treatment of Dilute Wastewater in a UASB Reactor at a Moderate Temperature: Performance Aspects.** Journal of Fermentation and Bioengineering, v. 83, n. 2, p. 179-184, 1997.

ALEMANHA. **Diretriz Técnica Alemã para controle da Poluição Atmosférica – TA Luft: Primeiro Regulamento Administrativo Geral da Lei Alemã de Contra Imissões.** Diário Oficial Ministerial da Alemanha. Alemanha. [S.l.], 2002

ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final.** 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010. [Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 6].

ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F.; DE SOUZA, S. G. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2012.

ANP. **Resolução ANP Nº8,** de 30 de janeiro de 2015 - DOU 2.2.2015. Agência Nacional de Petróleo. 2015

ARAUTERM. www.arauterm.com.br, 2015. Disponível em: <http://www.arauterm.com.br/pdf/tbl_poder_calorifico_inferior.pdf>. Acesso em: 09 Fevereiro 2015.

ARCEIVALA, S.J., 1981, **Wastewater treatment and disposal.** Marcel Dekker, New York.

AQUINO, Sérgio F. de; CHERNICHARO, Carlos A. L.. **Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 152-161, abr/jun. 2005.

LESCHBER, R.; LOLL, U. **ATV-Handbuch Klärschlamm.** 4ª ed., Editora Ernst und Sohn, Berlim, 1996.

BARBOSA, Vera L.; STUETZ, Richard M. **Treatment of hydrogen sulfide in biofuels.** In: LENS, P.; WESTERMANN, Peter; HABERBAUER, M.; MORENO, A. [Ed.]. **Biofuels for fuel cells: renewable energy from biomass fermentation.** Londres: IWA Publishing, 2005, 524 p.

Bauer, F. *et al.* **Biogas upgrading – Review of commercial technologies,** Svenskt Gastekniskt Center AB, Malmö. 2013.

BEGA, Egídio A.; DELMÉE, Gerad J.; COHN, Pedro E.; BULGARELLI, Roberval; KOCH, Ricardo; FINKEL, Vitor S. **Instrumentação Industrial** – 3ª ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

BEIL, M. **Biogasaufbereitung zu Biomethan;** Atas do 6º Diálogo de Hanau, realizado em 21.2.2008, Institut für Solare Energieversorgungstechnik na Universitätsgesellschaft Kassel e. V. [ISET] [editor], Kassel, 2008.

BELLI FILHO, P *et al.* **Tratamento de odores em sistemas de esgotos sanitários.** In: CHERNICHARO, Carlos Augusto L. [Coordenador]; **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.** PROSAB 2. Belo Horizonte, p. 455-490, 2001.

BISCHOFBERGER, W.; DICHTL, N.; ROSENWINKEL, K.-H.; SEYFRIED, C. F.; BOHNKE, B. **Anaerobtechnik.** Berlin. Heidelberg: Springer-Verlag, 718 p., 2005.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia**, v. 17, n. n. 1/2, p. 27-32., 2009.

BRASIL, Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 - **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**

BRASIL. **Plano Nacional de Eficiência Energética. Premissas e Diretrizes Básicas.** Ministério de Minas e Energia – MME. Brasília, p. 134. 2011.

BRASIL. Portaria nº 23, 12/02/2015. D.O.U. MP, 2015. Disponível em: <http://www.planejamento.gov.br/secretarias/upload/Legislacao/Portarias/2015/150213_port_23.pdf>. Acesso em: 05 Março 2015.

BRASIL. Ministério das Cidades. PLANSAB - Plano Nacional de Saneamento Básico. **Plano Nacional de Saneamento Básico: mais saúde com qualidade de vida e cidadania.** Brasília - DF, 2013.

BRAUN, R; WELLINGER, A. 2002. **Potential of Co-digestion.** Disponível em: <<http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/Potential%20of%20Codigestion%20short%20Brosch221203.pdf>>. Acesso em: 16 de setembro de 2014.

Cavalcanti P.F.F., van Haandel A. and Lettinga G. [2001]. **Polishing ponds for post-treatment of digested sewage part 1: flow-through ponds.** Wat. Sci. Technol., 44(4), 237-245.

CHERNICHARO, Carlos A. L.; STUETZ, Richard M. **Improving the design and operation of UASB reactors for treating domestic wastewater: management of gaseous emissions.** In: IX Latin American Workshop and Seminar on Anaerobic Digestion, 2008, Eastern Island - Chile. Anais... Eastern Island - Chile: IWA, 2008. p. 504-512.

CHERNICHARO, Carlos A. L. **Reatores anaeróbios.** 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. [Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5].

CHERNICHARO, Carlos A. L. **Reatores anaeróbios.** 1. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

CONSTANT, M. *et al.* **Biogas End-Use in the European Community.** Elsevier Science Publisher, England. 1989.

DAVID, A.C. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio.** 2002. Dissertação [Mestrado em Energia]. Programa de Interunidades de Pós-graduação em Energia – PIPGE (EP/FEA/IEE/IF), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

DWA-M 212. **Equipamento Técnico de Usinas de Biogás de esgoto em ETEs.** DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef 2008.

DWA-A 216. **Verificação e análise energética – instrumentos para a otimização energética de estações de tratamento de esgoto.** DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef 2013.

DWA-M 361. **Tratamento do Biogás.** DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef 2011.

DWA-M 363. **Origem, Tratamento e Utilização do Biogás.** DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef 2010.

DWA-M 380. **Codigestão em Digestores Anaeróbios de Lodo Municipais, Estações de Tratamento de Resíduos Sólidos e Usina de Biogás Agrícolas.** DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef 2009.

DROSG, B. **Process Monitoring in biogas plants.** IEA Bioenergy – Task 37 Technical Brochure, December 2013.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023.** Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Brasília, p. 434. 2014.

FNR. **Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz.** Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e. V. [FNR], Leipzig, 2006.

FNR. **Guia Prático do Biogás – Geração e Utilização.** Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e. V. [FNR], Leipzig, 2010.

FNR. **Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung.** Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e. V. [FNR], Leipzig, 2012.

GLÓRIA, R. M. **Estudo dos processos de formação, acumulação, emissão e oxidação de sulfeto de hidrogênio em reatores UASB tratando esgotos domésticos.** 53p. 2009. Dissertação [Mestrado em Saneamento] - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

GRANDE, Carlos A. [2012]. **Biogas Upgrading by Pressure Swing Adsorption.** SINTEF Materials and Chemistry, Oslo, Norway.

HAGMANN, M. **Faulgasreinigung vor der Gasverwertung in Blockheizkraftwerken.** Palestra do workshop da DWA “Energieoptimierung und BHKWs” (otimização energética e CHPs), de 19 de junho de 2008, realizado na cidade de Neuhausen auf den Fildern.

HARTWIG, P.; GERDES, D.; SCHREWE, N.. **Energieautarker Kläranlagenbetrieb.** aqua consult Ing. GmbH. Hannover, 2010.

HOFMANN *et al.* **Evaluierung der Möglichkeit zur Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz.** Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Leipzig, 2005.

HOHMANN, R. **Siloxanos no biogás – métodos de separação;** palestra no Encontro do Biogás da ATV-DVWK em Berlim, fev. 2004.

HYDRO INGENIEUR. Fotos disponíveis no site da empresa. <http://www.hydro-ing.at/index.html>. Acesso em: 10/03/2015.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. STOCKER, T. F., D. QIN, G. K. PLATTNER, M. TIGNOR, S. K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX, P. M. MIDGLEY [eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

ISSET. **Biogasaufbereitung zu Biomethan.** Atas do 6º Diálogo de Hanau, realizado em 21.02.2008 em Kassel: Institut für Solare Energieversorgungstechnik. Verein an der Universität Kassel e. V. (ISSET), Kassel.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C.A. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2005. p. 681.

KELLER, J.; HARTLEY, K. **Greenhouse gas production in wastewater treatment: process selection is the major factor.** Water Science and Technology, v. 47, n. 12, p. 43-48, 2003.

LETTINGA G. *et al.* **High-rate anaerobic waste-water treatment using the UASB reactor under a wide range of temperature conditions.** Biotechnology and Genetic Engineering Reviews. 2, 253-284, 1984.

LETTINGA G. *et al.* **Biological Wastewater Treatment. Part I: Anaerobic wastewater treatment.** Lecture Notes. Wageningen Agricultural University, ed. Jan. 1996.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgotos domésticos.** Tese de Doutorado. UFMG – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte – MG, 2011.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering - Treatment and Reuse,** 4. ed. New York, McGraw-Hill Companies, 2003.

MME. **Plano Nacional de Eficiência Energética. Premissas e Diretrizes Básicas.** Ministério de Minas e Energia - MME. Brasília, p. 134. 2011.

NBR 12209. **Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário.** Rio de Janeiro, ABNT. 2011.

NOYOLA, A.; CAPDEVILLE, B.; ROQUES, H. **Anaerobic treatment of domestic sewage with a rotating stationary fixed-film reactor.** Water Research, v. 22, n. 12, p. 1585-1592. 1988.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. **Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery.** *Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology*, v.5, p. 93-114. 2006.

PAGLIUSO, J. D.; PASSIG, F. H.; VILLELA, L. C. H. **Odour treatment and energy recovery in anaerobic sewage treatment plants.** In: VII Oficina e Simpósio Latino-Americano de Digestão Anaeróbia, Mérida, Yucatán - México, IWA/FEMISCA. 2002.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K.J.B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem.** 121 p. 2007. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/manuais/concproceqsec_07.pdf>. Acesso em: 13 de abril de 2015.

PEDROZA, M. M. *et al.* **Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão.** *Revista Liberato, Novo Hamburgo*, v. 11, p. 89-118, Jul/Dez 2010.

PERRY, R.H.; GREEN, D.W. **Perry's chemical engineers' handbook.** 7 ed. New York: McGraw-Hill. 1997

PERSSON, M. **Evaluation of Biogas Upgrading Technologies.** Report SCG 142, Swedish Gas Centre. 2003.

PERSSON, M.; JONSSON, O.; WELLINGER, A.: **Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection.** In: IEA Bioenergy Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas. Malmö, Aadorf, 2006.

PIEROTTI, S. M. **Avaliação da partida de reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), em escala real, sob condições hidráulicas desfavoráveis.** 2007. 141 p. Dissertação [Mestrado em Hidráulica e Saneamento] – Escola de Engenharia de São Carlos-SP, 2007.

POLSTER A.; BRUMMACK J. **Preiswerte Biogasentschwefelung an Sekundärrohstoffen.** Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik da Universidade de Dresden, Dresden, 2005.

POSSETTI, G. R. C., JASINSKI, V. P., ANDREOLI, C. V., BITTENCOURT, S., CARNEIRO, C. **Sistema térmico de higienização de lodo de esgoto movido a biogás para ETEs de médio e pequeno porte.** XV Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, 2012

POSSETTI, G. R. C *et al.* **Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico.** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), Curitiba, 2013.

PROBIOGAS. Material adaptado de BTE [Beratungsteam Energie und Verfahrenstechnik, Alemanha, 2004] apresentado no curso **“Fundamentos de Biogás – Parte 1”** 11/2013 Brasília.

- PROBIOGAS. **Estudo de viabilidade técnica-econômica do uso do biogás para cogeração em ETEs**. [em preparação] Brasília, 2015
- QUASIM, S. R. **Wastewater treatment plants: planning, design, and operation**. CBS College Publishing, Estados Unidos, 1985.
- RANDS, M.B *et al.* **Compost filters for H₂S removal from anaerobic digestion and rendering exhausts**. Journal Water Pollution Control Federation, v. 53, p. 185-189. 1981.
- RASI, S.; VEIJANEN, A.; RINTALA, J. **Trace compounds of biogas from different biogas production plants**. Energy, v. 32, p. 1375-1380, 2007.
- ROSA, A. P.; SCHMIDT, A. D. U.; BORGES, J. M.; CHERNICHARO, C. A. L. **Acumulação e remoção de espuma em reatores UASB: Estudo de Caso ETE Laboreaux – Itabira/MG**. . In: Anais do 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013.
- ROSENFELDT, S.; CABRAL, C. B. G. ;PLATZER, C. J.; HOFFMANN, H.; ARAUJO, R.A. **Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE**. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.
- ROSSOL, D.; SCHMELZ, K.-G.; HOHMANN, R. **Siloxane im Faulgas**. In: KA – Wasser, Abfall 2003 [50], p. 1043 – 1051, 2003.
- SCHWEIGKOFER, M.; NIESSNER, R. **Removal of siloxanes in biogases**. Journal of Hazardous Materials. v 83, p 183-196, 2001.
- SILVA, T. C. F.; POSSETTI, G. R. C.; COELHO, S.. **Avaliação do Potencial de Produção de Energia a partir do Biogás Gerado no Tratamento de Esgotos Domésticos**. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Florianópolis, ago. 2014.
- SNIS - Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2013**. Disponível em: <www.snis.gov.br>. Acesso em: junho, 2015.
- STATISTISCHES BUNDESAMT *et. al.*: **Abwasser und Klärschlamm in Deutschland** - Statistische Betrachtungen Teil 2: Klärschlamm, Klärgas, Rechen und Sandfanggut - Korrespondenz Abwasser, Abfall · 2015
- SOUZA, C. L. **Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgotos domésticos em reatores UASB**. Tese de Doutorado. UFMG – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte – MG, 2010.
- TUV [Vienna University of Technology], 2012, **Biogas to Biomethane Technology Review**. Disponível em: <bio.methan.at/sites/default/files/BiogasUpgradingTechnologyReview_ENGLISH.pdf> Acesso em: 12 de abril de 2015.

UNFCCC. **AMS-III.H. Methane recovery in wastewater treatment. Small-scale Methodology. Version 17.0. Sectorial Scope 13.** United Nations Framework Convention on Climate Change. CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM. [S.l.]. 2014.

URBAN *et al.* **Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz.** Resultados do estudo de mercado 2007 – 2008. Oberhausen, 2009

USEPA. **Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) and User's Manual, Version 3.02.** U.S. EPA, Office of Research and Development and Clean Air Technology Center. EPA/600/R-05-047. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2005.

VALENTE, Victor. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil /** Victor Bustani Valente. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgoto. Um manual para regiões de clima quente.** Campina Grande, Brasil, Universidade Federal da Paraíba. 1994.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005. [Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. V.1].

WELLINGER, A. & LINDBERG, A. In: **Proceedings of Biogas Event 2000: Kick-Off for a Future Deployment of Biogas Technology** 22-24 November 2000, Eskilstuna, Sweden. 2000.

WHELESS, E.; PIERCE, J. **Siloxanes in landfill and digester gas update.** SWANA 27th LFG Conference. San Antonio, TX. Março, 2004

14

ANEXOS

14.1 Anexo A: Diagramas de Fluxo simplificado - Exemplos

Figura 14.1: Exemplo de diagrama de fluxo simplificado - planta de biogás com gasômetro de baixa pressão no fluxo principal.

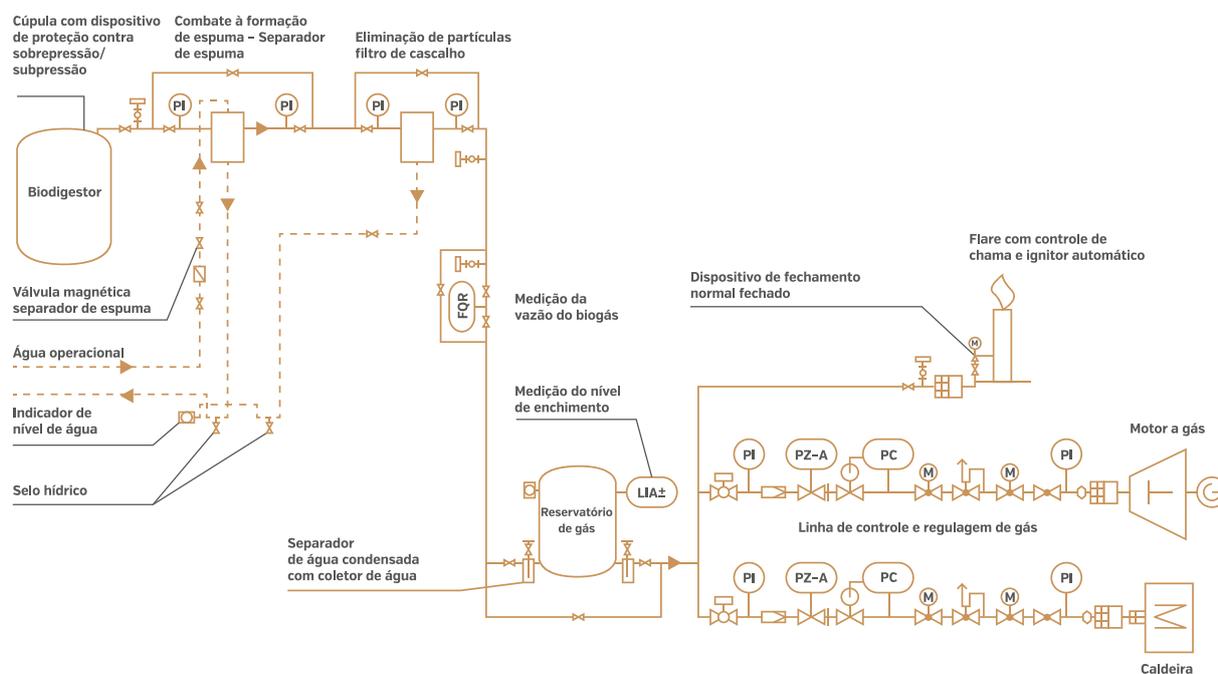


Figura 14.2: Exemplo de um diagrama de fluxo simplificado – planta de biogás com gasômetro não pressurizado no fluxo principal.

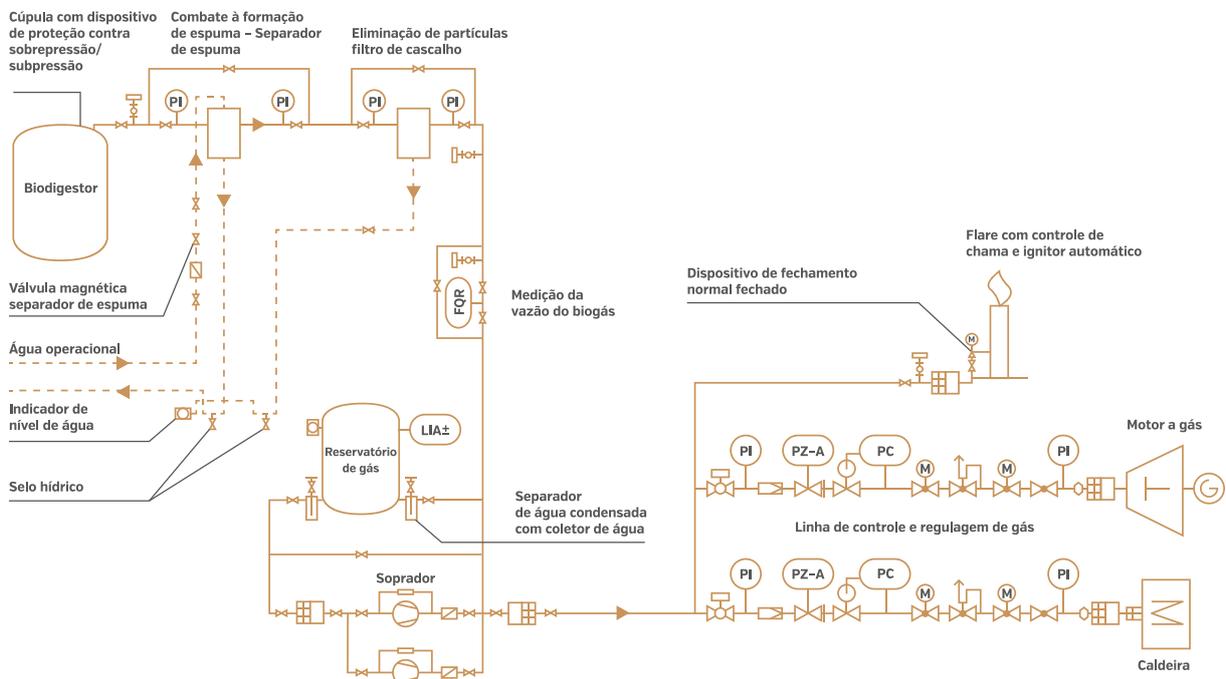
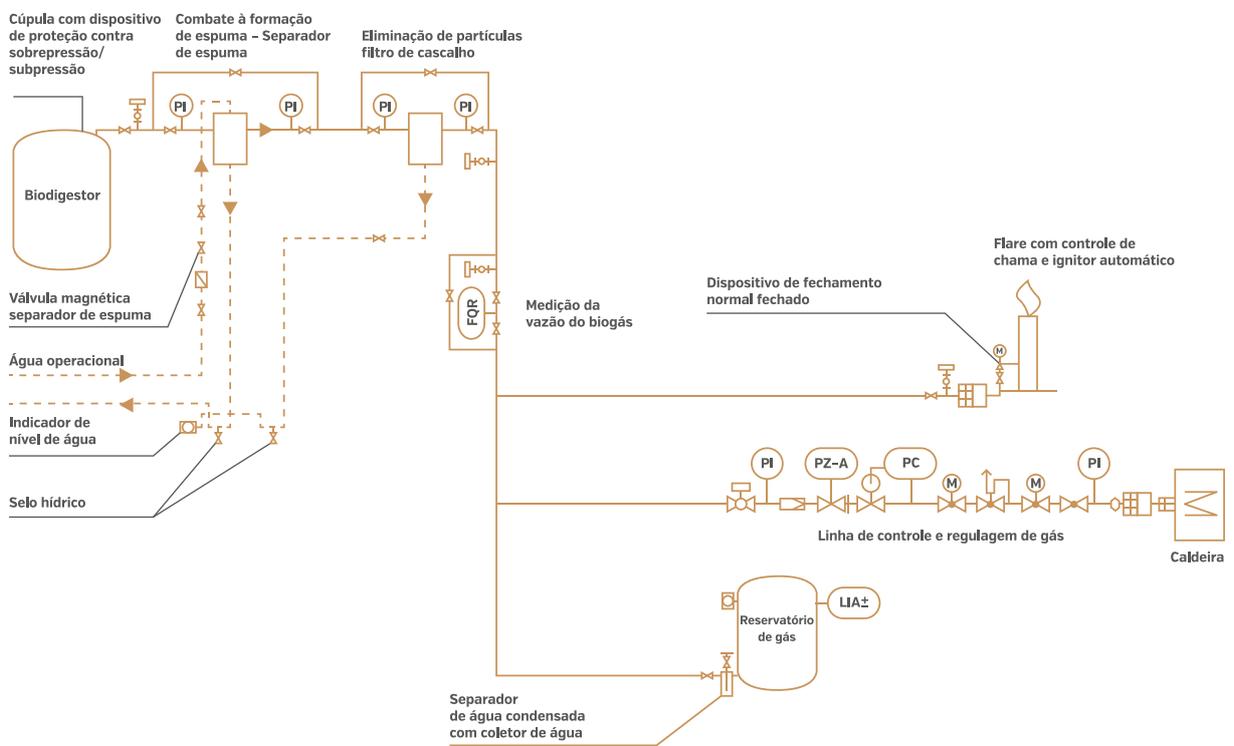


Figura 14.3: Exemplo de um diagrama de fluxo simplificado – biodigestor com gasômetro de baixa pressão em paralelo.



14.2 Anexo B:
Legislação

14.2.1 Normativas

Tabela 14.1: Normativas básicas nacionais e internacionais.

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
ABNT NBR 12.208/1992	Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT	Projetos de Estações elevatórias de Esgoto Sanitário - Procedimento.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 12.207/1992	Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT	Projeto de interceptores de esgoto sanitário - Procedimento.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 12.209/2011	Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT	Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 14.461/2000	Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT	Sistemas para Distribuição de Gás Combustível para redes enterradas; Tubos e Conexões de Polietileno PE 80 e PE 100 - Instalação em Obra por método destrutivo (vala a céu aberto), em que se define Biogás como mistura de gases com predominância do Metano e do Gás Carbônico.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 14.462/2000	Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT	Sistemas para Distribuição de Gás Combustível para redes enterradas - Tubos de Polietileno PE 80 e PE 100 - Requisitos.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 14.463/2000	Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT	Sistemas para Distribuição de Gás Combustível para redes enterradas - Conexões de Polietileno PE 80 e PE 100 - Requisitos.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 14.464/2000	Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT	Sistemas para Distribuição de Gás Combustível para redes enterradas - Tubos e conexões de polietileno PE 80 e PE 100 - Execução de Solda de Topo.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 14.465/2000	Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT	Sistemas para Distribuição de Gás Combustível para redes - Tubos e conexões de polietileno PE 80 e PE 100 - Execução de solda por Eletrofusão.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 16.302/2014	Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT	Qualificação de pessoas no processo construtivo de Edificações - Perfil profissional do soldador e mantenedor de tubos e conexões de polietileno.	http://www.abntcatalogo.com.br/

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
ABNT NBR 14.473/2000	Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT	Tubos e conexões de polietileno PE 80 e PE 100 – Reparo ou acoplamento de novo trecho à rede em carga, com utilização do processo de esmagamento (pinçamento).	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 15.526/2012	Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT	Redes de distribuição interna para gases combustíveis em instalações residenciais e comerciais – Projeto e execução.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 5.410/2004	Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT	Instalações elétricas de baixa tensão – Procedimento.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 9.648/1986	Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT	Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário – Procedimento.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 9.649/1986	Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT	Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário – Procedimento.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBRs 14.467/2000, 14.468/2000, 14.469/2000, 14.470/2000, 14.471/2000	Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT	Normas sobre testes laboratoriais para obtenção da qualidade – Conexões de Polietileno PE 80 e PE 100.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 17.505/2013	Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT	Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 14.903/2014	Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT	Gás natural – Determinação da composição por cromatografia gasosa.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 15.616/2008	Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT	Odoração do gás natural canalizado.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 15.631/2008	Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT	Gás natural – Determinação de compostos sulfurados utilizando cromatografia em fase gasosa.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ABNT NBR 15.765/2009	Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT	Gás natural e outros combustíveis gasosos – Determinação do teor de vapor de água por meio de analisadores eletrônicos de umidade.	http://www.abntcatalogo.com.br/
ASTM D1.945/1996	American Society for Testing and Materials – ASTM	Análise de gás natural por cromatografia gasosa.	http://www.astm.org/

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
ASTM D5.454/1999	American Society for Testing and Materials – ASTM	Teor de vapor de água de combustíveis gasosos usando analisadores de umidade eletrônicos.	http://www.astm.org/
ASTM D5.504/2004	American Society for Testing and Materials – ASTM	Determinação de compostos de enxofre no gás natural e os combustíveis gasosos por cromatografia gasosa e quimiluminescência.	http://www.astm.org/
ASTM D6.228/1998	American Society for Testing and Materials – ASTM	Determinação de compostos de enxofre no gás natural e os combustíveis gasosos por cromatografia gasosa e detecção fotométrica da chama.	http://www.astm.org/
ISO 6.326-1/2007	International Organization for Standardization – ISO	Gás natural, determinação de compostos de enxofre – Introdução geral.	http://www.iso.org
ISO 6.326-3/2007	International Organization for Standardization – ISO	Gás natural – determinação de compostos de enxofre – Parte 3: Determinação do sulfeto de hidrogênio, enxofre mercaptan e sulfureto de carbonilo de enxofre por potenciometria.	http://www.iso.org
ISO 6.326-5/2007	International Organization for Standardization – ISO	Gás natural – A determinação de compostos de enxofre – Parte 5: método de combustão Lingener.	http://www.iso.org
ISO 6.327/2008	International Organization for Standardization – ISO	Análise de gases – Determinação do ponto de orvalho da água do gás natural.	http://www.iso.org
ISO 6.974-1/2012	International Organization for Standardization – ISO	Gás natural – Determinação da composição com a incerteza definida por cromatografia gasosa – Parte 1: Diretrizes para análise sob medida.	http://www.iso.org
ISO 6.974-5/2014	International Organization for Standardization – ISO	Gás natural – Determinação da composição com a incerteza definida por cromatografia gasosa – Parte 5: Determinação do azoto, dióxido de carbono e C1 a C5 e C6 + hidrocarbonetos para um laboratório e online sistema de medição utilizando três colunas.	http://www.iso.org
ISO 10.101-1/1993	International Organization for Standardization – ISO	Gás natural – Determinação da água pelo método de Karl Fischer – Parte 1: Introdução.	http://www.iso.org

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
ISO 10.101-2/1993	International Organization for Standardization – ISO	Gás natural – Determinação da água pelo método de Karl Fischer – Parte 2: Procedimento de Titulação.	http://www.iso.org
ISO 10.101-3/1993	International Organization for Standardization – ISO	Gás natural – Determinação da água pelo método de Karl Fischer – Parte 3: procedimento Coulometric.	http://www.iso.org
ISO 10.715/1997	International Organization for Standardization – ISO	Gás natural – Orientações de amostragem.	http://www.iso.org
ISO 11.541/1997	International Organization for Standardization – ISO	Gás natural – Determinação do teor de água em alta pressão.	http://www.iso.org
ISO 18.453/2004	International Organization for Standardization – ISO	Natural gas – Correlation between water content and water dew point.	http://www.iso.org
ISO 19.739/2004	International Organization for Standardization – ISO	Gás natural – Determinação de compostos de enxofre utilizando cromatografia gasosa.	http://www.iso.org
Termo de referência para apresentação de estudo de impacto ambiental (EIA) e relatório de impacto ambiental (RIMA) sistema de biometanização de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais – SEMAD	Visa a orientar a elaboração de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) em atividades que são gerados lodos em estações de tratamento biológico de efluentes líquidos compatíveis com os esgotos sanitários.	http://www.meioambiente.mg.gov.br/

14.2.2 Legislação ambiental

Tabela 14.2: Legislação ambiental

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
CONAMA 237/1997	Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA	Licenciamento ambiental de atividades potencialmente poluidoras.	http://www.mma.gov.br/
CONAMA 357/2005	Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA	Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.	http://www.mma.gov.br/
CONAMA 375/2006	Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA	Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.	http://www.mma.gov.br/
CONAMA 382/2006	Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.	http://www.mma.gov.br/
CONAMA 003/1990	Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA	Padrões para definir pontos críticos de emissão e dispersão de poluentes atmosféricos.	http://www.mma.gov.br/
Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH 01/2008	Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM - Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CERH (MG)	Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.	http://www.siam.mg.gov.br/
Deliberação Normativa COPAM 74/2004	Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM (MG)	Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, de empreendimentos e atividades modificadoras do meio ambiente passíveis de autorização ou de licenciamento ambiental no nível estadual. Determina normas para indenização dos custos de análise de pedidos de autorização e de licenciamento ambiental, e dá outras providências (atividade: Produção de biogás).	http://sisemanet.meioambiente.mg.gov.br/
Decreto 43.216/2011	Legislação Estadual (RJ)	Regulamenta a lei nº 5.690, de 14 de abril de 2010, que dispõe sobre a política estadual sobre mudança global do clima e desenvolvimento sustentável.	http://www.rj.gov.br/

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Decreto 58.107/2012	Legislação Estadual (SP)	Institui a Estratégia para o Desenvolvimento Sustentável do Estado de São Paulo 2020, e dá providências correlatas. Fomenta o aumento do uso do biogás.	http://www.al.sp.gov.br/
Decreto nº 59.659 de 04 de dezembro de 2012	Legislação Estadual (SP)	Regulamenta a Lei de nº 5.690 de 14 abril de 2010, dispondo sobre a Política Estadual sobre a Mudança Global do Clima e Desenvolvimento Sustentável.	http://www.al.sp.gov.br/
Decreto nº3.453-R/2013	Legislação Estadual (ES)	Dispõe sobre a Política Estadual de incentivo às energias renováveis, tais como: eólica, solar, biomassa (madeiras, oleaginosas, algas marinhas, resíduos da agropecuária, esgotos domésticos e efluentes industriais, e gases provenientes de aterros sanitários - biometano), e outras fontes renováveis, visando a incentivar a produção e o consumo desses energéticos.	http://www.al.es.gov.br/
Resolução INEA 31/2011	Instituto Estadual do Ambiente - INEA (RJ)	Estabelece códigos de atividades adotados pelo INEA para enquadramento de empreendimentos que estão sujeitos ao licenciamento ambiental. Enquadra empreendimentos que coletam ou tratam esgoto sanitário, assim como utilizam biogás para a geração de energia elétrica.	http://www.inea.rj.gov.br/
Resolução INEA 32/2011	Instituto Estadual do Ambiente - INEA (RJ)	Estabelece os critérios para determinação do porte e do potencial poluidor dos empreendimentos e atividades, para seu enquadramento nas classes do sistema de licenciamento ambiental (SLAM).	http://www.inea.rj.gov.br/
Resolução CONSEMA 13/2012	Conselho Estadual do Meio Ambiente - CONSEMA (SC)	Aprova a Listagem das Atividades Consideradas Potencialmente Causadoras de Degradação Ambiental passíveis de licenciamento ambiental no Estado de Santa Catarina e a indicação do competente estudo ambiental para fins de licenciamento. Enquadra empreendimentos cujas atividades são Produção de gás e biogás, bem como Sistema de coleta e tratamento de esgotos sanitários.	http://www.sema.rs.gov.br/

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Portaria 01/1994	Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEAMA [ES]	Estabelece classificação técnica de atividades potencial ou efetivamente poluidoras ou degradadoras tendo por objetivo seus respectivos enquadramentos para efeito de cobrança das taxas enunciadas na Lei nº 4.861, de 31 de dezembro 1993, e no Decreto nº 3.735-N de 12 de agosto de 1994.	http://admin.es.gov.br/scripts/adm005_3.asp?cdpublicacao=41754
Lei 14.549/2011	Legislação Estadual [PE]	Altera a Lei nº 14.249, de 17 de dezembro de 2010, que dispõe sobre licenciamento ambiental, infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, e dá outras providências.	http://legis.alepe.pe.gov.br/arquivoTextoaasp?tiponorma=1&numero=14549&complemento=0&ano=2011&tipo=&url=
Resolução 04/2006	Legislação Estadual [RN]	Estabelece parâmetros e critérios para a classificação, segundo o porte e potencial poluidor/degradador, dos empreendimentos e atividades efetiva ou potencialmente poluidores ou ainda que, de qualquer forma, possam causar degradação ambiental, para fins estritos de enquadramento visando à determinação do preço para análise dos processos de licenciamento ambiental.	http://adcon.rn.gov.br/
Resolução 02/2001	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – FEPAM [RS]	Estabelece a alteração dos critérios e os valores de ressarcimento dos custos operacionais e análise do licenciamento ambiental e dá outras providências.	http://www.sema.rs.gov.br/
Deliberação Normativa 02/1990	Conselho de Política Ambiental – COPAM [MG]	Complementa a tabela A-2 do anexo Deliberação Normativa 01/90 referente à classificação de atividade segundo seu potencial poluidor.	http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8641
Instrução Normativa 6/2013	Ministério do Meio Ambiente – MMA	Regulamenta o Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais – CTF/APP.	https://servicos.ibama.gov.br/phocadownload/legislacao/in_ctf_app.pdf
Lei 12.187/2009.	Lei nacional	Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br/
Lei 11.445/2007	Lei Nacional	Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Decreto 44.844/2008	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais – SEMAD (MG)	Estabelece normas para licenciamento ambiental e autorização ambiental de funcionamento, tipifica e classifica infrações às normas de proteção ao meio ambiente e aos recursos hídricos e estabelece procedimentos administrativos de fiscalização e aplicação das penalidades. Aplica-se às atividades que dispõem de esgoto sanitário e resíduos sólidos urbanos.	http://www.siam.mg.gov.br/
Lei Estadual 17.133/2012	Lei Estadual (PR)	Institui a Política Estadual sobre Mudança do Clima no estado do Paraná.	http://www.legislacao.pr.gov.br/
Lei Estadual 5.690/2010	Lei Estadual (RJ)	Institui a política estadual sobre mudança global do clima e desenvolvimento sustentável e dá outras providências.	http://gov-rj.jusbrasil.com.br/
Resolução INEA/ PRES 65/2012	Instituto Estadual do Ambiente – INEA (RJ)	Dispõe sobre a apresentação de plano de mitigação de emissões de gases de efeito estufa para fins de licenciamento ambiental no Estado do Rio de Janeiro.	http://download.rj.gov.br/documentos/10112/1403799/DLFE-58445.pdf/ResolucaoInea65.pdf
Resolução INEA/ PRES 64/2012	Instituto Estadual do Ambiente – INEA (RJ)	Dispõe sobre a apresentação de inventário de emissões de gases de efeito estufa para fins de licenciamento ambiental no Estado do Rio de Janeiro.	http://download.rj.gov.br/documentos/10112/1925947/DLFE-69832.pdf/ResolucaoInea64.pdf
Lei Estadual 4.797/2012	Lei do Distrito Federal (DF)	Lei que estabelece princípios, diretrizes, objetivos, metas e estratégias para a Política de Mudança Climática no âmbito do Distrito Federal.	http://www.asselegis.org.br/
Lei Estadual 9.531/2010	Lei Estadual (ES)	Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas no Estado do Espírito Santo, contendo seus objetivos, princípios e instrumentos de aplicação.	http://www.al.es.gov.br/
Lei Estadual 13.798/2009	Lei Estadual (SP)	Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas em São Paulo.	http://www.ambiente.sp.gov.br/
Lei Estadual 13.594/2010	Lei Estadual (RS)	Institui a Política Gaúcha sobre Mudanças Climáticas – PGMC – fixando seus objetivos, princípios, diretrizes e instrumentos e dá outras providências.	http://www.cetesb.sp.gov.br/
Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de Minas Gerais	Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM (MG)	Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de Minas Gerais 2008.	http://www.feam.br/images/stories/inventario/inventario_de_emissoes_de_gases_-_feam_versao_para_internet.pdf

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Termo de referência para elaboração de estudo de impacto ambiental (EIA) e respectivo relatório de impacto ambiental (RIMA) para projetos de aproveitamento de biogás de aterro sanitário com geração de energia elétrica	Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM (MG)	Visa a orientar a elaboração de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), em cumprimento às Resoluções CONAMA 001/86, 006/87 e 279/01, Decreto Estadual 44.844/2008 e à Deliberação Normativa COPAM 74/2004, a serem apresentados pelos empreendedores ao Sistema Estadual de Meio Ambiente – SISEMA – para instruir o processo de licenciamento prévio de projetos de recuperação de biogás de aterro sanitário, com aproveitamento energético em planta com capacidade instalada superior a 10 MW.	http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/termos_referencia/outubro2010/tr-eia-biogas.pdf
Termo de referência para elaboração de relatório de controle ambiental (RCA) para projetos de aproveitamento de biogás de aterro sanitário com ou sem geração de energia elétrica	Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM (MG)	Visa a orientar a elaboração de Relatório de Controle Ambiental (RCA), em cumprimento à Deliberação Normativa COPAM 74/2004, a ser apresentado pelos empreendedores ao Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SISEMA – para instruir os processos de licenciamento prévio de projetos de recuperação e queima de biogás de aterro sanitário, com ou sem aproveitamento energético.	http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/termos_referencia/outubro2010/tr-rca-biogas.pdf
Termo de referência para apresentação de relatório de controle ambiental (RCA) sistema de biometanização de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica	Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM (MG)	Visa a orientar a elaboração de Relatório de Controle Ambiental (RCA) do processo de Licença Prévia, para instruir o licenciamento de empreendimentos de biometanização de resíduos sólidos urbanos (RSU) e outros resíduos compatíveis, com capacidade de produção de biogás igual ou inferior a 20.000 Nm ³ /d.	http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/termos_referencia/outubro2010/tr-rca-biometanizacao.pdf
Termo de referência para elaboração do plano de controle ambiental (PCA) sistema de biometanização de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica	Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM (MG)	Visa a orientar a elaboração de Plano de Controle Ambiental (PCA) do processo de Licença de Instalação, para instruir o licenciamento de empreendimentos de biometanização de resíduos sólidos urbanos (RSU) e outros resíduos compatíveis.	http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/termos_referencia/2012/tr-pca-biometanizacao-versao-2.0.pdf

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Termo de referência para elaboração de plano de controle ambiental (PCA) para projetos de aproveitamento de biogás de aterro sanitário com ou sem geração de energia elétrica	Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM (MG)	Visa a orientar a elaboração de Plano de Controle Ambiental (PCA) para instruir o processo de Licença de Instalação de empreendimentos de recuperação e queima de biogás de aterro sanitário com ou sem geração de energia elétrica.	http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/termos_referencia/outubro2010/tr-pca-biogas.pdf
Sistemas de tratamento de esgotos sanitários projeto, implantação e operação da ETE - roteiro do estudo.	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (SP)	Roteiro de estudo para elaboração do projeto de implantação e operação da ETE.	http://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/unificado/pdf/ete_projeto_implantacao_operacao.pdf
Instrução Normativa 05/2012 Sistema de coleta e tratamento de esgotos sanitários	Fundação do Meio Ambiente - FATMA (SC)	Definir a documentação necessária ao licenciamento e estabelecer critérios para apresentação dos projetos e planos ambientais para implantação de sistema de coleta e tratamento de esgotos sanitários de pequeno, médio e grande porte, incluindo tratamento de resíduos líquidos, tratamento e disposição de resíduos sólidos, emissões atmosféricas e outros passivos ambientais.	http://www.fatma.sc.gov.br/conteudo/instrucoes-normativas

14.2.3 Energia elétrica e gás

Tabela 14.3: Legislações referentes à energia elétrica e ao gás.

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Decreto 46.296/2013	Legislação Estadual (MG)	Dispõe sobre o Programa Mineiro de Energia Renovável - Energias de Minas - e de medidas para incentivo à produção e uso de energia renovável.	http://www.almg.gov.br/
Decreto 5.163/2004	Lei Nacional	Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorgas de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br/
Lei 8.987/1995	Lei Nacional	Regulamenta o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previstos no art. 175 da constituição federal, e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br/
PORTARIA ANP 32/2001	Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis	Regulamenta o exercício da atividade de revenda varejista de Gás Natural Veicular - GNV - em posto revendedor que comercialize exclusivamente esse combustível.	http://anp.gov.br/
Resolução Normativa ANEEL 167/2005	Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL	Estabelece as condições para a comercialização de energia proveniente de Geração Distribuída.	http://www.aneel.gov.br/
Resolução Normativa ANEEL 390/2009	Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL	Estabelece os requisitos necessários à outorga de autorização para a exploração e alteração da capacidade instalada de usinas termelétricas e de outras fontes alternativas de energia, os procedimentos para registro de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida e dá outras providências.	http://www.aneel.gov.br/
Decreto 6.361/2012	Legislação Estadual (RJ)	Dispõe sobre a política estadual de gás natural renovável - GNR -, criando a Política Estadual de Gás Natural Renovável, visando a incentivar a produção e o consumo de Gás Natural Renovável - GNR - e estabelecendo limite de recebimento de GNR a ser recebido pelas concessionárias.	http://www.rj.gov.br/

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Decreto 59.038/2013	Legislação Estadual [SP]	Institui o Programa Paulista de Biocombustíveis e dá providências correlatas.	http://www.al.sp.gov.br/
Decreto 60.001/2013	Legislação Estadual [SP]	Reduz a base de cálculo para o biogás e biometano de 18% para 12%.	http://www.al.sp.gov.br/
Decreto 60.298/2014	Legislação Estadual [SP]	Introduz alterações no Regulamento do Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação – RICMS.	http://www.al.sp.gov.br/
Projeto de Lei 6.559/2013	Legislação Estadual [SC]	Proposta em tramitação na Câmara dos Deputados estabelece normas para geração, transporte, filtragem, estocagem e geração de energia elétrica, térmica e automotiva com biogás.	http://www.camara.gov.br/
Lei 12.490/2011	Lei Nacional	Atribui à ANP a regulamentação e a autorização das atividades relacionadas com a indústria dos biocombustíveis, como produção, importação, exportação, transferência, transporte, armazenagem, comercialização, distribuição, avaliação de conformidade e certificação da qualidade de biocombustíveis.	http://www.planalto.gov.br/
Lei 9.478/1997	Lei Nacional	Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br/
Lei 11.097/2005	Lei Nacional	Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br/
Lei 9.84/1999	Lei Nacional	Dispõe sobre a fiscalização das atividades relativas ao abastecimento nacional de combustíveis, de que trata a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, estabelece sanções administrativas e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br/

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Decreto 2.953/1999	Lei Nacional	Dispõe sobre o procedimento administrativo para aplicação de penalidades por infrações cometidas nas atividades relativas à indústria do petróleo e ao abastecimento nacional de combustíveis, e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br/
Lei 10.438/2002	Lei Nacional	Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica.	http://www.planalto.gov.br/
Resolução ANP Lei 16/2012	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP	Fica estabelecida a especificação do gás natural, nacional ou importado, a ser comercializado em todo o território nacional.	http://www.anp.gov.br/
Resolução ANP Lei 41/2013	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP	Estabelece os requisitos para o exercício da atividade de revenda varejista. Ficam estabelecidos os requisitos necessários à autorização para o exercício da atividade de revenda varejista de combustíveis automotivos e a sua regulamentação. Fica definido como Gás Natural Veicular (GNV): mistura combustível gasoso, tipicamente proveniente do GN e biogás, destinada ao uso veicular e cujo componente principal é o metano, observadas as especificações estabelecidas pela ANP.	http://www.anp.gov.br/
Resolução ANP Lei 41/2007	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP	Regulamenta as atividades de distribuição e comercialização de gás natural comprimido (GNC) a Granel.	http://www.anp.gov.br/
Resolução ANP Lei 23/2012	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP	Estabelece as condições de aceitação do biometano como biocombustível veicular.	http://www.anp.gov.br/

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Resolução ANP Lei 8/2015	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP	Estabelece a especificação do Biometano de origem nacional oriundo de resíduos orgânicos agrossilvopastoris destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional, bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializam o produto em todo o território nacional.	http://www.anp.gov.br/
Decreto 57.042/2011	Legislação Estadual [SP]	Refere-se a benefícios fiscais relativos ao ICMS para atividades envolvendo Biogás e Biometano.	www.legislacao.sp.gov.br
Decreto 58.659/2012	Legislação Estadual [SP]	Institui o Programa Paulista de Biogás e dá providências correlatas.	www.legislacao.sp.gov.br
Convênio ICMS 112/2008	Legislação Estadual [SP]	Prevê a permissão aos estados de São Paulo e Mato Grosso de isentar o ICMS para atividades envolvendo saídas internas de Biogás e Biometano.	http://www1.fazenda.gov.br
Plano Paulista de Energia - PPE 2020	Conselho Estadual de Política Energética – CEPE [SP]	Estabelece políticas públicas e apresenta propostas para prover a demanda por energia no estado de SP, aumentando a participação das fontes renováveis. Aborda diretamente a utilização de biogás.	http://www.energia.sp.gov.br/
Plano Decenal de Expansão de Energia 2023	Ministério de Minas e Energia – MME	Apresenta importantes sinalizações para orientar as ações e decisões, voltadas para o equilíbrio entre as projeções de crescimento econômico do país e a necessária expansão da oferta, de forma a garantir à sociedade o suprimento energético com adequados custos, em bases técnicas e ambientalmente sustentáveis.	http://www.epe.gov.br/
Decreto 7.685/2012	Lei Nacional	Promulga o Acordo entre Brasil e Alemanha sobre Cooperação no Setor de Energia com foco em Energias Renováveis e Eficiência Energética, firmado em Brasília, em 14 de maio de 2008.	http://www.planalto.gov.br/

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Resolução Normativa ANEEL 482/2012	Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL	Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.	http://www.aneel.gov.br
Lei 10.848/2004	Lei Nacional	Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica. Considera a energia proveniente de usinas que produzam energia elétrica a partir de fontes eólicas, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa, enquadradas na primeira etapa do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA.	http://www.planalto.gov.br
Decreto 7.382/2010	Lei Nacional	Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural, bem como sobre as atividades de tratamento, processamento, estocagem, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural.	http://www.planalto.gov.br
Lei 11.909/2009	Lei Nacional	Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural, bem como sobre as atividades de tratamento, processamento, estocagem, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural; altera a Lei no 9.478, de 6 de agosto de 1997; e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br/
Decreto 5.025/2004	Lei Nacional	Regulamenta o inciso I e os §§ 1º, 2º, 3º, 4º e 5º do art. 3º da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, no que dispõem sobre o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA -, primeira etapa, e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br
Projeto de Lei 7.436/2014	Projeto de Lei	Institui mecanismo para promover a geração renovável descentralizada de energia elétrica (fontes: solar, hidráulica, biomassa incluindo o biogás e eólica) e altera a Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004.	http://www.camara.gov.br/
Projeto de Lei 3.924/2012	Projeto de Lei	Estabelece incentivos à produção de energia a partir de fontes renováveis, tarifas para a venda do excedente de energia à rede e dá outras providências.	http://www.camara.gov.br/

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Projeto de Lei 3.529/2012	Projeto de Lei	Institui a política nacional de geração de energia elétrica a partir da biomassa, estabelece a obrigatoriedade de contratação dessa energia e dá outras providências.	http://www.camara.gov.br/
Projeto de Lei 2.117/2011	Projeto de Lei	Dispõe sobre a criação do Plano de Desenvolvimento Energético Integrado e do Fundo de Energia Alternativa.	http://www.camara.gov.br/
Projeto de Lei 3.986/2008	Projeto de Lei	Altera dispositivos da Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, para promover a geração e o consumo de energia de fontes renováveis.	http://www.camara.gov.br/
Decreto de 27/1994	Lei Nacional	Cria o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios – PRODEEM –, e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/dnn/Anterior%20a%202000/1994/Dnn2793.htm
Portaria 81/2014	Ministério do Desenvolvimento Agrário – MDA	Dispõe sobre os critérios e procedimentos relativos à concessão, manutenção e uso do Selo Combustível Social.	http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=consultarLegislacaoFederal
Resolução ANP 23/2012	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP	Fica sujeita à autorização prévia da ANP a utilização de biocombustíveis não especificados e de suas misturas com combustíveis e/ou biocombustíveis especificados no país, destinados ao uso experimental ou ao uso específico, caso o consumo mensal seja superior a 10.000 [dez mil] litros.	http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=consultarLegislacaoFederal
Resolução 3.588/2008	Banco Central do Brasil – BCB	Institui, no âmbito do BNDES, o Programa de Estímulo à Produção Agropecuária Sustentável e promove ajustes nas normas dos programas de investimento Moderinfra, Moderagro, Moderfrota, Propflora e Prodecoop.	http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=consultarLegislacaoFederal
Projeto de Lei 1.845/2012	Projeto de Lei (RJ)	Cria a Política Estadual de Gás Natural Renovável (GNR).	http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/scpro1115.nsf/6b8b30130497e5d0832566ec0018d81f/3110896a78badad983257ac40069d345?OpenDocument

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Projeto de Lei 3.004/2008	Legislação nacional	Dispõe sobre a criação do Programa Nacional de Biogás.	http://www.camara.gov.br/sileg/integras/544225.pdf
Decreto 46.553/2014	Assembleia Legislativa de Minas Gerais [MG]	Altera o Regulamento do ICMS (RICMS), aprovado pelo Decreto nº 43.080, de 13 de dezembro de 2002.	http://www.fazenda.mg.gov.br/empresas/legislacao_tributaria/decretos/2014/d46553_2014.htm
Decreto 46.400/2013	Assembleia Legislativa de Minas Gerais [MG]	Altera o Regulamento do ICMS (RICMS), aprovado pelo Decreto nº 43.080, de 13 de dezembro de 2002.	http://www.fazenda.mg.gov.br/empresas/legislacao_tributaria/decretos/2013/d46400_2013.htm
Resolução Homologatória 1.807/2014	Agência Nacional De Energia Elétrica - ANEEL	Aprova o Edital do Leilão nº 08/2014-ANEEL e seus Anexos, denominado LER de 2014 ou 6º LER, o qual se destina à contratação de energia de reserva proveniente de empreendimentos de geração a partir de fontes solar fotovoltaica, eólica e biomassa composta de resíduos sólidos urbanos e/ou biogás de aterro sanitário ou biodigestores de resíduos vegetais ou animais, assim como lodos de estações de tratamento de esgoto, para início de suprimento em 1º de outubro de 2017, e estabelece as TUST e as TUSDg de referência para as centrais geradoras que participarem do aludido certame.	http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_geracao/documentos/REH_1807_2014.pdf
Lei 1.048/1996	Câmara Legislativa do Distrito Federal [DF]	Autoriza a utilização de gás natural em veículos rodoviários automotores do Distrito Federal.	http://www.tc.df.gov.br/SINJ/Arquivo.ashx?id_norma_consolidado=49002
Lei 12.771/2003	Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina [SC]	Da nova redação ao caput e inclui incisos ao art. 1º da lei Nº 12.200, DE 2002, a qual dispõe sobre incentivos à geração de energia elétrica alternativa e adota outras providências.	http://www.leisestaduais.com.br/sc/lei-ordinaria-n-12771-2003-santa-catarina-da-nova-redacao-ao-caput-e-inclui-incisos-ao-art-1o-da-lei-no-12-200-de-2002?q=biog%C3%A1s
Lei 20.824/2013	Lei Estadual [MG]	O Estado de Minas Gerais tem isenção de ICMS no fornecimento de peças, partes, componentes e ferramentas para conexão, e de transmissão de eletricidade gerada a partir de biogás. Isenção de ICMS no fornecimento de energia elétrica produzida em usinas geradoras que empregam o biogás como fonte de energia.	http://www.fazenda.mg.gov.br/

14.2.4 Segurança

Tabela 14.4: Legislações referentes à segurança.

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
NR 10/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade.	http://portal.mte.gov.br/
NR 13/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Caldeiras e Vasos de Pressão.	http://portal.mte.gov.br/
NR 16/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Atividades e Operações Perigosas.	http://portal.mte.gov.br/
NR 20/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Segurança e Saúde no Trabalho com Inflamáveis e Combustíveis.	http://portal.mte.gov.br/
NR 06/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Equipamentos de Proteção Individual – EPI.	http://portal.mte.gov.br/
NR 07/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Programas de Controle Médico de Saúde Ocupacional.	http://portal.mte.gov.br/
NR 09/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Programas de Prevenção de Riscos Ambientais.	http://portal.mte.gov.br/
NR 11/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais.	http://portal.mte.gov.br/
NR 12/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos.	http://portal.mte.gov.br/
NR 15/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Atividades e Operações Insalubres.	http://portal.mte.gov.br/
NR 17/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Ergonomia.	http://portal.mte.gov.br/
NR 21/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Trabalho a Céu Aberto.	http://portal.mte.gov.br/

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
NR 23/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Proteção Contra Incêndios.	http://portal.mte.gov.br/
NR 24/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Condições Sanitárias e de Conforto nos Locais de Trabalho.	http://portal.mte.gov.br/
NR 26/1978	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Sinalização de Segurança.	http://portal.mte.gov.br/
NR 33/2006	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Segurança e Saúde no Trabalho em Espaços Confinados.	http://portal.mte.gov.br/
NR 35/2012	Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho	Trabalho em Altura (para trabalhos a serem executados a mais de 2 metros de altura).	http://portal.mte.gov.br/
Portaria 3.214/1978	Ministério do Trabalho e Emprego	Regulamenta a Legislação sobre Segurança e Medicina do Trabalho.	http://portal.mte.gov.br/

14.2.5 Composto

Tabela 14.5: Legislações referentes ao composto.

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Lei Ordinária 6.894/1980	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA	Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, e dá outras providências.	http://www.agricultura.gov.br/vegetal/fertilizantes/legislacao
Decreto 4.954/2004	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA	Aprova o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, e dá outras providências.	http://www.agricultura.gov.br/vegetal/fertilizantes/legislacao
Instrução Normativa MAPA 5/2007	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA	Aprovar as definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes minerais, destinados à agricultura.	http://www.agricultura.gov.br/vegetal/fertilizantes/legislacao
Instrução Normativa SDA/MAPA 13/2011	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA	Aprovar as normas sobre especificações, garantias, registro, embalagem e rotulagem dos inoculantes destinados à agricultura, bem como as relações dos microrganismos autorizados e recomendados para produção de inoculantes no Brasil.	http://www.agricultura.gov.br/vegetal/fertilizantes/legislacao

IDENTIFICAÇÃO	ÓRGÃO	RESUMO DA TRATATIVA	SITE DE BUSCA
Instrução Normativa SDA/MAPA 14/2004	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA	Aprovar as definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos substratos para plantas.	http://www.agricultura.gov.br/vegetal/fertilizantes/legislacao
Instrução Normativa SDA/MAPA 17/2007	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA	Aprovar os Métodos Analíticos Oficiais para Análise de Substratos e Condicionadores de Solos.	http://www.agricultura.gov.br/vegetal/fertilizantes/legislacao
Instrução Normativa SDA/MAPA 25/2009	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA	Aprovar as normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura.	http://www.agricultura.gov.br/vegetal/fertilizantes/legislacao
Instrução Normativa SDA/MAPA 27/2006	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA	Refere-se às concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas, controle de matérias-primas nos fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes, para serem produzidos, importados ou comercializados.	http://www.agricultura.gov.br/vegetal/fertilizantes/legislacao
Instrução Normativa SDA/MAPA 35/2006	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA	Aprova as normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura.	http://www.agricultura.gov.br/vegetal/fertilizantes/legislacao
Instrução Normativa MAPA 53/2013	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA	Estabelece definições, a classificação, o registro e renovação de registro de estabelecimento, o registro de produto, a autorização de comercialização e uso de materiais secundários, o cadastro e renovação de cadastro de prestadores de serviços de armazenamento, de acondicionamento, de análises laboratoriais, de empresas geradoras de materiais secundários e de fornecedores de minérios, a embalagem, rotulagem e propaganda de produtos, as alterações ou os cancelamentos de registro de estabelecimento, produto e cadastro e os procedimentos a serem adotados na inspeção e fiscalização da produção, importação, exportação e comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, biofertilizantes e materiais secundários; o credenciamento de instituições privadas de pesquisa; requisitos mínimos para avaliação da viabilidade e eficiência agrônoma e elaboração do relatório técnico-científico para fins de registro de fertilizante, corretivo e biofertilizante na condição de produto novo.	http://www.agricultura.gov.br/vegetal/fertilizantes/legislacao



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

Ministério das Cidades

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PÁTRIA EDUCADORA

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7958-041-3



9 788579 580413

