

Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 5: Biogás e emissões fugitivas de metano

Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage – Part 5: Biogas and fugitive methane emissions

- **Data de entrada:**
01/08/2018
- **Data de aprovação:**
17/09/2018

Gustavo Rafael Collere Possetti / Julio Cezar Rietow / Fernanda Janaína Oliveira Gomes da Costa / Luiz Gustavo Wagner / Livia Cristina da Silva Lobato / Thiago Bressani Ribeiro / Déborah de Freitas Melo / Juliana Albano Reis / Carlos Augusto de Lemos Chernicharo ()*

DOI: 10.4322/dae.2018.042

Resumo

O gerenciamento da fase gasosa inerente ao tratamento de esgoto não vinha sendo devidamente considerado, por vários anos, no projeto, construção e operação de reatores UASB. Entretanto, com a necessidade de atendimento de requisitos de sustentabilidade associados à prestação de serviços de esgotamento sanitário, o gerenciamento e a recuperação dos gases passaram a ser relevantes, uma vez que possibilitam a produção de energia limpa e renovável, mitigam as emissões odorantes e de gases de efeito estufa, e salvaguardam infraestruturas e a saúde ocupacional de operadores. Nesse contexto, esta Nota Técnica apresenta os principais problemas, além de suas respectivas origens, associados ao biogás proveniente de reatores UASB alimentados com esgoto sanitário. Além disso, a Nota Técnica discorre sobre as melhores práticas de engenharia recomendadas para mitigar emissões fugitivas de metano e maximizar a recuperação de biogás.

Palavras-chave: Energia renovável, gás de efeito estufa, mitigação de odores, recuperação de gases dissolvidos, segurança operacional.

Gustavo Rafael Collere Possetti – Engenheiro Ambiental pela UFPR e Engenheiro Eletricista pela UTFPR. Mestre e Doutor em Ciências pela UTFPR. Gerente de Pesquisa e Inovação da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do ISAE. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

Julio Cezar Rietow – Engenheiro Ambiental e de Segurança do Trabalho pela PUCPR. Mestre e Doutorando em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

Fernanda Janaína Oliveira Gomes da Costa – Engenheira de Alimentos pela UEPG e Engenheira Química pela PUCPR. Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela UEPG e Doutora em Engenharia de Alimentos pela UFPR. Engenheira da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar).

Luiz Gustavo Wagner – Tecnólogo em Construção Civil e Especialista em Energias Renováveis pela UTFPR. Técnico da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar).

Livia Cristina da Silva Lobato – Engenheira Civil pela UFMG. Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

Thiago Bressani Ribeiro – Engenheiro Ambiental pela Universidade FUMEC. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Doutorando em Saneamento pelas Universidades de Ghent (Bélgica) e UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

Déborah de Freitas Melo – Engenheira Bioenergética pela Universidade FUMEC. Mestre e doutoranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG.

Juliana Albano Reis – Engenheira Ambiental pela UFMG.

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo – Engenheiro Civil pela UFMG. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle upon Tyne – UK. Professor titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Coordenador do INCT ETEs Sustentáveis.

***Endereço para correspondência:** Avenida Antônio Carlos 6.627 – Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Bloco 1. Belo Horizonte, MG. CEP: 31270-901. e-mail: calemos@desa.ufmg.br

Abstract

The management of the gaseous phase inherent to sewage treatment has not been properly considered for several years in the design, construction and operation of UASB reactors. However, with the need to meet sustainability requirements associated with the provision of sewerage services, the management and recovery of the gases became relevant since they enable the production of clean and renewable energy, mitigate odour emissions and greenhouse gases, and safeguard infrastructure and occupational health of operators. In this context, this Technical Note presents the main problems, in addition to their respective origins, associated with the biogas produced in UASB reactors fed with sewage. In addition, the Technical Note discusses the best engineering practices recommended to mitigate fugitive methane emissions and maximize biogas recovery.

Keywords: Renewable energy, greenhouse gas, odour mitigation, recovery of dissolved gases, operational safety.

1 INTRODUÇÃO

Há diversas vantagens em relação ao uso de processos anaeróbios para o tratamento de esgoto sanitário quando comparado com os processos aeróbios, destacando-se a produção de biogás, um composto que pode ser convertido em energia devido ao seu elevado teor de metano (70 a 81%), constituente com elevado poder calorífico (BRASIL, 2017a). Essa energia química pode ser convertida e empregada, por exemplo, na própria estação de tratamento de esgoto (ETE), como energia mecânica, térmica e/ou elétrica. Nesse sentido, há diversas possibilidades de uso energético do biogás, tais como acionamento de bombas e equipamentos elétricos e higienização e secagem do lodo e espuma descartados. Entretanto, ainda há uma limitação intrínseca ao aproveitamento energético do biogás devido, principalmente, às perdas por vazamentos (emissões fugitivas) e variações na sua quantidade e composição. Tais variações estão relacionadas a diversos aspectos, notadamente aqueles vinculados a projeto, construção e operação dos reatores UASB, mas também às características do esgoto afluente (p.ex.: concentração de demanda química de oxigênio - DQO e temperatura), as quais podem estar associadas à sazonalidade climática. Conjuntamente, as perdas de biogás contribuem diretamente para a redução do potencial de apro-

veitamento energético na ETE, bem como para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e de gases odorantes para a atmosfera.

Assim, o conhecimento e domínio do processo de produção e captação do biogás se tornam essenciais para viabilizar o aproveitamento desse subproduto, auxiliar no gerenciamento e na redução das emissões de GEE, mitigar eventuais problemas com maus odores na circunvizinhança das ETEs e salvaguardar infraestruturas e boas condições vinculadas à saúde ocupacional de operadores. Nesse sentido, o objetivo deste documento é aprofundar a discussão apontada na Parte 1 desta Coletânea de NTs (CHERNICHARO *et al.*, 2018), discorrendo sobre os problemas e respectivas origens, bem como os possíveis aprimoramentos relacionados a projeto, construção e operação de reatores UASB que podem influenciar na produção e recuperação de biogás. Esta Nota Técnica, portanto, não aprofunda as discussões acerca do uso do biogás para fins energéticos, mas discorre sobre os requisitos necessários para que tal procedimento se viabilize de acordo com as melhores práticas de engenharia até então disponíveis, considerando a maximização das taxas de produção e recuperação de biogás e minimização de emissões fugitivas de metano.

2 ORIGEM E PROBLEMAS RELACIONADOS À PRODUÇÃO E RECUPERAÇÃO DE BIOGÁS E ÀS EMISSÕES FUGITIVAS DE METANO

Na digestão anaeróbia, o processo de degradação biológica da matéria orgânica, em condições de ausência de oxigênio, gera subprodutos como o biogás. Formado por diversas substâncias, em distintas proporções, o biogás proveniente dos reatores UASB é composto majoritariamente por metano (70 a 81%), nitrogênio (10 a 25%) e gás carbônico (6 a 14%). Em menor volume, o biogás ainda apresenta pequenas quantidades de hidrogênio (0 a 3%), gás sulfídrico (H_2S) (233 a 2.470 ppm) e outros gases traço (BRASIL, 2017a).

Devido ao seu alto teor de CH_4 , o biogás possui elevado poder calorífico, sendo passível de recuperação e aproveitamento energético. O poder calorífico inferior (PCI) do CH_4 puro é $35,9 \text{ MJ.Nm}^{-3}$, sendo que o PCI do biogás, com 70 a 81% de CH_4 , varia entre 25,1 e $29,1 \text{ MJ.Nm}^{-3}$, correspondendo, respectivamente, a 78,9 e 91,5%, do PCI típico do gás natural ($31,8 \text{ MJ.Nm}^{-3}$). Destaca-se, contudo, que o CH_4 é considerado um dos mais importantes gases de efeito estufa (GEE), possuindo um potencial de aquecimento global, no horizonte de 100 anos, 28 vezes maior quando comparado ao CO_2 (IPCC, 2014). Por isso, a recuperação energética e a destruição do CH_4 presente no biogás têm sido incentivadas, não apenas como uma medida que pode gerar eventuais benefícios financeiros, mas como parte integrante de um plano de redução das emissões de GEE.

Cabe ressaltar que a elevada concentração de N_2 presente no biogás pode ser atribuída à solubilização deste gás no esgoto afluente, que, no interior do reator UASB, se desprende da fase líquida devido ao decréscimo da pressão parcial de N_2 atmosférico (NOYOLA *et al.*, 2006). Por sua vez, as baixas concentrações de CO_2 podem ser atribuídas à elevada solubilidade do gás, associada às elevadas cargas hidráulicas normalmente aplicadas aos reatores UASB tratando esgoto sanitário (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

Embora encontrado em baixas concentrações no biogás, o H_2S merece atenção especial devido ao seu potencial corrosivo e demais propriedades que causam desconfortos odoríferos e eventuais problemas ocupacionais, conforme detalhado na Parte 4 desta Coletânea de NTs (BRANDT *et al.*, 2018).

Nos itens subsequentes são apresentados os principais problemas relacionados com a produção e recuperação de biogás e com as emissões fugitivas de CH_4 em reatores UASB, tal como abordados na Parte 1 desta Coletânea de NTs (CHERNICHARO *et al.*, 2018).

2.1 Emissões fugitivas de gases de efeito estufa (CH_4) e de gases odorantes (H_2S)

Os diferentes compostos presentes no biogás possuem diferentes graus de solubilidade no meio e, dessa forma, se comportam de maneiras distintas, podendo permanecer dissolvidos no meio líquido ou se desprenderem para a fase gasosa. Conforme definições adotadas na Parte 4 desta Coletânea de NTs (BRANDT *et al.*, 2018), emissões fugitivas referem-se aos gases que são liberados para a atmosfera de forma difusa e sem uma medida de controle.

Devido a sua baixa solubilidade em água, o CH_4 pode ser despreendido para a fase gasosa, vindo a constituir a maior parcela do biogás coletado nos separadores trifásicos (STF) e passível de aproveitamento energético. Entretanto, estudos realizados por Souza *et al.* (2011) e Nelting *et al.* (2017) mostraram consideráveis concentrações de CH_4 dissolvido em efluentes de reatores UASB, podendo se desprender da fase líquida para a atmosfera (emissões fugitivas) devido à supersaturação do CH_4 na fase líquida. Adicionalmente, podem existir emissões fugitivas de biogás ao longo de todo o sistema de coleta, transporte e queima do biogás, devido a vazamentos nos STFs e/ou na linha de biogás, à baixa eficiência dos STFs na captura do biogás, bem como emissões pontuais associadas à combustão incompleta em queimadores. Projetos antigos ou inadequados que negligenciam o gerenciamento da fase gasosa, bem

como projetos, materiais e/ou execução ineficientes de sistemas de remoção de espuma também podem se tornar fatores vulneráveis para a ocorrência de emissões fugitivas de biogás.

Já o H_2S , conforme abordado na Parte 4 desta Coletânea de NTs (BRANDT *et al.*, 2018), é formado a partir da rota metabólica da sulfetogênese, correspondente à redução biológica do sulfato (SO_4^{2-}) pelas bactérias redutoras de sulfato (CHERNICHARO, 2007). A presença de sulfeto no meio líquido é fortemente influenciada pelo pH do meio. Com o pH em torno de 7, valor operacional comum em reatores UASB tratando esgoto sanitário, H_2S e HS^- estão presentes na solução em uma relação igual a 50% (CHERNICHARO, 2007; NOYOLA *et al.*, 2006). Uma vez que o H_2S possui alta solubilidade em meio líquido, grande parcela desse gás pode permanecer dissolvida e deixar o reator junto com o efluente final, ou ainda ser liberado para atmosfera, a depender dos seguintes fatores: ocorrência de turbulências no líquido, área superficial da interface líquido-atmosfera (compartimento de decantação) e temperatura do líquido. Parte dessas emissões de H_2S a partir da fase líquida são pontuais e passam a fazer parte do biogás produzido nos reatores. Assim, problemas de estanqueidade nas câmaras e linhas de gás, ineficiência de STFs e baixa eficiência nos queimadores de biogás são as principais causas das emissões pontuais de gases odorantes.

2.2 Baixo potencial de aproveitamento energético do biogás

O baixo potencial de aproveitamento energético do biogás deve-se notadamente às perdas e emissões fugitivas, as quais estão associadas aos seguintes aspectos principais: i) vazamentos nos STFs e/ou na linha de biogás; ii) sistemas ineficientes e vulneráveis de remoção de espuma; iii) entrada excessiva de água pluvial na rede coletora de esgoto; e iv) emissões fugitivas da parcela de CH_4 que se encontra dissolvida no efluente.

2.2.1 Vazamentos nos separadores trifásicos e/ou na linha de biogás

As emissões fugitivas de biogás provenientes de vazamentos nos STFs e/ou tubulações também contribuem para a redução do potencial de recuperação e aproveitamento energético do biogás, bem como para as emissões de GEE e de gases odorantes. Esses vazamentos estão associados a problemas de projeto e de construção, uso de materiais inapropriados, corrosão em estruturas e tubulações e falta de estanqueidade nas câmaras de gás dos STFs, em tampas de inspeção e nas tubulações de biogás.

É comum encontrar STFs confeccionados em lonas, a maioria de policloreto de polivinila (PVC), as quais são normalmente fixadas nas estruturas de concreto dos reatores por suportes de alumínio. Devido ao acúmulo de lodo no compartimento de decantação do reator ou ao espessamento da espuma na parte interna do STF, pode ocorrer o bloqueio da passagem de biogás e também o rompimento das lonas e/ou dos suportes de fixação. Conforme relatado e ilustrado na Parte 3 desta Coletânea de NTs, a obstrução à passagem natural de biogás em virtude do espessamento da camada de espuma no interior do STF gera esforços elevados nas paredes dessa estrutura, que podem ocasionar danos de desnivelamento, torção e, em alguns casos, ruptura, prejudicando a recuperação de biogás (LOBATO *et al.*, 2018). Destaca-se, ainda, que o escape de biogás para o compartimento de decantação ocasiona o arraste de sólidos, prejudicando a qualidade do efluente do reator UASB, além de ter impacto direto no aumento das emissões de GEE e de gases odorantes. Ademais, devido à presença de H_2S no biogás, os STFs e os demais acessórios e equipamentos da linha de biogás, quando não fabricados com o uso de materiais resistentes e protegidos com revestimentos anticorrosivos, estão sujeitos à ocorrência de fissuras e eventuais vazamentos (Figura 1 (a-c)).

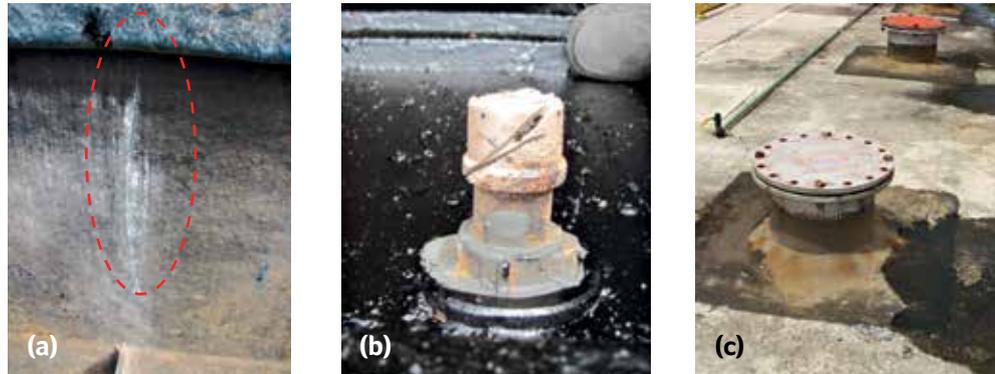


Figura 1 - Ilustração de pontos de ocorrência de vazamentos de biogás: a) Fissura presente no STF de reator UASB; b) Conexão da tubulação de biogás danificada; c) Vazamento de gás em inserts no concreto.

Dependendo dos materiais utilizados e dos aspectos construtivos adotados, as tampas de inspeção dos reatores, tipicamente concebidas em concreto ou em plástico reforçado em fibra de vidro (PRFV), podem não assegurar a estanqueidade da câmara de gás, gerando emissões fugitivas. Por exemplo, as tampas de PRFV são normalmente envoltas por uma membrana em etileno propileno dieno monômero (EPDM) e possuem um sistema de presilhas para garantir seu rápido fechamento, no entanto,

caso a camada de EPDM seja instalada de forma irregular, permitindo a formação de ondulações, não haverá uma vedação eficiente. Isso também ocorre quando as superfícies das tampas apresentam curvaturas em função de sua exposição ao tempo. Na Figura 2 é ilustrada uma tampa de PRFV com falha no elemento de vedação. Destaca-se, ainda, que o concreto próximo às tampas também pode sofrer corrosão, possibilitando a passagem de gás no contorno das tampas de inspeção.

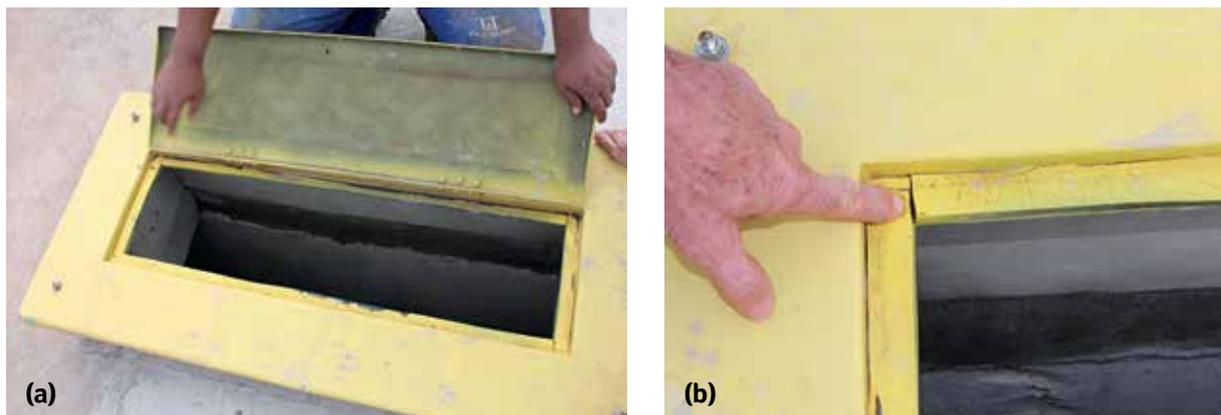


Figura 2 – a) Tampa de PRFV para inspeção de separador trifásico; b) Detalhe de falha no elemento de vedação da tampa de inspeção.

Adicionalmente, podem ocorrer emissões fugitivas de biogás em juntas de dilatação do concreto, quando não são devidamente tratadas e preenchidas na etapa de construção. Na área da câma-

ra de gás, essas juntas tendem a ser gradualmente corroídas com o tempo, permitindo a fuga de gás. Tais fugas podem ocorrer também em fissuras no concreto na área da câmara de gás, provenientes,

por exemplo, de problemas de cura do concreto e orifícios, eventualmente ocasionados pelo mau acabamento de agulhas de travamento de formas durante a concretagem.

Ademais, tubulações de condução do biogás e demais componentes, tais como válvulas e registros, fabricados em materiais não resistentes à corrosão (p. ex.: aço carbono) estão mais sujeitas a vazamentos.

2.2.2 Sistemas ineficientes e vulneráveis de remoção de espuma que propiciam emissões fugitivas de biogás

A inexistência ou ineficiência (relacionada a projetos, materiais e/ou execução inadequados) dos dispositivos de remoção de espuma nos STFs implica na necessidade de limpezas periódicas nos

reatores, as quais são extremamente trabalhosas, além de propiciarem emissões fugitivas de biogás. Grande parte dos reatores anaeróbios implantados no Brasil não possui dispositivos de remoção de espuma, o que obriga a interrupção da operação da unidade para a realização da limpeza. Em alguns reatores, a remoção de espuma é realizada a partir da abertura das tampas de inspeção instaladas na parte superior das câmaras de gás dos STFs (Figuras 3a e 3b). Esse procedimento possibilita a emissão de gases odorantes e risco de segurança operacional, visto que em determinadas condições pode haver formação de atmosfera explosiva. Adicionalmente, a abertura das tampas de inspeção do STF para a retirada de espuma pode ocasionar uma perda significativa do biogás.

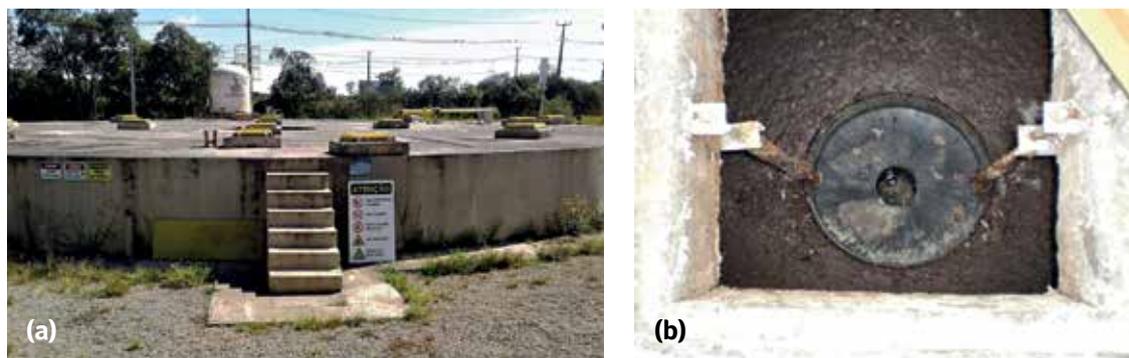


Figura 3 – Sistema inexistente e/ou ineficiente de remoção de espuma: a) reator anaeróbio sem dispositivo de remoção de espuma; b) abertura da tampa de inspeção para remoção de espuma.

2.2.3 Entrada excessiva de água pluvial na rede coletora de esgoto

Embora os projetos de sistemas de coleta de esgotos sejam precipuamente concebidos como separadores absolutos, é comum a presença de ligações clandestinas de águas pluviais na rede coletora de esgoto. A contribuição parasitária de águas pluviais ocasiona a diluição do esgoto (incremento de vazão e redução da concentração de

DQO) e, conseqüentemente, tem impacto significativo na redução da produção de biogás. Caso não extravasado, esse excesso de vazão afluente pode provocar sobrecarga hidráulica nos reatores, com redução do tempo de detenção hidráulica (TDH), aumento da velocidade ascensional e eventual arraste de sólidos junto ao efluente. Possetti *et al.* (2013), Waiss e Possetti (2015) e Cabral (2016), constataram uma relação direta entre o

aumento da vazão de esgoto afluente e a ocorrência de chuvas, com a consequente diminuição do TDH e da produção de biogás.

2.2.4 Emissões fugitivas da parcela de CH₄ dissolvida no efluente

A quantificação do CH₄ no biogás é de suma importância para a viabilização do seu aproveitamento energético. Entretanto, verifica-se que existem grandes perdas de CH₄ dissolvido no efluente de reatores UASB tratando esgoto sanitário. Em estudo realizado por Souza *et al.* (2011), foram registradas concentrações de CH₄ dissolvi-

do no efluente variando entre 17 e 22 mg.L⁻¹, em diferentes escalas (piloto, demonstração e real).

Em termos de balanço de massa de DQO, medições efetuadas por Souza *et al.* (2011) em reatores UASB em escala piloto e demonstração, operando com diferentes TDH, indicaram que a parcela dissolvida no efluente variou de 36 a 41% de todo o CH₄ produzido (Figura 4). Essa perda representa uma redução no potencial de recuperação energética e, portanto, precisa ser considerada nos balanços de massa de DQO em métodos de estimativa de produção de biogás, como o proposto por Lobato *et al.* (2012).

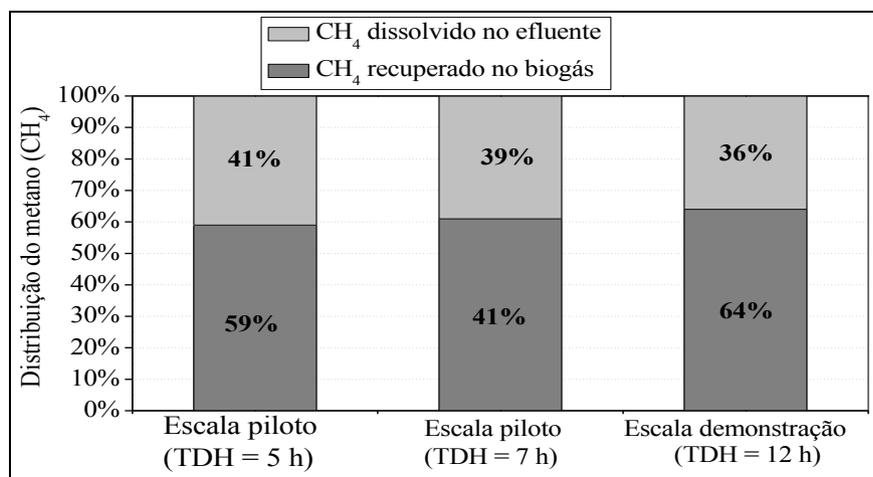


Figura 4 – Perdas de CH₄ dissolvido em efluente de reatores UASB e recuperado no biogás.

Fonte: SOUZA *et al.* (2011).

2.3 Aspectos de segurança vinculados à criação de espaços confinados e formação de atmosferas explosivas

Estudos realizados por Moreno *et al.* (2015) identificaram 169 acidentes documentados, ocorridos entre os anos de 1995 a 2014, em plantas com produção de biogás espalhadas pelo mundo. Os resultados desses estudos apontaram que 82% desses acidentes foram ocasionados por explosões e inalação de substâncias tóxicas e asfixiantes.

Devido aos aspectos construtivos de reatores anaeróbios, esses são caracterizados pela criação de espaços confinados (p. ex.: compartimento de decantação do STF), cuja ventilação existente é insuficiente para a remoção de gases. Desse modo, a expulsão de ar desses espaços pode ocasionar uma carência de oxigênio. Em ambientes onde o teor de oxigênio se reduz para concentrações menores que 18% podem ocorrer riscos de asfixia e intoxicação (BRASIL, 2017a).

Além das questões de carência de oxigênio, substâncias tóxicas presentes no biogás, como o H_2S , podem causar a morte ou a perda instantânea da capacidade física e do raciocínio lógico de trabalhadores em espaços confinados. O H_2S , quando em elevadas concentrações no ambiente, é extremamente tóxico aos seres vivos, conforme apresentado na Parte 4 desta Coletânea de NTs (BRANDT *et al.*, 2018). Pessoas expostas ao H_2S podem, por determinado período de tempo, perder a sensibilidade olfativa e, assim, deixar de senti-lo. Nesse caso, o odor desagradável deixaria de atuar como sinal de advertência (BRASIL, 2017a).

Em relação ao CO_2 , sua elevada concentração no ambiente pode interferir nas trocas gasosas do ar atmosférico nos alvéolos pulmonares, podendo ser fatal até mesmo em concentrações normais de oxigênio molecular. De acordo com a Norma Regulamentadora - NR 15 (BRASIL, 1978), que trata das atividades e operações insalubres, o limite de tolerância para o CO_2 é de 3.900 ppm.

Outro aspecto de segurança relevante em ETEs com produção de biogás é a formação de atmosferas explosivas. Toda mistura de gás possui uma energia mínima de ignição, sendo que abaixo desse patamar é impossível se provocar uma explosão. Uma faísca de um circuito elétrico ou até mesmo o aquecimento de um equipamento instalado em um ambiente explosivo podem ser considerados como fontes de ignição e, conseqüentemente, provocarem explosão. Adotando os limites de explosão do CH_4 , pode-se então estabelecer uma faixa explosiva para as relações ar-combustível e também com os gases inertes presentes no biogás. A faixa explosiva entre CH_4 e ar atmosférico encontra-se entre 4,4% (limite inferior de explosão) e 15% (limite superior de explosão) de concentração de CH_4 (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008). A presença de gases inertes, como o N_2 e o CO_2 , por exemplo, quando em elevadas concentrações no meio, proporcionam o estreitamento da faixa de explosividade, fazendo com que os limites

de explosão se igualem próximos da concentração do ar atmosférico, de 58% N_2 (ou aproximadamente 11,6% de oxigênio) (BRASIL, 2017a).

3 POSSÍVEIS APRIMORAMENTOS RELACIONADOS À PRODUÇÃO E RECUPERAÇÃO DO BIOGÁS

Nos itens seguintes são apresentados os possíveis aprimoramentos em termos de projeto, construção e operação do sistema de coleta e transporte do biogás que podem contribuir para viabilizar a recuperação e o aproveitamento energético desse subproduto.

3.1 Projeto e construção dos separadores trifásicos e linha de gás

O projeto de um sistema de coleta de biogás em reatores UASB apresenta especificidades devido às suas características diferenciadas: baixa vazão e baixa pressão; presença de umidade e material particulado; e potencial de corrosão. Isso faz com que o projeto das instalações de biogás seja distinto das aplicações usuais de gases. Cabe aos projetistas estarem atentos às demandas específicas da área de tratamento de esgotos ao fazerem concepções e recomendações de projeto para o sistema de coleta de biogás. É importante que se tenha bastante rigor durante as fases de projeto e de construção, tanto na especificação quanto na execução dos dispositivos de coleta (p. ex.: separador trifásico), transporte (p.ex.: linha de gás) e tratamento do biogás (p. ex.: queimador). Atenção especial deve ser dada para problemas de vazamento nesses dispositivos e, também, para a baixa eficiência de combustão em alguns tipos de queimadores de biogás.

Quanto aos STFs, os quais são mais expostos ao processo de corrosão, esses devem ser confeccionados em materiais que apresentem elevada resistência (p.ex.: fibra de vidro) ou serem revestidos contra corrosão, com o intuito de minimizar a ne-

cessidade de paralisações do reator UASB para manutenção, reduzindo os riscos de acidentes, bem como a perda de eficiência na captura do biogás. O concreto tem sido, ainda, o material mais utilizado, mas as experiências nem sempre são satisfatórias, devido a problemas de vazamentos de gases, corrosão, além de se constituir em uma estrutura pesada e volumosa. Materiais não corrosivos, menos volumosos e mais leves, como lona e fibra de vidro, têm sido utilizados como opções ao concreto (CHERNICHARO, 2007). No caso de STFs confeccionados em lona plástica, a fixação final merece atenção especial, visto que não se deve permitir a concentração de tensões em pontos isolados da lona. Caso contrário, ocorrerá o rompimento do material, prejudicando a sedimentação de partículas e o direcionamento do fluxo de biogás para o interior do STF. Em relação ao STF em fibra de vidro, é essencial o controle do processo produtivo de forma a garantir sua qualidade. Além do cuidado na especificação do material a ser utilizado, é imprescindível que os STFs sejam construídos respeitando as diretrizes apresentadas na Parte 3 desta Coletânea de NTs (LOBATO *et al.*, 2018).

Ainda em relação às estruturas em concreto presente nos reatores UASB, é aconselhável que durante o processo construtivo de STFs, assim como dos canais e canaletas de efluentes, sejam escolhidos materiais que ofereçam alta resistência, baixa porosidade e cura adequada, minimizando o aparecimento de fissuras e possíveis vazamentos de biogás na superfície de tais estruturas. É ainda aconselhável que a superfície dessas estruturas seja impermeabilizada por meio da utilização de material polimérico resistente a ácidos, que apresente coeficientes de dilatação iguais ou superiores ao do concreto (BRASIL, 2017a).

Em relação à linha de gás, as tubulações devem ser fabricadas em aço inoxidável ou em polietileno de alta densidade (PEAD). Ademais, é essencial garantir a adequada vedação de toda a linha a fim

de se evitar emissões fugitivas, bem como quedas de pressão no sistema de coleta.

É essencial que, antes da partida do sistema, sejam realizados testes de pressão e estanqueidade das linhas de coleta de biogás, STFs e tampas de inspeção, visto que esse procedimento pode evitar problemas futuros, como vazamento de gases, perdas significativas do potencial energético e emissões difusas de gases de efeito estufa (CH_4) e odorantes (H_2S). A realização de testes simples, como a injeção de fumaça no interior dos STFs, ou de testes mais elaborados, como a pressurização intencional dos reatores, podem contribuir significativamente na detecção de vazamentos. Durante a operação da ETE, todo o sistema de coleta e transporte do biogás deve ser constantemente inspecionado sobre sua integridade e possíveis pontos de vazamentos, bem como devem ser efetuadas manutenções preventivas de todos os componentes (p.ex.: válvulas, filtros, medidores) presentes na linha de biogás.

Ressalta-se que na execução das atividades de operação e manutenção dos reatores devem ser tomados alguns cuidados, de forma a evitar o aporte de ar para as câmaras e tubulações de gás e a consequente formação de misturas explosivas.

O controle e o monitoramento da vazão do biogás gerado devem ser realizados continuamente, visto que variações bruscas podem sugerir a presença de vazamentos no separador trifásico ou mesmo nas tubulações de coleta e transporte, assim como a ocorrência de distúrbios no processo de digestão anaeróbia, que, inevitavelmente, geram perda da capacidade de produção do biogás (BRASIL, 2017a).

Cabe salientar que, em alguns tipos de reatores anaeróbios, sobretudo em reatores de leito fluidizado (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 para atmosferas explosivas - 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 tubulações e de gasômetros.

3.2 Remoção controlada de espuma no interior do STF

A adoção de separadores trifásicos equipados com mecanismo hidrostático para a remoção de espuma é essencial para a adequada operação de reatores UASB. A Parte 3 desta Coletânea de NTs (LOBATO *et al.*, 2018) apresenta uma descrição detalhada do processo de remoção hidrostática de espuma. Cabe ressaltar que o estabelecimento de um protocolo para a remoção sistemática desse material é essencial para evitar o seu acúmulo e conseqüente espessamento e solidificação no interior do STF, o que impossibilitaria o funcionamento adequado do mecanismo de remoção hidrostática.

Alguns reatores UASB em operação são dotados de mecanismos de quebra-escuma, como, por exemplo, a aplicação de jatos de água conduzidos por uma tubulação localizada acima da câmara de gás do STF. A adoção de tais mecanismos visa corrigir um problema associado à ineficiência do estabelecimento de protocolos para a retirada do material flotante, o qual tende a se solidificar no interior do STF, tal como mencionado anteriormente. As tubulações de água, como mecanismos de quebra-escuma, podem se constituir em pontos de escape de biogás, especialmente quando não estão preenchidas por água. A instalação de registros de PVC (válvulas quebra-escuma) nessas

linhas pode ser uma alternativa para minimizar as emissões fugitivas de biogás. Ressalta-se, todavia, a recomendação do estabelecimento de uma frequência adequada de remoção do material flotante, o que evitaria a necessidade de implantação de mecanismos de quebra-escuma.

3.3 Redução da entrada de água pluvial na rede coletora de esgoto

A redução da entrada de água pluvial na rede coletora de esgoto é relevante para as ETEs, uma vez que pode influenciar o processo de tratamento anaeróbico, como mencionado anteriormente.

O emprego de materiais, juntas e técnicas apropriadas durante a etapa construtiva das redes coletoras, assim como a inspeção de pontos críticos na rede, podem contribuir significativamente para a redução das contribuições de água pluvial e, também, das taxas de infiltração.

Programas de conscientização dos usuários e uma fiscalização rigorosa durante a realização das ligações prediais são estratégias cruciais para se tentar evitar ou pelo menos reduzir o número de ligações clandestinas. Isso porque, não raramente, visando facilitar e minimizar os custos de construção, os proprietários acabam unificando as redes de águas pluviais com a rede interna de esgoto, o que inevitavelmente traz impacto a todo o sistema de tratamento de esgotos, notadamente na queda da produção do biogás.

Em ETEs que sejam alimentadas por extensas redes coletoras, tendo inclusive estações elevatórias distribuídas ao longo de sua extensão, 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 facilitarão a identificação de trechos da rede coletora com maior taxa de infiltração e/ou contribuição de águas pluviais.

3.4 Controle das emissões fugitivas de CH₄ e H₂S

A recuperação do CH₄ e H₂S dissolvidos em efluentes dos reatores UASB é uma prática importante e uma preocupação mais recente que vem ganhando notório destaque nos meios técnico e científico. Na Parte 4 desta Coletânea de NTs (BRANDT *et al.*, 2018) foram abordados importantes aspectos relacionados à origem e aos problemas referentes às emissões gasosas, todavia focando nas questões associadas a odores e corrosão. Foram propostas medidas para o gerenciamento das emissões fugitivas e residuais, tanto preventivas quanto corretivas, sendo que várias das alternativas de controle para o H₂S também se aplicam para as emissões fugitivas de CH₄. Os exemplos de soluções são o confinamento de ambientes e tratamento dos gases exauridos desses locais ou, eventualmente, a utilização de técnicas mais avançadas para recuperação do metano dissolvido.

Uma das técnicas testadas mais recentemente para a recuperação de metano dissolvido consiste de um sistema a vácuo, cuja avaliação foi recentemente realizada no Estado do Paraná. O princípio de funcionamento desse sistema é a separação líquido-gás por meio da redução de pressão, sendo que o efluente do reator anaeróbio é coletado no interior do compartimento de decantação, uma vez que, segundo Nelting *et al.* (2017), quanto maior a profundidade no interior do reator anaeróbio, maior a concentração de CH₄ dissolvido. O sistema de recuperação de CH₄ dissolvido em questão é constituído por uma torre, uma bomba a vácuo, sensores de vazão, pressão e compostos gasosos. O projeto da torre deve considerar a determinação do diâmetro, da altura, da vazão de efluente e da perda de carga. Estruturalmente, a torre é composta por dois tubos concêntricos, nos quais a pressão negativa é aplicada na região anular. O processo se inicia com a introdução do efluente na parte inferior do tubo interno, e este verte em uma fina camada sobre a parede externa do tubo interno, propor-

cionando maior área superficial de contato. O biogás então se desprende do efluente devido à diferença de pressão parcial líquido-gás e é recuperado na parte superior da torre onde há os sensores de vazão e de composição dos gases de saída. Por fim, o efluente líquido parcialmente desgaseificado é direcionado até uma caixa de distribuição de fluxo interligada às unidades de tratamento subsequentes. Os estudos realizados em escala de demonstração demonstraram taxas de recuperação de CH₄ e H₂S dissolvidos da ordem de 75% e 50%, respectivamente, ratificando o potencial de aplicação da solução.

3.5 Instalação de queimadores de biogás

Conforme discutido na Parte 4 desta Coletânea de NTs (BRANDT *et al.*, 2018), no que tange ao enclausuramento da chama, existem basicamente dois tipos de queimadores: aberto e enclausurado (fechado).

Os queimadores abertos são os mais comuns devido ao seu baixo custo de investimento e facilidade de instalação. No entanto, por não possuírem nenhum tipo de proteção, a queima ocorre sob a influência direta das intempéries, o que acaba afetando a sua eficiência, sendo tipicamente inferior a 50%. Por isso, são recomendados para ETEs de menor porte, em que os critérios de destruição do CH₄ e de compostos odorantes não sejam prioritários. Alternativamente, esses queimadores podem ser utilizados como item de reserva em plantas que fazem o uso energético de biogás, sendo acionado apenas nos momentos de paralisações dos equipamentos utilizados para a transformação energética de biogás. Para o adequado funcionamento dos queimadores abertos, recomenda-se que os seguintes acessórios sejam incorporados em suas estruturas: proteção contra vento, chuva e sistema de ignição automática.

Já os queimadores enclausurados são recomendados em locais que demandam alta eficiência

na destruição do CH₄ e de compostos odorantes. A eficiência de destruição de compostos gasosos dos queimadores enclausurados supera os 99% (KAMINSKI, 2018). Por outro lado, seu custo de investimento é entre 15 e 20 vezes maior que aquele inerente ao queimador aberto. Além disso, sua instalação requer controles complementares para garantir seu correto funcionamento, como controle de vazão, pressão e até mesmo do armazenamento do biogás em alguns casos. Destaca-se que os queimadores enclausurados podem ainda ser empregados no tratamento complementar de gases residuais, como alternativa ao uso de biofiltros.

Com intuito de minimizar as emissões de GEE e de gases odorantes é importante, sempre que possível, realizar avaliação técnico-econômica da possibilidade de substituição dos queimadores de biogás abertos por queimadores enclau-

surados, tendo em vista a maior eficiência de queima desses últimos.

3.6 Instalação de medidores de vazão e monitoramento da composição do biogás

Poucas são as ETEs que realizam o monitoramento contínuo da produção do biogás em reatores anaeróbios, visto que boa parte dos métodos tradicionais de medições são morosos e com um alto custo de análise. Porém, com novas tecnologias surgindo no mercado, sobretudo aquelas vinculadas às áreas de eletrônica e sensoriamento remoto, possibilita-se a realização de medições in loco e em tempo real da produção de biogás em reatores UASB.

Os principais medidores de vazão de biogás e suas respectivas vantagens e desvantagens são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens das principais tecnologias de medição de vazão 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; • Elevado custo.
Medidor vórtex	<ul style="list-style-type: none"> • Sem partes móveis; • Elevada acurácia; • Resistente à corrosão; • Baixa perda de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Longa distância linear de medição necessária; • Necessitam de medições complementares de temperatura e pressão.
Medição por meio de pressão dinâmica	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada 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; • Difícil calibração; • Erro de 1,5 a 5%; • Longa distância de medição.
Fluidistor	<ul style="list-style-type: none"> • Sem partes móveis; • Elevada acurácia; • Baixo custo; • Fácil de limpar, manusear e trocar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo complexo de vazão; • Erro de 1,5%; • Sensível a vibrações.
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; • Manutenção onerosa e rotineira; • Baixa resolução.
Medidor mássico por dispersão térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil instalação; • Baixo custo de investimento; • Baixa perda de carga; • Recomendado para controle de processo e levantamento de potenciais; • Medições precisas até em flutuações de pressão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensível à umidade e às partículas do gás; • Longa distância linear de medição necessária; • Calibração necessita de gás padrão; • Caso o fluido tenha a sua composição variável ao longo da medição, a sua vazão deve ser corrigida.

Fonte: adaptado de BRASIL (2017a).

Além das questões de quantificação da produção de biogás em reatores anaeróbios, é recomendado, sempre que possível, o monitoramento regular da composição desse gás, em especial do teor de CH₄, uma vez que ele define o potencial

de recuperação energética. Adicionalmente, a obtenção da concentração de CH₄ pode servir de base para a supervisão e controle do processo de degradação anaeróbia ocorrida no interior do reator. Os teores de CO₂, H₂S e O₂ também podem

ser monitorados para auxiliar no controle operacional do processo.

Embora a composição do biogás possa ser avaliada com elevada acurácia em laboratórios (com a utilização de cromatógrafos gasosos, por exemplo), atualmente é possível determiná-las em tempo real com o auxílio de equipamentos portáteis e/ou com analisadores de processo. Nesse sentido, os sensores óticos com feixe duplo operando na faixa do infravermelho vêm sendo utilizados nas determinações dos teores de CH_4 e de CO_2 e as células eletroquímicas na medição dos teores de H_2S e O_2 .

Embora as tomadas de decisão intrínsecas ao gerenciamento e aproveitamento energético do biogás em ETEs devam ser pautadas em resultados de medições, muitas vezes, essas não são exequíveis. Nesses casos, as decisões precisam ser pautadas em modelos matemáticos de estimativas. Dentre os modelos disponíveis, o proposto por Lobato *et al.* (2012) tem sido muito utilizado por pesquisadores e gestores de ETEs para estimar a produção de biogás nesses sistemas. O modelo em questão expressa de forma plausível os fenômenos físicos, químicos e biológicos dentro do reator, fazendo com que os resultados de suas estimativas apresentem menores desvios estatísticos em relação aos valores mensurados. Diferentes faixas de relações unitárias foram obtidas a partir da aplicação do modelo proposto por Lobato *et al.* (2012), tais como:

- Volume unitário de CH_4 produzido: 6,8 a 13,7 $\text{NL.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$ e 42,2 a 81,3 NL.m^{-3} esgoto.
- Volume unitário de biogás produzido: 9,8 a 17,1 $\text{NL.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$ e 60,3 a 101,6 NL.m^{-3} esgoto.
- Potencial energético unitário: 0,4 a 0,8 kWh.m^{-3} esgoto e 7,0 a 8,0 kWh.Nm^{-3} biogás.

Cabe destacar que as relações unitárias apresentadas são apenas valores de referência. Para a estimativa mais acurada das taxas de produção de biogás e de CH_4 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 leva em consideração o balanço de massa proposto por Lobato *et al.* (2012). O programa é gratuito e está disponível para *download* no seguinte endereço eletrônico: <http://etes-sustentaveis.org>.

3.7 Classificação de atmosferas explosivas e identificação de espaços confinados

Os principais objetivos da classificação de áreas sujeitas a atmosferas explosivas estão voltados para a eliminação da probabilidade de ocorrência do ambiente explosivo ao redor de uma fonte de ignição. Para a realização da classificação das áreas é necessário que se tenha, minimamente, a planta do local a ser classificado, contendo informações sobre tubulações, reatores, painel de instrumentação, equipamentos, entre outros dispositivos. Com o levantamento dessas informações, deve-se, então, identificar todas as fontes de riscos de liberação de gás inflamável na ETE, bem como a disponibilidade de ventilação nessas fontes.

As áreas classificadas como atmosferas explosivas devem ser divididas em zonas de riscos, as quais são baseadas na frequência de ocorrência e duração de uma atmosfera explosiva. Desse modo, as zonas podem ser divididas em (NBR IEC 60079-10-1 - ABNT, 2009): i) zona 0 - área na qual uma atmosfera explosiva de gás está presente de modo contínuo ou por longos períodos de tempo; ii) zona 1 - área na qual uma atmosfera explosiva de gás é provável de ocorrer de modo ocasional em condições normais de operação; e iii) zona 2 - área na qual uma atmosfera explosiva de gás não é provável de ocorrer em condições normais de operação, porém, caso ocorra, irá persistir por curtos períodos de tempo.

Em ETEs com produção de biogás, o gasômetro, o reator e o queimador, em condições especiais de operação, podem ser classificadas como zona 0.

Equipamentos instalados na planta, como válvulas de alívio de pressão, válvulas corta-chamas e selos hídricos, que possam liberar gás inflamável durante operação normal, podem ser enquadrados como zona 1. Flanges, conexões e acessórios de tubulação podem ser classificados como zona 2 (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008). Na Figura 5 é apresentado um exemplo de mapa esquemático das zonas de riscos identificadas em uma ETE com reator anaeróbio.

Além do mapeamento das áreas classificadas, é preciso também identificar, isolar e sinalizar os espaços confinados presentes em uma ETE,

de forma a controlar os riscos de atividades que obrigatoriamente se desenvolvam nesses locais. Dentre os principais riscos de acidentes em espaços confinados, destacam-se os riscos de asfixia e intoxicação ocasionados pela presença de gases no interior do ambiente de trabalho. Para reduzir tais riscos, recomenda-se que medições de gases sejam realizadas antes e durante o trabalho (BRASIL, 2006). Os principais instrumentos e equipamentos de medição de gases que devem ser utilizados nesses ambientes são: i) cromatógrafo; ii) detector multi-gás; iii) oxímetro; iv) explosímetro; e v) oxiexplosímetro.

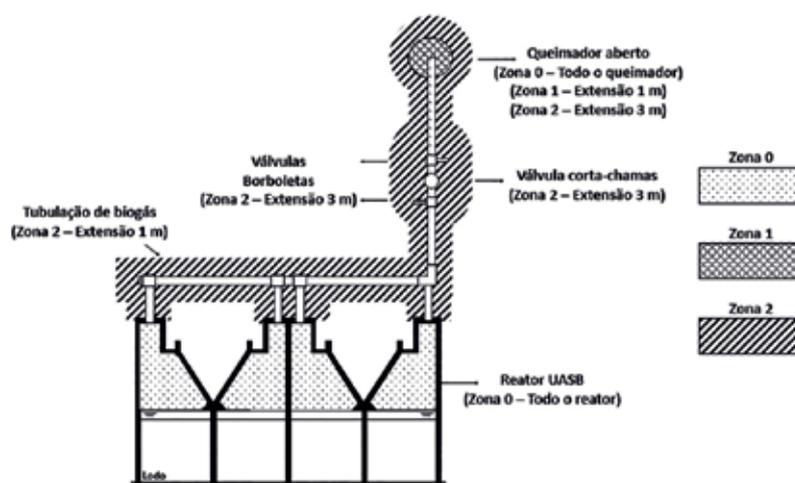


Figura 5 – Mapa esquemático das zonas de riscos de explosão em uma ETE com reator anaeróbio.

Fonte: RIETOW *et al.* (2017).

3.8 Análise de viabilidade técnico-econômica sobre a possibilidade de destruição de metano e aproveitamento energético de biogás

A utilização do biogás para fins energéticos está amplamente fundamentada na literatura. O Guia Brasileiro de Aproveitamento Energético de Biogás em ETEs compila os requisitos técnicos necessários para a implementação de usinas de recuperação energética de biogás (BRASIL, 2016). Os avanços obtidos no país, em especial durante a

execução do Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Uso Energético de Biogás no Brasil (Probiogás), demonstram casos de sucesso e com potencial de replicação (MOREIRA, 2017).

Estudos atestam, por exemplo, 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 200.000 e 450.000

habitantes, essas taxas poderiam alcançar até 80% (VALENTE, 2015). Já em ETEs com baixa capacidade de produção e recuperação de metano, em que é pouco provável que a utilização de equipamentos para geração combinada de eletricidade e calor encontre viabilidade econômica, a principal alternativa refere-se à combustão direta com recuperação de energia térmica.

É verdade que os critérios para a tomada de decisão acerca do uso do biogás devem ser avaliados individualmente e estão associados com o potencial de geração de energia (intimamente ligado ao porte da ETE), demanda de higienização/secagem de lodo, demanda energética da ETE, vocação regional, tarifa de energia elétrica, entre outros (BRASIL, 2017b; ROSENFELD *et al.*, 2015). Destaca-se, porém, que há um movimento crescente no país, ainda incipiente, voltado para a utilização de ferramentas de suporte a tomada de decisão, cujas variáveis são econômicas e não meramente financeiras. Prestadores de serviços de saneamento, por exemplo, já estão buscando orientar suas ações de acordo com um plano de redução das emissões de GEE (CARVALHO e POSSETTI, 2017), vislumbrando contribuir para as metas estratégicas estabelecidas pelo governo brasileiro e pactuadas internacionalmente.

Por isso, considerando que a recuperação energética do biogás em ETEs dotadas de reatores UASB é promissora, a adoção das boas práticas de engenharia descritas nesta NT parece ser um item mandatário para os melhores desempenhos econômico e financeiro inerentes às iniciativas com tal natureza.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a recuperação do biogás proveniente de reatores UASB seja uma importante tendência no setor de esgotamento sanitário brasileiro, há problemas oriundos da concepção de projetos, de aspectos construtivos e de rotinas operacionais que precisam ser dirimidos para impulsionar a valori-

zação energética desse subproduto e a redução das emissões de metano.

A adoção das boas práticas de engenharia reportadas nesta NT, as quais foram respaldadas pela literatura e experiências dos autores, corroboram para o incremento das taxas de biogás passíveis de aproveitamento, maximizando o potencial de produção de energia limpa e renovável, mitigando as emissões de gases de efeito estufa e odoríferos e salvaguardando infraestruturas e a saúde ocupacional de operadores.

Dentre os pontos de aprimoramento elencados destacam-se: a vedação e a estanqueidade da câmara de gás e das tubulações de biogás dos reatores UASB; a construção de STFs apropriados; o controle e a redução do aporte de água pluvial na rede coletora de esgoto; a remoção controlada da espuma; a recuperação de CH₄ dissolvido no meio líquido; a instalação de queimadores de biogás eficientes; a medição e o monitoramento da produção de biogás; e a classificação de atmosferas explosivas.

As experiências de sucesso conquistadas a partir da adoção de todas essas melhorias ainda são incipientes. No entanto, as implementações individualizadas e as validações de cada uma das soluções aqui descritas permitem inferir que os projetos de recuperação energética de biogás que zelem por tais intervenções possuirão melhores desempenhos econômico e financeiro.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Prof. Fabiana Lopes Passos Del Rei pela contribuição para a estruturação inicial desta Nota Técnica. Agradecem ainda o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e

do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

6 REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR IEC 60079-10-1: **Classificação de áreas – atmosferas explosivas**. 1ª ed. Rio de Janeiro, 2009. 71 p.

BRANDT, E. M. F., SANTOS, J. M. B., SOUZA, C. L., POSSETTI, G. R. C., BRESSANI- RIBEIRO, T. B., CARVALHO-JÚNIOR, A. N., CHERNICHARO, C. A. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 4: Controle de corrosão e emissões gasosas. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 56-72, 2018.

BRASIL. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. 2 ed. Brasília, Distrito Federal: Ministério das Cidades, 2017a. 183 p.

BRASIL. Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho nº 15. **Atividades e Operações insalubres**, 1978.

BRASIL. Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho nº 33. **Segurança e Saúde no Trabalho em Espaços Confinados**, 2006.

BRASIL. **Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs a partir do biogás**. 1 ed. Brasília, Distrito Federal: Ministério das Cidades, 2017b. 145 p.

CABRAL, B. G. C. **Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário**. 2016, 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

CARVALHO, M. E., POSSETTI, G. R. C. Potencial de redução das emissões de gases do efeito estufa provenientes de reatores anaeróbios de estações de tratamento de esgoto: proposição de cenários para o Estado do Paraná. In: **Congresso ABES/FENASAN 2017**, São Paulo, Brasil. Anais... São Paulo, Brasil: ABES, 2017.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2ª 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, C. A. L., VAN LIER, J. B., NOYOLA, A., RIBEIRO, T. B. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. **Environmental Science and Biotechnology**, v.14, p. 649-679, 2015.

CHERNICHARO, C.A.L, BRESSANI-RIBEIRO, T., PEGORINI, E., POSSETTI, G.R.C., MIKI, M. K., NONATO, S. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 1: Tópicos de Interesse. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 5-16, 2018.

DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources**. Wiley-VCH, Weinheim, 2008.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

KAMINSKI, G. F., WAGNER, L. G., SILVA, F. O. M., POSSETTI, G. R. C. Análise crítica acerca da aplicação de queimadores enclausurados em ETEs para destruição de biogás. In: **3º Simpósio MAUI Brasil – Alemanha**, 2018, Curitiba, Brasil. **Anais...** Curitiba, Brasil: Universität Stuttgart, UFPR, SENAI e ABES-PR, 2018.

LOBATO, L. C., CHERNICHARO, C. A., SOUZA, C. L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. **Water Science & Technology**, v. 66, n. 12, p. 2745-2753, 2012.

LOBATO, L. C. S., BRESSANI-RIBEIRO, T., SILVA, B. S., FLÓREZ, C. A. D., NEVES, P. N. P., CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 3: Gerenciamento de lodo e espuma. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

MOREIRA, H. C. **Biogás em estações de tratamento de esgotos: os principais legados da cooperação técnica Brasil-Alemanha**. 2017. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

MORENO, V. C., COZZANI, V. Major accident hazard in bioenergy production. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries** v. 35, p. 135-144, 2015.

NELTING, K., TRAUTMANN, N., CAICEDO, C., WEICHGREG, D., ROSENWINKEL, K. H., COSTA, F. J. O. G., POSSETTI, G. R. C. Constraints on the dissolved methane in the effluent of full scale municipal UASB reactors. In: **The 14th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies** - LET, Florianópolis, Brasil. **Proceedings...** Florianópolis, Brasil: International Water Association – IWA, 2017.

NOYOLA, A., MORGAN-SAGASTUME, J. M., LOPEZ-HERNANDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 5, n. 1, p. 93-114, 2006.

POSSETTI, G. R. C., JASINSKI, V. P., MESQUITA, N. C., KRIGUEL, K., CARNEIRO, C. Medições em tempo real do biogás produzido em

reatores UASB alimentados com esgoto doméstico. In: **27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Goiânia, Brasil. **Anais...** Goiânia, Brasil: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2013.

RIETOW, J. C., POSSETTI, G. R. C., FERNANDES, I. R., LISBOA, A. M., WAGNER, L. G. Classificações de atmosferas explosivas em estações de tratamento de esgotos com produção de biogás. In: **Congresso ABES/FENASAN 2017**, São Paulo, Brasil. **Anais...** São Paulo, Brasil: ABES, 2017.

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. In: **28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2015.

SOUZA, C. L., CHERNICHARO, C. A., AQUINO, S. F. Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. **Water Science & Technology**, v. 64, n. 11, p. 2259-2264, 2011.

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil**. 2015. 182 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

WAISS, T. C. F., POSSETTI, G. R. C. Influência de eventos de chuva na produção de biogás de reatores anaeróbios alimentados com esgoto doméstico. In: **28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2015.