

revista

# DAE



sabesp

214

Volume 66

novembro 2018

ISSN 0101-6040

Distribuição gratuita

**EDIÇÃO ESPECIAL COLETÂNEA REATORES UASB**

**Contribuição para o aprimoramento de projeto,  
construção e operação de reatores UASB  
aplicados ao tratamento de esgoto sanitário**



**inct**  
ETEs Sustentáveis



---

# editorial

Prezados leitores,

É com grande satisfação que apresentamos a edição especial da REVISTA DAE sobre Reatores UASB, resultado de uma parceria com o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em ETES Sustentáveis (INCT ETES Sustentáveis). O INCT ETES Sustentáveis foi criado com o intuito de se tornar um centro de referência nacional e internacional para questões relacionadas ao tratamento de esgoto sanitário, de forma a contribuir para a promoção de mudanças estruturais e estruturantes por meio da capacitação profissional, do desenvolvimento de soluções tecnológicas apropriadas às diversas realidades nacionais, da construção de conhecimento e sua transmissão para a sociedade, órgãos governamentais e empresariais.

Esta edição foi composta de artigos pré-selecionados no tema sugerido - Reatores UASB. Assim, foi criado um comitê de avaliação das Notas Técnicas, composto pelos seguintes professores: Eduardo Pacheco Jordão (UFRJ), Marcos von Sperling (UFMG), Mario Takayuki Kato (UFPE), Pedro Alem Sobrinho (EP-USP) e Roque Passos Piveli (EP-USP), sob a coordenação do professor Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, desta forma garantindo o rigor científico dos artigos.

Boa leitura,



Engª Cristina Knorich Zuffo

EDITORA-CHEFE



Nº 214

edição especial de novembro 2018

#### Missão

A Revista DAE tem por objetivo a publicação de artigos técnicos e científicos originais nas áreas de saneamento e meio ambiente.

#### Histórico

Iniciou-se com o título Boletim da Repartição de Águas e Esgotos (RAE), em 1936, prosseguindo assim até 1952, com interrupções em 1944 e 1945. Não circulou em 1953. Passou a denominar-se Boletim do Departamento de Águas e Esgotos (DAE) em 1954 e Revista do Departamento de Águas e Esgotos de 1955 a 1959. De 1959 a 1971, passou a denominar-se Revista D.A.E. e, a partir de 1972, Revista DAE. Houve, ainda, interrupção de 1994 a 2007. Relançada em 2007 a revista está qualificada pela CAPES como periódico B2 e está indexada a dois diretórios: Latindex e Diadorim.

#### Publicação

Trimestral (janeiro, abril, julho e outubro)

Diretoria de Tecnologia, Empreendimentos e Meio Ambiente – T Superintendência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação Tecnológica – TX

Rua Costa Carvalho, 300 – Pinheiros – 05429 000

São Paulo – SP – Brasil

Tel (11) 3388 9422 / Fax (11) 3814 5716

#### Editora-Chefe

MSc Engenheira Cristina Knorich Zuffo

#### Editores Científica

MSc Engenheira Iara Regina Soares Chao

#### Editores Associados

Prof. Dr. Carlos Augusto Lemos Chernicharo e MSc Eng. Thiago Bressani Ribeiro

#### Conselho Editorial

Prof. Dr. Pedro Alem Sobrinho (Universidade de São Paulo – USP), Prof. Dr. Cleverton Vitorio Andreoli (Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar), Prof. Dr. José Roberto Campos (USP), Prof. Dr. Dib Gebara (Universidade Estadual Paulista – Unesp), Prof. Dr. Eduardo Pacheco Jordão (Universidade Federal do Rio de Janeiro), Prof. Dr. Rafael Kospchitz Xavier Bastos (Universidade Federal de Viçosa), Prof. Dr. Wanderley S. Paganini (Faculdade de saúde Pública da USP), Profª. Drª. Emilia Wanda Rutkowski (Universidade Estadual de Campinas – Unicamp), Prof. Dr. Marcos Tadeu (USP), Profª. Drª. Dione Mari Morita (Escola Politécnica da USP), Profª. Drª. Angela Di Bernardo Dantas (Universidade de Ribeirão Preto/UNAERP). Coordenação da Eng. Cristina Knorich Zuffo (Sabesp).

#### Capa

Crédito: Acervo SABESP. ETE Várzea Paulista

#### Projeto Gráfico, Diagramação e Revisão

Beatriz Martins Gomes 29772393832

ISSN 0101-6040

As opiniões e posicionamentos expressos nos artigos são de total responsabilidade de seus autores e não significam necessariamente a opinião da Revista DAE ou da Sabesp.

#### Veja a revista eletrônica na internet:

<http://www.revistadae.com.br>

Crédito: Acervo SABESP  
ETE Várzea Paulista

## nesta edição

### NOTAS TÉCNICAS

5

Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 1: Tópicos de Interesse

*Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage – Part 1: Topics of Interest*

17

Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 2: Tratamento preliminar, bombeamento e distribuição de vazão

*Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage – Part 2: Preliminary treatment, pumping and influent distribution*

30

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

*Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage – Part 3: Management of sludge and scum*

56

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

*Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage – Part 4: Control of corrosion and gaseous emissions*

73

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*

90

Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 6: Qualidade do efluente

*Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage – Part 6: Effluent quality*

110

EVENTOS

# Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 1: Tópicos de Interesse

*Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage – Part 1: Topics of Interest*

• **Data de entrada:**  
01/08/2018

• **Data de aprovação:**  
17/09/2018

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (\*) / Thiago Bressani Ribeiro / Eduardo Sabino Pegorini / Gustavo Rafael Collere Possetti / Marcelo Kenji Miki / Saulo Nonato de Souza

DOI: 10.4322/dae.2018.038

## Resumo

O Brasil detém o maior parque de reatores anaeróbios do mundo, considerando-se a aplicação da tecnologia para o tratamento de esgoto sanitário. Apesar das reconhecidas vantagens dos reatores do tipo UASB, há problemas que têm impedido seu máximo desempenho operacional. Negligenciar a existência e postergar a solução desses desafios pode colocar em risco os importantes avanços conseguidos até o presente, impactando o futuro da tecnologia anaeróbia no país e, conseqüentemente, o setor de esgotamento sanitário nacional. Esta Nota Técnica (NT) objetiva apresentar os principais tópicos de interesse relacionados à necessidade de aprimoramentos de projeto, construção e operação de reatores UASB, a partir de um amplo levantamento junto a especialistas do setor acadêmico e de prestadores de serviços de saneamento nacionais. Os tópicos identificados foram correlacionados aos problemas passíveis de ocorrerem em reatores UASB, bem como às suas respectivas origens. Para cada tópico e problemas identificados, foram feitas indicações das principais soluções que vêm sendo adotadas, em vista das pesquisas mais recentes e das experiências de sucesso em ETEs no Brasil. Os tópicos de interesse são reportados sinteticamente na presente NT, sendo posteriormente detalhados no conjunto de Notas Técnicas que integram a coletânea “Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário”.

**Palavras-chave:** Biogás, corrosão, espuma, lodo, odor, qualidade do efluente, reatores anaeróbios

## Abstract

*Brazil has the largest park of anaerobic reactors in the world, considering the technology application for sewage treatment. Despite the recognized advantages of UASB reactors, there are problems that have prevented their maximum op-*

**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.

**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.

**Eduardo Sabino Pegorini** – Engenheiro Agrônomo e Mestre em Ciências do Solo pela UFPR. Engenheiro da Unidade de Gestão de Projetos do KFW na Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar).

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

**Marcelo Kenji Miki** – Engenheiro Civil e Mestre pela Escola Politécnica da USP. Gerente do Departamento de Execução de Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo (Sabesp).

**Saulo Nonato de Souza** – Engenheiro Civil pela UFMG. Engenheiro de Operação da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa). Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG.

\***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

*erational performance. Neglecting the existence and delaying the solution of these challenges can jeopardize the important advances made to date, impacting the future of anaerobic technology in the country and, consequently, the national sewage sector. This Technical Note (TN) aims to present the main topics of interest related to the need for improvements in the design, construction and operation of UASB reactors, based on a wide survey with experts from the academic sector and national sanitation service providers. The identified topics were correlated to the problems likely to occur in UASB reactors, as well as to their respective origins. For each topic and identified problems, indications were given of the main solutions that have been adopted, in view of the most recent researches and successful experiences in STPs in Brazil. The topics of interest are summarily reported in this TN, and are further detailed in the set of Technical Notes that integrate the collection "Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage".*

**Keywords:** Anaerobic reactors, biogas, corrosion, effluent quality, odour, scum, sludge

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da experiência com filtros anaeróbios reportada na clássica publicação de Young e McCarty (1969), um grupo de pesquisadores da Universidade de Wageningen (Holanda), liderado pelo professor Gatze Lettinga, sugeriu a substituição do meio suporte pela inserção de um separador de fases (líquida, sólida e gasosa) na parte superior do reator. Esse aspecto se configurou no início do desenvolvimento dos reatores anaeróbios de manta lodo e fluxo ascendente (UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) (LETTINGA, 2014). As primeiras investigações com os reatores UASB foram associadas ao tratamento de efluentes da indústria de processamento de batata para extração de amido e processamento de beterraba para obtenção de açúcar. Ainda em meados da década de 70, realizaram-se os primeiros testes com reatores UASB em escala laboratorial (30-120 L) e piloto (6 m<sup>3</sup>) tratando o esgoto sanitário da vila de Bennekom (Holanda). Não obstante, problemas associados à necessidade de aquecimento do esgoto, visando simular as temperaturas em países de clima tropical, motivaram a busca de parcerias para a implantação de reatores UASB em países em desenvolvimento. Logo, um projeto entre os governos holandês e colombiano, com a participação da Universidade de Wageningen e da empresa de consultoria Royal Haskoning, possibilitou a implantação de um reator UASB em escala de demonstração (64 m<sup>3</sup>) na cidade de Cali

(LETTINGA, 2014). Os bons resultados associados com o projeto de pesquisa fomentaram a definição das bases iniciais dos critérios e parâmetros de projeto, operação e manutenção de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário. A partir dessa experiência, decorreu-se entre as décadas de 80 e 90 a implantação de reatores em escala plena (~1.000 m<sup>3</sup>) na própria cidade de Cali, bem como projetos de pesquisa na Índia, Gana, Oriente Médio e América Latina, notadamente no Brasil, Colômbia e México.

Especificamente no Brasil, o uso dos reatores UASB para o tratamento de esgoto foi introduzido na década de 80, quando se iniciaram projetos de vários grupos de pesquisa nacionais e de engenheiros atuantes no setor. Especificamente no estado do Paraná, destaca-se que os projetistas da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) estiveram na Holanda na década de 80, interagindo com o professor Gatze Lettinga. Dessa interface adveio a concepção dos reatores anaeróbios de leito fluidizado (RALF), uma variante do reator UASB marcadamente empregada pela Sanepar. Durante os estágios iniciais, o projeto e operação ainda incipientes dos reatores UASB criaram entraves à credibilidade do sistema, culminando em rejeição da tecnologia anaeróbia em alguns prestadores de serviços de saneamento e órgãos ambientais. Todavia, a confiança tem sido reestabelecida nas décadas recentes como resultado da intensificação

de estudos e pesquisas na área, bem como a partir da experiência obtida com a operação de reatores em escala plena. Indubitavelmente, uma importante contribuição para a consolidação e disseminação da tecnologia anaeróbia para o tratamento de esgoto sanitário no Brasil foi proveniente do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PRO-SAB), desenvolvido entre os anos de 1997 e 2007 (CAMPOS, 1999; CHERNICHARO, 2001).

De fato, estações de tratamento de esgoto (ETEs) compostas por reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio permitem, geralmente, uma redução dos custos de implantação (CAPEX) entre 20-50% e de operação (OPEX) superior a 50%, quando comparados a estações convencionais de lodo ativado (SILVA, 1993; ALEM SOBRINHO e JORDÃO, 2001; von SPERLING e CHERNICHARO, 2005; CHERNICHARO, 2006). Esse é um dos fatos responsáveis pelo incremento dos níveis de tratamento de esgoto na América Latina (CHERNICHARO *et al.*, 2015). Nesse contexto, nota-se que os reatores UASB são a principal tendência atual de tratamento de esgotos no Brasil, como unidades únicas, ou seguidos de alguma forma de pós-tratamento. Segundo levantamento realizado por Chernicharo *et al.* (2018), cerca de 40% das ETEs localizadas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil empregam reatores UASB em seu fluxograma de tratamento. Isso permite ainda afirmar que o país detém o maior parque de reatores anaeróbios do mundo, considerando-se a aplicação da tecnologia para o tratamento de esgoto sanitário.

Além da simplicidade operacional dos reatores UASB quando comparados aos processos aeróbios convencionais (lodo ativado) ou físico-químicos, bem como os aspectos financeiros anteriormente mencionados, a concentração de biomassa (2-6 g.L<sup>-1</sup>) e a idade do lodo (> 30 dias) no reator são tipicamente elevadas, o que reduz significativamente seu volume em relação a outros processos de tratamento de efluentes. Outras vantagens dos reatores UASB são a ausência de meio suporte, em vista do crescimento disperso da biomassa, a baixa produção de lodo

e o reduzido gasto energético, típicos dos sistemas anaeróbios. Adicionalmente, o lodo excedente a ser descartado já se encontra adensado e digerido, podendo ser diretamente direcionado à unidade de desaguamento. Por fim, destaca-se a possibilidade associada à geração e coleta do biogás, o qual é passível de aproveitamento energético devido à sua composição rica em metano. De acordo com recentes resultados do Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (PROBIOGÁS), o teor médio de metano no biogás proveniente de reatores UASB tratando esgoto sanitário varia entre 70 e 81% (BRASIL, 2017), cujo poder calorífico inferior é de aproximadamente 10 kWh.Nm<sup>-3</sup> (MORAN *et al.*, 2010).

Apesar dessas reconhecidas vantagens, o uso de reatores UASB no Brasil ainda apresenta desafios que impedem seu máximo desempenho operacional. Parcela importante dos problemas associados a esses reatores anaeróbios tem sua origem em deficiências nas fases iniciais de projeto. Todavia, processos construtivos inadequados e problemas operacionais também têm sido reportados pela literatura e pelos prestadores de serviços de saneamento em diversas regiões do país (MIKI, 2010). Além dos problemas técnicos de concepção, construção e operação, em diversos momentos os problemas operacionais decorrem de situações que extrapolam os limites das ETEs, tais como questões de gestão dos sistemas que se refletem em falhas administrativas e financeiras, que com frequência impedem a execução adequada de procedimentos operacionais essenciais. Assim, negligenciar a existência e postergar a solução desses problemas pode colocar em risco os importantes avanços conseguidos até o presente, impactando o futuro da tecnologia anaeróbia no Brasil. Isso se constituiria em um impacto sem precedentes para o setor de esgotamento sanitário nacional, com enormes riscos de implicações diretas na estagnação dos índices de cobertura de tratamento de esgoto no país.

Importante destacar que a maioria expressiva dos problemas abordados nesta coletânea de Notas Técnicas pode ser corrigida de maneira simples e efetiva, sem impactos significativos sobre os custos dos reatores, desde que mais atenção seja dedicada às etapas de projeto e de construção, e à melhor capacitação dos operadores das estações de tratamento. Muito provavelmente, os problemas de gestão encontram-se associados à maioria das ETEs, independentemente da tecnologia de tratamento utilizada. Acredita-se, portanto, que as informações contidas nesse conjunto de Notas Técnicas podem contribuir efetivamente para a

correção da quase totalidade dos problemas de projeto, construção e operação de reatores UASB.

## 2 CONSOLIDAÇÃO DE TÓPICOS DE INTERESSE

Os principais tópicos de interesse relacionados à necessidade de aprimoramentos de projeto, construção e operação de reatores UASB são representados esquematicamente na Figura 1, a partir de amplo levantamento realizado junto a especialistas do setor acadêmico e de prestadores de serviços de saneamento nacionais.

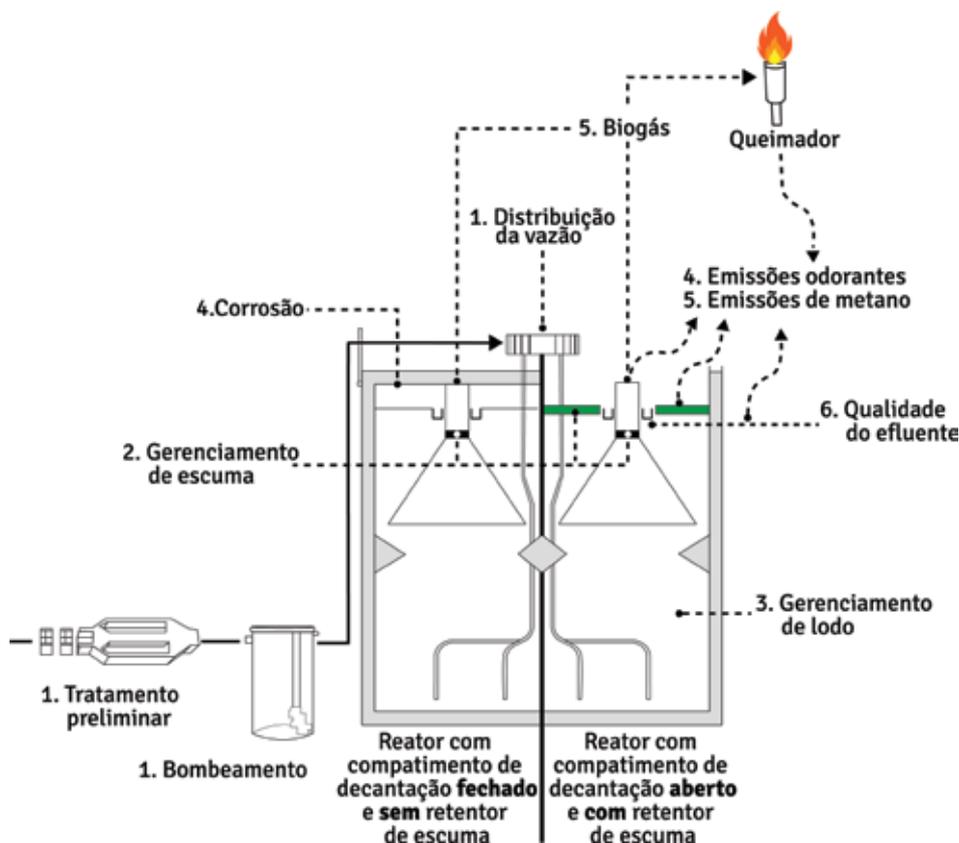


Figura 1 - Tópicos de interesse para o aprimoramento de reatores UASB

Os tópicos de interesse identificados são relatados de forma sintética na presente Nota Técnica (NT), sendo detalhados, conforme apresentado na Tabela 1, nas NTs subsequentes que integram a Coletânea “Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário”.

Esses tópicos de interesse foram correlacionados, na Tabela 2, aos problemas passíveis de ocorrerem em reatores UASB, bem como às suas respectivas origens, em vista das experiências em ETEs no Brasil. Como elemento final da Tabela 2, foram indicadas as principais soluções que vêm sendo adotadas no país para a resolução dos problemas relatados.

**Tabela 1:** Relação entre os principais tópicos de interesse para aprimoramentos de reatores UASB e as Notas Técnicas correspondentes

Tópicos de interesse	Nota Técnica correspondente
1. Tratamento preliminar, bombeamento e distribuição de vazão	Parte 2: Tratamento preliminar, bombeamento e distribuição de vazão (BRESSANI-RIBEIRO <i>et al.</i> , 2018);
2. Gerenciamento de espuma	Parte 3: Gerenciamento de lodo e espuma (LOBATO <i>et al.</i> , 2018);
3. Gerenciamento de lodo	
4. Corrosão e emissões odorantes	Parte 4: Controle de corrosão e emissões odorantes (BRANDT <i>et al.</i> , 2018);
5. Biogás e emissões fugitivas de metano	Parte 5: Biogás e emissões fugitivas de metano (POSSETTI <i>et al.</i> , 2018);
6. Qualidade do efluente	Parte 6: Qualidade do efluente (ALMEIDA <i>et al.</i> , 2018).

**Tabela 2:** Principais tópicos de interesse para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB

Tópicos de interesse	Problemas relacionados	Origem do problema	Possíveis aprimoramentos
1- Tratamento preliminar, bombeamento e distribuição de vazão	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ocorrência de <u>odores nas imediações do tratamento preliminar (TP)</u></li> <li>Formação de <u>depósitos de areia nos canais</u> do TP</li> <li><u>Empoçamento de líquido drenado</u> das caçambas de resíduos removidos no TP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Existência de pontos de turbulência nas unidades do TP que favoreçam a liberação do sulfeto de hidrogênio dissolvido na fase líquida (esgoto afluente à ETE);</li> <li>Os sólidos removidos no TP contém matéria orgânica, a qual pode entrar em decomposição e gerar maus odores durante o período de estocagem nas caçambas utilizadas para acumulação desses resíduos;</li> <li>Alterações da seção transversal de canais, ocasionando o decréscimo das velocidades de escoamento e a consequente deposição de sólidos de natureza orgânica;</li> <li>Velocidades inferiores às mínimas previstas em projeto no início da operação da ETE;</li> <li>Ausência de contenção e drenagem dos pátios onde são posicionadas as caçambas utilizadas para estocagem dos resíduos do TP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Implantar o <u>confinamento, exaustão e tratamento dos gases</u> extraídos dos locais com maior turbulência e emissão de gases dissolvidos (ver detalhes na Parte 4 desta Coletânea de NTs – BRANDT <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>Jogar <u>cal sobre os resíduos na caçamba para neutralizar a emissão</u> de odores;</li> <li>Reduzir o tempo de estocagem da caçamba na ETE;</li> <li>Avaliar alternativas de <u>modulação de implantação do TP</u>, objetivando assegurar a manutenção de velocidades mínimas de escoamento, especialmente no início de plano;</li> <li>Utilizar <u>pátios</u> para posicionamento das caçambas <u>com contenção e drenagem dos líquidos</u>, que devem ser retornados para o TP. Adicionalmente, prever telhado sobre os pátios, a fim de evitar/reduzir o aporte de água de chuva.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>Vazões de bombeamento</u> não compatíveis com as vazões médias e máximas utilizadas no projeto dos reatores anaeróbios</li> <li><u>Afogamento de grades</u> implantadas a montante de estações elevatórias</li> <li>Ausência de <u>controle da frequência e das vazões de extravasamento</u> da ETE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muitas elevatórias de esgoto (EE) de pequeno e médio porte são projetadas com apenas duas bombas, sendo uma para rodízio e reserva. Nessas situações, a vazão nominal de cada bomba deve ser maior ou igual à vazão máxima de projeto dos reatores;</li> <li>Por sua vez, o dimensionamento hidráulico dos reatores é feito com base na vazão média de projeto, sendo previsto e verificado o funcionamento para a condição de vazão máxima (com os coeficientes K1 e K2), todavia a operação do reator sob vazão máxima não deve exceder a um período de 2 – 4 horas. Ou seja, EE que operam com apenas uma bomba e que não dispõem de inversores de frequência estarão bombeando, sempre, uma vazão igual ou superior à vazão máxima de projeto dos reatores, expondo os mesmos a condições de sobrecarga hidráulica durante o bombeamento;</li> <li>Face ao exposto anteriormente, o hidrograma de vazões afluente ao reator UASB é diferente do hidrograma das vazões afluentes a ETE;</li> <li>O dispositivo de controle de vazão de pico (extravasor) é comumente implantado junto à parede lateral do canal de chegada ao TP. Todavia, em ETEs nas quais a EE de chegada está localizada a jusante do TP e, onde há risco de interrupção do fornecimento de energia elétrica, pode ocorrer o afogamento das unidades do TP localizadas a montante da EE, caso esta não disponha de extravasor próprio, independente do anterior (do TP);</li> <li>As ETEs usualmente não dispõem de registro de eventos de extravasamento e controle de vazões de excesso que são derivadas para o curso d'água.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilizar <u>bombas com variadores de velocidade</u> (inversores de frequência) ou o mínimo de três bombas, sendo uma para rodízio e reserva, tal como recomendado no item 6.4.2 da NBR 12.209 (ABNT, 2011);</li> <li>Implantar <u>medidor de vazão pós-estação elevatória</u>, de modo a verificar as vazões efetivamente aduzidas ao reator UASB, especialmente quando as bombas operarem sem inversores de frequência. Neste caso, seria possível a obtenção do hidrograma das vazões afluentes ao reator UASB;</li> <li>Implantar <u>extravasores</u> que efetivamente <u>protejam as unidades subsequentes</u> do tratamento quanto a sobrecargas hidráulicas. Nesse caso, dois extravasores, um antes do TP e outro associado ao poço de sucção da EE de chegada são necessários para evitar o afogamento de unidades implantadas a montante de elevatórias;</li> <li>Implantar <u>medidores de vazão</u> no canal de extravasão da ETE, de modo a assegurar o registro da frequência e magnitude das vazões afluentes derivadas para o curso d'água.</li> </ul>

Tópicos de interesse	Problemas relacionados	Origem do problema	Possíveis aprimoramentos
1- Tratamento preliminar, bombeamento e distribuição de vazão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Distribuição não uniforme de vazão</b> para os tubos de alimentação do reator, podendo ocasionar: <ul style="list-style-type: none"> <li>- acumulação de detritos nos locais em que ocorre estagnação do esgoto;</li> <li>- formação de zonas mortas e consequente elevação excessiva da concentração do lodo nos pontos não alimentados;</li> <li>- formação de fluxos preferenciais nas zonas que recebem alimentação em excesso;</li> <li>- eventualmente, pode haver queda na eficiência de retenção de sólidos e de remoção de matéria orgânica.</li> </ul> </li> <li>• <b>Entupimento frequente dos tubos de alimentação</b> do reator, aumentando o trabalho do operador com a desobstrução dos mesmos</li> <li>• <b>Fixação inadequada dos tubos de distribuição</b> junto à caixa de distribuição e ao fundo do reator</li> <li>• <b>Acúmulo de areia e detritos</b> nos compartimentos de distribuição</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estruturas de distribuição projetadas e/ou executadas em materiais que não possibilitam acabamento adequado (p.ex.: concreto);</li> <li>• Baixa qualidade construtiva e/ou negligência/desatenção da equipe de fiscalização da obra;</li> <li>• Desnívelamento dos vertedores por falha durante a construção e/ou em decorrência de procedimento de limpeza;</li> <li>• Quebra de placas divisoras entre tubos de distribuição em decorrência de procedimento de limpeza;</li> <li>• Número de tubos de distribuição inferior ao recomendado na NBR 12.209 (ABNT, 2011) (mínimo de 1 tubo a cada 2 a 3 m<sup>2</sup>).</li> <li>• Elevada presença de detritos (lixo) no esgoto, em decorrência dos maus usos das instalações sanitárias e do sistema de esgotamento como um todo;</li> <li>• Unidades do tratamento preliminar projetadas e/ou executadas em não conformidade com a NBR 12.209 (ABNT, 2011);</li> <li>• Unidades do tratamento preliminar fora de operação por questões de manutenção;</li> <li>• Compartimentos de distribuição projetados com fundo plano e/ou com baixa inclinação;</li> <li>• Tubos de alimentação do reator com diâmetro inferior ao recomendado pela NBR 12.209 (ABNT, 2011) e/ou com comprimento excessivo e/ou com mudanças de direção que dificultam a livre passagem do esgoto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizar caixas de distribuição confeccionadas em <b>materiais que possibilitem melhor acabamento</b> (p.ex.: fibra de vidro, polipropileno);</li> <li>• Incluir <b>caixas de recepção e distribuição de vazão de excesso de lodo aeróbio</b>, de modo a permitir flexibilidade de manobra durante a alimentação desse excesso de lodo entre os módulos dos reatores UASB;</li> <li>• <b>Rigor da equipe de fiscalização</b> durante o acompanhamento da obra;</li> <li>• Verificar o <b>nivelamento de vertedores</b> no recebimento da obra e periodicamente após o início da operação. Proceder também a limpeza periódica dos vertedores, visando evitar sua obstrução parcial.</li> <li>• Realizar <b>campanhas de sensibilização dos usuários</b> do sistema de esgotamento sanitário, objetivando a redução do lançamento de detritos na rede de esgoto;</li> <li>• Utilizar <b>unidades de tratamento preliminar</b> (grades, peneiras e desarenadores) de <b>comprovada eficiência</b> e que atendam as prescrições da NBR 12.209 (ABNT, 2011);</li> <li>• Implantar estruturas de <b>distribuição de vazão projetadas com fundo inclinado</b>, de modo a minimizar o acúmulo de areia e detritos;</li> <li>• <b>Aprimorar os projetos de tratamento preliminar</b> para aumentar a confiabilidade, minimizar manutenção dos equipamentos e aumentar a eficiência (ver recomendações na Parte 2 desta Coletânea de NTs – BRESSANI-RIBEIRO <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>• <b>Garantir o rigor da equipe de fiscalização</b> durante o acompanhamento da obra e instalação de equipamentos;</li> <li>• Adotar <b>rotinas e procedimentos de limpeza</b> das caixas de distribuição;</li> <li>• Utilizar <b>dispositivo de desobstrução dos tubos de alimentação</b> do reator.</li> </ul>
2- Gerenciamento de espuma	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acumulação de camada sólida e espessa de espuma na superfície dos decantadores. Esse material é usualmente de difícil remoção e pode ocasionar danos às canaletas de coleta do líquido e perda de qualidade do efluente do reator</li> <li>• <b>Acumulação de camada superficial sólida e espessa de espuma no interior dos separadores trifásicos (STF)</b>. Esse material é de difícil remoção pelo operador da ETE, constituindo-se, portanto, em um dos principais problemas operacionais dos reatores UASB implantados no Brasil</li> <li>• A camada de espuma do interior dos STF tende a <b>impedir a liberação do biogás</b> produzido no reator anaeróbio e, por sua vez: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ocasionar a passagem do biogás para o compartimento de decantação, com impactos diretos sobre a qualidade do efluente (perda de sólidos) e sobre os níveis de emissão de gases odorantes e de efeito estufa;</li> <li>- Reduzir a recuperação de biogás para fins de queima e/ou de aproveitamento energético;</li> <li>- Reduzir o volume útil da câmara de gás e modificar sua pressão de operação.</li> </ul> </li> <li>• O espessamento da camada de espuma pode impor esforços estruturais elevados nas paredes do separador trifásico (STF). Esses esforços, por sua vez, podem ocasionar <b>danos e até mesmo a ruptura do STF</b>, notadamente quando esses são confeccionados com materiais de menor resistência, a exemplo de lonas plásticas, chapas/ telhas metálicas ou de amianto etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A acumulação de espuma na superfície dos decantadores e no interior dos STF de reatores UASB depende das características do esgoto bruto, particularmente em relação à presença de detritos (plástico, cotonete, cabelo, fio dental etc.) e de óleos e graxas (O&amp;G). Parte desses materiais, notadamente os de menor densidade, quando não adequadamente removidos no tratamento preliminar (grades e peneiras), tendem a flotar no interior do reator e acumular na parte superior do STF, vindo a constituir a “espuma”;</li> <li>• As características construtivas dos reatores e as condições hidráulicas de operação podem fazer com que boa parte da espuma seja formada por lodo flotado;</li> <li>• Ausência de acesso adequado e/ou falta de condições de segurança ocupacional para o procedimento de retirada de espuma;</li> <li>• Ineficiência do mecanismo de remoção de espuma do STF e/ou não remoção frequente e sistemática desse material flotado pode levar ao espessamento e solidificação da camada de espuma.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Considerar <b>melhorias no tratamento preliminar</b>, de modo a reduzir a entrada de detritos, de sólidos flutuantes e de O&amp;G nos reatores. Dentre os aspectos preconizados, pode-se mencionar a utilização de grades ultrafinas (6 a 10 mm) e de peneiras de pequena abertura (3 a 4 mm) (ver recomendações na Parte 2 desta Coletânea de NTs – BRESSANI-RIBEIRO <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>• <b>Controlar o recebimento de descargas de efluentes não domésticos (END)</b>, tais como lodo de tanque séptico e efluentes de indústrias caracteristicamente com O&amp;G elevados (laticínios, abatedouros, frigoríficos, lavanderias industriais etc.);</li> <li>• Utilizar STF equipados com <b>dispositivos internos que possibilitem a remoção</b> da espuma, a exemplo do Separador Êtsus 1000 (ver detalhes na Parte 3 desta Coletânea de NTs – LOBATO <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>• Utilizar <b>câmaras múltiplas piramidais</b>, de modo a possibilitar o confinamento da espuma em menores áreas e facilitar sua remoção (ver detalhes na Parte 3 desta Coletânea de NTs – LOBATO <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>• Quando não for possível a utilização de dispositivos internos de remoção de espuma, a parte superior do STF deve ser equipada com número suficiente de <b>escotilhas de inspeção</b>, de modo a possibilitar a efetiva remoção do material flotado. Todavia, essa alternativa não é a ideal, pois resulta na perda de biogás para a atmosfera. Quando utilizada, atentar para a necessidade de <b>estanqueidade da câmara de gás</b> e de acesso adequado para equipamentos de remoção de espuma, observando ainda os requisitos de <b>segurança ocupacional dos operadores</b>;</li> <li>• Considerar no projeto das unidades de processamento da fase sólida da ETE a <b>previsão de recebimento da espuma removida dos reatores anaeróbios</b>.</li> </ul>

Tópicos de interesse	Problemas relacionados	Origem do problema	Possíveis aprimoramentos
<p><b>3 - Gerenciamento de lodo</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande parte dos reatores UASB existentes no Brasil opera com <u>excesso de lodo</u>, ocupando volumes além da capacidade de armazenamento no compartimento de digestão dos reatores. Isso decorre, normalmente, da falta de <u>descartes sistemáticos de lodo</u> e pode ocasionar:             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Passagem excessiva de lodo do compartimento de digestão para o compartimento de decantação, com consequente incremento da perda de sólidos com o efluente do reator;</li> <li>- A perda de sólidos com o efluente ocasiona a imediata queda na eficiência física de remoção de matéria orgânica do reator, em decorrência do aumento da parcela de DQO e DBO particulada presente no efluente;</li> <li>- Aumento da formação de espuma no compartimento de decantação do reator;</li> <li>- Acúmulo excessivo de areia no fundo dos reatores;</li> <li>- Diminuição do volume útil para o tratamento do esgoto bruto;</li> <li>- Sobrecarga e eventual comprometimento da unidade de pós-tratamento, notadamente daquelas que operam com algum meio de enchimento (p.ex.: biofiltros, filtros percoladores);</li> <li>- Dificuldades no gerenciamento do lodo aeróbio gerado na unidade de pós-tratamento, quando este é enviado para adensamento e estabilização no reator UASB;</li> <li>- O carreamento de sólidos com o efluente do reator UASB pode alterar os parâmetros cinéticos utilizados no dimensionamento da unidade de pós-tratamento.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O acúmulo excessivo de lodo nos reatores e a falta de descartes sistemáticos estão associados a um ou mais dos seguintes fatores:             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Manuais ou diretrizes de operação que não detalham adequadamente os procedimentos de descarte de lodo que devem ser seguidos pelos operadores;</li> <li>- Leitos de secagem e/ou equipamentos de desaguamento de lodo com capacidade aquém da necessidade de processamento da ETE;</li> <li>- Equipamentos do sistema de desaguamento (bombas de lodo, dosadoras de polímero, centrífugas, entre outros) fora de operação, em decorrência de dificuldades com a manutenção preventiva e corretiva dos mesmos;</li> <li>- Falhas de projeto de montagem mecânica do sistema de desaguamento, ocasionando elevada necessidade de manutenções corretivas;</li> <li>- Falta de remoção sistemática de lodo dos leitos de secagem, impedindo o descarte de lodo do reator;</li> <li>- Falta de remoção sistemática de lodo dos reatores UASB em decorrência de problemas logísticos / administrativos;</li> <li>- Coeficiente de produção de lodo mais elevado que o considerado em projeto, em decorrência do recebimento, na ETE, de contribuições não consideradas originalmente (p.ex.: lodo de tanque séptico, lixiviado de aterro sanitário, lodo químico de ETA, efluentes não domésticos).</li> </ul> </li> <li>• O acúmulo de areia no fundo dos reatores decorre, principalmente, de problemas na unidade de desarenação. Esses problemas podem estar relacionados a deficiências de projeto, de construção e de operação;</li> <li>• Número insuficiente de tubos para descarte e mal distribuídos ao longo do compartimento de digestão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior rigor, durante a fase de projeto, no <u>cálculo da produção de lodo do reator</u>, sendo de particular interesse o conhecimento das contribuições que a ETE receberá;</li> <li>• <u>Obrigatoriedade de pontos de amostragem de lodo em diferentes profundidades</u> em todos os módulos do reator UASB;</li> <li>• <u>Prever tanques de recebimento / adensamento / homogeneização de lodo</u>, localizados antes da unidade de desaguamento, de modo a conferir maior flexibilidade para o descarte de lodo dos reatores;</li> <li>• Na escolha da alternativa de desaguamento, dar preferência a processos mais robustos, <u>adaptados à realidade local e ao porte da ETE</u>;</li> <li>• Considerar <u>melhorias no tratamento preliminar</u>, de modo a reduzir a entrada de detritos nos reatores e possibilitar a obtenção de um lodo de melhor qualidade. Dentre as sugestões preconizadas, pode-se mencionar a utilização de grades ultrafinas (6 a 10 mm) e de peneiras de pequena abertura (3 a 4 mm) (ver recomendações na Parte 2 desta Coletânea de NTs – BRESSANI-RIBEIRO <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>• <u>Compatibilizar a operação dos equipamentos do sistema de desaguamento</u>, de modo a permitir o controle de carga de ST nestas unidades;</li> <li>• Incluir no contrato do projeto a necessidade de elaboração de manuais ou diretrizes de operação que <u>detalhem todos os procedimentos e rotinas operacionais</u> para o adequado gerenciamento do lodo na ETE;</li> <li>• Incluir no contrato do projeto a necessidade de elaboração de especificações técnicas mais detalhadas, de modo a garantir a <u>aquisição de equipamentos de desaguamento mais robustos</u> e que ofereçam as condições mínimas necessárias de <u>assistência técnica</u>;</li> <li>• No caso da previsão de <u>recebimento de lodo de tanque séptico</u> na ETE, avaliar com rigor as quantidades esperadas e a possibilidade de implementar <u>unidade específica para o recebimento</u> desse tipo de contribuição;</li> <li>• Não permitir que os reatores UASB recebam <u>lodo químico de ETAs</u>. Caso seja aventada essa possibilidade, proceder estudo criterioso que possibilite atestar que o material contido no lodo químico não provocará danos ao funcionamento do reator e aos equipamentos mecânicos de bombeamento e desaguamento do lodo;</li> <li>• Atenção especial à qualidade do projeto, da construção e da operação da <u>unidade de desarenação</u>;</li> <li>• Instalar tubulações que possibilitem o <u>descarte do lodo em diferentes níveis</u>, conforme preconizado na NBR 12.209 (ABNT, 2011);</li> <li>• Avaliar o impacto da perda de sólidos no efluente anaeróbio sobre a unidade de pós-tratamento (ver recomendações na Parte 6 desta Coletânea de NTs – ALMEIDA <i>et al.</i>, 2018).</li> </ul>

Tópicos de interesse	Problemas relacionados	Origem do problema	Possíveis aprimoramentos
<p><b>4 - Corrosão e emissões odorantes</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os problemas de odores e de corrosão nas ETEs que empregam reatores UASB encontram-se associados principalmente ao gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S) gerado durante o processo de tratamento anaeróbio. Uma parte do H<sub>2</sub>S formado permanece dissolvido na massa líquida, enquanto outra parte se desprende para a atmosfera gasosa. A maior parte do H<sub>2</sub>S liberado da fase líquida passa a fazer parte do biogás, mas <u>uma parcela importante é emitida de forma difusa</u> ao longo do percurso da fase líquida (vertedores, caixas de passagem, distribuidores rotativos e outros pontos que causam turbulência). Adicionalmente, problemas de odores e de corrosão podem ocorrer também nas estações elevatórias de esgoto, nas unidades de tratamento preliminar, nos tanques de retorno e manuseio de lodo etc.</li> <li>O H<sub>2</sub>S emitido para a atmosfera possui odor característico de ovo podre e é perceptível ao olfato humano em baixíssimas concentrações (~0,5 ppb), podendo causar <u>impactos sobre o bem estar da população</u> que vive no entorno da ETE. Em concentrações mais elevadas, pode causar riscos à saúde dos trabalhadores da ETE</li> <li>O H<sub>2</sub>S emitido para a atmosfera pode induzir a <u>severos problemas de corrosão</u> nas estruturas em concreto armado e em materiais e equipamentos confeccionados em aço carbono e ferro fundido. Exemplos de materiais e estruturas mais sujeitos à corrosão são: caixas de passagem, paredes, lajes e tampas de inspeção localizadas na parte superior dos reatores; escadas, passarelas, guarda-corpos, cercas metálicas e tubulações em geral; materiais e equipamentos utilizados na linha de coleta e transporte de biogás</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A geração de H<sub>2</sub>S nos reatores anaeróbios decorre da presença de compostos de enxofre no esgoto bruto, os quais são reduzidos a sulfeto pela ação de bactérias redutoras de sulfato;</li> <li>As emissões de H<sub>2</sub>S a partir da fase líquida podem ocorrer, tanto de forma pontual (para o interior do separador trifásico, vindo a ser um dos constituintes do biogás), como de forma difusa (ao longo do percurso do efluente líquido). Dessa forma, a origem dos problemas de odor e de corrosão pode estar relacionada tanto à linha de coleta e tratamento de biogás, como às emissões difusas a partir da fase líquida;</li> <li>O H<sub>2</sub>S que se desprende da fase líquida para a atmosfera gasosa pode propiciar a formação de ácido sulfúrico e deflagrar o processo de corrosão. Dessa forma, a existência de vertedores, caixas de passagem e outros pontos que causem turbulência na massa líquida favorecem a liberação do H<sub>2</sub>S e a corrosão das estruturas de concreto e metálicas nas imediações desses pontos de liberação;</li> <li>Dessa forma, a origem do problema se relaciona a cinco fatores principais:             <ol style="list-style-type: none"> <li>presença de compostos de enxofre no esgoto bruto afluente ao reator anaeróbio;</li> <li>existência de singularidades que causam turbulência ao longo do perfil hidráulico da ETE e possibilitam a liberação do H<sub>2</sub>S dissolvido na fase líquida;</li> <li>utilização de materiais e revestimentos não resistentes à corrosão;</li> <li>baixa estanqueidade da câmara de gás e manejo inadequado das tampas de inspeção dos reatores;</li> <li>baixa eficiência de combustão em alguns tipos de queimadores de biogás.</li> </ol> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar criteriosamente os <u>volumes e tempos de detenção hidráulica dos poços de sucção</u> das estações elevatórias de esgoto. Havendo riscos de emanação de H<sub>2</sub>S, prever o confinamento, a exaustão e o tratamento dos gases;</li> <li>Ter atenção especial e verificar, durante a fase de projeto, a <u>definição do perfil hidráulico da ETE</u>, de modo a evitar singularidades que causem turbulência. Não sendo possível, prever o confinamento, a exaustão e o tratamento do H<sub>2</sub>S oriundo dessas singularidades. Atenção especial deve ser dada também para linhas de retorno de lodo e pontos de recepção de lodo de tanques sépticos;</li> <li>Considerar a <u>direção dos ventos na definição do leiaute das unidades</u>. Verificar conveniência de implantar "cortina verde" e afogamento do lançamento de efluentes anaeróbios;</li> <li>Ter especial atenção, durante as fases de projeto e de obra, na <u>especificação e execução dos dispositivos de coleta</u> (p. ex.: testes de estanqueidade) e <u>tratamento do biogás</u>. Atenção especial deve ser dada para problemas de corrosão e de vazamento nesses dispositivos, e também para a <u>baixa eficiência de combustão</u> em alguns tipos de queimadores de biogás;</li> <li>Utilizar <u>materiais resistentes à corrosão</u> ou especificar <u>produtos anticorrosivos</u> para revestimento de todos os materiais e estruturas não resistentes à corrosão;</li> <li><u>Minimizar a geração e liberação de H<sub>2</sub>S</u>. Algumas medidas: i) implementar restrições ao recebimento de efluentes que contenham sulfato e/ou sulfeto; ii) adicionar produtos químicos ao esgoto bruto que possam oxidar ou precipitar os sulfetos; iii) implementar microaeração no interior do reator anaeróbio; iv) usar dispositivos de retirada de espuma que evitem a abertura de escotilhas; e v) promover a desodorização, exaustão e tratamento dos gases dissolvidos na fase líquida;</li> <li>Realizar diagnósticos permanentes (p. ex.: estanqueidade das tampas de inspeção dos reatores) e campanhas de medição para <u>identificar eventuais pontos de fuga de biogás e de gases residuais</u>.</li> </ul>

Tópicos de interesse	Problemas relacionados	Origem do problema	Possíveis aprimoramentos
5- Biogás e emissões fugitivas de metano	<ul style="list-style-type: none"> <li>Emissão de <u>gases odorantes</u> (sulfeto de hidrogênio)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conforme apontado no item anterior (corrosão e emissões odorantes), parte das emissões de H<sub>2</sub>S a partir da fase líquida são pontuais e passam a fazer parte do biogás produzido nos reatores. Problemas de estanqueidade nas câmaras e linhas de gás, a ineficiência do separador trifásico e a baixa eficiência nos queimadores de biogás são as causas das emissões pontuais de gases odorantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>O projeto de um sistema de coleta de biogás em reatores UASB apresenta especificidades devido às suas características diferenciadas de: baixa vazão e baixa pressão; presença de umidade e material particulado; e de potencial de corrosão. Isso faz com que o <u>projeto das instalações de biogás seja distinto das aplicações usuais de gases</u>. 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;</li> <li>Ter maior rigor, durante as fases de projeto e de obra, na <u>especificação e execução dos dispositivos de coleta</u> (p. ex.: separador trifásico), <u>transporte</u> (p. ex.: linha de gás) e <u>tratamento do biogás</u> (p. ex.: queimador). Atenção especial deve ser dada para <u>problemas de vazamento</u> nesses dispositivos, e também para a <u>baixa eficiência de combustão</u> em alguns tipos de queimadores de biogás. Exigir a realização de <u>testes de estanqueidade</u> periódicos na câmara de gás do separador trifásico e na linha de gás;</li> <li>Quanto à <u>entrada excessiva de água de chuva</u> na rede de esgoto, esse é um problema de elevada gravidade e também de solução complexa. Os possíveis aprimoramentos estão relacionados principalmente a: i) sensibilização do usuário; ii) fiscalização mais rigorosa durante a realização das ligações prediais; iii) identificação e correção das ligações clandestinas;</li> <li>Em relação às emissões fugitivas de CH<sub>4</sub>, liberadas ao longo do percurso do efluente líquido, podem ser previstos <u>dispositivos para dessorção, exaustão e tratamento</u> desse gás ou, eventualmente, a utilização de técnicas mais avançadas para <u>recuperação do metano dissolvido</u> (ver detalhes na Parte 4 desta Coletânea de NTs - BRANDT <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>Realizar avaliação técnico-econômica da possibilidade de <u>substituição dos queimadores de biogás abertos</u> por queimadores enclausurados, tendo em vista a maior eficiência de queima desses últimos;</li> <li>Assegurados os aprimoramentos que permitam maior recuperação de biogás, listados anteriormente, realizar análise de viabilidade técnico-econômica sobre a <u>possibilidade de geração de energia elétrica e/ou térmica</u>, de acordo com as diretrizes do Guia Brasileiro de Aproveitamento Energético de Biogás (BRASIL, 2016);</li> <li>Efetuar <u>manutenções preventivas</u> dos componentes (válvulas, filtros, medidores) presentes na linha de biogás.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Emissão de <u>gases de efeito estufa</u> (metano)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>O metano (CH<sub>4</sub>), produzido a partir da degradação anaeróbia da matéria orgânica, é um gás inodoro e com elevado poder calorífico (passível de aproveitamento energético) e ao mesmo tempo com elevado potencial de efeito estufa;</li> <li>A maior parte do metano formado nos reatores anaeróbios é coletada como biogás, sendo passível de aproveitamento energético. Todavia, uma parcela expressiva do metano formado (30 a 40%) se dissolve no meio líquido e se desprende para a atmosfera de forma dispersa. Essa corrente gasosa é denominada de emissões fugitivas. Adicionalmente, podem existir perdas de metano ao longo de todo o sistema de coleta, transporte e queima de biogás. Dessa forma, as emissões mais significativas de metano em reatores UASB encontram-se usualmente associadas a: i) emissões fugitivas da parcela que encontra-se dissolvida no efluente; e ii) vazamentos nos separadores trifásicos e/ou na linha de biogás, e/ou a combustão incompleta nos queimadores;</li> <li>Projetos, materiais e/ou execução ineficientes de sistemas de remoção ou de quebra-escuma, que podem se tornar pontos vulneráveis para emissões fugitivas de biogás;</li> <li>Projetos antigos ou inadequados que negligenciam o gerenciamento da fase gasosa inerente ao tratamento de esgoto em reatores UASB.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevados níveis de vazamentos nas câmaras de gás de separadores trifásicos e na linha de gás são usualmente as principais causas das elevadas perdas de biogás nos reatores UASB;</li> <li>Entrada excessiva de água de chuva na rede de esgoto durante os períodos chuvosos, o que pode ocasionar grande diluição do esgoto e conseqüente redução da produção de biogás. Adicionalmente, o excesso de vazão pode provocar sobrecarga hidráulica no reator, resultando em perda de biomassa e conseqüente perda de eficiência de geração de biogás.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baixo potencial de <u>aproveitamento energético</u> nos reatores anaeróbios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>O biogás é composto majoritariamente por metano, um gás inflamável que, misturado com o oxigênio, pode gerar uma mistura explosiva. Além disso, em ambientes enclausurados, as concentrações de algumas substâncias presentes no biogás (p. ex.: H<sub>2</sub>S) podem ser superiores aos limites tóxicos a seres humanos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instalar <u>medidores de vazão e monitoramento da produção de biogás nos reatores UASB</u>. Se possível, verificar se a produção de biogás apresenta variação substancial entre os períodos secos e chuvosos e se o teor médio de metano encontra-se na faixa usual entre 70 e 80%;</li> <li>Elaborar <u>mapas de risco e instalação de componentes de identificação de atmosferas explosivas</u>. Identificar <u>áreas de espaço confinado</u> e execução de atividades de operação / manutenção nessas áreas de acordo com os critérios de segurança ocupacional cabíveis;</li> <li>Executar as atividades de operação/manutenção dos reatores de forma a <u>evitar o aporte de ar para as câmaras e tubulações de gás</u> e a conseqüente formação de misturas explosivas;</li> <li>Definir <u>metas de redução das emissões</u> de gases de efeito estufa.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aspectos de segurança vinculados à criação de <u>espaços confinados</u> e formação de <u>área classificadas</u> como atmosferas explosivas</li> </ul>		

Tópicos de interesse	Problemas relacionados	Origem do problema	Possíveis aprimoramentos
6 - Qualidade do efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perda de sólidos no efluente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leitos de secagem e/ou equipamentos de desaguamento de lodo com falhas de montagem, com capacidade aquém da necessidade de processamento ou ainda fora de operação;</li> <li>• Falta de protocolos ou protocolos inadequados para descarte de lodo de excesso nos reatores UASB, conforme caracterizado no Tópico 3;</li> <li>• Dificuldades para se implantar adequadas rotinas de envio de lodo aeróbio para adensamento e digestão no reator UASB;</li> <li>• Fuga de gases do interior do STF para o compartimento de decantação do reator UASB, ocasionando o arraste de sólidos;</li> <li>• Vertedores desnivelados / obstruídos causando zonas de sobrecarga hidráulica e arraste de sólidos;</li> <li>• Recebimento de efluentes não domésticos;</li> <li>• Sobrecarga hidráulica e velocidades ascensionais elevadas associadas a entrada excessiva de água pluvial na rede coletora de esgoto;</li> <li>• Picos excessivos de vazão e velocidades ascensionais elevadas devido a elevatórias mal dimensionadas ou que operam com apenas uma bomba e que não dispõem de inversores de frequência, bem como considerações inadequadas no projeto com relação à estimativa da vazão máxima (de pico).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obrigatoriedade de pontos de amostragem de lodo em diferentes profundidades em todos os módulos do reator UASB;</li> <li>• Enfatizar e detalhar nos manuais ou diretrizes de operação todos os procedimentos e rotinas operacionais para o adequado gerenciamento do lodo na ETE, contemplando o envio de lodo aeróbio, quando se fizer necessário;</li> <li>• Definir rotina periódica de verificação do nivelamento dos vertedores e da existência de fugas de gases do STF para o compartimento de decantação dos reatores UASB;</li> <li>• Quanto à entrada excessiva de água pluvial na rede de esgoto, os possíveis aprimoramentos foram indicados no tópico anterior (biogás e emissões fugitivas de metano);</li> <li>• Utilizar bombas com variadores de velocidade (inversores de frequência) ou o mínimo de três bombas, sendo uma para rodízio e reserva, tal como recomendado no item 6.4.2 da NBR 12.209 (ABNT, 2011);</li> <li>• Controlar o recebimento de efluentes não domésticos (END).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não atendimento a padrões de lançamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O processo anaeróbio tem limitações intrínsecas associadas à eficiência de remoção de matéria orgânica, nutrientes e outros compostos de menor biodegradabilidade, a exemplo dos surfactantes. Todavia, a depender da capacidade de autodepuração do corpo receptor, somente a etapa anaeróbia pode ser suficiente para o atendimento ao padrão do corpo hídrico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A combinação sequencial de processos anaeróbios e aeróbios (p. ex.: UASB/FBP) tende a explorar da melhor forma as vantagens individuais de cada sistema. A remoção de surfactantes e N-amoniaco pode ser sistematicamente obtida em sistemas de pós-tratamento compostos por lodo ativado, filtros aerados submersos, wetlands, lagoas de polimento e filtros biológicos percoladores.</li> <li>• A utilização de sistemas de pós-tratamento associados à aplicação no solo e a utilização do efluente para fins menos nobres (p. ex.: supressão de poeira) pode reduzir a necessidade de remoção de nutrientes;</li> <li>• A precipitação química de fósforo pode ser uma alternativa quando a remoção desse elemento é necessária;</li> <li>• Buscar alternativas de uso do efluente, inclusive nas próprias instalações da ETE (p. ex.: para preparo de soluções de polímero e irrigação de jardins).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deficiências da unidade de pós-tratamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A perda de sólidos nos reatores UASB pode resultar em sobrecarga nas unidades de pós-tratamento, pois tende a prejudicar os processos de transferência de massa, consumo de oxigênio e remoção de poluentes, contribuindo ainda para a colmatação de sistemas de biomassa aderida (que utilizam algum meio suporte);</li> <li>• O problema de colmatação tende a se agravar no caso de FBPs preenchidos com brita, quando da ausência de especificação adequada da granulometria na fase de projeto ou falha de fiscalização durante a etapa de obras.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avaliar o impacto da perda de sólidos no efluente anaeróbio sobre a unidade de pós-tratamento;</li> <li>• Maior rigor durante a fase de projeto quanto à especificação do material de enchimento para sistemas de pós-tratamento de biomassa aderida;</li> <li>• Rigor da equipe de fiscalização durante o acompanhamento da obra.</li> </ul>

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme apontado nesta Nota Técnica, os problemas relacionados ao tratamento de esgoto por reatores UASB podem estar associados a deficiências de projeto, de construção e de operação. Ademais, a ineficiência de mecanismos de gestão impede/difículta o cumprimento de procedimentos adequados de contratação de projetos, serviços terceirizados, compra de equipamentos, fiscalização de obras e disponibilização de recursos humanos qualificados para a correta operação dos sistemas de tratamento de esgoto. Ressalta-se que tais problemas de gestão ocorrem na maioria das ETEs, independentemente da tecnologia de tratamento utilizada.

Com esta Coletânea de Notas Técnicas, espera-se contribuir para o melhor entendimento dos diferentes problemas e de suas origens, assim como para o apontamento dos necessários aprimoramentos de projeto, construção e operação de reatores anaeróbios aplicados ao tratamento de esgoto sanitário. *Embora sejam muitos os problemas detectados, a maioria expressiva pode ser corrigida de maneira simples e efetiva, sem impactos significativos sobre os custos dos reatores.*

Nesse sentido, gestores, consultores, projetistas, construtores e operadores de sistemas de tratamento de esgoto baseados em reatores UASB são incentivados a se atualizarem e a aprofundarem seus conhecimentos acerca dos tópicos de interesse discutidos nesta Nota Técnica, os quais são detalhados nas outras cinco Notas Técnicas (Partes 2 a 6) que integram esta Coletânea.

### 4 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à estudante de engenharia civil da UFMG, Vanessa Rodrigues de Melo, e aos engenheiros da Sabesp, Bruno Sidnei da Silva e Luiz Yoshiharu Ito, pelas contribuições ao longo da elaboração dessa 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.*

### 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEM SOBRINHO P., JORDÃO E.P. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios – uma análise crítica. Capítulo. 9. In: CHERNICHARO, C.A.L. (coordenador). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. FINEP/PROSAB, Rio de Janeiro, 544 p., 2001.
- ALMEIDA, P.G.S., BRESSANI-RIBEIRO, T.B., SILVA, B.S., AZEVEDO, L. S., CHERNICHARO, C.A.L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 6: Qualidade do efluente. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 90-108, 2018.
- 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 odorantes. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 56-72, 2018.
- BRASIL – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades/Probiogás. Resultados do projeto de medições de biogás em reatores anaeróbios. Brasília, Distrito Federal: Ministério das Cidades, 2017. 128 p.
- BRESSANI-RIBEIRO T.; LOBATO, L. C. S.; SOUZA, S. N.; PEGORINI, E. S.; CHERNICHARO, C. A. L. 2018 Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 2: Tratamento Preliminar. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 17-29, 2018.
- CAMPOS, J. R. (coordenador). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. São Carlos: reatores anaeróbios. Belo Horizonte: FINEP, 464 p., 1999.
- CHERNICHARO, C. A. L. (coordenador). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: FINEP/PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 544 p., 2001.
- CHERNICHARO, C. A. L. Post-Treatment Options for the Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 5, n. 1, p. 73-92, 2006.
- CHERNICHARO, C. A. L., VAN LIER, J.B., NOYOLA, A., BRESSANI-RIBEIRO, T. Anaerobic sewage treatment: state of the art, con-

straints and challenges. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 14, n. 4, p. 649-679, 2015.

CHERNICHARO, A.A.L., BRESSANI-RIBEIRO, T., GARCIA, G.B., LERMONTOV, A., PEREIRA, C.B., PLATZER, C.J., POSSETTI, G.R.C., LEITES, M.A.L., ROSSETO, R. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. **Revista DAE**, v. 66, n. 213, p. 5-19, 2018.

LETTINGA G. **My Anaerobic Sustainability Story**, Lettinga Foundation, 2014.

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.

MIKI, M.K. Dilemas do UASB. **Revista DAE**, v. 183, n.1504, p. 25-37, 2010.

MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D.D.; BAILEY M.B. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 7th ed.: John Wiley & Sons. 2010

POSSETTI, G. R. C., RIETOW, J. C., COSTA, F. J. O. G., WAGNER, L. G., LOBATO, L.C.S., BRESSANI-RIBEIRO, T., MELO, D. F., REIS, J.A, CHERNICHARO, C. A. L. 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. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 73-89, 2018.

SILVA, S. M. C. P. **Desenvolvimento de uma nova concepção de tratamento de águas residuárias pela associação de processos anaeróbios e aeróbios**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

VON SPERLING, M., CHERNICHARO, C.A.L. **Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions**. IWA Publishing, London, 1452 p., 2005.

YOUNG, J.C., MCCARTY, P.L. The anaerobic filter for waste treatment. **Journal (Water Pollution Control Federation)**, v.5.1. p. 160-173, 1969.

# Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 2: Tratamento preliminar, bombeamento e distribuição de vazão

*Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage – Part 2: Preliminary treatment, pumping and influent distribution*

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

Thiago Bressani Ribeiro / Lívia Cristina da Silva Lobato / Saulo Nonato de Souza / Eduardo Sabino Pegorini / Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (\*)

DOI: 10.4322/dae.2018.039

## Resumo

A etapa de tratamento preliminar é fundamental para o adequado condicionamento do esgoto antes de sua entrada nos reatores UASB. Nesta Nota Técnica objetiva-se discorrer sobre os principais problemas, suas respectivas origens e os possíveis aprimoramentos associados ao tratamento preliminar, bombeamento e distribuição de vazão nos reatores UASB. Em síntese, um adequado tratamento preliminar influenciará positivamente: i) na manutenção das estruturas de distribuição de vazão e calhas coletoras de efluente, evitando obstruções; ii) na redução da deposição e acúmulo de areia no fundo de reatores UASB; iii) no gerenciamento do lodo, visto que será possível obter um material sólido com menor conteúdo de detritos e areia, e de melhor qualidade estética; iv) no gerenciamento da espuma, sobretudo devido ao fato de que, quando não removidos adequadamente no tratamento preliminar, alguns materiais (p.ex.: plásticos e detritos leves em geral) tendem a flotar no interior do reator e acumular na parte superior do separador trifásico; v) na redução significativa de problemas corriqueiros na operação das unidades de processamento mecanizado de lodo e espuma, como paralisação por obstruções de tubulações, quebra e perda de rendimento de equipamentos por desgaste.

**Palavras-chave:** Desarenador, gradeamento, odor, peneiramento, resíduos do tratamento preliminar

**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.

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

**Saulo Nonato de Souza** – Engenheiro Civil pela UFMG. Engenheiro de Operação da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa). Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG.

**Eduardo Sabino Pegorini** – Engenheiro Agrônomo e Mestre em Ciências do Solo pela UFPR. Engenheiro da Unidade de Gestão de Projetos do KFW na Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar).

**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 preliminary treatment step is essential for the adequate sewage conditioning prior to UASB reactors. This Technical Note aims to discuss the main problems, their respective origins and the possible improvements associated with the preliminary treatment, pumping and influent distribution to UASB reactors. In summary, an adequate preliminary treatment will positively influence: i) the maintenance of the flow distribution structures and effluent collection system, avoiding obstructions; ii) the reduction of deposition and accumulation of sand at the bottom of UASB reactors; iii) the management of sludge, since it will be possible to obtain a biosolid with lower content of debris and sand, and of better aesthetic quality; iv) the management of scum, mainly due to the fact that, when not properly removed in the preliminary treatment, some materials (e.g. plastics and light debris in general) tend to float inside the reactor and accumulate in the upper part of the three-phase separator; v) the significant reduction of common problems in the operation of sludge and scum processing units, such as stoppage due to pipe obstruction, breakage and loss of equipment performance due to wear.*

**Keywords:** Grit chamber, odour, residues of the preliminary treatment, screening, sieving

## 1 INTRODUÇÃO

A etapa de tratamento preliminar (TP) em uma estação de tratamento de esgoto (ETE) é tipicamente composta por grades de barras e desarenadores. O principal papel das unidades que compõem o tratamento preliminar está associado à remoção de sólidos que poderiam comprometer o adequado funcionamento das unidades subsequentes do tratamento (neste caso, dos reatores UASB), sobretudo em virtude de obstruções de tubulações, avarias a equipamentos eletromecânicos, acumulação de areia no interior dos reatores e formação de espuma. Esses problemas usualmente também se estendem para equipamentos e unidades do processamento dos subprodutos do tratamento, como lodo e espuma, requerendo paralisações frequentes, as quais podem variar de simples limpezas e desobstruções até a quebra de equipamentos de manutenção delicada e lenta (p. ex.: centrífugas).

Especificamente quanto às grades, busca-se adotar um espaçamento entre barras que permita uma eficiente remoção de detritos (p. ex.: cabelo, cotonete, absorvente, fio dental, algodão, lenço umedecido, ponta de cigarro, materiais plásticos). Notar que estes detritos não deveriam ser descartados pelos usuários nas instalações sanitárias domiciliares e redes coletoras de esgoto. Quando da utilização de uma sequência de grades (geral-

mente duas), adota-se um espaçamento entre barras gradualmente decrescente (grades grossas, médias, finas, ultrafinas). A alternativa de gerenciamento do material retido (fase sólida) está associada tipicamente à disposição final em aterros sanitários, eventualmente precedida de uma etapa de remoção de umidade. Para ETEs de pequeno porte, esta disposição final pode ocorrer na própria área da estação, em valas adequadamente preparadas e licenciadas para o recebimento dos rejeitos. Todavia, ressalta-se que as condições técnicas para esta forma de disposição final são similares às de um aterro sanitário, o que pode implicar em excessiva demanda construtiva e operacional para ETEs de pequeno porte. O aproveitamento energético do material retido na grade (p.ex.: coprocessamento em fornos de clínquer) ainda é incipiente no Brasil, mas há relatos que indicam um considerável poder calorífico inferior (PCI) e baixo teor de cinzas associados aos resíduos retidos na etapa de gradeamento fino (BORGES, 2014). Adicionalmente, a celulose pode constituir a maior parcela da demanda química de oxigênio (DQO) inerte presente no esgoto, devido ao papel higiênico (RUIKEN *et al.*, 2013), sendo que em alguns países desenvolvidos a sua recuperação já vem sendo realizada em escala piloto/plena, objetivando o aproveitamento energético,

incorporação ao asfalto, dentre outros (MARCELIS e WESSELS, 2018).

Em relação aos desarenadores, a depender do porte da ETE, pode-se considerar a utilização de unidades de: i) fluxo horizontal e seção retangular ou quadrada; ii) fluxo em espiral (aerado); iii) fluxo em vórtice. As alternativas de gerenciamento do material removido (fase sólida) estão associadas tipicamente à secagem e posterior disposição final em aterros sanitários. A recuperação da areia removida para fins de preparo de concreto não estrutural ou reposição em leitos de secagem na própria ETE ainda é incipiente, mas pode se configurar como uma importante alternativa de gerenciamento deste subproduto a curto e médio prazo.

Há relatos esparsos na literatura associados à caracterização qualitativa dos resíduos removidos no tratamento preliminar, mas sabe-se que a quantidade e a composição do material retido na etapa de gradeamento dependem principalmente do espaçamento entre barras. Todavia, as características da bacia de contribuição da ETE influenciam no volume e qualidade do material removido, podendo-se elencar, entre outras (adaptado de WEF, 1994; WEF, 1998):

- O tamanho da área e o tipo de ocupação da bacia de contribuição;
- A configuração do sistema de coleta de esgoto: a presença de estações elevatórias diminui a quantidade de material retido no gradeamento, devido à remoção prévia antes do recalque (p. ex.: cestos em estações elevatórias de esgoto bruto e deposição de material no fundo do poço de sucção);
- Os hábitos e a educação sanitária da população atendida;
- Recebimento de caminhões limpa-fossa, efluente não doméstico, resíduos de outras ETEs (como espuma e lodo), resíduos de estações elevatórias (EE). É importante mencionar que o recebimento dessas contribuições acarreta um aumento na

produção de lodo e na formação e acumulação de espuma nos reatores UASB, conforme apresentado na Parte 3 desta Coletânea de Notas Técnicas (NTs) (LOBATO *et al.*, 2018).

O volume de sólidos retido no gradeamento varia usualmente entre 6 e 50 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de esgoto tratado (JORDÃO e PESSÔA, 2017). De acordo com uma caracterização quali-quantitativa efetuada por Borges (2014), em uma ETE de grande porte (Equivalente Populacional - EP = 258.000 habitantes) no interior do estado de São Paulo, o material retido na etapa de gradeamento grosseiro (em termos de volume e massa) foi preponderantemente constituído por matéria orgânica putrescível (restos de alimentos, animais em decomposição, entre outros - 65% em volume), seguido de plástico (17% em volume), pedras (9% em volume), tecido (6% em volume) e papel (3% em volume). Quanto à avaliação efetuada em relação aos resíduos retidos no gradeamento fino, uma configuração semelhante foi obtida. A composição do material retido apresentou variação sazonal significativa, indicando forte influência da precipitação no aumento da quantidade de pedras. Estas, por sua vez, referiam-se a placas de precipitados, contendo enxofre, cálcio e gorduras solidificadas, por exemplo.

Em relação à quantidade de areia presente no esgoto bruto, esta depende de diversos fatores, dentre eles: i) o tipo (sistema combinado ou separador) e as condições de conservação do sistema de coleta e transporte de esgoto; ii) características da drenagem pluvial da bacia de contribuição (coletores sujeitos a inundação tendem a receber maior carga de sedimentos através das tampas de poços de visita); iii) o tipo de ocupação da bacia de contribuição; e iv) o tipo de solo da bacia de contribuição e o grau de pavimentação das ruas. A quantidade de areia em sistemas separadores varia usualmente entre 4 e 37 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de esgoto tratado (METCALF & EDDY, 2003).

## 2 PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES PARA O TRATAMENTO PRELIMINAR

As unidades que compõem o TP podem ser implantadas enterradas (Figura 1a), apoiadas ou elevadas (Figura 1b) em relação ao nível do terreno. As soluções enterradas podem facilitar o enclausuramento do TP, tal como demonstrado na Figura 1a para o desarenador e calha Parshall, todavia, podem implicar em maior dificuldade operacional associada à rotina de limpeza das unidades, além de, na maioria das vezes, demandarem uma EE dentro da ETE. Nesta configuração, o TP a montante da EE pode ter um importante papel na proteção dos conjuntos moto-bomba, mas não há como garantir que este aspecto compense a maior dificuldade com a operação das unidades enterradas. Cabe destacar que os aspectos associados à cobertura, exaustão e tratamento de odores no TP são abordados na Parte 4 desta Coletânea de NTs (BRANDT *et al.*, 2018).

Por sua vez, a solução elevada pode demandar maior custo de implantação comparativamente à solução apoiada, embora possua a vantagem

de permitir a descarga de fundo por gravidade dos desarenadores, o que pode implicar em simplificação ou eliminação de equipamentos eletromecânicos (p. ex.: parafuso classificador). Adicionalmente, a caçamba para coleta do material gradeado pode ser estrategicamente disposta próxima ao gradeamento, em nível inferior ao TP. Isso contribui para a melhoria das condições ergonômicas associadas à limpeza manual das grades de barra. Eventualmente, a etapa de gradeamento pode estar associada à elevatória de esgoto bruto, atentando-se para a necessidade de adoção de estrutura de controle das vazões afluentes (extravasor) para prevenir o afogamento das grades. Neste caso, entendendo-se que as grades sejam componentes da EE, as unidades do TP se reduziriam à implantação do desarenador e, eventualmente, gradeamento fino e peneiramento. Em muitas situações, a elevação do TP elimina uma nova EE dentro da ETE, uma vez que o ganho de cota pode ser advindo do próprio emissário de recalque, contribuindo para que o perfil hidráulico seja integralmente a favor da gravidade.



Figura 1 – Unidades do tratamento preliminar: a) Solução enterrada e enclausurada; b) Solução elevada.

Os canais que conduzem às grades de barras e ao desarenador são tipicamente confeccionados em concreto armado, todavia, para ETEs de pequeno porte (Vazão -  $Q < 20 \text{ L.s}^{-1}$  ou EP < 10.000 hab.), as dimensões de tais canais podem ser diminutas a ponto de dificultar a execução da obra em concreto, conforme abordado adiante, no item “Outros aspectos importantes de projeto, construção e operação”.

### 3 DIRETRIZES PARA PROJETO

#### 3.1 Parâmetros e critérios de dimensionamento

A lógica principal de dimensionamento das unidades do tratamento preliminar perpassa por assegurar velocidades de escoamento adequadas para a remoção de sólidos grosseiros, evitando problemas de obstrução, desgaste e travamento em equipamentos eletromecânicos, sensores e medidores de velocidade submersos. Todavia, deve-se assegurar que tais velocidades não impliquem na sedimentação da matéria orgânica particulada, o que propiciaria a geração de odores. As diretrizes de projeto para a etapa de tratamento preliminar encontram-se discriminadas na Norma Brasileira - NBR 12.209 (ABNT, 2011).

Os principais parâmetros e critérios de dimensionamento das unidades componentes do tratamento preliminar são reportados na Tabela 1. Os diferentes arranjos recomendados para o TP referentes à escolha de grades e desarenadores são apresentados na Figura 2, em função do equivalente populacional (ou vazão afluente) da ETE. Ressalta-se que tais arranjos são oriundos da experiência operacional em ETEs em diversos estados brasileiros, notadamente nas regiões sul e sudeste, tendo sido extensamente discutidos junto a especialistas do setor de saneamento nacional.

**Tabela 1** – Principais parâmetros e critérios de dimensionamento para as unidades do tratamento preliminar

Gradeamento (grades de barras)	
Parâmetro	Valor
Velocidade máxima através das barras da grade para a vazão final <sup>a</sup>	1,20 m.s <sup>-1</sup>
Inclinação das barras em relação à horizontal	45 a 60° - limpeza manual 60 a 90° - limpeza mecanizada
Perda de carga mínima a ser considerada (escoamento de montante)	0,15 m - limpeza manual 0,10 m - limpeza mecanizada
Desarenador <sup>b</sup>	
Parâmetro	Valor
Velocidade de escoamento	0,25 a 0,40 m.s <sup>-1</sup>
Profundidade mínima para acumulação de material sedimentado	0,20 m
Taxa de escoamento superficial	600 a 1.000 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>

**Nota:** a vazão de dimensionamento das unidades do TP deve ser a vazão máxima afluente

<sup>a</sup>Os canais a montante e a jusante dos dispositivos de remoção de sólidos grosseiros devem garantir, pelo menos uma vez ao dia, desde o início da operação, uma velocidade igual ou superior a 0,40 m.s<sup>-1</sup>. A velocidade mínima de escoamento nestes canais deve ser idealmente superior a 0,30 m.s<sup>-1</sup>, a fim de evitar a deposição de areia nos canais.

<sup>b</sup>Critérios válidos para desarenadores de fluxo horizontal e seção retangular (tipo canal)

**Fonte:** adaptado de NBR 12.209 (ABNT, 2011)

#### 3.2 Arranjos recomendados para o tratamento preliminar

Nota-se que na NBR 12.209 (ABNT, 2011) não há uma recomendação explícita sobre as possibilidades de utilização de diferentes tipos de grade (em termos do espaçamento entre barras e automação da limpeza), especialmente para ETEs de pequeno porte ( $Q < 20 \text{ L.s}^{-1}$  ou EP < 10.000 hab.). No caso de estações cuja vazão máxima afluente em final de plano for igual ou superior a  $100 \text{ L.s}^{-1}$ , as grades devem ser de limpeza mecanizada. Especificamente para sistemas de pequeno porte, a experiência operacional tem apontado positivamente para a utilização sequencial de duas grades finas de limpeza manual, com espaçamento livre entre as

barras de 20 e 10 mm, respectivamente (Figura 2). Cabe ressaltar que a opção por se utilizar grades de limpeza manual ou mecanizada para este porte de ETEs está a cargo do prestador de serviço, em vista do volume de material a ser retido ou das dificuldades operacionais (NBR 12.209 – ABNT, 2011).

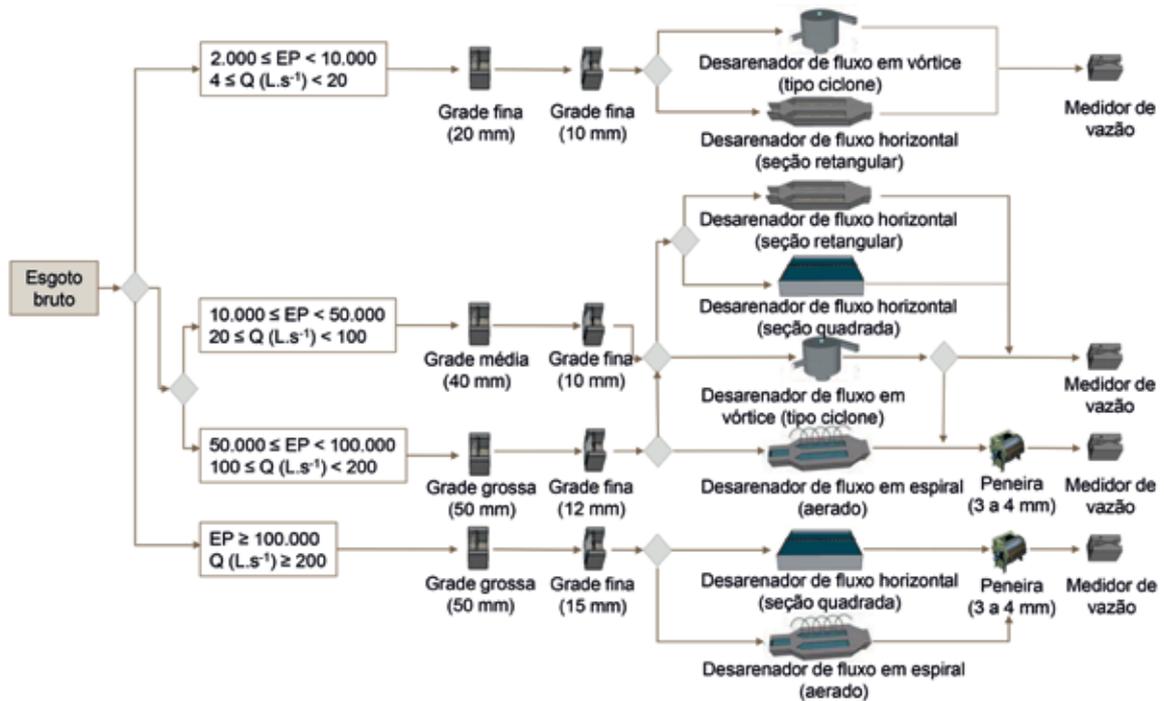
Em se tratando de ETEs que empregam reatores UASB, é imprescindível a utilização de dispositivo de remoção de sólidos grosseiros com aberturas iguais ou inferiores a 12 mm para ETEs com vazão máxima até  $100 \text{ L.s}^{-1}$  (NBR 12.209 – ABNT, 2011). De acordo com as experiências operacionais, a utilização de unidades de peneiramento estático (3 a 5 mm de abertura da malha) em ETEs de pequeno porte, pós-gradeamento, tem-se mostrado importante para evitar obstruções nas linhas de alimentação de reatores UASB (vertedores e tubulações), bem como em calhas coletoras de efluente tratado. Para estações cuja vazão máxima é superior a  $100 \text{ L.s}^{-1}$ , é imprescindível a utilização de peneira com aberturas iguais ou inferiores a 6 mm, segundo indicação da NBR 12.209 (ABNT, 2011). Neste caso, as experiências operacionais têm apontado o emprego preferencial de peneiras com abertura de malha de 3 ou 4 mm.

A qualidade do lodo e da espuma descartados, em termos da presença de sólidos grosseiros, também se reflete na confiabilidade de operação dos sistemas de desaguamento mecanizado, reduzindo a necessidade de manutenção devido à obstrução de tubulações de alimentação de bombas e centrífugas, travamentos de rotores e estatores de bombas e de misturadores, rompimento de selos mecânicos, acúmulo de resíduos em tanques de equalização etc. Adicionalmente, uma remoção mais eficiente de sólidos grosseiros propicia a obtenção de um lodo de melhor qualidade estética, o que pode favorecer o uso agrícola, além de diminuir a formação de espuma no interior dos reatores anaeróbios.

Em relação aos desarenadores, para sistemas de pequeno porte ( $Q < 20 \text{ L.s}^{-1}$  ou EP < 10.000 hab.)

usualmente são adotadas as unidades de fluxo horizontal e seção retangular (tipo canal – ver Figura 1b), com velocidade constante garantida por meio de uma seção de controle implantada a jusante do desarenador (normalmente antes de uma calha Parshall) e remoção não mecanizada de areia. Uma opção bastante utilizada para sistemas de pequeno e médio porte ( $Q < 100 \text{ L.s}^{-1}$  ou EP < 50.000 hab.), sobretudo na região sul do país, refere-se ao desarenador de fluxo em vórtice (tipo ciclone), com remoção de areia por meio de *air lift*. Para sistemas de maior porte ( $Q \geq 100 \text{ L.s}^{-1}$  ou EP  $\geq 50.000$  hab.), comumente são adotadas as unidades de fluxo horizontal e seção quadrada em planta. Neste caso, a remoção da areia retida é efetuada por meio de braços raspadores e lavador de areia. Unidades de maior porte requerem atenção especial para assegurar uma distribuição uniforme da vazão afluyente em toda a seção de escoamento do canal, além de uma atenta operação para identificar a ocorrência de fluxos preferenciais e/ou assoreamento em pontos específicos do canal, notadamente à montante da grade, especialmente no início de operação das ETEs.

Especificamente em relação aos desarenadores aerados (fluxo em espiral), embora sejam equipamentos de reconhecida eficiência para a remoção de areia, as esparsas experiências brasileiras reportadas na literatura indicam baixa eficiência destes equipamentos associada à remoção de óleos e graxas. Entre os possíveis motivos aventados, a diferença de viscosidade do líquido em função da temperatura pode ser um importante fator, visto que tais equipamentos, em sua maioria, são projetados para as condições de clima temperado. Todavia, há que se ressaltar experiências bem sucedidas com a operação de desarenadores aerados observadas pelos autores no estado do Rio de Janeiro. A possibilidade de remoção de óleos e graxas na etapa de tratamento preliminar pode ser interessante para a redução da formação de espuma em reatores UASB, que, especialmente nas ETEs de maior porte, representam um dos principais problemas operacionais.



**Figura 2** – Alternativas recomendadas para as unidades do tratamento preliminar de ETEs de diferentes portes. **Nota:** as equivalências entre Q e EP foram determinadas a partir de  $Q_{med}$ . O dimensionamento das unidades do TP deve ser realizado utilizando  $Q_{max}$ .

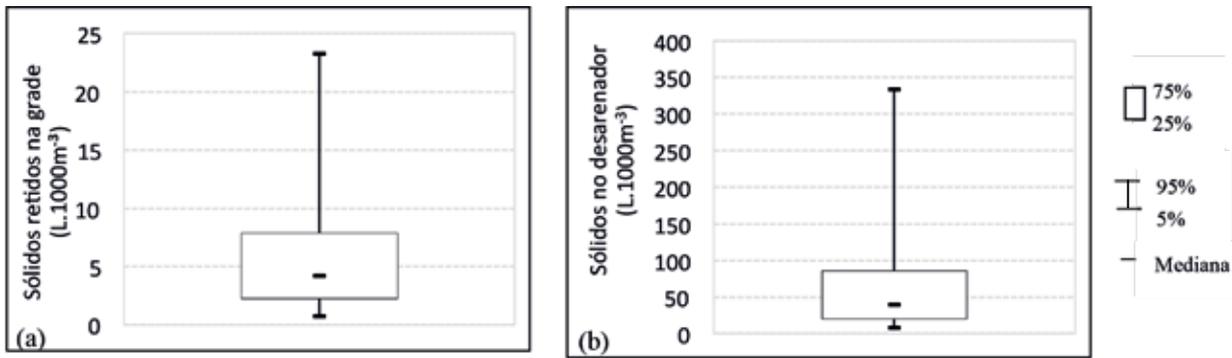
Adicionalmente às alternativas recomendadas na Figura 2, devem ser verificadas as possibilidades de modulação e de redundância das unidades do TP, especificamente para ETEs de médio e grande porte ( $Q \geq 20 L.s^{-1}$  ou  $EP \geq 10.000$  hab.), conforme indicado na Tabela 2. Para ETEs de pequeno porte ( $Q < 20 L.s^{-1}$  ou  $EP < 10.000$  hab.), recomenda-se a implantação de um canal paralelo de desvio (*by-pass*) dotado de gradeamento fino (espaçamento entre barras igual a 20 mm).

### 3.3 Material retido nas unidades do tratamento preliminar

De acordo com dados coletados junto a 24 ETEs na bacia hidrográfica do Rio das Velhas, no estado de Minas Gerais, o volume mediano de material retido nas unidades de gradeamento foi da ordem de 4,2 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de esgoto tratado (Figura 3) (2,5 a 8,0 L.1.000m<sup>-3</sup> – percentis 25 e 75% dos dados), bem próximo ao limite inferior da faixa de valores reportada na literatura, entre 6 e 50 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de esgoto tratado (JORDÃO e PESSÔA, 2017). De certa forma, o pequeno volume de material retido

nas grades identificado nesse levantamento causa estranheza, uma vez que, sabidamente, é grande a quantidade de detritos presentes nos esgotos gerados na maioria das cidades brasileiras. Fica a dúvida se a baixa retenção de material nas grades não é decorrente do elevado espaçamento entre barras, o que, em última instância, estaria contribuindo para a elevada presença de detritos no interior dos reatores (juntamente com a espuma e o lodo).

Para 23 destas ETEs investigadas, o volume mediano de material retido no desarenador foi da ordem de 40 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de esgoto tratado (Figura 3) (20 a 85 L.1.000m<sup>-3</sup> – percentis 25 e 75% dos dados), ligeiramente superior ao limite máximo de 37 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de esgoto tratado, reportado por Metcalf & Eddy (2003). Essa elevada quantidade de areia pode ser atribuída à ocorrência de infiltração na rede coletora e, principalmente, contribuição pluvial parasitária, que parece ser uma realidade em todo o território nacional. A título de informação complementar, dados verificados no litoral paulista indicam volumes de areia retidos da ordem de 60 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de esgoto tratado.



**Figura 3** – Material retido nas unidades de tratamento preliminar de ETEs na bacia hidrográfica do Rio das Velhas. (a) sólidos retidos na grade (L.1.000m<sup>-3</sup>); (b) sólidos retidos no desarenador (L.1.000m<sup>-3</sup>).

De fato os volumes de sólidos grosseiros e de areia retidos na etapa de tratamento preliminar dependem de uma série de fatores, tal como anteriormente caracterizado nessa NT, o que deve ser estritamente observado na etapa de projeto das ETEs.

#### 4 ASPECTOS RELACIONADOS A PROJETO, CONSTRUÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

Os principais aspectos a serem avaliados na análise de projetos das unidades que compõem o trata-

mento preliminar são sintetizados na Tabela 2. Ao listá-los, buscou-se definir o grau de importância associado à observância de cada aspecto, de acordo com os seguintes critérios:

- Grau de importância médio – aspectos que, se não observados, podem comprometer a operação e manutenção adequada do sistema;
- Grau de importância alto – aspectos cuja observação é imprescindível para a boa operação e manutenção do sistema.

**Tabela 2** – Principais aspectos a serem avaliados na análise de projetos das unidades que compõem o tratamento preliminar

Aspecto	Grau de importância	
	Alto	Médio
<b>Aspectos gerais</b>		
Consultar a unidade operacional e de manutenção eletromecânica anteriormente à definição da concepção/layout do TP (apoiado, elevado, a montante da EE, equipamentos, possibilidade de recebimento de caminhão limpa fossa e efluentes não domésticos, forma de limpeza e esgotamento das unidades, necessidade de controle de odor etc.).	X	
Dimensionar as unidades usando a vazão máxima afluyente e garantir as velocidades mínimas de escoamento, de forma a impedir a deposição indesejada de sólidos orgânicos (SSV).	X	
Justificar a escolha de tratamento preliminar manual ou mecanizado.	X	
Verificar o perfil hidráulico das unidades do TP. Devem ser consideradas as perdas de carga (canais, comportas e equipamentos) desde o ponto de controle de escoamento (p.ex.: calha Parshall) até a unidade de gradeamento, para a definição das lâminas d'água (jusante e montante de cada unidade).	X	
Prever dispositivo de extravasão de vazões afluyentes superiores à capacidade de projeto da ETE. Notar que, em ETEs nas quais a EE de chegada está localizada a jusante do TP e, onde há risco de interrupção do fornecimento de energia elétrica, dois extravasores devem ser implantados, um antes do TP e outro associado ao poço de sucção da EE de chegada. Esta medida visa evitar o afogamento de unidades implantadas a montante de elevatórias.	X	
No canal de extravasão da ETE, prever a implantação de medidores de vazão que assegurem o registro da frequência e magnitude das vazões afluyentes derivadas para o curso d'água.		X
Prever válvula <i>flap</i> quando o extravasor for afogado, devendo a mesma ser instalada mais próxima ao tratamento preliminar, priorizando o acesso para manutenção da válvula.	X	
O <i>by-pass</i> a montante do tratamento preliminar deverá ser provido de dispositivo para esgotar a areia depositada na rede.	X	
Para ETEs de médio e grande porte ( $Q \geq 20 \text{ L.s}^{-1}$ ou $EP \geq 10.000 \text{ hab.}$ ), adotar redundância (duplicação) das unidades do TP (gradeamento, desarenação e peneiramento). Avaliar alternativas de modulação para redução do investimento inicial, todavia, assegurar a manutenção de velocidades mínimas, a fim de evitar a deposição indesejada de sólidos.	X	

Aspecto	Grau de importância	
	Alto	Médio
<b>Aspectos gerais</b>		
Para ETEs de pequeno porte ( $Q < 20 \text{ L.s}^{-1}$ ou EP < 10.000 hab.), adotar canal paralelo ( <i>by-pass</i> ) com grade de 20 mm.	X	
Verificar a possibilidade/viabilidade técnica e econômica de utilização de gradeamento mecanizado e/ou peneira estática para ETEs de pequeno e médio porte ( $Q < 100 \text{ L.s}^{-1}$ ou EP < 50.000 hab.).		X
Avaliar a possibilidade de implantação de gradeamento sequencial composto de grade grossa, média e fina, caso não seja adequado utilizar o gradeamento mecanizado.		X
Prever sistema de coleta, armazenamento, transporte e disposição final dos resíduos sólidos retidos no TP considerando a rotina operacional (frequência de remoção e destino) e incômodo à vizinhança (odores).	X	
Prever comportas a montante e a jusante das unidades, que permitam a admissão, isolamento, limpeza e desvio ( <i>by-pass</i> ) dos esgotos.	X	
Nas especificações de comportas e equipamentos, considerar o uso de materiais resistentes à corrosão.	X	
Para as estações elevatórias, observar a profundidade do poço de sucção, sendo preferencialmente limitada a 8 m. Em caso de poços superiores a 8 m, deverão ser previstas condições de acesso para manutenção e limpeza (plataformas intermediárias, rampa, escada, talha elétrica etc.) e guarda-corpo no entorno. Todavia, a depender do tipo de limpeza de grade, mesmo para profundidades inferiores a 8 m devem ser garantidas condições adequadas de acesso e limpeza.	X	
Prever caçambas menores em ETEs de pequeno porte, a fim de não acumular resíduos por longos períodos de tempo, com a consequente geração de odores.		X
Avaliar a necessidade de prever dispositivos de cobertura para as caçambas de depósito de resíduos, em função das condições pluviométricas locais e da necessidade de controle de odores.	X	
Considerar asfalto e passeio cimentado no entorno das unidades no projeto paisagístico e de urbanização do tratamento preliminar.	X	
Garantir acesso compatível com os veículos utilizados pela operação para a retirada das caçambas/containers, incluindo: inclinação adequada das rampas de acesso; área de manobra suficiente e raios de curvas adequados para o trânsito de caminhões; base, sub-base e pavimento compatível com o tráfego de veículos.	X	
Prever acesso adequado para os operadores executarem as atividades rotineiras e, também, de manutenção eletromecânica das unidades (p.ex.: lubrificação, retirada de motores, roscas etc.).	X	
Considerar coleta e direcionamento do percolado das caçambas para o afluente à ETE.	X	
Em ETEs que recebam efluentes de caminhões limpa fossa, espuma e lodo de outras ETEs e EEEs, deve-se considerar a instalação de unidade específica para recebimento e controle (p.ex.: tanque de homogeneização), atentando para o impacto na produção de lodo no reator UASB (ver Nota Técnica 3 – Lobato <i>et al.</i> , 2018).	X	
Garantir a compatibilização entre os equipamentos previstos em projeto e aqueles de fato adquiridos, para se evitar adequações na estrutura civil e eletromecânica das unidades do tratamento preliminar, durante as fases de construção e operação.	X	
<b>Gradeamento</b>	<b>Alto</b>	<b>Médio</b>
Para a estimativa de sólidos grosseiros e areia retidos, utilizar dados operacionais relacionados à realidade local (verificar as características da bacia de esgotamento, como: ocupação e atividade econômica).	X	
Em caso de unidades mecanizadas, prever canal paralelo com grade de limpeza manual, com mesmo espaçamento entre barras.	X	
O gradeamento deverá ser executado com barras de seção retangular. Não utilizar barras de seção circular ou barras horizontais para auxílio na fixação das barras principais, pois dificultam a livre passagem do rastelo.	X	
Para tratamento preliminar implantado a jusante de estação elevatória, deverá ser previsto gradeamento grosseiro a montante da elevatória (notar que o espaçamento entre barras deve ser inferior ao diâmetro do rotor da bomba, para evitar passagem de sólidos grosseiros de maiores dimensões). Adicionalmente, deverá ser avaliada a possibilidade de implantação de gradeamento médio e fino a montante da elevatória.	X	
Para ETEs com desaguamento mecanizado de lodo e/ou de espuma, prever no tratamento preliminar uma etapa de peneiramento com malha de até 6 mm (preferencialmente 3 ou 4 mm), visando assegurar a adequada operação e minimização de paralisações dessas unidades (p. ex.: misturador de tanque de equalização, bombas de alimentação de equipamentos de desaguamento).	X	
Em ETEs de grande porte com gradeamento mecanizado, avaliar a possibilidade de utilização de dispositivos de compactação para os resíduos removidos, objetivando reduzir o volume e a liberação de percolado em caçambas e containers, reduzir odores e melhorar as características do material para disposição final.		X
<b>Desarenador</b>	<b>Alto</b>	<b>Médio</b>
Quando a largura do desarenador for inferior a 30 cm, avaliar e propor alternativas, como desarenador do tipo fluxo em vórtice ou confecção de equipamento de limpeza sob medida, compatível com as menores dimensões do canal ou ainda a adoção de soluções pré-fabricadas em materiais alternativos (p.ex.: fibra de vidro e polipropileno - PP).		X
Para desarenadores de limpeza manual, verificar a existência de rebaixo adequado para o acúmulo de areia em função da frequência de limpeza adotada pela operação.	X	
Onde a topografia permitir, adotar descarte de areia pelo fundo, de maneira a reduzir o gasto com caminhão limpa fossa.		X
Para os desarenadores mecanizados de seção quadrada, a moldagem da circunferência do raspador deve ser realizada dentro do quadrado em que está inscrito (contemplando chanfros nos vértices), com uso do próprio braço raspador do equipamento.	X	
Para os desarenadores de seção quadrada, garantir uma distribuição uniforme da vazão ao longo da largura da unidade. Além de se ter um dimensionamento hidráulico adequado no canal de acesso, deverá haver possibilidade de se regular a vazão em cada ponto de entrada.	X	
Para os desarenadores de seção quadrada, garantir a possibilidade de acesso para a limpeza do canal afluente, visto que, em algumas situações, pode haver a deposição de areia nos extremos desse canal devido à ocorrência de velocidades inferiores às mínimas previstas no projeto.	X	
Para os desarenadores de seção quadrada, avaliar a possibilidade de prever descarga de fundo para o esgotamento das unidades, a fim de possibilitar a limpeza e a manutenção do braço raspador e do dispositivo classificador.	X	

Nota-se que a maioria dos aspectos anteriormente listados foram categorizados como de significância alta. Tal fato reflete a importância do tratamento preliminar para o adequado condicionamento dos esgotos preliminarmente à entrada nos reatores UASB. Em síntese, um adequado tratamento preliminar influenciará positivamente: i) na manutenção das estruturas de distribuição de vazão e calhas coletoras de efluente, evitando obstruções; ii) na redução da deposição/acúmulo de areia no fundo de reatores UASB; iii) no gerenciamento do lodo, visto que será possível obter um sólido com menor conteúdo de detritos e areia, e de melhor qualidade estética; iv) no gerenciamento de espuma, sobretudo devido ao fato de que, quando não removidos adequadamente no tratamento preliminar, alguns materiais (p.ex.: plásticos e detritos leves em geral) tendem a flotar no interior do reator e acumular na parte superior do separador trifásico; v) na redução significativa de problemas corriqueiros na operação das unidades de processamento mecanizado de lodo e espuma, como paralisação por obstruções de tubulações, quebra e perda de rendimento de equipamentos por desgaste.

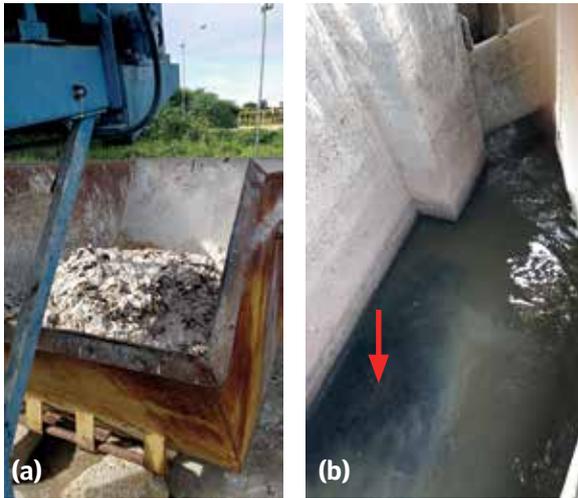
#### 4.1 Emissões odorantes no tratamento preliminar

Nas situações em que os canais do TP não são confinados, o perfil hidráulico no projeto e implantação das unidades deve evitar a formação de turbulências, objetivando minimizar o desprendimento de gases odorantes e com potencial de corrosão. Quando os canais do TP são confinados, com exaustão dos gases, deve-se avaliar a possibilidade da chegada do esgoto ocorrer em regime turbulento (p. ex.: utilizando tubulações com descarga acima do NA máximo operacional), de modo a facilitar o desprendimento, a exaustão e o tratamento dos gases dissolvidos no esgoto afluente.

Adicionalmente, materiais resistentes à corrosão, bem como a proteção das estruturas de concreto em locais de sabida emissão de gases devem ser assegurados, tal como apontado na Parte 4 desta Coletânea de NTs (BRANDT *et al.*, 2018).

A emissão de odores no tratamento preliminar em ETEs de pequeno porte também está associada ao acúmulo do material retirado nas grades, quando depositado em caçambas. Recomenda-se a utilização de caçambas de menor volume, para que o material ali disposto não fique armazenado por um longo período. Eventualmente, a aplicação de cal virgem para controlar a emissão de odores pode ser necessária (Figura 4a). Nestes casos, é necessário prever local adequado para armazenamento desses produtos na ETE. Em contrapartida, para ETEs de maior porte ( $Q \geq 100 \text{ L.s}^{-1}$  ou EP  $\geq 50.000$  hab.), podem ser requeridas medidas de fechamento de caçambas que considerem materiais resistentes (p.ex.: dobradiças, fixação de lonas) e a observância à aspectos ergonômicos (p.ex.: peso). O acesso de caminhões (p.ex.: declividade de rampas, raios de curvas, capacidade suporte do pavimento, área de manobra) para a retirada de caçambas também deve ser considerado na etapa de projeto e construção da ETE.

Outro aspecto importante está associado à garantia das velocidades mínimas de escoamento nos canais a montante e a jusante do gradeamento e do desarenador, idealmente superiores a  $0,30 \text{ m.s}^{-1}$ , para evitar a deposição indesejada de sólidos nessas estruturas, como exemplificado na Figura 4b. Atenção especial deve ser direcionada a possíveis mudanças de seção transversal no transcurso destes canais. O eventual acúmulo de materiais nesses pontos implica na emissão de maus odores, associados à decomposição dos sólidos orgânicos indevidamente retidos, bem como pode comprometer o funcionamento de grades e comportas.



**Figura 4** – (a) Manejo do material removido na etapa de gradeamento, com aplicação de cal; (b) Acúmulo de sólidos no canal afluente ao desarenador.

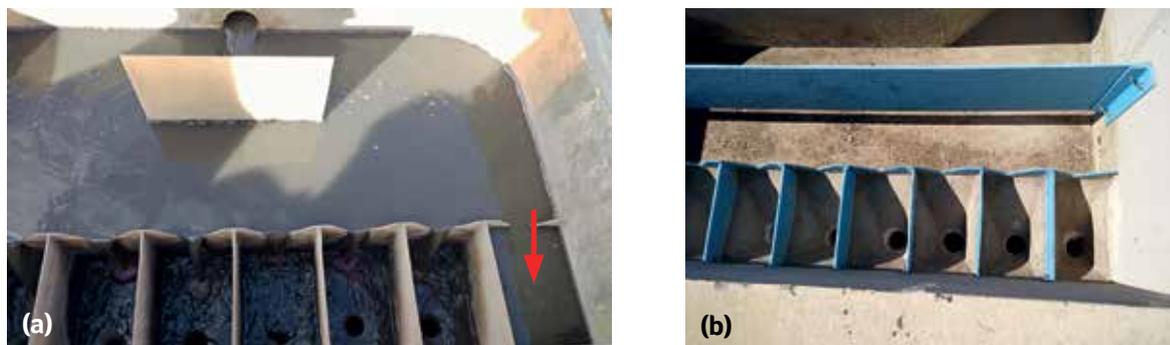
#### 4.2 Bombeamento e distribuição de vazão

A etapa de bombeamento das vazões afluentes à ETE para o reator UASB é um ponto crucial para o adequado desempenho dos reatores anaeróbios. Nos casos em que há necessidade de recalque da vazão afluente à ETE para a alimentação dos reatores UASB, especialmente em estações de pequeno e médio porte ( $Q < 100 \text{ L.s}^{-1}$  ou EP < 50.000 hab.), verifica-se que os projetos contemplam tipicamente apenas duas bombas, sendo uma para rodízio e reserva. Logo, os reatores são expostos a condições de sobrecarga hidráulica, devido ao bombeamento constante de uma vazão igual ou superior à vazão máxima para a qual foram projetados, culminando em eventos de queda na eficiência de retenção de sólidos e remoção de matéria orgânica.

Tal como previsto no item 6.4.2 da NBR 12.209, no caso de alimentação por estação elevatória, a vazão máxima de bombeamento não pode exceder mais que 25% da vazão máxima de esgoto afluente (ABNT, 2011). Neste caso, recomenda-se a utilização de bombas com variadores de velocidade

(inversores de frequência) ou o mínimo de três bombas, sendo uma para rodízio e reserva. Adicionalmente, recomenda-se a instalação de um medidor de vazão após a estação elevatória, com o intuito de caracterizar o efetivo hidrograma de vazões afluente ao reator UASB. Tal medida reveste-se de importância, sobretudo quando da troca de equipamentos, em que bombas com diferentes pontos operacionais costumam ser instaladas.

Especificamente quanto às caixas de distribuição do esgoto afluente aos reatores UASB, é comum notar estruturas com o fundo plano e/ou com baixa inclinação (Figura 5a), o que propicia o acúmulo de areia e/ou detritos, especialmente quando da ocorrência de falhas no tratamento preliminar. Nesse sentido, recomenda-se a adoção de caixas com fundo inclinado (Figura 5b). Adicionalmente, estruturas confeccionadas em materiais que permitem melhor acabamento (p.ex.: fibra de vidro - Figuras 5a e 5b), bem como o correto dimensionamento e verificação das lâminas d'água nos vertedores triangulares para as vazões máximas de bombeamento, são aspectos importantes para a garantia de uma distribuição uniforme de vazão para dentro dos compartimentos que alimentam os tubos de distribuição. Por sua vez, esses tubos conectados ao fundo das caixas de distribuição devem possuir diâmetro de 75 mm, visto que, ao passo que garantem uma velocidade descendente adequada, são grandes o suficiente para evitarem frequentes obstruções (obviamente, quando se tem um funcionamento satisfatório do TP). Ressalta-se a necessidade de completa garantia da correta fixação dos tubos às estruturas de distribuição, uma vez que estes podem se soltar sob a laje sem que o operador perceba que o tubo está desconectado. Neste caso, o esgoto afluente adentraria o compartimento de decantação do reator UASB, ao invés de ser distribuído ao fundo da unidade.



**Figura 5** – Detalhes de compartimentos de distribuição de vazão afluente a reatores UASB: a) Caixa com fundo plano, com destaque para o entupimento de um tubo; b) Caixa com fundo inclinado.

### 4.3 Outros aspectos importantes de projeto, construção e operação

Especificamente para ETEs de pequeno porte ( $Q < 20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  ou EP < 10.000 hab.), as dimensões do tratamento preliminar, especialmente os canais afluente e efluente ao gradeamento e desarenador, tornam-se diminutas para atender às condições ideais de escoamento previstas na NBR 12.209 (ABNT, 2011). Logo, o emprego de estruturas de concreto armado moldado *in loco* pode não ser a solução ideal, em vista das dificuldades associadas à retirada das formas de concretagem e à garantia da espessura necessária ao cobrimento mínimo de armadura (5 cm – NBR 6.118 – ABNT, 2014). Neste caso, tal como mencionado anteriormente, soluções pré-moldadas em materiais alternativos podem ser uma interessante alternativa, a exemplo do plástico reforçado em fibra de vidro (PRFV) e do polipropileno.

A preocupação com critérios ergonômicos e de saúde e segurança no trabalho deve fazer parte do projeto e construção das unidades do TP, a exemplo da previsão de instalação de guarda-corpo e escadas de acesso (resistentes à corrosão), pontos de água de serviço, aberturas mínimas para passagem de operadores e ferramental adequado para as operações de limpeza e manutenção. A previsão de dispositivos de esgotamento dessas unidades também torna mais ágil e simples as operações de limpeza destas unidades.

É de fundamental importância que o projeto leve em consideração as especificidades dos equipamentos que serão **efetivamente adquiridos e implantados**, tais como: perda de carga efetiva, necessidade de rebaixos, demanda de água para limpeza, descarga de drenos, apoio para roscas e grades, acesso para manutenção eletromecânica e limpezas etc. A compatibilização entre os equipamentos previstos em projeto e aqueles de fato adquiridos é crucial para se evitar adequações na estrutura civil e eletromecânica das unidades do tratamento preliminar, durante as fases de construção e operação, as quais podem representar custos significativos.

Finalmente, torna-se importante chamar a atenção para problemas construtivos recorrentes, tanto de obra como de instalação de equipamentos, tais como equipamentos instalados desnivelados (comportas, braços raspadores de desarenadores, classificadores de areia) e equipamentos que reduzem a seção do canal com paramentos laterais.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem 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 BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12209: **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2011. 57 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

BORGES, N. B. **Aproveitamento dos resíduos gerados no tratamento preliminar de estações de tratamento de esgoto**. 2014. 238 p. Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

BRANDT, E. M. F., SANTOS, J. M. B., SOUZA, C. L., POSSETTI, G. R. C., BRESSANI-RIBEIRO, T., CARVALHO-JÚNIOR, A. N., CHERNICHARO, C. A. L. 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 odorantes. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 56-72, 2018.

JORDÃO, E.P., PESSÓA, C.A. Tratamento de esgotos domésticos. 8ª edição. Rio de Janeiro, ABES, 2017.

MARCELIS, P. & WESSELS, C. Recovery and valorisation of cellulose from sewage: the route to circularity. In: **12<sup>th</sup> European Waste Water Management Conference**, 2018, Manchester, UK. **Anais...** Manchester, UK, 2018.

METCALF & EDDY, **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4<sup>th</sup> ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.

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.

RUIKEN, C.J., BREUER, G., KLAVERSMA, E., SANTIAGO, T., VAN LOOSDRECHT, M. Sieving wastewater – Cellulose recovery, economic and energy evaluation. **Water Research**, v. 47, p. 43-48, 2013.

WEF - Water Environment Federation. **Preliminary Treatment for Wastewater Facilities**. Manual of Practice OM-2. Alexandria, VA. 1994.

WEF - Water Environment Federation. **Design of Municipal Wastewater Treatment Plants**. Manual of Practice n. 8, ASCE Manual and Report on Engineering Practice n. 76. Alexandria, VA. 1998.

# 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

*Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage – Part 3: Management of sludge and scum*

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

Lívia Cristina da Silva Lobato / Thiago Bressani Ribeiro / Bruno Sidnei da Silva / Carlos Andrés Díaz Flórez / Priscilla Natalie Pereira Neves/ Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (\*)

DOI: 10.4322/dae.2018.040

## Resumo

A ausência e/ou a não efetividade de rotinas operacionais adequadas para o descarte de lodo excedente e remoção de espuma tem resultado em graves problemas operacionais e de perda de eficiência do sistema de tratamento como um todo. A fim de garantir o adequado gerenciamento desses subprodutos sólidos, é imprescindível o estabelecimento de rotinas operacionais para o manejo do lodo e da espuma, que possam ser implementadas de forma efetiva nos reatores UASB. Esta Nota Técnica (NT) tem como objetivo apresentar os problemas e suas respectivas origens relacionados ao gerenciamento inadequado desses subprodutos sólidos, bem como os possíveis aprimoramentos de projeto, construção e operação. Em síntese, os aprimoramentos referem-se aos seguintes aspectos principais: i) sensibilização dos usuários; ii) melhorias no tratamento preliminar; iii) cálculo mais preciso da produção de lodo nos reatores, levando em consideração o recebimento de todas as possíveis contribuições à ETE; iv) definição das quantidades de lodo a serem mantidas e a serem descartadas do reator; v) definição da estratégia de descarte e das características do sistema de desaguamento; vi) controle sobre o recebimento de efluentes não domésticos; vii) melhor controle sobre a formação de espuma no compartimento de decantação; e viii) utilização de separadores trifásicos equipados com dispositivo de remoção de espuma. Importante ressaltar que o gerenciamento integrado dos subprodutos sólidos (lodo e espuma), bem como do biogás, pode trazer importantes benefícios para as ETEs.

**Palavras-chave:** Biogás; desaguamento; óleos e graxas; reatores anaeróbios; separador trifásico; tratamento preliminar.

**Lívia 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.

**Bruno Sidnei da Silva** – Engenheiro Ambiental pela UFSC. Mestre em Engenharia Hidráulica e Ambiental pela USP. Engenheiro da Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo (Sabesp).

**Carlos Andrés Díaz Flórez** – Engenheiro Civil pela Universidade de Antioquia. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG.

**Priscilla Natalie Pereira Neves** – Engenheira Ambiental pela UFMG. Mestranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos 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 absence and/or the non-effectiveness of suitable operational routines for the withdrawal of excess sludge and scum removal have resulted in serious operational problems and loss of efficiency of the sewage treatment system as a whole. In order to ensure the adequate management of these solid by-products, it is essential to establish operational routines for sludge and scum management that can be effectively implemented in UASB reactors. This Technical Note (TN) aims to present the problems and their respective origins related to the inadequate management of these solid by-products, as well as the possible improvements of design, construction and operation. In summary, the improvements refer to the following main aspects: i) users awareness; ii) improvements to the preliminary treatment; iii) more accurate calculation of the sludge production, taking into account the receipt of all possible contributions to the STP; iv) definition of the quantities of sludge to be maintained and to be discharged from the reactor; v) definition of the disposal strategy and the characteristics of the dewatering system; vi) control over the reception of non-domestic effluents; vii) better control over the formation of scum in the sedimentation compartment; and viii) use of three-phase separators equipped with a scum removal system. It is important to emphasize that the integrated management of solid by-products (sludge and scum), as well as biogas, can bring important benefits to STPs.

**Keywords:** Anaerobic reactors; biogas; dewatering; oil and grease; preliminary treatment; three-phase separator.

## 1 INTRODUÇÃO

O tratamento de esgoto sanitário em reatores UASB gera subprodutos sólidos – lodo e espuma, os quais precisam ser adequadamente gerenciados a fim de garantir a eficiência e as vantagens desse tipo de tecnologia. Entretanto, em grande parte das estações de tratamento de esgoto (ETE) no Brasil, esse gerenciamento muitas vezes é negligenciado, acarretando em diversos problemas para o sistema de tratamento.

Durante a partida do sistema de tratamento, a acumulação de lodo (biomassa + sólidos inertes) nos reatores UASB acontece após alguns meses de operação contínua, sendo que a taxa de acumulação depende tanto do crescimento da biomassa (síntese de células microbianas) como também da presença de sólidos em suspensão inertes ou não biodegradáveis. Esses últimos, embora não façam parte da biomassa propriamente dita, responsável pela degradação dos compostos orgânicos que adentram ao reator, podem contribuir de maneira significativa para a majoração do *coeficiente de*

*produção de lodo*, devendo, portanto, serem necessariamente computados nos cálculos de produção de lodo dos reatores anaeróbios utilizados para o tratamento de esgoto sanitário.

Uma das principais características dos reatores UASB, quando operados adequadamente, é a sua elevada capacidade de retenção de lodo, resultando em idades de lodo elevadas e conferindo elevado grau de estabilização do lodo. Essa elevada capacidade de retenção do lodo é decorrente da existência do separador trifásico, das velocidades ascensionais impostas ao reator e da alta sedimentabilidade do tipo de lodo desenvolvido neste sistema (LEITÃO *et al.*, 2009). Entretanto, o reator, dado o seu volume compacto, apresenta uma capacidade limite de retenção e armazenamento de lodo, ditada principalmente pelos volumes dos compartimentos de digestão e de decantação do reator. Estas capacidades não devem ser ultrapassadas, em função de estratégias de descarte de lodo inexistentes ou inadequadas; caso contrário poderá ocorrer perda excessiva de sólidos e deterioração da qualidade do

efluente do reator, além de outros problemas correlatos, conforme descrito na Parte 1 desta Coletânea de NTs (CHERNICHARO *et al.*, 2018). Nesse sentido, é mandatário que o lodo presente em excesso seja removido periodicamente e de forma apropriada.

Em relação a espuma no interior dos reatores UASB, sua formação, acumulação e tipo dependem essencialmente da composição do esgoto bruto, particularmente no que tange à presença de detritos (p. ex.: cabelo, cotonete, absorvente, fio dental, algodão, lenço umedecido, ponta de cigarro, materiais plásticos) e óleos e graxas. Assim como o lodo, a espuma também deve ser removida com a frequência devida, visto que seu acúmulo pode levar ao bloqueio da passagem natural do gás, prejudicando sua coleta (LETTINGA e HULSHOFF POL, 1991), bem como pode ocasionar a diminuição da eficiência do tratamento, devido à perda de partículas de espuma juntamente com o efluente final (SATO *et al.*, 2006), dentre outros problemas igualmente graves, conforme descritos na Parte 1 desta Coletânea de NTs (CHERNICHARO *et al.* 2018) e detalhados mais adiante nesta NT.

A ausência e/ou a não efetividade do gerenciamento do lodo e da espuma pode comprometer a eficiência do sistema de tratamento como um todo. Assim, é imperiosa a necessidade de aprimoramentos no projeto e na construção dos reatores UASB, bem como de estabelecimento de rotinas operacionais adequadas para o gerenciamento desses subprodutos, que possam ser implementadas de forma efetiva nesses reatores.

## 2 ORIGEM E PROBLEMAS RELACIONADOS AO LODO EXCEDENTE

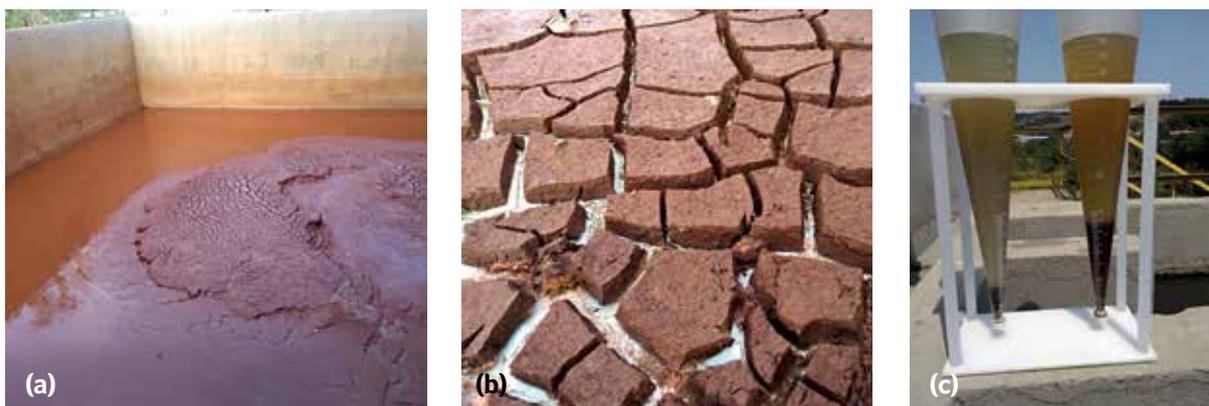
Diversos reatores UASB existentes no Brasil operam com quantidades de lodos que ultrapassam suas capacidades de retenção e armazenamento. Como consequência principal, esses reatores, via de regra, apresentam perda excessiva de sólidos, que impactam negativamente a qualidade do efluente e a eficiência física de remoção de material particulado, em decorrência do esgotamento da capacidade de retenção e armazenamento de lodo no interior do reator. Adicionalmente, a perda de sólidos com o efluente dos reatores UASB pode acarretar sobrecarga nas unidades de pós-tratamento, a exemplo da colmatação do meio suporte de filtros biológicos percoladores (FBP) (Figura 1). Também, o envio de lodo aeróbio da unidade de pós-tratamento (p. ex.: FBP, lodos ativados), para adensamento e estabilização nos reatores UASB, tem sido apontado como uma das causas da perda de sólidos no efluente desses reatores. Entretanto, experiências práticas indicaram que o estabelecimento e implementação de protocolos operacionais para o envio desse lodo aos reatores UASB e para os descartes de lodo excedente dessas unidades, de forma sistematizada e com frequência adequada, fazem frente às dificuldades relatadas no gerenciamento do lodo secundário aeróbio gerado na unidade de pós-tratamento. Essa questão é abordada em detalhes na Parte 6 desta Coletânea de NTs (ALMEIDA *et al.*, 2018).



**Figura 1** – Impacto da perda excessiva de sólidos sobre a unidade de pós-tratamento: a) colmatação do meio suporte; b) afogamento de filtros biológicos percoladores pós-reatores UASB.

Um ponto que merece destaque por aumentar a produção de lodo e, conseqüentemente, impactar o seu gerenciamento, refere-se ao recebimento, na ETE, de contribuições não consideradas na etapa de projeto (p. ex.: lodo de tanques sépticos, lixiviado de aterros sanitários, lodo químico de estações de tratamento de água - ETA, efluentes não domésticos - END). Especificamente em relação ao lodo de ETA, a Figura 2 ilustra o aspecto do lodo químico oriundo

da limpeza de floculadores e decantadores, quando úmido (Figura 2a) e após desaguamento (Figura 2b). Percebe-se, claramente, o aspecto "barrento" do lodo, constituído basicamente por silte e argila. Já na Figura 2c é apresentado o impacto do lançamento do lodo de ETA na rede coletora de esgoto, podendo-se observar o aumento expressivo, em cerca de 15 vezes, do teor de sólidos sedimentáveis no esgoto que chega à ETE.



**Figura 2** – Lodo químico de uma ETA: (a) retido em tanque pulmão após o descarte de floculadores e decantadores; (b) após etapa de desaguamento; (c) impacto sobre o teor de sólidos sedimentáveis no esgoto afluente a uma ETE (cone à esquerda: apenas esgoto bruto - cerca de 5 mL.L<sup>-1</sup>; cone à direita: esgoto bruto + lodo químico da ETA descartado na rede de esgoto - cerca de 80 mL.L<sup>-1</sup>).

Estudos sobre a produção de lodo em uma ETE em escala plena, na qual os reatores UASB foram originalmente projetados para tratar apenas esgoto sanitário e o lodo secundário aeróbio gerado na unidade de pós-tratamento, mostraram que o coeficiente real de produção de lodo ( $Y_{\text{lodo}}$ ) era cerca de 20% superior ao valor considerado no projeto. Ao se investigar a razão da discrepância entre o  $Y_{\text{lodo}}$  de projeto e o  $Y_{\text{lodo}}$  de campo, identificou-se que a ETE recebia contribuições não consideradas no projeto, relativas ao recebimento de lixiviado de aterro sanitário, de lodo de tanque séptico e de lodo químico de uma estação de tratamento de águas fluviais. Ou seja, decisões tomadas no nível de gerência não levaram em consideração se o sistema de desaguamento da ETE em questão possuía capacidade para processar a quantidade adicional de lodo que seria gerada nos reatores UASB.

Normalmente, a ausência de uma rotina operacional para os descartes sistemáticos de lodo dos reatores UASB, ou até mesmo a sua ineficácia, está associada a um ou mais dos seguintes fatores:

- Pontos de amostragem, utilizados para o monitoramento da concentração do lodo ao longo do compartimento de digestão do reator, em número insuficiente e/ou instalados em posição errada, em desacordo com o projeto (Figura 3).
- Tubulações de descarte de lodo em número insuficiente ou mal distribuídas ao longo da altura do compartimento de digestão (Figura 4).

- Manuais e/ou diretrizes de operação dos reatores UASB e dos sistemas de desaguamento que não detalham adequadamente os procedimentos a serem seguidos pelos operadores.
- Falta de remoção sistemática de lodo dos reatores UASB e dos leitos de secagem em decorrência de problemas logísticos e administrativos (p. ex.: contrato de prestação de serviço referente ao transporte do lodo não compatível com a frequência necessária, impedindo o descarte de lodo do reator).
- Falhas nos projetos dos sistemas de desaguamento natural ou mecanizado, dimensionados com capacidade aquém da necessidade de processamento de lodo na ETE ou incompatíveis com as características do lodo a ser desaguado, por não levar em consideração as especificidades locais, as condições climáticas e operacionais (p. ex.: escala dos operadores, transporte do lodo, disponibilidade de produtos químicos e peças de reposição, necessidade de manutenções preventivas, possibilidade de paralisações devido à necessidade de manutenções corretivas).
- Equipamentos do sistema de desaguamento mecanizado (p. ex.: bombas de lodo, dosadores de polímero, centrífugas) fora de operação, em decorrência de dificuldades com a manutenção preventiva e corretiva dos mesmos.



**Figura 3** – Instalação de ponto de amostragem de lodo bem acima do limite do compartimento de decantação, em desacordo com o projeto.



**Figura 4** – Tubulação de descarte de lodo posicionada muito próxima do defletor de gases, em desacordo com o projeto.

Além dos problemas relacionados ao gerenciamento do lodo propriamente dito, conforme abordado anteriormente, existem ainda problemas que são ocasionados pelo funcionamento inadequado das unidades que compõem o tratamento preliminar, sendo comum a passagem de elevada quantidade de detritos (lixo). Os detritos com maior densidade e, em alguns casos a areia, irão se depositar no fundo dos reatores e passarão a fazer parte do lodo. A agregação de detritos e areia ao lodo pode resultar na diminuição do volume útil dos reatores e, quando removidos, podem causar entupimentos nas tubulações de lodo e prejudicar o funcionamento do sistema de desaguamento. Ademais, resultará na geração de um subproduto sólido (lodo desaguado) com qualidade estética desagradável. Na Figura 5 são apresentadas imagens que ilustram detritos retidos em uma peneira de 6 mm (Figura 5a) e detritos que adentraram o reator e passaram a fazer parte do lodo descartado e desaguado em leitos de secagem (Figura 5b).



**Figura 5** – a) Detritos retidos em uma unidade de peneiramento de 6 mm; b) Presença de detritos em lodo e espuma desaguados em leitos de secagem.

### 3 POSSÍVEIS APRIMORAMENTOS RELACIONADOS AO GERENCIAMENTO DO LODO

Face ao exposto anteriormente, depreende-se que é de fundamental importância o correto gerenciamento do lodo produzido nos reatores UASB e na ETE como um todo. A adoção das medidas descritas a seguir pode contribuir significativamente para o melhor gerenciamento do lodo e solução de diversos problemas que ocorrem atualmente em ETEs que empregam reatores UASB para o tratamento de esgoto sanitário.

#### 3.1 Sensibilização de usuários

Vários dos atuais problemas operacionais nas ETEs brasileiras decorrem da inadequada utilização das instalações sanitárias no interior das residências (e também de estabelecimentos comerciais – p. ex.: restaurantes), o que resulta na alteração significativa dos esgotos gerados, em termos quantitativos e qualitativos, como, presença excessiva de água de chuva, de detergente (surfactantes), de óleo de cozinha e de detritos (p. ex.: cabelo, cotonete, absorvente, fio dental, algodão, lenço umedecido, ponta de cigarro, materiais plásticos). Assim, a sensibilização dos usuários dos serviços de esgotamento sanitário passa a ser uma ação essencial. Para tanto, é necessário a criação de espaços dialógicos, onde seja possível apreender o conhecimento, a percepção e as perspectivas da população em relação à importância do saneamento na comunidade, em particular sobre a geração e as soluções de tratamento e destinação que são dadas ao esgoto sanitário. Ademais, nesses espaços, é importante a realização de debates sobre como cada usuário é diretamente responsável pelo processo na sua origem, a partir do que entende como razoável lançar nas peças sanitárias.

#### 3.2 Melhoria no tratamento preliminar

Com o intuito de reduzir a entrada de detritos e de areia nos reatores UASB, é de extrema importância um maior cuidado na definição das unidades do tratamento preliminar, visto que boa parcela desses sólidos poderia deixar de fazer parte da composição do lodo (e de constituir a camada de espuma), se as unidades do tratamento preliminar fossem capazes de reter estes materiais. Dentre as melhorias preconizadas, pode-se mencionar a utilização de grades ultrafinas e de peneiras de pequena abertura (3 a 4 mm). Complementarmente, outra possível melhoria estaria associada à remoção de óleos e graxas a montante dos reatores UASB, no tratamento preliminar. Uma alternativa que vem sendo implantada em algumas ETEs que empregam reatores anaeróbios são os desarenadores aerados (fluxo em espiral), conforme relatado na Parte 2 desta Coletânea de NTs (BRESSANI-RIBEIRO *et al.*, 2018). No entanto, as esparsas experiências brasileiras reportadas na literatura indicam baixa eficiência desses equipamentos associada à remoção de óleos e graxas.

#### 3.3 Cálculo mais preciso da produção de lodo nos reatores UASB

Usualmente, as estimativas da produção de lodo são realizadas a partir da faixa reportada na literatura para o coeficiente de produção de lodo ( $Y_{\text{lodo}}$ ), o qual varia de 0,10 a 0,20 kgST.kgDQO<sup>-1</sup>. Entretanto, essa faixa de valores refere-se apenas à produção de lodo em um reator UASB aplicado exclusivamente ao tratamento de esgoto doméstico. Nos casos em que o reator recebe outros tipos de contribuições (p. ex.: lodo aeróbio produzido na unidade de pós-tratamento, lodo de tanque séptico, lixiviado de aterro sanitário, efluentes não domésticos), o valor de  $Y_{\text{lodo}}$  será obviamente mais elevado. Torna-se, portanto, **imprescindível que o projeto defina o valor de  $Y_{\text{lodo}}$  com a máxima segurança possível**, uma vez que o

mesmo impactará diretamente: i) a produção de lodo do reator; ii) o dimensionamento do sistema de desaguamento; e iii) o estabelecimento das rotinas operacionais de descarte de lodo.

No caso da previsão de recebimento de **lodo de tanque séptico** em reatores UASB, é necessária a avaliação rigorosa dos volumes esperados e da possibilidade de **implementar unidade específica para o recebimento desse tipo de contribuição**, que permita a separação e envio do sobrenadante para o reator, e o lodo adensado para um digestor complementar ou, se estiver bem estabilizado, diretamente para a unidade de desaguamento.

No tocante ao recebimento de **lixiviado de aterro sanitário e de efluentes não domésticos (END)** nos reatores UASB, deve-se atentar para as seguintes questões principais:

- Lixiviados de aterros jovens (usualmente com menos de 5 anos de operação) apresentam concentrações bastante elevadas dos parâmetros demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sulfetos e amônia, de tal sorte que eventuais impactos sobre a estabilidade e o desempenho do reator vão depender intrinsecamente do grau de diluição do lixiviado em relação à vazão de esgoto afluente à ETE. Concentrações mais elevadas de DBO e de DQO na mistura esgoto bruto + lixiviado contribuem diretamente para o aumento da produção de lodo no reator, todavia também possibilitam o incremento da produção de biogás, de interesse nos casos em que se pratica o aproveitamento energético deste subproduto. Por sua vez, concentrações elevadas de sulfetos e amônia na mistura esgoto bruto + lixiviado poderiam, eventualmente, causar toxicidade aos microrganismos anaeróbios, notadamente às arqueias metanogênicas. Para que não haja riscos de toxicidade, é importante verificar (e garantir) que o fator de diluição seja elevado, para que as concentrações de sulfetos e de amônia na mistura esgoto bruto + lixiviado resultem em va-

lores bem abaixo dos níveis considerados tóxicos (CHERNICHARO, 2007).

- Lixiviados de aterros antigos (normalmente com mais de 5 anos de operação) tendem a apresentar elevadas relações DQO/DBO (pouca matéria orgânica biodegradável), de tal sorte que pouco contribuem para o aumento da produção de lodo e de biogás no reator. Ademais, as concentrações de sulfetos, amônia e compostos recalcitrantes são tipicamente elevadas, sendo que eventuais problemas de toxicidade continuam a depender dos fatores de diluição desses constituintes, conforme abordado anteriormente.

- Quanto aos ENDs, a aptidão do reator anaeróbio em tratá-los conjuntamente com o esgoto doméstico depende intrinsecamente do tipo de END em questão. ENDs de natureza essencialmente orgânica e com baixas concentrações de sólidos suspensos (p. ex.: efluentes de cervejarias, fábricas de refrigerantes) usualmente podem ser recebidos sem maiores problemas, devendo o projetista atentar principalmente para os aspectos de maior produção de lodo (mas também de biogás) e de riscos de acidificação do reator, caso a alcalinidade do esgoto não seja suficiente para a neutralização dos ácidos orgânicos formados a partir desses ENDs (que se acidificam muito rapidamente). Para outros tipos de ENDs de natureza orgânica, deve-se proceder análise ainda mais criteriosa, com atenção especial para a presença de elevadas concentrações de sólidos suspensos e de elementos potencialmente tóxicos (p. ex.: sulfetos, amônia, metais pesados). ENDs de natureza inorgânica (p. ex.: galvanoplastia) não devem ser encaminhados para tratamento em ETEs que empregam processos biológicos. Complementarmente, seria desejável que as ETEs dispusessem, minimamente, de sensores para medição *online* de pH junto à chegada do esgoto bruto, a fim de possibilitar a identificação de mudanças bruscas nos valores desse parâmetro. Muito embora ações de remediação sejam difíceis quando da detecção

de valores de pH fora da faixa usual do esgoto (6,5 a 7,5), o registro das medições poderia auxiliar na identificação da origem do problema e na definição das medidas a serem tomadas.

Em relação ao **lodo químico de ETA, este não deve ser encaminhado para reatores UASB**, visto que suas características podem prejudicar o funcionamento e a eficiência do reator. O lodo resultante da limpeza de floculadores e decantadores, apresenta, via de regra, elevado teor de sólidos inorgânicos - 0,5 a 1,0% (notadamente silte e argila) e, se lançado na rede de coleta e transporte de esgoto sanitário, muito provavelmente irá se acumular no fundo dos reatores, reduzindo o volume útil dos mesmos. Ademais, esses sólidos são de difícil remoção pelo sistema de extração de lodo utilizado nos reatores UASB. Caso seja considerada a possibilidade de encaminhamento de lodo químico de ETA para ETEs com reatores UASB, deverá ser realizado estudo técnico criterioso que possibilite atestar que os elementos contidos no lodo químico não ocasionarão a formação de bancos de sedimentos no fundo do reator. Há que se considerar, ainda, eventuais riscos de danos a bombas e outros equipamentos (p. ex.: centrífugas). O recebimento do lodo químico de ETA em ETE também pode gerar impactos na atividade microbiana. Ao avaliar os efeitos do recebimento de lodo de ETA (com utilização de sulfato de alumínio como coagulante) nos de-

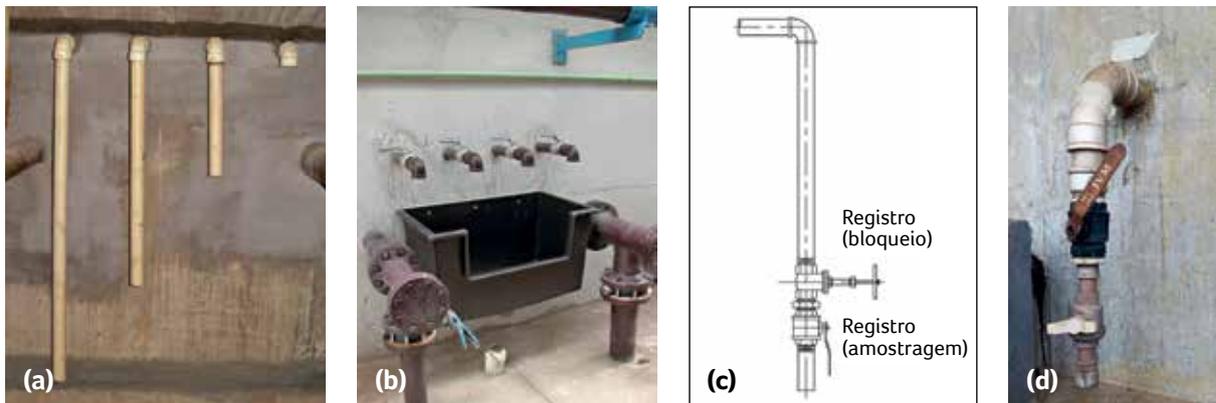
cantadores primários de uma ETE, Scalize (2003) observou, a partir de testes de atividade metanogênica, uma maior produção de metano no frasco controle (que não continha lodo de ETA) e uma decrescente produção de metano à medida que se aumentou a fração de lodo de ETA nos frascos. Ademais, espécies de microrganismos do gênero *Methanothrix* sp foram inibidas, sendo encontradas em maior número no frasco controle e em menor quantidade nos frascos em que foi adicionado lodo de ETA, sendo possível inferir que esse lodo foi tóxico aos microrganismos metanogênicos, podendo prejudicar o processo de digestão anaeróbia.

### 3.4 Previsão de adequado sistema de amostragem de lodo ao longo da altura do reator

Para o estabelecimento das estratégias de descarte (quantidade e frequência) é necessário o monitoramento contínuo do lodo presente no reator, a partir da determinação do perfil e da massa de sólidos (CHERNICHARO, 2007). Para tanto, é essencial que o reator disponha de um sistema de amostragem que permita a adequada identificação da altura e da concentração do lodo no interior do compartimento de digestão, devendo assim apresentar as características principais descritas no Quadro 1 e exemplificadas na Figura 6.

#### Quadro 1 – Principais diretrizes para projeto e construção do sistema de amostragem de lodo

- Previsão de pontos verticais de amostragem de lodo ao longo de toda a altura do compartimento de digestão do reator, distantes no máximo 0,50 m entre si, sendo o primeiro ponto na mesma altura do descarte de fundo (0,20 a 0,30 m) e o último na interface dos compartimentos de digestão e de decantação. Os demais pontos de amostragem devem ser distribuídos equitativamente entre o primeiro e o último ponto de amostragem, sendo o ideal um mínimo de 4 pontos de amostragem (Figura 6a).
- Previsão de caixa de manobra dos registros de amostragem de lodo que possibilite o adequado trabalho do operador, atentando para a necessidade de manuseio dos frascos de coleta e de limpeza das instalações (Figura 6b).
- Os registros deverão ser do tipo esfera, sendo recomendada a utilização de registro metálico seguido de registro de PVC em todos os pontos de amostragem de lodo (Figura 6c e 6d).
- Devem ser previstos conjuntos de pontos verticais de amostragem que possibilitem a caracterização representativa do lodo de todo o volume reacional do compartimento de digestão do reator.
- As tubulações e registros de amostragem devem possuir diâmetro interno útil mínimo de 50 mm.



**Figura 6** – Sistema de amostragem de lodo de reator UASB: a) vista interna dos pontos verticais de amostragem no interior do compartimento de digestão, espaçados em 50 cm; b) vista externa dos pontos de amostragem e da caixa de manobra dos registros; c) e d) detalhe do registro metálico seguido de registro de PVC.

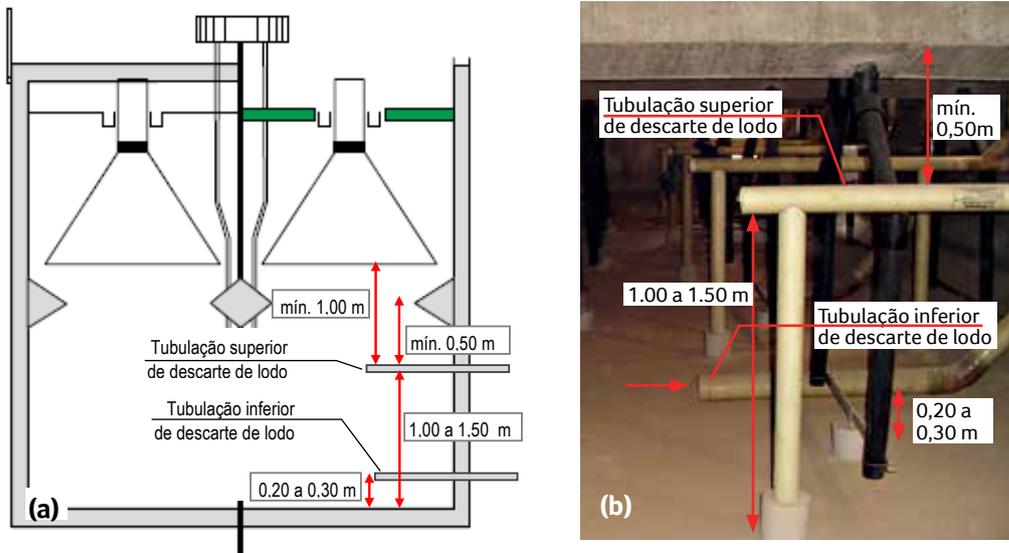
### 3.5 Previsão de adequado sistema de descarte de lodo dos reatores

De forma a propiciar maior flexibilidade operacional, recomenda-se a previsão de conjuntos de tubulações de descarte de lodo em duas profundidades diferentes no interior do compartimento de digestão do reator: um conjunto inferior, localizado entre 0,20 e 0,30 m acima do fundo do reator; e um conjunto superior, localizado entre 1,00 e 1,50 m acima do fundo do reator. O **conjunto inferior** de tubulações permite o descarte do lodo mais concentrado, que apresenta melhores condições de sedimentabilidade, enquanto o **conjunto superior** permite a retirada do lodo menos concentrado, com piores condições de sedimentabilidade (Figura 7). Essa configuração de sistema de descarte (superior e inferior) busca possibilitar que seja feita a **remoção programada do**

**lodo de pior qualidade** (superior, menos concentrado) e a **preservação do lodo de melhor qualidade** (inferior, mais concentrado), de modo a proporcionar: i) a obtenção de uma maior idade do lodo e, conseqüentemente, o descarte de um lodo mais estabilizado; ii) a manutenção de leito de lodo denso junto ao fundo do reator, que possa atuar como um "filtro" que auxilie na retenção de sólidos suspensos por tempo suficiente para que possam ser hidrolisados; e iii) menor perda de sólidos para o compartimento de decantação, refletindo diretamente na melhoria da qualidade do efluente do reator. Ademais, a parcela de lodo descartada pelo fundo possibilita a remoção parcial de sólidos inertes (areia) que adentraram ao reator. O sistema de descarte de lodo deve apresentar as características principais descritas no Quadro 2 e exemplificadas na Figura 7.

#### Quadro 2 – Principais diretrizes para projeto e construção do sistema de descarte de lodo

- Previsão de conjuntos de tubulações de descarte de lodo em duas diferentes alturas do compartimento de digestão do reator: tubulações inferiores localizadas entre 0,20 e 0,30 m do fundo; e tubulações superiores localizadas entre 1,00 e 1,50 m do fundo. Atentar que as tubulações superiores de descarte de lodo devem ficar posicionadas a pelo menos 0,50 m abaixo do defletor de gases, de modo a possibilitar a remoção efetiva do lodo menos concentrado (Figura 7a e 7b). De acordo com a NBR 12.209, a tubulação superior de descarte de lodo deve ser posicionada a pelo menos 1,00 m abaixo da entrada do compartimento de decantação (ABNT, 2011) (Figura 7a).
- Previsão de uma tubulação de descarte de lodo de fundo para cada 20 a 30 m<sup>2</sup> de área de reator. Para o descarte de lodo superior, menos concentrado, podem ser utilizadas áreas de influência mais elevadas (30 a 50 m<sup>2</sup>), ou avaliada a possibilidade de utilização de uma única tubulação, de grande diâmetro, interligada a ramais coletores, de 100 ou 150 mm. A tubulação de grande diâmetro deve ser dimensionada com vistas a se alcançar perda de carga próxima à zero, considerando a vazão total decorrente do somatório dos ramais coletores a ela interligados.
- As tubulações e válvulas de descarte do lodo inferior devem possuir diâmetro interno útil mínimo de 150 mm. Para as tubulações e válvulas de descarte do lodo superior pode ser adotado o diâmetro interno de 100 mm. As válvulas de manobra devem ser, preferencialmente, do tipo faca.



**Figura 7** – Sistema de descarte de lodo do reator UASB: a) representação esquemática do posicionamento das tubulações inferiores e superiores de descarte de lodo; b) vista interna das tubulações inferiores e superiores de descarte de lodo.

### 3.6 Definição das massas de lodo a serem mantidas e a serem descartadas do reator

A fim de se evitar a perda indesejada de sólidos junto ao efluente final, deve-se manter a massa de lodo no interior do reator **entre um valor mínimo**, correspondente à biomassa suficiente para digerir a carga orgânica afluenta, **e um valor máximo**, dependente da capacidade de retenção de lodo no reator UASB. O cálculo da massa mínima é reali-

zado a partir da carga orgânica aplicada ao reator e da atividade metanogênica específica (AME) do lodo anaeróbio, conforme exemplificado a seguir. A AME pode ser definida como a capacidade máxima de produção de metano por um consórcio de microrganismos anaeróbios, realizada em condições controladas de laboratório, para viabilizar a atividade bioquímica máxima de conversão de substratos orgânicos a metano (CHERNICHARO, 2007).

**Exemplo 1:** Calcular a massa mínima a ser mantida em um reator tratando esgoto doméstico, considerando os seguintes dados de projeto:

- População contribuinte:  $P = 10.000 \text{ hab.}$
- Contribuição *per capita* de DQO:  $QPC_{DQO} = 0,10 \text{ kgDQO.hab}^{-1}.d^{-1}$
- Eficiência de remoção de DQO:  $E_{DQO} = 70\%$
- Atividade metanogênica específica do lodo:  $AME = 0,20 \text{ kgDQO}_{CH_4}.kgSTV^{-1}.d^{-1}$  (valor típico entre 0,10 e 0,20  $\text{kgDQO}_{CH_4}.kgSTV^{-1}.d^{-1}$ )

Solução:

1) Carga orgânica aplicada ( $CO_{apl}$ ):

$$CO_{apl} = P \times QPC_{DQO} \quad CO_{apl} = 10.000 \text{ hab} \times 0,10 \text{ kgDQO.hab}^{-1}.d^{-1} = 1.000 \text{ kgDQO}.d^{-1}$$

2) Carga orgânica removida ( $CO_{remov}$ ):

$$CO_{remov} = CO_{apl} \times E_{DQO} \quad CO_{remov} = 1.000 \text{ kgDQO}.d^{-1} \times 70\% = 700 \text{ kgDQO}.d^{-1}$$

3) Massa mínima ( $M_{min}$ ):

$$M_{min} = \frac{CO_{remov}}{AME} \quad M_{min} = \frac{700 \text{ kgDQO}.d^{-1}}{0,20 \text{ kgDQO}_{CH_4}.kgSTV^{-1}.d^{-1}} = 3.500 \text{ kgSTV}$$

Já para se definir a massa máxima de lodo que o reator consegue armazenar, sem que ocorra passagem de lodo para o compartimento de decantação e perda excessiva de sólidos no efluente, devem ser observados os resultados de monitoramento de sólidos suspensos e sólidos sedimentáveis no efluente do reator, bem como de concentrações de sólidos totais (ST) ao longo de toda a altura do compartimento de digestão (perfil de lodo), buscando-se inferir a partir de qual massa de lodo no interior do reator inicia-se maior perda de sólidos e deterioração da qualidade do efluente. Outra possibilidade, quando não se possui uma série histórica de dados que permita a definição da massa máxima, refere-se à manutenção da concentração de ST do lodo amostrado no ponto mais elevado do compartimento de digestão, localizado imediatamente antes do defletor de gases, **sempre abaixo de 0,5%.**

### 3.7 Definição da estratégia de descarte

A partir da estimativa da produção de lodo no reator e da massa de lodo a ser descartada, calcula-se o volume de lodo a descartar de acordo com a estratégia de descarte adotada. Uma estratégia que vem sendo recomendada é a de se **descartar pelo**

**menos 50% da massa de lodo excedente a partir da tubulação superior** (1,00 a 1,50 m acima do fundo). Para compensar os maiores volumes de descarte resultantes dessa prática, deve-se prever, nos novos projetos, um **poço de adensamento e homogeneização de lodo** antes da unidade de desaguamento. O adensamento parcial do lodo possibilita que o sobrenadante seja retornado para o reator UASB, e que a fração mais concentrada seja adequadamente homogeneizada para se atingir a faixa ideal de teor de ST exigida pelo equipamento de desaguamento mecanizado. O descarte de lodo superior favorece ainda a manutenção de baixíssimas concentrações de ST na interface dos compartimentos de digestão e decantação, a qual deve permanecer sempre abaixo de 0,5% ST, conforme comentado anteriormente.

É recomendável a retirada pré-programada e continuada do lodo excedente para que o reator opere ciclicamente da forma mais estável possível. Os exemplos seguintes ilustram os cálculos das capacidades necessárias de sistemas de desaguamento natural e mecanizado para processamento do lodo descartado, em função da produção de lodo no reator anaeróbico e da estratégia de descarte adotada.

**Exemplo 2:** Dimensionar o sistema de desaguamento natural de lodo de reatores UASB, considerando os seguintes dados de projeto:

- População contribuinte:  $P = 10.000$  hab.
- Carga orgânica aplicada:  $CO_{apl} = 1.000$  kgDQO.d<sup>-1</sup>
- Coeficiente de produção de lodo no reator UASB (0,10 a 0,20 kgST.kgDQO<sup>-1</sup>):  $Y_{lodo} = 0,20$  kgST.kgDQO<sup>-1</sup>
- Massa específica do lodo (usualmente da ordem 1.020 a 1.040 kgST.m<sup>-3</sup>):  $\gamma = 1.020$  kgST.m<sup>-3</sup>

Observação: Os exemplos 2 e 3 contemplam apenas o coeficiente de produção de lodo no reator UASB. Caso a ETE receba outros tipos de contribuições (p. ex.: lodo aeróbico produzido na unidade de pós-tratamento, lodo de tanque séptico, lixiviado de aterro sanitário, efluentes não domésticos etc.) e/ou seja adotado o envio de lodo aeróbico da unidade de pós-tratamento (p. ex.: FBP, lodos ativados), para adensamento e estabilização nos reatores UASB, deve ser computado no cálculo do sistema de desaguamento o aumento no valor do coeficiente de produção de lodo devido a essas contribuições.

Solução:

1) Produção diária de lodo no reator ( $P_{lodo}$ )

$$P_{lodo} = Y_{lodo} \times CO_{apl} \quad P_{lodo} = 0,20 \text{ kgST.kgDQO}^{-1} \times 1.000 \text{ kgDQO.d}^{-1} = 200 \text{ kgST.d}^{-1}$$

2) Estabelecimento da rotina de descarte de lodo e tempo de ciclo dos leitos de secagem

Considerando:

- Frequência de descarte -  $f_d$ : 7 dias
- Tempo de ciclo dos leitos de secagem -  $t_c$ : 21 dias
- O tempo de ciclo dos leitos de secagem deve ser definido em função das condições climáticas do local e aspectos operacionais de cada ETE.

3) Volumes de lodo a descartar de cada ponto (superior e inferior)

Considerando:

- Concentração esperada para o lodo superior e inferior:

- Lodo superior:  $C_{\text{lodo-sup.}} = 2\%$  (20.000 mgST.L<sup>-1</sup>)

- Lodo inferior:  $C_{\text{lodo-inf.}} = 5\%$  (50.000 mgST.L<sup>-1</sup>)

- Percentuais de descarte de lodo superior e inferior:

- Lodo superior: 50% em massa

- Lodo inferior: 50% em massa

$$V_{\text{lodo}} = \frac{P_{\text{lodo}} \times f_d}{\gamma \times C_{\text{lodo}}}$$

$$V_{\text{lodo-sup.}} = \frac{200 \text{ kgST} \cdot d^{-1} \times 7 d \times 50\%}{1.020 \text{ kgST} \cdot m^{-3} \times 2\%} = 34 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{lodo-inf.}} = \frac{200 \text{ kgST} \cdot d^{-1} \times 7 d \times 50\%}{1.020 \text{ kgST} \cdot m^{-3} \times 5\%} = 14 \text{ m}^3$$

4) Massa de lodo excedente descartada dos reatores ( $M_{\text{lodo}}$ )

$$M_{\text{lodo}} = P_{\text{lodo}} \times f_d$$

$$M_{\text{lodo}} = 200 \text{ kgST} \cdot d^{-1} \times 7 d = 1.400 \text{ kgST}$$

5) Volume de lodo excedente descartada dos reatores ( $V_{\text{lodo}}$ )

$$V_{\text{lodo}} = V_{\text{lodo-sup.}} + V_{\text{lodo-inf.}}$$

$$V_{\text{lodo}} = 34 \text{ m}^3 + 14 \text{ m}^3 = 48 \text{ m}^3$$

6) Dimensionamento dos leitos de secagem

- Altura da lâmina de lodo no leito de secagem ( $H_{\text{leito}}$ )

- Adotou-se  $H_{\text{leito}} = 0,35 \text{ m}$ .

- A altura da lâmina de lodo no leito de secagem não deve exceder a 0,40 m.

- Área necessária para cada leito de secagem ( $A_{\text{leito}}$ )

$$A_{\text{leito}} = \frac{V_{\text{lodo}}}{H_{\text{leito}}}$$

$$A_{\text{leito}} = \frac{48 \text{ m}^3}{0,35 \text{ m}} = 137 \text{ m}^2$$

- Número de unidades e geometria dos leitos de secagem

- Considerando a realização de descartes semanais e tempo de ciclo dos leitos de secagem de 21 dias, adotaram-se 4 células de 10,0 m x 14,0 m.

- Taxa de aplicação de sólidos resultante em cada leito de secagem ( $T_{x-ST}$ )

$$T_{x-ST} = \frac{M_{\text{lodo}}}{A_{\text{leito}}}$$

$$T_{x-ST} = \frac{1.400 \text{ kgST}}{140 \text{ m}^2} = 10 \text{ kgST} \cdot m^{-2}$$

- De acordo com a NBR 12.209, a descarga de lodo nos leitos de secagem não pode exceder a carga de sólidos em suspensão totais de 15 kgST.m<sup>-2</sup> de área de secagem, em cada ciclo de operação (ABNT, 2011).

Na Figura 8 é apresentado um desenho esquemático mostrando a rotina de descarte de lodo e de limpeza dos leitos de secagem (LS).

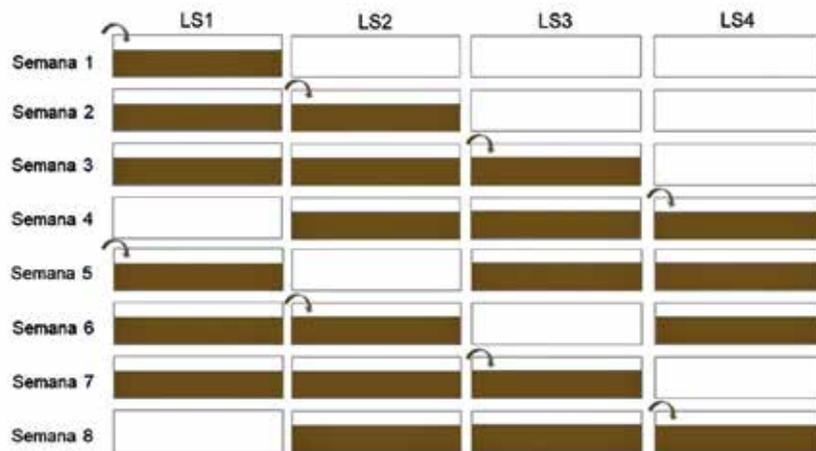


Figura 8 – Ilustração esquemática da rotina de descarte de lodo e limpeza dos leitos de secagem do Exemplo 2.

**Exemplo 3:** Dimensionar o sistema de desaguamento mecanizado de lodo de reatores UASB, considerando os seguintes dados de projeto:

- População contribuinte:  $P = 100.000$  hab.
- Carga orgânica aplicada:  $CO_{apl} = 10.000 \text{ kgDQO} \cdot \text{d}^{-1}$
- Coeficiente de produção de lodo no reator UASB ( $0,10$  a  $0,20 \text{ kgST} \cdot \text{kgDQO}^{-1}$ ):  $Y_{\text{lodo}} = 0,20 \text{ kgST} \cdot \text{kgDQO}^{-1}$
- Massa específica do lodo (usualmente da ordem  $1.020$  a  $1.040 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3}$ ):  $\gamma = 1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3}$

Solução:

1) Cálculo da produção diária de lodo ( $P_{\text{lodo}}$ )

$$P_{\text{lodo}} = Y_{\text{lodo}} \times CO_{apl} \qquad P_{\text{lodo}} = 0,20 \text{ kgST} \cdot \text{kgDQO}^{-1} \times 10.000 \text{ kgDQO} \cdot \text{d}^{-1} = 2.000 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1}$$

2) Cálculo dos volumes diários de lodo a descartar de cada ponto (superior e inferior)

• Concentração esperada para o lodo superior e inferior:

- Lodo superior:  $C_{\text{lodo-sup.}} = 2\%$  ( $20.000 \text{ mgST} \cdot \text{L}^{-1}$ )

- Lodo inferior:  $C_{\text{lodo-inf.}} = 5\%$  ( $50.000 \text{ mgST} \cdot \text{L}^{-1}$ )

• Percentuais de descarte de lodo superior e inferior:

- Lodo superior: 50% em massa

- Lodo inferior: 50% em massa

$$V_{\text{lodo}} = \frac{P_{\text{lodo}}}{\gamma \times C_{\text{lodo}}} \qquad V_{\text{lodo-sup.}} = \frac{2.000 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1} \times 50\%}{1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3} \times 2\%} = 49,0 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$$

$$V_{\text{lodo-inf.}} = \frac{2.000 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1} \times 50\%}{1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3} \times 5\%} = 19,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$$

3) Volume diário de lodo a ser descartado ( $V_{\text{lodo}}$ )

$$V_{\text{lodo}} = V_{\text{lodo-sup.}} + V_{\text{lodo-inf.}} \qquad V_{\text{lodo}} = 49,0 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} + 19,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} = 68,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$$

4) Concentração média do lodo enviado para o sistema de desaguamento mecanizado ( $C_{\text{lodo-média}}$ )

$$C_{\text{lodo-média}} = \frac{C_{\text{lodo-sup.}} \times V_{\text{lodo-sup.}} + C_{\text{lodo-inf.}} \times V_{\text{lodo-inf.}}}{V_{\text{lodo}}}$$

$$C_{\text{lodo-média}} = \frac{2\% \times 49,0 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} + 5\% \times 19,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}}{68,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}} = 2,8\%$$

5) Carga de sólidos a ser processada diariamente pelo sistema de desaguamento mecanizado

$$CS = V_{\text{lodo}} \times \gamma \times C_{\text{lodo-média}} \quad CS = 68,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \times 1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3} \times 2,8\% = 1.959,2 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1}$$

6) Dimensionamento do sistema de desaguamento mecanizado de lodo com a utilização de centrífuga

• Definição do número de centrífugas

- Considerou-se: 1 unidade em operação + 1 rodízio e reserva.

- Ressalta-se que o número de unidades em operação e reserva é função do porte da estação e da quantidade de lodo gerado, bem como da estrutura de manutenção a ser implantada e da disponibilidade de rotas alternativas de disposição do lodo.

• Definição da rotina operacional

- Considerou-se: 5 dias por semana e 8 horas diárias de funcionamento.

• Cálculo da capacidade da centrífuga necessária para o processamento do lodo excedente ( $C_c$ ):

$$C_{c-volume} = \frac{V_{\text{lodo}} \times 7d}{5d} \quad C_{c-volume} = \frac{68,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \times 7d}{5d} = 96,0 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$$

$$C_{c-massa} = \frac{CS \times 7d}{5d} \quad C_{c-massa} = \frac{1.959,2 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1} \times 7d}{5d} = 2.742,9 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1}$$

- O sistema de desaguamento deve ser capaz de processar diariamente 96,0 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> ou 2.742,9 kgST.d<sup>-1</sup>, a fim de compensar o não processamento de lodo aos finais de semana.

- Considerando 8 horas diárias de funcionamento, a centrífuga deve ter capacidade para processar 12 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> ou 342,9 kgST.h<sup>-1</sup>.

- Importante ressaltar que o volume (e a massa) total de lodo a ser processado diariamente deverá ser dividido pelo número de reatores que integram a ETE, de modo a manter a massa de lodo em cada reator sempre acima da mínima recomendada (ver Exemplo 1). Ademais, o volume a ser descartado de cada reator deve ser dividido pelo número de válvulas superiores e inferiores, sendo efetuado primeiro o descarte da linha de lodo superior e depois da linha de lodo inferior.

- Para facilitar e agilizar a operação de descarte do lodo, uma alternativa é a realização do descarte do lodo de apenas alguns reatores por dia, em esquema de rodízio entre todos os reatores da ETE, desde que a massa de lodo em cada reator seja mantida sempre acima da mínima recomendada.

• Seleção do equipamento

- Para a seleção do equipamento disponível comercialmente, as seguintes informações devem ser enviadas para os fornecedores: (i) vazão de esgoto afluyente à ETE; (ii) volume e carga de sólidos a serem processados por dia; (iii) concentrações de sólidos do lodo a ser processado; e (iv) dados sobre a rotina operacional (número de horas de funcionamento por semana).

### 3.8 Definição das características dos sistemas de desaguamento

Para o dimensionamento do sistema de desaguamento de lodo, seja ele natural ou mecanizado, além da estimativa da produção de lodo levando em conta todas as possíveis contribuições que possam impactar o coeficiente de produção de lodo ( $Y_{\text{lodo}}$ ), é de fundamental importância considerar as especificidades de cada local, as condições climáticas, as condições operacionais, bem como questões logísticas e administrativas. Ademais, **é essencial considerar a possibilidade do descarte de lodo a duas alturas**, conforme exemplificado anteriormente, o que culmina em um maior volume de lodo de descarte. Ressalta-se que essa desvantagem pode ser minimizada com a previsão de poço para adensamento e homogeneização do lodo, como comentado anteriormente.

#### 3.8.1 Desaguamento natural

Em ETEs com desaguamento natural em leitos de secagem, os descartes devem ser realizados em bateladas, sendo a frequência compatível com a capacidade de retenção e armazenamento de lodo nos reatores, o tempo médio de secagem (de acordo com as condições climáticas do local) e o contrato com o prestador de serviço referente à remoção e transporte do lodo desaguado.

Em relação ao dimensionamento dos leitos de secagem, deve-se atentar para a necessidade de modulação (em quantidade e dimensões), a qual deve estar muito bem associada ao planejamento (frequência e volume) de descarte de lodo e de limpeza dos leitos de secagem, de modo a se evitar a realização de descarte sobre descarte, ou seja, carga de lodo sobre carga de lodo, o que pode acelerar a colmatação dessas unidades.

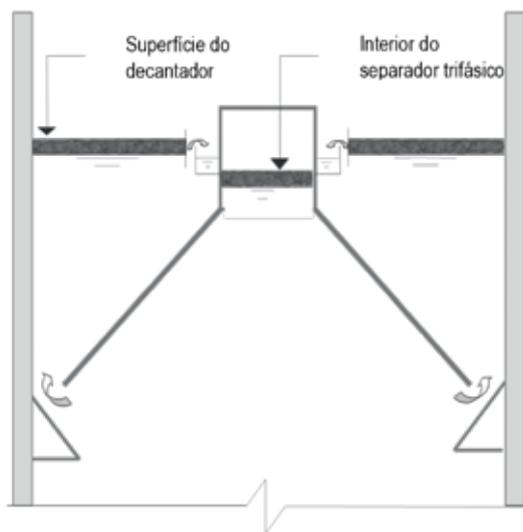
#### 3.8.2 Desaguamento mecanizado

Já em ETEs onde se utilizam processos de desaguamento mecanizado, o descarte de lodo deve ser realizado diariamente e a magnitude dos descartes deve corresponder à produção diária de lodo considerando todos os reatores. Entretanto, essa rotina operacional deve ser adotada apenas quando a massa de lodo nos reatores estiver abaixo do valor máximo adotado ou a concentração de ST no ponto de amostragem superior for inferior a 0,5%. Em situações de excesso de lodo nos reatores UASB, as operações de descarte e de funcionamento do sistema de desaguamento mecanizado devem ser intensificadas.

A definição da rotina operacional de descarte de lodo deve ser compatível com os seguintes aspectos principais: i) a escala dos operadores; ii) os contratos de prestadores de serviços referentes ao transporte do lodo desaguado e à realização de manutenções preventivas e corretivas; iii) a possibilidade de paralisações; iv) a disponibilidade de produtos químicos e peças de reposição. Adicionalmente, deve-se avaliar a possibilidade de redundância dos equipamentos críticos e/ou a previsão de leitos de secagem (em casos específicos até mesmo a redundância), como alternativa em caso de paralisações e/ou manutenções dos equipamentos do sistema de desaguamento, evitando assim situações de passivo de lodo no interior dos reatores, o que pode acarretar na perda de sólidos junto ao efluente.

## 4 ORIGEM E PROBLEMAS RELACIONADOS À ACUMULAÇÃO DE ESCUMA

Em reatores UASB, a formação de espuma pode ocorrer em dois locais distintos: i) na superfície do compartimento de decantação; ii) no interior do separador trifásico (STF), na interface de liberação dos gases formados durante a digestão anaeróbia (Figura 9).



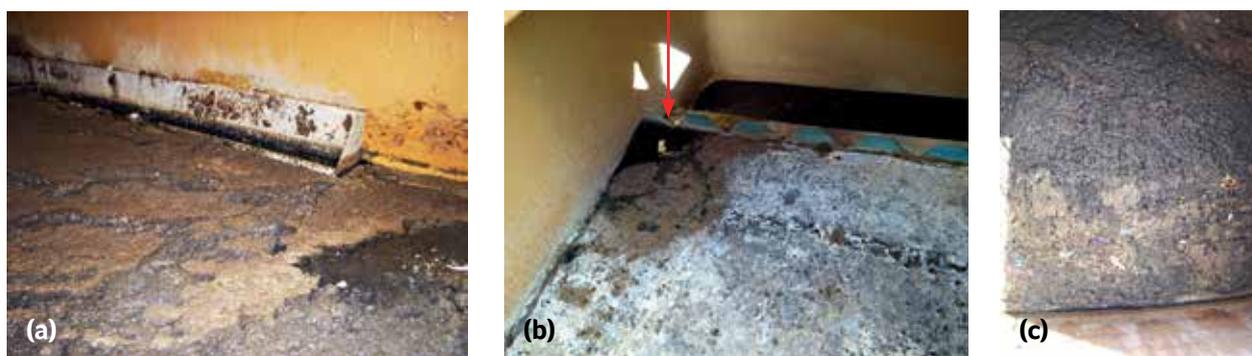
**Figura 9** – Identificação dos pontos de acumulação de espuma em reatores UASB.  
 Fonte: Chernicharo (2007)

#### 4.1 Espuma acumulada na superfície do compartimento de decantação

A espuma acumulada na superfície dos compartimentos de decantação dos reatores UASB, embora se caracterize como um resíduo muito concentrado, apresenta coeficientes de acumulação relativamente baixos, sendo possível projetar os compartimentos de decantação sem retentores de espuma,

a fim de possibilitar que esse material seja descarregado junto com o efluente, sem acarretar na deterioração significativa da sua qualidade. Entretanto, é essencial **garantir o adequado nivelamento e fixação das calhas coletoras de efluente e a vedação na instalação dos vertedores**, de forma a evitar fluxos preferenciais e o acúmulo de espuma na parte superior dos compartimentos de decantação, conforme mostrado nas Figuras 10a e 10b.

É importante salientar que a taxa de acumulação de espuma nos compartimentos de decantação depende também do adequado gerenciamento do lodo excedente. A ausência ou o descarte do lodo excedente com uma frequência não compatível com a produção de lodo no sistema pode acarretar em uma maior perda de sólidos para o compartimento de decantação. Uma vez no decantador, esse lodo se agrega à camada de espuma e passa a conferir o aspecto de "lodo flotado" juntamente com a espuma (Figura 10c). Essa situação tende a se agravar quando o reator opera com sobrecarga hidráulica e velocidades ascensionais mais elevadas que as previstas em projeto. Se não gerenciado adequadamente, o acúmulo excessivo de espuma no compartimento de decantação pode contribuir para a deterioração da qualidade do efluente final.



**Figura 10** – Acúmulo de espuma no compartimento de decantação devido à: (a) calhas coletoras de efluentes desniveladas; (b) falta de vedação na instalação dos vertedores (o efluente passa entre a placa vertedora em fibra de vidro e a calha coletora em concreto); (c) falta de descarte de lodo e sobrecarga hidráulica no reator.

## 4.2 Escuma acumulada no interior do separador trifásico

A ausência ou ineficiência dos dispositivos de remoção da escuma acumulada no interior do separador trifásico, associada a condições precárias de acesso, falta de condições de segurança ocupacional e não existência de protocolo sistematizado para a remoção desse material, pode levar ao espessamento e solidificação da camada de escuma (Figura 11a).

Essa camada de escuma pode impedir a passagem natural do biogás gerado no reator, podendo ocasionar sua passagem para o compartimento de decantação, comprometendo a retenção de sólidos e levando à deterioração da qualidade do efluente (LETTINGA e HULSHOFF, 1991; SOUZA *et al.*, 2006). Em alguns casos, o impedimento da passagem natural do biogás acarreta no seu acúmulo e no aumento da pressão sob a camada

espessa de escuma, resultando na geração de **esforços estruturais elevados nas paredes do separador trifásico**. A depender da magnitude desses esforços e da qualidade estrutural das paredes do separador trifásico, podem ocorrer danos de desnivelamento, de torção e até mesmo de ruptura desta estrutura (Figuras 11b e 11c). Ademais, o rompimento abrupto da camada de escuma pelo biogás sob pressão excessiva pode provocar a movimentação de placas solidificadas de escuma e a torção das paredes do separador trifásico (RAMOS, 2008; MIKI, 2010; van LIER *et al.*, 2011). A propensão à ruptura do separador trifásico encontra-se fortemente associada ao tipo de material empregado nessas estruturas, notadamente, quando são confeccionados com materiais de menor resistência, a exemplo de lonas plásticas, chapas e telhas de amianto, e até mesmo de fibra de vidro de qualidade inferior.



**Figura 11** – (a) Escuma solidificada no interior do separador trifásico; (b e c) Rompimento de separador trifásico.

A passagem do biogás para o compartimento de decantação também tem impacto direto no aumento dos níveis de emissão de gases odorantes e de efeito estufa. Adicionalmente, acarreta a redução da recuperação de biogás para fins de queima e/ou de aproveitamento energético.

Valem aqui as mesmas considerações feitas anteriormente acerca do "lodo flotado" que se agrega à camada de escuma do compartimento de decantação, em

decorrência do excesso de lodo no compartimento de digestão e de sobrecargas hidráulicas no reator.

Ademais, são válidas também as preocupações acerca dos detritos (lixo) não retidos no tratamento preliminar e que adentram ao reator. Uma parcela significativa dos detritos mais leves irá flotar e se agregar à camada de escuma no interior do separador trifásico ou na superfície do compartimento de decantação.

## 5 POSSÍVEIS APRIMORAMENTOS RELACIONADOS AO GERENCIAMENTO DA ESCUMA

A adoção das medidas descritas a seguir pode contribuir significativamente para o melhor gerenciamento da espuma. Ressalta-se que as medidas de sensibilização do usuário e melhoria do tratamento preliminar também são fundamentais para esse gerenciamento, uma vez que grande parte dos detritos pode vir a constituir a camada de espuma. Ademais, as medidas descritas para o gerenciamento do lodo impactam a formação e acumulação de espuma nos reatores UASB, logo devem ser tomadas em conjunto com as medidas descritas a seguir.

### 5.1 Controle sobre o recebimento de efluentes não domésticos

Alguns tipos de efluentes não domésticos, tais como lodo de tanques sépticos e de efluentes

industriais com elevado teor de óleos e graxas (p. ex.: laticínios, abatedouros, frigoríficos), podem contribuir para o incremento da formação e acumulação de espuma nos reatores UASB e, conseqüentemente, agravar os problemas mencionados anteriormente. Recomenda-se, portanto, rigoroso controle no recebimento destas e de outras contribuições que possam colaborar para o agravamento da formação de espuma nos reatores UASB.

### 5.2 Melhor controle sobre a formação de espuma no compartimento de decantação

Para se alcançar um melhor controle sobre a formação de espuma na superfície do compartimento de decantação, devem ser consideradas as diretrizes apresentadas no Quadro 3.

**Quadro 3** – Principais diretrizes para projeto, construção e operação relacionadas ao controle da formação de espuma no compartimento de decantação.

- Melhoria do projeto, da confecção e da instalação das calhas coletoras de efluente (garantia de lâmina vertedora mínima de 15 mm e fixação adequada que garanta nivelamento e resistência à torção).
- Correto dimensionamento da estrutura de extravasão de esgoto e/ou da estação elevatória de alimentação dos reatores, de modo a se evitar sobrecargas hidráulicas e velocidades excessivas nos compartimentos de digestão e de decantação do reator.
- Correto gerenciamento do lodo, de modo a evitar passagem excessiva e "flotação" de lodo no compartimento de decantação.

### 5.3 Utilização de separadores trifásicos equipados com dispositivo de remoção de espuma

Na evolução das alternativas de aprimoramento de reatores UASB, os projetos mais recentes têm incorporado canaletas de coleta de espuma no interior do separador trifásico (Figura 12), de forma a possibilitar a remoção hidrostática. Alguns projetos incorporam, adicionalmente, aspersores

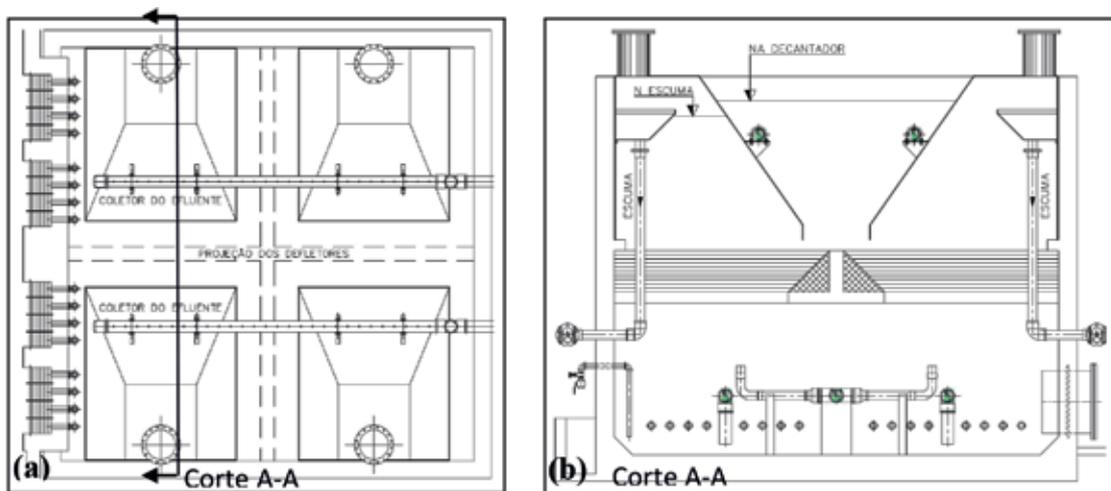
com jatos pressurizados de água com o intuito de auxiliar no carreamento da espuma para dentro das canaletas de coleta. Não se tem certeza da real necessidade desses aspersores, tendo em vista que a espuma removida com maior frequência (2 a 3 vezes por semana) é bastante fluída e não necessita de jatos de água para a sua remoção efetiva (ROSA *et al.*, 2012; SANTOS, 2014; DÍAZ FLÓREZ, 2016).



**Figura 12** – Separadores trifásicos com canaleta interna de coleta de espuma: a) STF confeccionado em concreto e lona, com canaleta em alumínio; b) STF confeccionado em concreto, com canaleta em PRFV; e c) STF confeccionado em PRFV, com canaleta em PRFV.

Uma alternativa à utilização de separadores trifásicos contínuos (tronco-piramidais retangulares - ver Figura 16), equipados com canaletas longas, é a utilização de separadores trifásicos

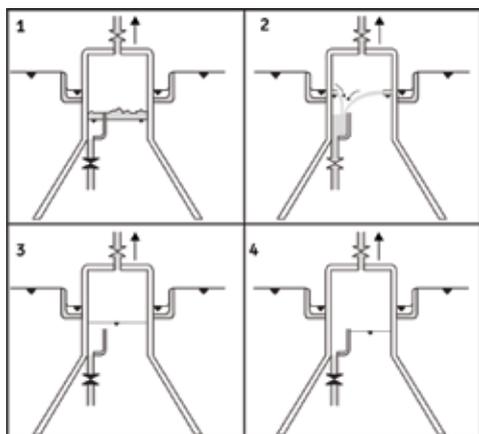
menores, tronco-piramidais quadrangulares, equipados com coletores de espuma na forma de bojo (cuba) em sua parte interna, conforme mostrado na Figura 13.



**Figura 13** – Separador trifásico tronco-piramidal quadrangular equipado com coletor interno de espuma. a) vista em planta; b) corte transversal.

O procedimento de remoção hidrostática baseia-se na alteração do nível d'água no interior do separador trifásico, de modo a possibilitar que a espuma verta para a canaleta, interna ao separador, e seja encaminhada para a tubulação de descarte, externa ao reator. A alteração do nível d'água no interior

do separador trifásico é alcançada pelo incremento ou redução da pressão na linha de gás compreendida entre o separador trifásico e o selo hidráulico localizado no topo de cada reator UASB. Na Figura 14 está ilustrada a representação esquemática do sistema para remoção hidrostática da espuma.



**Figura 14** – Representação esquemática do sistema para remoção hidrostática da espuma.

#### Sequência de procedimentos

1. Níveis de espuma durante a operação normal do reator (linha de gás pressurizada, de modo a manter o nível de espuma 2 a 3 cm abaixo da borda superior da canaleta interna).
2. Elevação do nível de espuma, conseguido com o alívio da pressão da linha de gás, de forma a possibilitar a entrada de espuma na canaleta interna.
3. Fechamento da válvula de esgotamento da canaleta interna.
4. Aumento da pressão da linha de gás, retornando à condição operacional mostrada em 1.

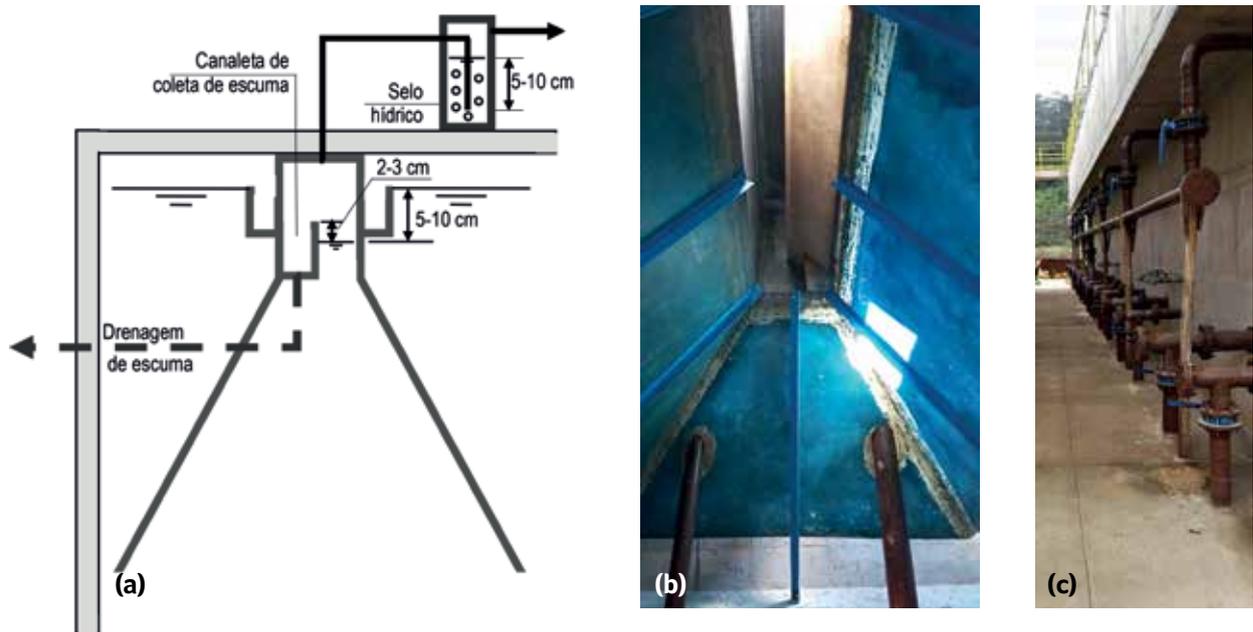
Esse dispositivo para remoção hidrostática foi testado com bons resultados em reatores UASB em escalas de demonstração e plena, tendo sido observadas eficiências de remoção entre 75% e 90% (ROSA *et al.*, 2012; SANTOS, 2014; DÍAZ FLÓREZ, 2016).

Ressalta-se que tal dispositivo só funciona adequadamente para a remoção de espuma no seu estado fluido (não excessivamente adensada e solidificada).

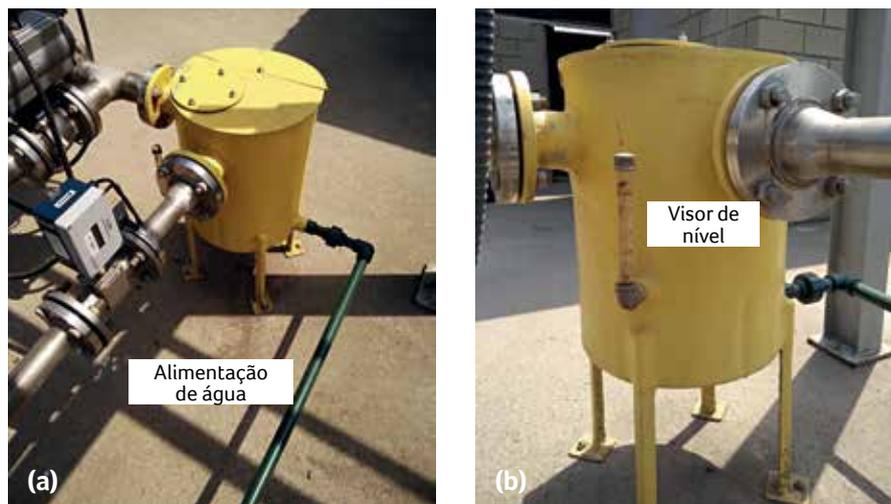
No Quadro 4 são apresentadas as principais diretrizes a serem consideradas no projeto, construção e operação do dispositivo de remoção de espuma.

#### Quadro 4 – Diretrizes para projeto, construção e operação do dispositivo de remoção de espuma.

- A quantidade de espuma acumulada no interior do separador trifásico deve ser verificada para cada condição específica, considerando a qualidade do esgoto bruto, a eficiência do tratamento preliminar e as características construtivas do reator, quando do início de operação do dispositivo de remoção de espuma.
- O separador trifásico deve ser integrado ao selo hidráulico para permitir o controle das pressões internas e, conseqüentemente, o ajuste dos níveis d'água em relação à canaleta de coleta de espuma (Figuras 15a e 16).
- As canaletas de coleta de espuma devem ser preferencialmente posicionadas junto a uma das paredes do separador trifásico e não junto ao centro. O posicionamento da canaleta junto a uma das laterais possibilita maior lâmina vertente e maior eficiência na remoção de espuma. Na Figura 15b é mostrada uma canaleta em seção triangular.
- Correto posicionamento da canaleta de coleta de espuma quando da construção, tendo em vista que a instalação em níveis diferentes dos especificados em projeto podem inviabilizar a adequada pressurização e o funcionamento do dispositivo.
- Prever pontos de inspeção e válvulas nas tubulações de saída de espuma de cada separador trifásico, visando à identificação de pontos de entupimento e a não ocorrência de perda de carga hidráulica desigual, observada quando da instalação de apenas uma válvula (Figura 15c).
- Prever bocais de extração ao longo do comprimento da canaleta de coleta de espuma, a fim de permitir condições hidráulicas mais adequadas para o escoamento da espuma (Figura 17).
- Com base nas experiências relacionadas ao desenvolvimento do separador trifásico modular Étsus-1000, para a configuração de múltiplos bocais de extração, uma largura de 15 cm para a canaleta de coleta de espuma é suficiente para garantir vazões adequadas de escoamento e, também, adequadas taxas de liberação de biogás (taxa de liberação mínima:  $1,0 \text{ m}^3 \text{ biogás} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) na área exterior a canaleta de coleta de espuma.
- Garantir a estanqueidade do compartimento de gás, de modo a possibilitar o estabelecimento de pequenas pressões na linha de biogás (10 a 15 cm.c.a).
- A frequência ideal de remoção de espuma no interior dos separadores trifásicos deve ser estabelecida por meio de inspeção visual, que pode ser realizada a partir da abertura das escotilhas de fechamento hermético (ou a partir de visores transparentes, quando disponíveis), antes e depois de cada operação de descarte. A prática operacional do reator possibilitará estabelecer a melhor rotina de descarte (frequência e tempo de descarte, grau de abertura das válvulas, volumes removidos).
- Sempre que possível, prever válvulas motorizadas para facilitar a operação de remoção de espuma.



**Figura 15** – Dispositivo de remoção hidrostática de espuma: (a) ilustração esquemática do controle de pressão e nível de espuma no interior do STF; (b) vista de canaleta de coleta de espuma em seção triangular; (c) válvulas nas tubulações de saída de espuma de cada separador trifásico.



**Figura 16** - Selo hidráulico utilizado para controle de pressão e nível de espuma: a) vista geral da instalação; b) detalhe do visor de nível.

### 5.3.1 Separador trifásico modular Étsus-1000

O separador trifásico modular Étsus-1000 (Figura 17) trata-se de produto em fase final de desenvolvimento, fruto de parceria firmada entre a UFMG, por meio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações de Tratamento de Esgoto Susten-

táveis (INCT ETEs Sustentáveis), com companhias estaduais de saneamento e empresas fabricantes de peças em fibra de vidro. Esse produto, confeccionado em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), busca contribuir para a solução de diversos problemas operacionais de reatores UASB, quais

sejam: i) o adequado gerenciamento de espuma; ii) a coleta eficiente do biogás, sem perdas por vazamentos; iii) a adequada coleta do efluente líquido tratado, evitando o desprendimento de gases residuais e a ocorrência de curtos-circuitos hidráulicos. As principais vantagens associadas ao produto são:

- Estrutura modular de separação trifásica que incorpora aspectos de leveza, resistência, estanqueidade e facilidade de transporte e instalação.

- Incorporação de sistema de remoção da espuma que se acumula no interior do separador trifásico, contribuindo diretamente para a melhoria de aspectos operacionais dos reatores UASB e de redução/eliminação de emissões odorantes e de perdas de biogás.

- Incorporação de sistema de coleta de efluente acoplado ao corpo do separador trifásico, com dispositivo de verificação de nível.

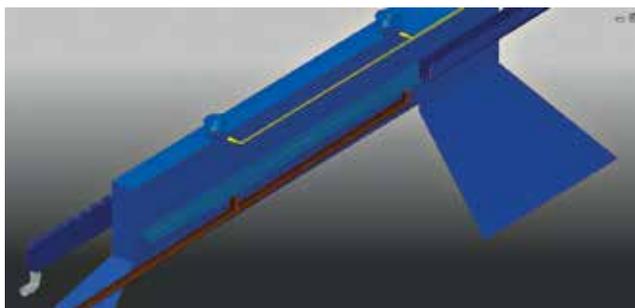
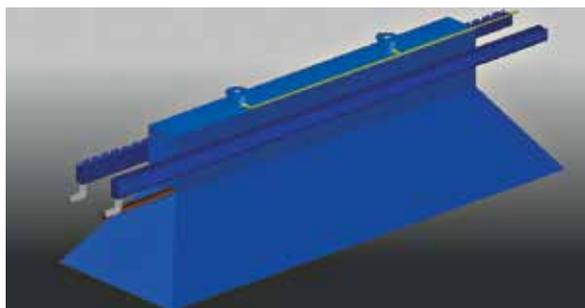


Figura 17 – Perspectiva esquemática do separador trifásico modular – Étsus 1000.

#### 5.4 Gerenciamento e destinação final

Após a remoção da espuma dos reatores UASB é de extrema importância o adequado gerenciamento e destinação final deste subproduto. No Brasil, algumas ETEs têm considerado os leitos de secagem como uma etapa importante do gerenciamento. Entretanto, é necessária a inclusão de uma etapa de peneiramento, a fim de separar a elevada quantidade de material grosseiro presente na espuma da fração peneirada. O material retido na peneira deve ser encaminhado para disposição final em aterro sanitário e a fração peneirada deve ser encaminhada para desaguamento em leitos de secagem.

Adicionalmente, em função dos **elevados volumes de líquido descartados juntamente com a espuma**, a fração peneirada pode ser direcionada a um **tanque de adensamento** com intuito de separar a espuma em três fases: i) fração sobrenadante; ii) fração clarificada; e iii) fração sedimentada. Pesquisa realizada em um sistema piloto de

adensamento indicou que 5% da espuma peneirada correspondeu à fração sobrenadante, 89% à fração clarificada e 6% à fração sedimentada. A caracterização da fração clarificada apresentou concentrações medianas de ST, DQO, DBO e óleos e graxas dentro das faixas usuais para o esgoto bruto, indicando, portanto, que essa fração pode ser retornada ao início do sistema de tratamento, sem prejuízos para o funcionamento e eficiência das unidades. Nesse sentido, a previsão de um **tanque de adensamento** para recebimento da fração peneirada da espuma é de grande importância, a fim de possibilitar a separação da fração clarificada, de grande volume, para retorno ao tratamento da fase líquida. Com isso, apenas as frações sobrenadante e sedimentada são encaminhadas para desaguamento em leitos de secagem, em conjunto ou em separado. Assim, como o volume dessas duas frações correspondeu a um pouco mais que 10% do volume total peneirado, a inclusão da etapa de adensamento, antes do desaguamento em leitos de se-

cagem, contribui para uma redução substancial da área dessas unidades (DÍAZ FLÓREZ, 2016).

Dessa forma, os projetos mais recentes têm preconizado que a espuma (fluida) removida de reatores UASB seja encaminhada para uma unidade de peneiramento e, em sequência, para uma unidade de adensamento, conforme descrito a seguir:

i) a unidade de peneiramento (# 1,0 mm) possibilita a separação do material grosseiro (detritos)

contido na espuma (Figura 18a), para posterior disposição final em aterro sanitário;

ii) a unidade de adensamento, localizada após a unidade de peneiramento, possibilita separação da fração clarificada das demais frações (sobrenadante e sedimentada), com o retorno da fração clarificada para a unidade de tratamento preliminar, ou para o próprio reator UASB, e as demais frações para os leitos de secagem (Figura 18b).



**Figura 18** – a) Fração grosseira de espuma retida em unidade de peneiramento; b) fração sobrenadante de espuma enviada para leito de secagem.

## 6 GERENCIAMENTO INTEGRADO DE LODO E ESCUMA

A adoção dos aprimoramentos apresentados nessa NT e o gerenciamento integrado dos subprodutos sólidos - lodo e espuma - são de fundamental importância para garantir a eficiência do sistema de tratamento. Na Figura 19 são apresentadas alternativas para o gerenciamento integrado de lodo e espuma (e biogás), as quais podem trazer importantes benefícios para as ETEs. Destaque para as seguintes possibilidades principais:

- Uso do biogás para secagem térmica do lodo (e da espuma).

- Envio do lodo (e da espuma) para tanques de adensamento, de modo a possibilitar a separação e retorno do excesso de água para a unidade de tratamento preliminar, ou para o próprio reator UASB.

- Higienização do lodo (e da espuma) em leitos de secagem (aquecidos com biogás), em secadores solares ou em secadores térmicos, os quais podem propiciar que o material desaguado seja aproveitado em atividades agrossilvipastoris ou em unidades de aproveitamento energético, ao invés de ser disposto em aterros sanitários.

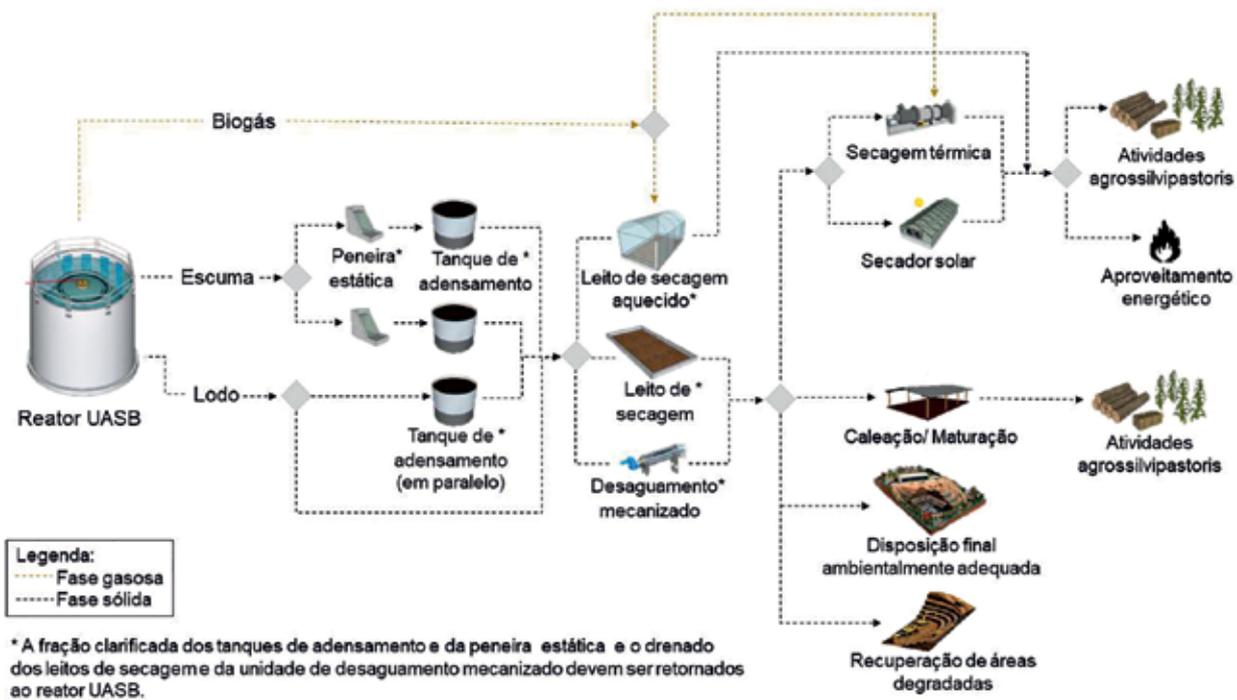


Figura 19 – Alternativas para o gerenciamento integrado de lodo e espuma.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições de Isabel Cristina Chiodi de Freitas e Ayana Lemos Emrich na elaboração dessa NT e as empresas Biofibra e Fibrasa pela parceria no desenvolvimento do separador trifásico *Étsus-1000*. 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.*

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12209: **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2011. 57 p.
- ALMEIDA, P. G. S., BRESSANI RIBEIRO, T., SILVA, B. S., AZEVEDO, L. S., CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 6: Qualidade do Efluente. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 90-108, 2018.
- BRESSANI-RIBEIRO, T., LOBATO, L.C.S., MELO, V.R., PEGORINI, E., NONATO, S., CHERNICHARO, C.A.L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 2: Tratamento Preliminar. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 17-29, 2018.
- 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., 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.

DÍAZ FLÓREZ, C. A. **Avaliação de protocolos de descarte e desidratação da espuma acumulada no interior de separadores trifásicos de reatores UASB**. 2016, 83 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

LEITÃO, R. C., SANTAELLA, S. T., van HAANDEL, A. C., ZEEMAN, G., LETTINGA, G. The effect of operational conditions on the hydrodynamic characteristics of the sludge bed in UASB reactors. In: **12<sup>th</sup> World Congress on Anaerobic Digestion**, 2010, Guadalajara, México. **Proceedings...** Guadalajara, México: International Water Association - IWA, 2010.

LETTINGA, G., HULSHOFF POL, L.W. UASB - Process design for various types of wastewaters. **Water Science & Technology**, v. 24, n. 8, p. 87-107, 1991.

MIKI, M. K. Dilemas do UASB. **Revista DAE**, v.183, n. 1504, p. 25-37, 2010.

RAMOS, R. A. **Avaliação da influência da operação de descarte de lodo no desempenho de reatores UASB em estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal**. 2008, 135 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade de Brasília, 2008.

ROSA, A.P., LOBATO, L.C.S., CHERNICHARO, C.A.L., MARTINS, D. C. R. B., MACIEL, F. M., BORGES, J. M. Improving performance and operational control of UASB reactors via proper sludge and scum discharge routines. **Water Practice & Technology**, v. 7, n. 3, p. 1-11, 2012.

SANTOS, A. **Remoção, tratamento e valoração de espuma proveniente de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto doméstico**. 2014. 115 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014

SATO, N., OKUBO, T., OHASHI, A. & HARADA, H. Prospects for a self-sustainable sewage treatment system: case study on full-scale UASB system in India's Yamuna River Basin. **J. Environ. Manage.** v. 80, n.3, p. 198-207, 2006.

SOUZA, C. L., SILVA, S. Q., AQUINO, S. F. & CHERNICHARO, C. A. L. Production and characterization of scum and its role in odour control in UASB reactors treating domestic wastewater. In: **4<sup>th</sup> World Water Congress**, Beijing, China. **Proceedings...**Beijing, China: International Water Association - IWA, 2006.

van LIER, J. B., VASHI, A., van der LUBBE, J., HEFFERNAN, B. Anaerobic sewage treatment using UASB reactors: Engineering and operational aspects. In: **Fang, H.H.P. (Editor) Environmental anaerobic technology: applications and new developments**. Imperial College Press -London-UK. p. 59-87, 2011.

# 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

*Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage – Part 4: Control of corrosion and gaseous emissions*

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

Emanuel Manfred Freire Brandt / Juliana Mattos Bohrer Santos / Cláudio Leite de Souza / Gustavo Rafael Collere Possetti / Thiago Bressani Ribeiro / Antônio Neves de Carvalho Júnior / Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (\*)

DOI: 10.4322/dae.2018.041

## Resumo

As emissões gasosas fugitivas estão diretamente associadas aos problemas de odor e de corrosão em estações de tratamento de esgoto que empregam processos anaeróbios. Nesse sentido, o controle de tais emissões e dos processos corrosivos por meio de medidas preventivas e/ou corretivas é fundamental para a garantia do bem-estar de trabalhadores e da população vizinha a ETEs, apresentando ainda o potencial de redução de gastos operacionais com manutenção, reparo de estruturas danificadas e garantia da vida útil de equipamentos. Esta Nota Técnica tem como objetivo caracterizar os problemas e suas respectivas origens associadas às emissões gasosas, bem como apresentar as técnicas de maior relevância para o projeto, a construção e a operação de reatores UASB visando o controle da corrosão e das emissões fugitivas. Em síntese, os aprimoramentos relacionados a essa temática associam-se à possibilidade de utilização de técnicas preventivas para a redução de emissões ou ao controle corretivo, com o emprego de estruturas de dessorção, contenção, exaustão e tratamento de gases, assim como a utilização de materiais resistentes à corrosão e revestimentos anticorrosivos. As emissões gasosas e a possibilidade de corrosão são inerentes ao uso de reatores UASB para o tratamento de esgoto sanitário, todavia, é possível a utilização de técnicas que atuem efetivamente na mitigação desses aspectos.

**Palavras-chave:** Contenção de gases, dessorção de gases dissolvidos, exaustão, odor, sulfeto de hidrogênio

**Emanuel Manfred Freire Brandt** – Químico Industrial pela UFOP. Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Professor adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFJF.

**Juliana Mattos Bohrer Santos** – Engenheira Ambiental pela UFJF. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Doutoranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

**Cláudio Leite de Souza** – Engenheiro Civil pela UFV. Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

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

**Antônio Neves de Carvalho Júnior** – Engenheiro Civil pela UFMG. Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela UFMG. Professor Associado do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG. Coordenador do Laboratório de Concreto e Argamassas do DEMC/EE.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

Waste gas emissions are directly associated with odour and corrosion problems in anaerobic sewage treatment plants (STPs). Therefore, the control of such emissions and corrosive processes by means of preventive and/or corrective actions is essential to guarantee the well-being of workers and of the surrounding population of STPs. It also has the potential of decreasing operational expenses with maintenance, repair of damaged structures, as well as guarantee of equipment lifespan. This Technical Note aims to characterize the problems and their respective origins associated with gaseous emissions, as well as to present the most relevant techniques for the design, construction and operation of UASB reactors aiming at the control of corrosion and diffusive emissions. In summary, the improvements related to this theme are associated with the possibility of using preventive techniques to reduce emissions or corrective control, taking into account the use of desorption of dissolved gases, containment, exhaustion and gas treatment structures, as well as the use of corrosion resistant materials and anticorrosive coatings. Gaseous emissions and the possibility of corrosion are inherent to the use of UASB reactors for sewage treatment, however it is possible to use techniques that effectively act to mitigate these aspects.

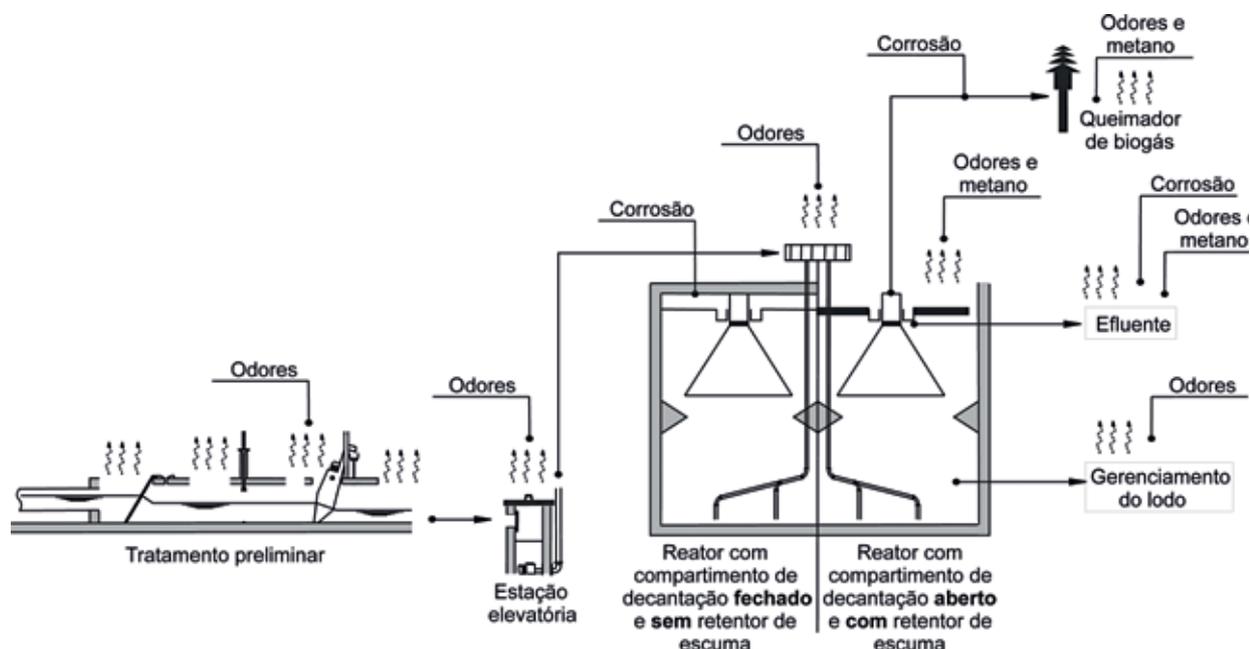
**Keywords:** Desorption of dissolved gases, exhaustion, gas containment, hydrogen sulphide, odour

## 1 INTRODUÇÃO

Apesar de suas inúmeras vantagens e ampla utilização no tratamento de esgoto, os reatores UASB apresentam algumas limitações relacionadas às emissões gasosas fugitivas, tal como caracterizado na Parte 1 desta Coletânea de Notas Técnicas (NT) (CHERNICHARO *et al.*, 2018). Caso não sejam adequadamente equacionadas, tais limitações podem prejudicar a aplicação mais ampla dessa tecnologia de tratamento de esgoto no Brasil. Conforme apresentado esquematicamente na Figura 1, as emissões fugitivas correspondem aos gases responsáveis pelos odores e pela corrosão, os quais são gerados nas diversas etapas da estação de tratamento de esgoto (ETE), notadamente na etapa do tratamento anaeróbico. Uma preocupação adicional recai sobre a presença de gases dissolvidos nos efluentes dos reatores UASB, os quais, dependendo das condições de turbulência do líquido, podem ser liberados para a atmosfera intensificando os odores e os processos corrosivos, além da possibilidade da emissão difusa de gases de efeito estufa (GEE). Adicionalmente, os problemas de odor e de corrosão também podem estar relacionados à linha de coleta e tratamento de biogás, bem como às unidades de gerenciamento de lodo.

Nesse sentido, o controle das emissões gasosas e dos processos corrosivos por meio de medidas preventivas e/ou corretivas torna-se essencial para garantir o bem-estar dos trabalhadores e residentes no entorno das ETEs, além de reduzir os gastos com a manutenção e reparo das estruturas danificadas pela corrosão e salvaguardar a vida útil de componentes. Dessa forma, o objetivo deste documento é apresentar as técnicas de maior relevância para o projeto, a construção e a operação de reatores UASB visando o controle da corrosão e das emissões gasosas, discutindo ainda os principais tópicos de interesse relacionados à necessidade de aprimoramentos.

Grande parte dessas técnicas foi desenvolvida ou adaptada à realidade brasileira a partir de estudos no âmbito do PROSAB (Programa de Pesquisas em Saneamento Básico), do PROBIOGÁS (Projeto Brasil – Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil), da RENTED (Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizados), do INCT ETES Sustentáveis (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto) e por pesquisas desenvolvidas no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente, e Recursos Hídricos da UFMG e de outros programas de pós-graduação no Brasil.



**Figura 1** – Emissões gasosas fugitivas nas diversas etapas de uma ETE, com destaque para os reatores UASB.

## 2 ORIGEM E PROBLEMAS RELACIONADOS ÀS EMISSÕES GASOSAS

Diferentes compostos odorantes são biologicamente formados a partir do esgoto em condições anaeróbias, sendo o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), resultante da redução biológica do sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) ou tiosulfato ( $S_2O_3^{2-}$ ) presentes no esgoto, o composto mais comumente associado aos odores (STUETZ e FRECHEN, 2001). O  $H_2S$  apresenta limiar de detecção humano variando entre 0,47 ppbv (0,00047 ppm<sub>v</sub>) e 100 ppbv (0,1 ppm<sub>v</sub>) (METCALF & EDDY, 2016). Destaca-se, contudo, que outros compostos de enxofre (p. ex.: mercaptanas), ácidos orgânicos voláteis, aldeídos, álcoois, fenóis, amônia e aminas também podem contribuir para a percepção dos odores (CHERNICHARO, 2007; METCALF & EDDY, 2016).

O sulfeto produzido pela atividade de microrganismos se difunde no esgoto, podendo ser encontrado na forma ionizada (o bissulfeto -  $HS^-_{(aq)}$  e o sulfeto -  $S^{2-}_{(aq)}$ ) ou associado ao hidrogênio (o  $H_2S_{(aq)}$ ), a depender do pH. Para valores de pH inferiores a 7, a forma não dissociada ( $H_2S$ ) é o prin-

cipal componente dissolvido. Já o  $HS^-$  predomina para valores de pH entre 7 e 13. O  $S^{2-}$  somente predominará em valores de pH extremamente elevados. O  $H_2S_{(aq)}$  é a única forma do sulfeto capaz de se desprender do meio líquido e ser liberada para a atmosfera, gerando maus odores. Nesse sentido, as emissões de  $H_2S$  dependem primeiramente das condições necessárias para o desenvolvimento dos microrganismos (anaeróbios), mas também de outros fatores como: sua concentração no esgoto; área superficial do líquido exposta à atmosfera; características construtivas dos reatores anaeróbios; grau de turbulência do fluido; pH e temperatura do esgoto.

Aliada à questão da emanação de odores, na presença de umidade e pequenas quantidades de oxigênio, o  $H_2S$  pode ser oxidado a ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), que possui propriedades corrosivas, causando a depreciação de peças e estruturas metálicas ou de concreto (Figura 2 (a-c)). Ademais, em misturas gasosas, o  $H_2S$  pode oferecer riscos à saúde humana, mesmo em baixas concentrações. Os efeitos à saúde humana começam com

irritação ocular (exposições acima de 10 ppm<sub>v</sub> por 6-7 h), perda momentânea de consciência e outros efeitos graves como edema pulmonar e convulsão (exposições de 100-200 ppm<sub>v</sub> por cerca de 20min) e até a morte (exposições acima de 900 ppm<sub>v</sub> por aproximadamente 1 min). Altas concentrações de H<sub>2</sub>S no ar atmosférico (150-200 ppm<sub>v</sub>) podem prejudicar as glândulas olfativas de seres humanos, resultando na perda do olfato em cerca de 2-15 min. Essa perda do olfato pode levar a uma falsa sensação de segurança (WEF, 2004).

Além do H<sub>2</sub>S e de outros compostos odorantes, estudos recentes mostraram a presença do meta-

no (CH<sub>4</sub>) dissolvido em altas concentrações (6 a 25 mg.L<sup>-1</sup>) em amostras líquidas coletadas nas superfícies de decantadores de reatores UASB (SOUZA, 2010; SOUZA *et al.*, 2011; NELTING *et al.*, 2015), indicando a possibilidade de sua liberação para a atmosfera. De fato, concentrações de CH<sub>4</sub> até 6,4%<sub>v/v</sub> (64.000 ppm<sub>v</sub>) já foram relatadas em ambientes confinados do compartimento de decantação e de unidades hidráulicas receptoras dos efluentes de reatores UASB, concentração essa dentro da faixa de inflamabilidade e explosividade do gás (SOUZA, 2010; SOUZA *et al.*, 2012; GLÓRIA *et al.*, 2016).



**Figura 2** - Fotos de detalhes da corrosão em: a) passarela metálica; b) estrutura de concreto; c) estruturas metálicas de guarda-corpo.

Para as discussões que se seguem nesta NT, foram adotadas as seguintes terminologias:

- Quando os gases são liberados para a atmosfera de forma difusa e sem uma medida de controle, são denominados de **emissões fugitivas**. Como exemplo, tem-se a emissão de H<sub>2</sub>S em elevatórias de esgoto (EE) e nas etapas do tratamento preliminar, cujas imediações apresentam concentrações típicas de H<sub>2</sub>S da ordem de 0,4 a 40 ppm<sub>v</sub> (CHERNICHARO *et al.*, 2010).
- Quando se confina a fonte de emissão fugitiva e gera-se uma corrente gasosa por meio de exaustão, o fluxo denomina-se **gás residual**. Como exemplo, tem-se a cobertura e exaustão dos gases das EE e

das etapas do tratamento preliminar. Outro exemplo é a exaustão da atmosfera confinada do compartimento de decantação de reatores UASB fechados, cujas concentrações de H<sub>2</sub>S podem atingir 50 ppm<sub>v</sub> (CHERNICHARO *et al.*, 2010), muitas vezes levando à corrosão da laje de cobertura do reator quando não devidamente protegida.

- Quando é realizada a coleta dos gases gerados no compartimento de digestão dos reatores UASB, a partir da câmara de gás do separador trifásico, o fluxo gasoso é denominado **biogás**, um gás rico em CH<sub>4</sub>, mas que também contém quantidades significativas de H<sub>2</sub>S, entre 1.000 e 5.000 ppm<sub>v</sub> (NOYOLA *et al.*, 2006).

• Quando os gases são emitidos a partir da combustão do biogás em queimadores e em unidades de aproveitamento energético, o fluxo gasoso é uma **emissão pontual**. Nesses casos, é importante destacar que os dispositivos de combustão não garantem 100% de eficiência na destruição do  $\text{CH}_4$  e dos gases odorantes, especialmente no caso de queimadores abertos (BRASIL, 2017; KAMINSKI *et al.*, 2018).

### 3 POSSÍVEIS APRIMORAMENTOS RELACIONADOS AO CONTROLE DE CORROSÃO E EMISSÕES GASOSAS

O controle de corrosão e emissões gasosas deve priorizar ações preventivas para a redução das emissões fugitivas, mas eventualmente podem ser necessárias ações corretivas que envolvam a contenção e exaustão dos gases residuais para o subsequente tratamento dos odores e gases corrosivos. Adicionalmente, podem ser utilizados métodos para a liberação (dessorção) de gases dissolvidos nos efluentes dos reatores UASB.

#### 3.1 Controle preventivo das emissões gasosas

Os esforços para reduzir as emissões fugitivas devem ser tomados desde a fase de projeto, mas também durante a operação das ETEs, tal como sintetizado na Tabela 1.

#### 3.2 Controle corretivo das emissões gasosas

##### 3.2.1 Contenção e exaustão dos gases

Mesmo após a aplicação das ações preventivas, dependendo das condições de formação dos gases, pode se tornar indispensável: i) a contenção das fontes emissoras, por meio de coberturas/galpões; ii) a introdução de ar atmosférico dentro das áreas confinadas; e iii) a captação/exaustão dos gases residuais gerados. Na Tabela 2 são apresentados os principais aspectos técnicos de interesse no dimensionamento de coberturas e sistemas de exaustão dos gases residuais. A discussão sub-

sequente traz maiores detalhes e propostas de projeto para a contenção das emissões fugitivas e exaustão dos gases residuais nas etapas do tratamento preliminar e nos reatores UASB.

A contenção total dos odores e dos gases corrosivos gerados no tratamento preliminar é uma medida que demanda maiores investimentos, uma vez que somente será garantida a partir da construção de um galpão que confine todo o tratamento preliminar, gerando significativas vazões de gases residuais para tratamento. Nos casos em que não se faz necessário um controle rigoroso das emissões gasosas no tratamento preliminar, deve-se optar por uma medida que demande menores investimentos. Uma alternativa aos dispendiosos galpões é apresentada na Figura 3, que consiste na cobertura dos canais e criação de zonas de pressão negativa abaixo das lajes/coberturas nas proximidades das grades, por onde o ar atmosférico ingressa naturalmente. Para promover as zonas de pressão negativa nas proximidades das grades, a montante e a jusante das barras devem ser instalados captadores de ar interligados ao sistema de exaustão de gases, assim como cortinas em tiras de policloreto de vinila (PVC), que diminuirão a área livre da seção transversal do canal (entre o NA e a laje/cobertura) e proporcionarão uma maior velocidade nominal do gás nas aberturas da cobertura.

No caso dos reatores UASB, a contenção dos odores e gases corrosivos pode ser feita por meio da cobertura e exaustão dos dispositivos de distribuição de vazão que alimentam os reatores, do compartimento de decantação e das canaléticas de coleta de efluente dos reatores (Figura 4). É necessário prever coberturas que permitam o acesso para limpeza e manutenção, como é o caso das coberturas deslizantes ou tampas de inspeção. No caso do compartimento de decantação, é necessário prever aberturas na laje de cobertura para permitir a entrada de ar atmosférico na superfície do decantador, bem como captadores de gases residuais nas paredes laterais dos

reatores, próximo ao NA e às canaletas de coleta de efluente. Alternativamente, pode-se prever a entrada de ar no compartimento de decantação através de frestas entre os módulos pré-molda-

dos da laje. Porém, tal medida somente é indicada no caso de reatores UASB de pequeno porte, uma vez que não garante adequado fluxo de gases em toda a atmosfera confinada.

**Tabela 1 – Ações preventivas para a redução das emissões fugitivas em ETEs**

Etapa	Problemática	Ação necessária
Projeto	Emissões fugitivas nas unidades de tratamento preliminar da ETE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inclusão de dispositivos para permitir a remoção de sedimentos acumulados nos canais das grades e dos desarenadores (p. ex.: pontos de jato de água).</li> <li>- Nas situações em que os canais do tratamento preliminar não são confinados, priorizar o regime hidráulico laminar, a fim de manter os gases odorantes dissolvidos na fase líquida.</li> <li>- Nas situações em que os canais do tratamento preliminar são confinados, avaliar a possibilidade de que a chegada do esgoto nesta unidade se dê em regime turbulento (p. ex.: utilizando tubulações acima do NA máx. operacional), de modo a facilitar o desprendimento, a exaustão e o tratamento dos gases dissolvidos no esgoto afluente.</li> </ul>
	Emissões fugitivas nos reatores UASB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inclusão de dispositivo para evitar o acúmulo desta espuma dentro dos separadores trifásicos dos reatores UASB (p. ex.: remoção hidrostática de espuma) – ver Parte 3 desta Coletânea de Notas Técnicas (LOBATO <i>et al.</i>, 2018).</li> <li>- Projeto de reatores UASB com decantadores estanques a gases (p.ex.: tampas hermeticamente fechadas, adoção de técnicas de enclausuramento, previsão da impermeabilização de superfícies).</li> <li>- Evitar quedas hidráulicas na coleta e condução do efluente tratado.</li> </ul>
	Emissões fugitivas gerais	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de barreiras físicas no perímetro da ETE que induzam turbulência atmosférica (p. ex.: árvores/cortinas verdes e muros de no mínimo 4 m de altura).</li> </ul>
Operação	Emissões fugitivas nas unidades de tratamento preliminar da ETE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoção e destinação final adequada e frequente de resíduos do tratamento preliminar.</li> <li>- Adição de ar e/ou agentes químicos na rede coletora, em estações elevatórias e no tratamento preliminar – consultar Brandt <i>et al.</i> (2017).</li> <li>- Estabelecimento de pontos, procedimentos (entrada submersa e gradual) e horários para recepção de lodo de tanques sépticos (de preferência durante a maior vazão de entrada de esgoto na ETE).</li> <li>- As unidades devem ser limpas e lavadas após as intervenções operacionais diárias e pintadas após manutenção.</li> </ul>
	Emissões fugitivas nos reatores UASB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoção frequente da espuma acumulada em reatores UASB – ver Parte 3 desta Coletânea de Notas Técnicas (LOBATO <i>et al.</i>, 2018).</li> <li>- Realização de testes de estanqueidade nas câmaras de biogás e nos decantadores.</li> <li>- Manejo adequado das tampas de inspeção nas câmaras de biogás e nos decantadores.</li> </ul>
	Emissões fugitivas nas etapas de gerenciamento de lodo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Restrição ao manuseio de lodo não estabilizado.</li> <li>- Evitar o cisalhamento de lodo em bombas.</li> <li>- Remoção diária de lodo desidratado.</li> <li>- Adição de permanganato ou sais de ferro ao lodo – consultar Brandt <i>et al.</i> (2017).</li> <li>- Contenção, exaustão e tratamento dos gases residuais contendo amônia, emitidos a partir da estabilização alcalina prolongada do lodo (caso adotado essa alternativa para higienização do lodo).</li> </ul>
	Emissões fugitivas gerais	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementação de programa para recebimento de efluentes não domésticos, de modo a restringir o lançamento de elevadas cargas de compostos precursores dos odores (nitrogênio orgânico, amônia, enxofre orgânico, sulfato, tiosulfato, ácidos orgânicos voláteis, entre outras espécies químicas odorantes).</li> <li>- Monitoramento adequado da concentração de sulfato afluente à ETE, de modo a facilitar a identificação de contribuições industriais.</li> <li>- Monitoramento das emissões fugitivas e elaboração de mapas de odores no entorno da ETE (análise para identificação e quantificação direta dos compostos odorantes; uso de nariz eletrônico; elaboração de júri olfatométrico) – consultar CEN (2003); Lisboa <i>et al.</i> (2009, 2010); Miranda (2017); Blanco-Rodríguez <i>et al.</i> (2018).</li> </ul>

**Tabela 2 – Especificações técnicas para coberturas e sistemas de exaustão dos gases residuais**

Critério de projeto	Especificação técnica	
Tipo de cobertura	Plana	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite apenas o acesso limitado à área confinada, por meio de comportas ou janelas.</li> <li>- Minimiza o volume enclausurado e a vazão de gás para tratamento.</li> <li>- Indicação: canais; caixas de distribuição; pequenos tanques.</li> </ul>
	Em arco ou telhado de duas águas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite apenas o acesso limitado à área confinada, por meio de comportas ou janelas.</li> <li>- Podem apresentar menores custos em relação às coberturas planas (em função da menor espessura da cobertura), mas aumentam o volume enclausurado e a vazão de gás para tratamento.</li> <li>- Indicação: canais; tanques.</li> </ul>
	Galpão ou cúpula	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite acesso irrestrito à área confinada.</li> <li>- Apresentam maiores custos de implantação e operação (geram maiores vazões de gás para exaustão e tratamento).</li> <li>- Indicação: tratamento preliminar; unidades de gerenciamento de lodo; decantadores; filtros biológicos percoladores pós-UASB.</li> </ul>

Critério de projeto		Especificação técnica
Materiais construtivos das coberturas e sistema de exaustão	Concreto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo e elevada capacidade de suportar cargas.</li> <li>- Módulos pesados e espessos, o que dificulta acesso de operadores.</li> <li>- Suscetível à corrosão (aplicar proteção de PRFV, poliuréia; poliuretanos elastoméricos; pintura de epóxi etc.).</li> <li>- Indicação: cobertura de reatores UASB; construção das unidades de tratamento dos gases residuais.</li> </ul>
	Alumínio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevado custo e boa capacidade de suportar esforços de tensão.</li> <li>- São leves e facilitam o acesso de operadores.</li> <li>- Possui boa resistência em atmosferas com <math>H_2S</math>, mas podem ser atacados pelo <math>H_2SO_4</math>.</li> <li>- Indicação: confecção de elementos das coberturas (com revestimento epóxi) como portas, janelas, esquadrias; dutos de transporte de gases.</li> </ul>
	Aço inoxidável	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevado custo e ótima capacidade de suportar esforços de tensão.</li> <li>- São relativamente leves e facilitam o acesso de operadores.</li> <li>- Elevada resistência à corrosão. São utilizados aços inoxidáveis do tipo AISI 316.</li> <li>- Indicação: confecção de todas as estruturas, em razão da durabilidade do material.</li> </ul>
	Materiais poliméricos e elastoméricos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PRFV, PVC, PEAD, PP ou PPR, borracha.</li> <li>- Elevado custo, mas baixo peso específico e elevada resistência à corrosão.</li> <li>- Podem ser moldados em diversas formas.</li> <li>- Indicação: tubos e conexões; cobertura de canais e tanques em geral.</li> </ul>
Sistema de exaustão	Vazão de exaustão	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taxa de renovação da atmosfera confinada (introdução de ar): em áreas não visitáveis (acesso parcial), as taxas variam de 4 a 6 renovações/h; em ambientes visitáveis (entrada de operadores), as taxas são da ordem de 10 renovações/h.</li> <li>- Pressão diferencial: devem-se controlar as aberturas das coberturas para o exterior, além de submeter o ambiente interno a uma pressão inferior à atmosférica (pressão diferencial min. 2,5 mm c.a.), proporcionando condições para que o ar entre pelas frestas e aberturas (velocidade mínima de <math>6,4 m.s^{-1}</math>), com a garantia da não ocorrência de emissões fugitivas.</li> <li>- Concentração dos gases: devido à mistura do <math>O_2</math> (originado do ar atmosférico introduzido na cobertura) com <math>CH_4</math> e <math>H_2S</math>, as vazões devem garantir que não sejam formadas misturas dentro dos limites inferior e superior de inflamabilidade ou explosividade: <math>5\%_{v/v}</math> a <math>15\%_{v/v}</math> para o <math>CH_4</math>; <math>4\%_{v/v}</math> a <math>44\%_{v/v}</math> para o <math>H_2S</math>. Eventualmente pode ser necessário o monitoramento das concentrações de <math>CH_4</math> no sistema de exaustão.</li> </ul>
	Dutos de transporte de gases	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Podem ser de seção circular ou retangular.</li> <li>- Devem ser inclinados para possibilitar o encaminhamento da umidade condensada para os pontos baixos da rede de exaustão.</li> <li>- Nos pontos mais baixos da rede de exaustão devem ser instalados dispositivos para drenagem de condensado.</li> <li>- Devem ser instalados <i>dampers</i> ou válvulas tipo agulha em cada ponto de captação dos gases e nos pontos das ramificações da rede de dutos de exaustão (permitem ajustes de vazão e pressão em cada ramificação da rede e são utilizados para isolar uma determinada área do sistema de controle de odores em eventos de manutenção).</li> </ul>
	Ventilador / exaustor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Arranjo pode ser a montante ou a jusante da unidade de tratamento dos gases.</li> <li>- São utilizados ventiladores centrífugos com rotor de pás inclinadas para frente, radiais ou inclinadas para trás.</li> <li>- Devem ser confeccionados em material resistente à corrosão por solução de ácido sulfúrico a 10%.</li> <li>- Adotar componentes eletromecânicos próprios para áreas classificadas segundo a diretiva 1999/92/EC do parlamento e conselho europeu, com certificação ATEX (Equipamentos Elétricos para Atmosferas Explosivas) segundo a diretiva 1994/9/EC do parlamento e conselho europeu.</li> </ul>

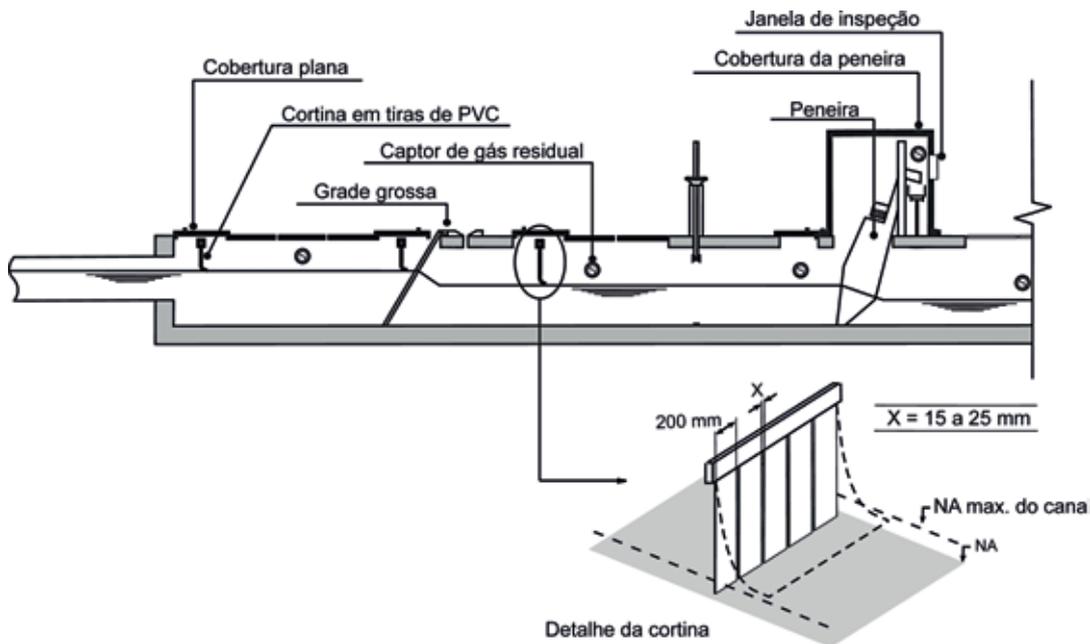
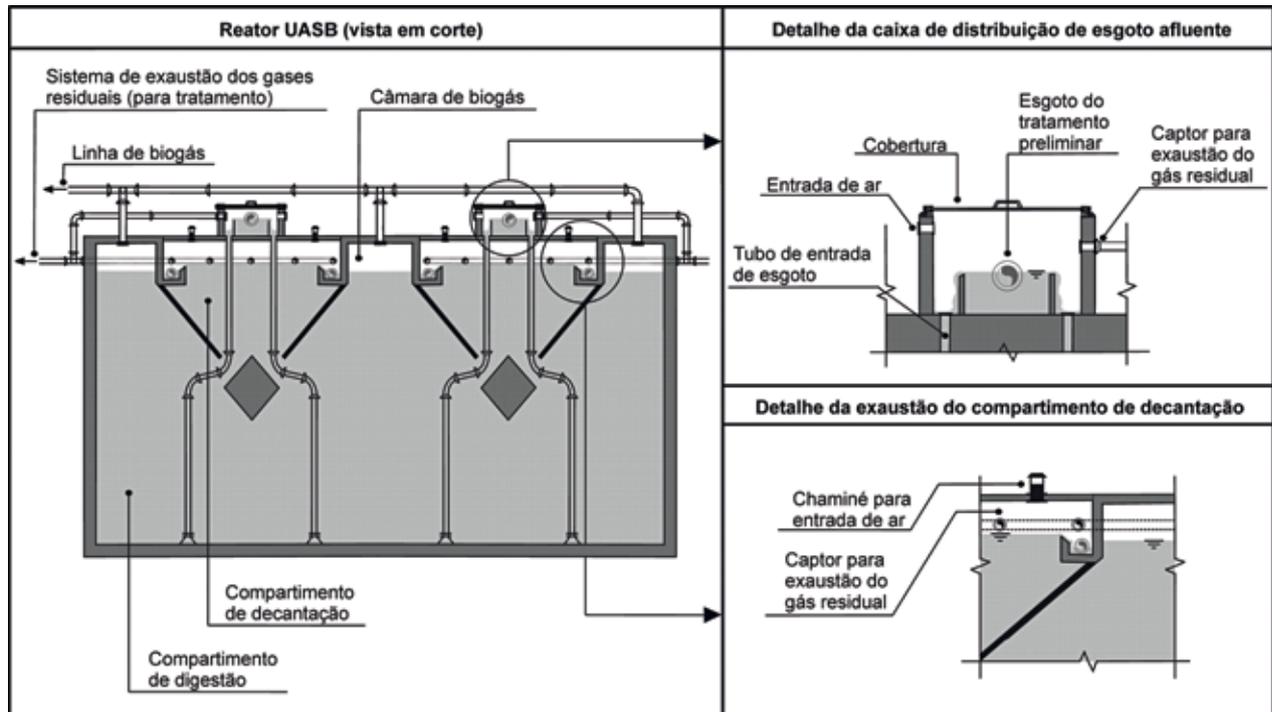


Figura 3 – Esquema da contenção de odores e gases corrosivos no tratamento preliminar.



**Figura 4** – Esquema da contenção de odores e gases corrosivos em reatores UASB.

O fluxo de gases na atmosfera confinada do compartimento de decantação deve sempre ser descendente, o que reduz a possibilidade de condensação de umidade na laje, protegendo-a da corrosão. Ademais, o  $H_2S$  e outros gases odorantes em geral possuem densidades relativas ao ar maiores do que a unidade, favorecendo a sua acumulação nas regiões mais baixas do volume confinado. Como o volume confinado nos compartimentos de decantação pode ser demasiadamente grande, recomenda-se a aplicação de menores taxas de renovação da atmosfera confinada (3 a 4 renovações por hora), porém ainda suficientes para impedir o acúmulo de umidade nas estruturas internas (WEF, 2004). Com essa prática, são economizados gastos com o sistema de exaustão e tratamento dos gases residuais.

Ainda sobre os compartimentos de decantação dos reatores UASB, há no meio técnico/científico um grande debate em relação à construção de reatores sem laje de cobertura, já que alguns estudos e resultados práticos demonstraram que,

no caso dos reatores projetados sem cobertura na região de decantação, a acumulação de espuma sobre a superfície pode auxiliar no controle de odores devido à presença de microrganismos oxidadores de sulfeto (SOUZA *et al.*, 2006; GARCIA, 2009). Nos casos em que não se faz necessário um controle rigoroso das emissões gasosas nos reatores UASB, é possível avaliar a possibilidade de retenção da espuma nos decantadores abertos para a atmosfera, reduzindo significativamente os gastos construtivos e com medidas de controle de odores e corrosão. Adicionalmente, há quem defenda o enclausuramento dos compartimentos de decantação e até sua interligação com a câmara de gás. Essa alternativa já foi experimentada em reatores UASB modificados e em RALFs no Estado do Paraná, sendo adotada com a perspectiva de aumento da taxa de captação de biogás. Ressalta-se, contudo, que estudos ainda se fazem necessários para ratificar a eficiência, bem como as vantagens e desvantagens inerentes a esta solução, uma vez que contrapõe ao conceito original

dos reatores UASB clássicos, nos quais a interligação do compartimento de decantação com a câmara de gás não é admitida.

### 3.2.2 Dessorção dos gases dissolvidos em efluentes de reatores UASB

A presença de gases dissolvidos nos efluentes dos reatores UASB é uma questão relevante que pode agravar muito a emissão de odores, gases de efeito estufa ( $CH_4$ ) e os processos corrosivos nas ETEs. Conforme discutido no item anterior, é possível minimizar a liberação de gases por meio da utilização de coberturas e da exaustão dos canais de efluentes. Porém, efetivamente, a garantia de controle e remoção do  $H_2S$  dos efluentes dos reatores UASB pode ser alcançada com a maximização da sua emissão em uma unidade simples, compacta, confinada e dotada de exaustão, com

o gás residual capturado e encaminhado para tratamento adequado. Esse processo de transferência de massa envolvendo a remoção de gases dissolvidos no efluente para um fluxo gasoso é denominado de dessorção. Na Figura 5 (a-c) são mostrados os principais tipos de câmaras de dessorção (CD) que podem ser utilizadas na remoção de gases dissolvidos em efluentes de reatores UASB. A técnica da CD é baseada em mecanismos elementares de agitação da fase líquida no interior de uma estrutura fechada com fluxos d'água em queda livre e pressão interna igual à atmosférica. Um fluxo de gás (ar atmosférico) é aplicado no sentido oposto ao fluxo de esgoto, de forma a aumentar a taxa de transferência de massa entre as fases. Dessa forma, tem-se na parte superior da CD a entrada de esgoto e saída de ar, e na parte inferior a saída de esgoto e entrada de ar.

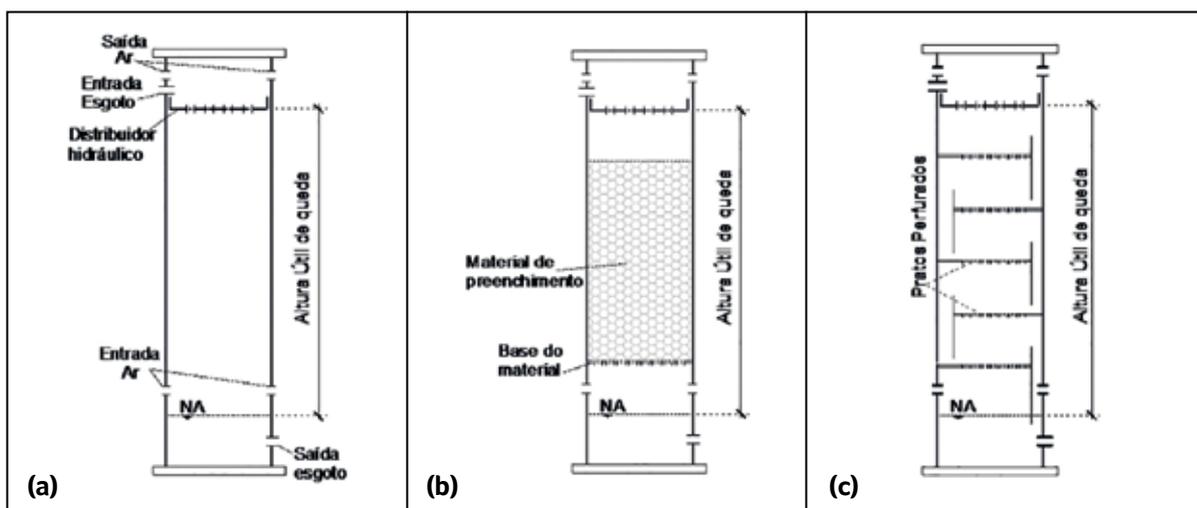


Figura 5 – Esquema de câmara de dessorção: a) sem enchimento; b) com enchimento; c) com pratos.

A CD sem preenchimento (Figura 5a) é a técnica mais econômica, na medida em que não apresenta qualquer atributo interno diferenciador, tal qual nas demais, sendo baseada somente na queda d'água. Contudo, em geral a CD sem preenchimento atinge eficiências mais baixas que as demais CDs, mas que podem ser suficientes para

possibilitar a minimização de problemas associados às emissões fugitivas de  $H_2S$  em efluentes de reatores UASB (GLÓRIA *et al.*, 2016). Sinteticamente, as eficiências de remoção de  $H_2S$  que vêm sendo encontradas e os principais parâmetros de projeto já identificados e testados são mostrados na Tabela 3. As CDs permitem ainda a remoção do

CH<sub>4</sub> dissolvido nos efluentes dos reatores UASB, uma preocupação mais recente que vem ganhando notório destaque no meio técnico e científico. Nesse sentido, existem proposições de aprimoramento desse processo a partir da utilização de membranas desgaseificadoras (COOKNEY *et al.*, 2012; COOKNEY *et al.*, 2016.) e da adoção de sistemas a vácuo, como a tecnologia DiMeR (*Dissolved Methane Recovery*), recentemente avaliada

no Estado do Paraná (NELTING e TRAUTMANN, 2015). Maiores informações sobre a quantificação, dessorção e recuperação do CH<sub>4</sub> dissolvido podem ser encontradas nos trabalhos realizados por Souza (2010), Nelting *et al.* (2015), Glória *et al.* (2016), Nelting *et al.* (2017), Souza *et al.* (2018), as quais são detalhadas na Parte 5 desta Coletânea de NTs (POSSETTI *et al.*, 2018).

**Tabela 3** – Síntese dos principais parâmetros de projeto e eficiências de remoção de H<sub>2</sub>S em câmaras de dessorção (resultados obtidos em pesquisas piloto)

Tipo de câmara de dessorção	Altura útil (H) <sup>(a)</sup> (m)	Taxa de aplicação superficial (TAS) <sup>(b)</sup> (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .min <sup>-1</sup> )	Qg.Qℓ <sup>-1</sup> (rQ) <sup>(c)</sup>	Eficiência de remoção de H <sub>2</sub> S (%)	Concentração de H <sub>2</sub> S no gás residual (ppm)
Sem enchimento	1,0 a 1,5	0,10 - 0,30	2 a 10	40 - 70	100 - 400
Com enchimento <sup>(d)</sup>	1,2 a 1,5	0,15 - 0,30	3 a 4	65 - 85	200 - 600

<sup>(a)</sup> Altura de queda d'água: determina a altura útil de queda, consequentemente, o tempo de fluxo em queda;

<sup>(b)</sup> Taxa de aplicação superficial: determina a área da seção transversal, portanto, tamanho em planta da câmara;

<sup>(c)</sup> Relação entre vazões ar (Qg)/líquido (Qℓ): determina a vazão de exaustão da atmosfera interna da CD a partir da vazão de esgoto;

<sup>(d)</sup> Anéis plásticos.

Fonte: Santo (2017), Glória (2018), Machado (2018).

**Exemplo simplificado de dimensionamento de uma CD com enchimento**

Para esse exemplo foram adotados os parâmetros considerados mais promissores até o presente momento, de forma a obter eficiências da ordem de 80% na remoção de H<sub>2</sub>S dissolvido nos efluentes dos reatores UASB. A perspectiva é de se gerar como gás residual um fluxo com concentração de H<sub>2</sub>S de cerca de 400 ppm (e CH<sub>4</sub> de cerca de 0,5 % ou 5.000 ppm). Os parâmetros considerados a partir da Tabela 3 como os mais indicados são:

- H = 1,50 m (útil);
- TAS = 0,25 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>;
- rQ = 4 vezes;
- Modificações internas: enchimento com 1 m de camada de anéis plásticos;
- Altura total de 2,0 m, sendo composta por: 0,25 m (da cobertura ao distribuidor do afluente) + 0,25 m (do distribuidor até início do enchimento) + 1,0 m (do início do preenchimento até placa de suporte) + 0,25 m (da placa de suporte até o NA) + 0,25 m (do NA até o fundo da câmara).

Sequência de dimensionamento:

Sendo a vazão média de esgoto afluente: Qℓ = 10 L.s<sup>-1</sup> ou (0,6 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>)

Primeiramente, calcula-se a área da unidade:

$$A = Q_{\ell} / TAS \rightarrow A = (0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}) / (0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}) \rightarrow A = 2,4 \text{ m}^2 (D=1,75 \text{ m})$$

Sendo: rQ = 4, a vazão de exaustão será:

$$Q_g = rQ \times Q_{\ell} \rightarrow Q_g = 4 \times (0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}) \rightarrow Q_g = 2,4 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} (144 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$$

*Nota: Esta vazão de exaustão, contendo os gases residuais extraídos da CD, deverá ser direcionada para uma unidade de tratamento, conforme tratado no item seguinte.*

### 3.2.3 Tratamento dos gases residuais

Uma vez enclausurados, dessorvidos e exauridos, os gases residuais devem ser submetidos a um adequado tratamento. Devido à vasta experiência já adquirida em projetos e operação de sistemas em escala real, as técnicas mais utilizadas para o abatimento de odores e gases corrosivos em ETEs são: absorção físico-química; adsorção e biofiltração (BELLI FILHO *et al.*, 2001; NOYOLA *et al.*, 2006). Se a ETE contiver um sistema de lodo ativado para o pós-tratamento do efluente do reator UASB, uma possibilidade simples e econômica para o controle dos odores e gases corrosivos é o direcionamento do gás residual para o fundo do tanque de aeração. A biomassa aeróbia no tanque de aeração oxidará os sulfuretos e outros compostos odorantes. Outra possibilidade bastante econômica para o tratamento dos gases residuais é o seu envio para os queimadores de biogás. Nesse caso, o biogás será utilizado como combustível para a destruição dos compostos odorantes e corrosivos presentes nos gases residuais. Contudo, nesse caso deve-se atentar para as eficiências dos queimadores (ver item subsequente).

Dentre as técnicas físicas, químicas e biológicas supracitadas, os aspectos econômicos (custos de implantação, operação, manutenção, requisitos

de energia e de produtos químicos) são amplamente favoráveis ao uso de biofiltros (CHERNICHARO *et al.*, 2010; ESTRADA *et al.*, 2012). Por esse motivo, nesta NT são apresentados apenas os aspectos relacionados à biofiltração. Maiores detalhes a respeito dos processos de absorção físico-química e de adsorção podem ser obtidos em Kohl e Nielsen (1997), Belli Filho *et al.* (2001) e Stuetz e Frechen (2001).

O processo da biofiltração consiste em empregar um leito fixo de material de enchimento para o desenvolvimento de biomassa aderida (biofilme), através do qual o gás residual é insuflado em sentido ascendente ou descendente. Um grupo aeróbio de bactérias desenvolve-se no biofilme e converte o  $H_2S$  em  $S^0$  ou  $SO_4^{2-}$ . Para a formação e o crescimento do biofilme, o meio suporte frequentemente deve ser umidificado. O material de enchimento também tem como objetivo fornecer nutrientes para o crescimento dos microrganismos.

Os biofiltros podem ser classificados em três tipos principais: biofiltro não estruturado e com enchimento de fundo (escavado em solo) (Figura 6 (a-b)); biofiltro estruturado e com fundo falso (Figura 7 (a-b)); biofiltro pré-fabricado (Figura 8 (a-b)) (CHERNICHARO *et al.*, 2011).

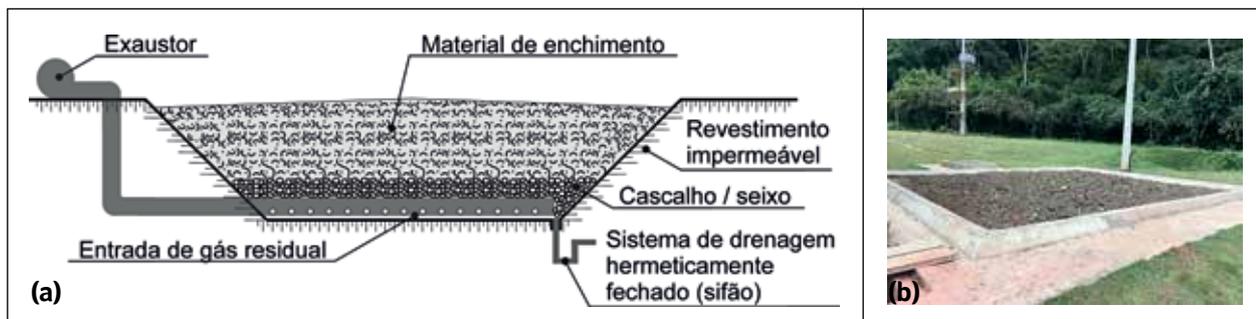


Figura 6 – Biofiltro não estruturado com enchimento de fundo: a) desenho esquemático; b) foto em uma ETE.

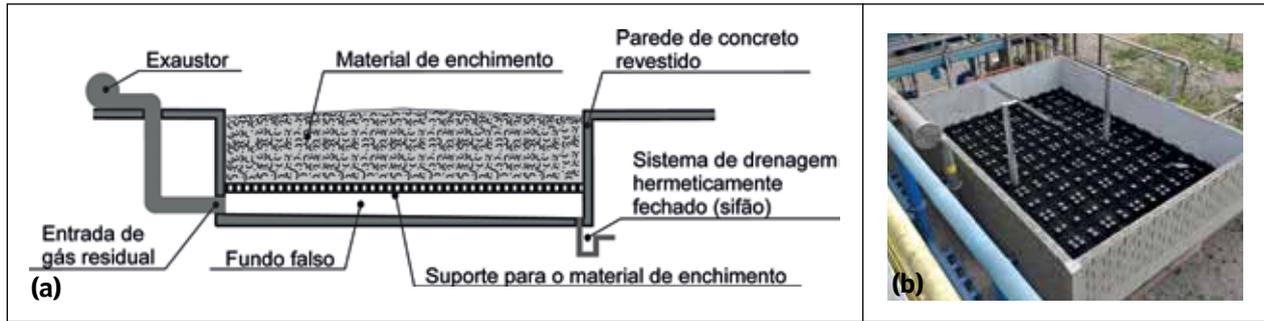


Figura 7 – Biofiltro estruturado e com fundo falso: a) desenho esquemático; b) foto em uma ETE.

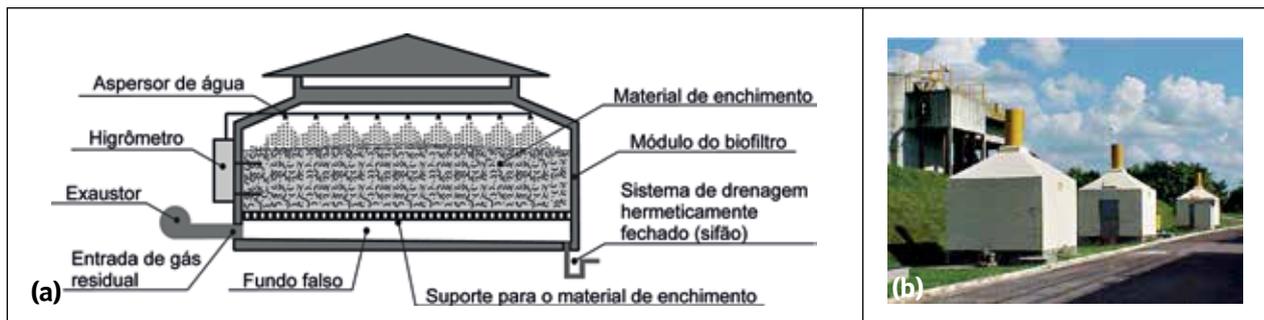


Figura 8 – Biofiltro pré-fabricado: a) desenho esquemático; b) foto em uma ETE.

Vários fatores afetam a biofiltração dos gases residuais contendo  $H_2S$ . A composição e o fluxo do gás residual, as características e a umidade dos materiais de enchimento são determinantes para o processo, embora outros fatores como o pH e a temperatura também desempenhem um papel fundamental. O dimensionamento do biofiltro é feito a partir de três parâmetros principais: i) tempo de contato do gás com o meio suporte; ii) taxa de aplicação superficial; e iii) carga volumétrica. A experiência prática mostra que, para o caso de tratamento de gases residuais de ETEs, a concentração do  $H_2S$  será muito baixa, assim como a carga volumétrica aplicada ao biofiltro. Dessa forma, os parâmetros que definirão as dimensões do biofiltro serão o tempo de contato do gás com o meio suporte e a taxa de aplicação superficial, ambos estritamente dependentes da vazão dos gases residuais. Maiores detalhes sobre a seleção de materiais de enchimento, parâmetros de dimensionamento e critérios de projeto dos biofiltros são apresentados na NBR 12.209 (ABNT, 2011), em Chernicharo *et al.*

(2011) e Souza *et al.* (2018). Caso seja de interesse o dimensionamento de um biofiltro para o abatimento do  $CH_4$  residual liberado a partir dos efluentes dos reatores UASB (assunto mais recente), o leitor poderá recorrer a Brandt (2016) e Souza *et al.* (2018). Se o interesse for o abatimento de odores e de  $CH_4$ , recomenda-se a instalação de dois biofiltros em série, sendo o primeiro destinado ao tratamento dos compostos odorantes e o segundo destinado ao tratamento do  $CH_4$ , já que as condições ácidas frequentemente encontradas em biofiltros de  $H_2S$  podem restringir a atividade de bactérias oxidadoras de  $CH_4$ .

### 3.2.4 Controle das emissões pontuais de odores e GEE

Os queimadores, geralmente chamados de *flares*, são essenciais em todas as ETEs anaeróbias. Em ETEs sem unidade de aproveitamento energético do biogás, o queimador exerce a função de reduzir

as emissões de GEE e de odores, a partir da combustão do CH<sub>4</sub> e dos compostos odorantes. No caso de ETEs com unidades de aproveitamento energético, o queimador deve ser instalado para o caso de excesso de produção de biogás ou de paralisações da unidade (BRASIL, 2017). De acordo com a pressão necessária do gás, os queimadores podem ser classificados em dois tipos: atmosféricos (8 mbar); ou a ar forçado (15 mbar). Os queimadores atmosféricos obtêm o ar de combustão do ambiente por autossucção, já para os queimadores a ar forçado, o ar de combustão é fornecido por um soprador (FNR, 2010). No que tange ao enclausuramento da chama, existem dois tipos

principais de queimadores: aberto; ou enclausurado (fechado). Em qualquer um dos casos, a ignição pode ser realizada por chama piloto ou fagulhamento com energia elétrica. As vantagens e desvantagens de cada tipo de queimador estão apresentadas na Tabela 4. Os requisitos e recomendações de segurança e demais informações mais específicas são encontradas no Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em ETEs (BRASIL, 2017), na NBR 12209 (ABNT, 2011), na Norma Alemã DWA\_M\_212 – Equipamento Técnico de Digestores Anaeróbios em ETEs (DWA, 2008; KAMINSKI *et al.*, 2018) e na Parte 5 desta Coletânea de NTs (POSSETTI *et al.*, 2018).

**Tabela 4** – Comparação entre tipos de queimadores de biogás

Queimador	Vantagens	Desvantagens
Aberto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apresenta menores custos de aquisição (até 20 vezes menores em relação ao queimador enclausurado).</li> <li>- Operação simples.</li> <li>- Apresenta boa dispersão dos gases de combustão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior área de exclusão.</li> <li>- Aplicável somente para menores vazões de biogás (&lt;7 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>).</li> <li>- Geralmente não é possível o monitoramento ou supervisão da queima (temperatura de queima, estabilidade da chama, vazão e tempo de residência do biogás etc.).</li> <li>- Baixas eficiências de destruição do CH<sub>4</sub> (&lt;50%) e de compostos odorantes.</li> </ul>
Enclausurado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maiores eficiências de destruição do CH<sub>4</sub> (&gt;98%) e de compostos odorantes (&gt;95% no caso do H<sub>2</sub>S).</li> <li>- Menor área de exclusão.</li> <li>- Possibilidade de controle e monitoramento do processo (medição de vazão de biogás e temperatura da queima; pontos para tomada de amostras de biogás e gases de combustão etc.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maiores custos de aquisição.</li> <li>- Maior complexidade operacional.</li> <li>- Baixa dispersão dos gases de combustão.</li> <li>- Pode ser necessário instalação de gasômetro para auxiliar na regularização da vazão de biogás enviado ao queimador.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de BRASIL (2017) e Kaminski *et al.* (2018).

### 3.2.5 Uso de materiais resistentes à corrosão e revestimentos anticorrosivos

No sentido de minimizar os problemas de corrosão nas linhas de coleta de biogás, os tubos e as conexões devem ser fabricados em aço inoxidável ou em plástico adequado. Devido à maior resistência à corrosão, é recomendada a utilização do aço AISI 316Ti (EN 1.4571) em vez do aço AISI 304 (EN 1.4301). A espessura mínima das paredes de tubos de aço inoxidável deve seguir o exigido pela norma ISO 4200 Série A (BRASIL, 2017). Tubos e conexões de polietileno de alta densidade (PEAD) são considerados adequados para a condução do biogás, ao contrário dos tubos e das conexões de PVC. No caso de utili-

zação do PEAD, devem ser empregados tubos condutores com resistência elétrica menor que 109 Ohm e coeficiente de expansão térmica de 0,20 mm.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> de forma a minimizar o risco de incêndio. Adicionalmente, devido à baixa estabilidade estrutural do plástico, destaca-se a importância da instalação de um número suficiente de suportes para mantê-los suspensos, de modo a evitar curvaturas e pontos indesejáveis de acúmulo de condensado (BRASIL, 2017).

O material mais frequentemente aplicado na construção de reatores UASB é o concreto. Contudo, deve-se empregar o revestimento interno das estruturas para proteção anticorrosiva, principalmente nas regiões que ficam acima do nível do líquido. O

separador trifásico, por estar localizado na parte superior do reator, está mais exposto à corrosão, devendo, portanto, ser fabricado em material mais resistente, ou revestido com maior rigor (CHERNICHARO, 2007). Destaca-se que, devido ao fato dos separadores trifásicos confeccionados em concreto terem proporcionado experiências negativas por problemas de vazamentos de gases e corrosão, adicionalmente ao elevado peso e volume de sua estrutura, materiais resistentes à corrosão e com menores volumes e pesos, a exemplo do polipropileno (PP) e do plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), têm sido alternativas que vêm ganhando importância nos últimos anos.

Para o caso de reatores construídos a partir do emprego do aço, o método de proteção anticorrosiva a partir de revestimentos é o mais difundido, sendo necessário o controle rigoroso dos revestimentos utilizados e/ou a utilização de aços especiais. É indicado o revestimento em tinta epóxi de alta espessura (>400 µm) aplicado após tratamento abrasivo da superfície. Os aços inoxidáveis que contêm molibdênio (AISI 316L) possuem melhor resistência à corrosão.

Já para reatores em concreto armado, o cuidado com a proteção anticorrosiva da estrutura deve existir desde o início da fase de construção da unidade, por meio da utilização de um concreto de resistência química adequada. Dessa forma, alguns aspectos devem ser considerados, visando atingir reduzidas taxas de absorção e de permeabilidade, tais como: utilização de um concreto com baixa relação água/cimento; vibração rigorosa do concreto; apropriado processo de cura; e escolha de um tipo de cimento adequado, a exemplo do Portland pozolânico (CHERNICHARO, 2007).

Ressalta-se que a não observância dos aspectos mencionados anteriormente, em termos de uma criteriosa especificação de materiais e técnicas executivas, pode conduzir a uma significativa redução da vida útil da estrutura de concreto, conforme

exposto a seguir: i) um elevado fator água/cimento promoveria a obtenção de uma estrutura com maior porosidade/capilaridade devido à saída da água não associada quimicamente (água adicionada somente para fornecer trabalhabilidade ao material), facilitando, por conseguinte, a entrada de agentes agressivos no concreto; ii) a vibração deficiente do concreto poderia resultar na obtenção de uma estrutura não homogênea (popularmente conhecida como “estrutura com presença de brocas”), o que poderia facilitar a penetração de água e gases no interior deste material e, por conseguinte, o ataque e a oxidação da armadura. Observa-se que os produtos da corrosão ocupam no interior do concreto volumes de 3 a 10 vezes o volume original do aço, originando tensões internas com valores superiores a 40 MPa (CÁNOVAS, 1988); iii) um inapropriado processo de cura produziria um concreto com a presença de fissuras devido a retração hidráulica. Estas, por sua vez, possibilitariam a penetração de água e gases e, novamente, o ataque e a oxidação da armadura; iv) o uso do tipo inadequado de cimento reduziria a resistência do concreto aos ataques químicos provenientes dos agentes agressivos presentes neste meio.

Adicionalmente, a aplicação de revestimentos resistentes a ácidos nas estruturas de concreto melhora ou inibe os efeitos da corrosão. A pintura do reator com borracha clorada (espessura mínima de 4 mm) ou epóxi betuminosa (espessura mínima de 400 µm) são possíveis soluções de revestimento (FORTUNATO *et al.*, 1998). A borracha clorada, apesar de apresentar menores custos, possui baixa resistência aos ácidos. Por outro lado, a pintura epóxi possui um custo mais elevado, mas apresenta melhor resistência aos ácidos, podendo ainda ser aplicada em menor número de demãos (FORTUNATO *et al.*, 1998). Mais recentemente, experiências de sucesso têm sido obtidas com a aplicação de poliuretanos elastoméricos, algumas vezes usados em conjunto com mantas de geotêxtil (p. ex.: Polibrid®/Zebron®) (Figura 9a). Também vem sendo aplicado com sucesso o PRFV para o revestimento de estruturas de concreto e de aço, conforme mostrado na Figura 9b.



**Figura 9** – Revestimento interno de reatores UASB: a) aplicação de Polibrid; b) aplicação de PRFV.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Deve-se reconhecer que as emissões gasosas (odores e gases de efeito estufa) e a possibilidade de corrosão são inerentes ao uso dos reatores UASB para o tratamento de esgoto. Contudo, conforme apresentado, é possível a utilização de técnicas efetivas que atuem no controle preventivo e corretivo desses aspectos. Há disponível no meio técnico e científico informações suficientes para a utilização dessas técnicas no projeto, na construção e na operação de reatores UASB. Destaca-se o elevado nível de produção técnica-científica aplicada a esses reais desafios, o que de certa forma é motivo de orgulho nacional e coloca o Brasil como um dos países mais maduros no uso da tecnologia anaeróbia de tratamento de esgoto. Nesse viés, é importante que em futuros projetos e em adequações de projetos já existentes, sejam considerados os principais avanços já alcançados no sentido do controle das emissões gasosas, para que o Brasil continue no patamar atual de liderança e disseminação do uso de reatores UASB para o tratamento de esgoto. Destaque pode ser dado aos seguintes pontos:

- Alguns cuidados no projeto (p. ex.: regime hidráulico de escoamento do esgoto, dispositivos para remoção de espuma, reatores UASB estanques a gases, materiais e estruturas resistentes à corrosão), e na operação das ETEs por processos anaeróbios (p. ex.: adição de agentes químicos, remoção de es-

cuma, gerenciamento adequado do lodo) podem minimizar ou até mesmo sanar muitos problemas relacionados às emissões fugitivas.

- A contenção de fontes emissoras e o tratamento dos gases residuais gerados podem ser indispensáveis quando se pretende o controle total dos odores. Entretanto, a garantia de controle e remoção do  $H_2S$  dissolvido nos efluentes dos reatores UASB só deve ser alcançada a partir do uso de câmaras de dessorção de gases a jusante dos reatores.
- Para o tratamento dos gases residuais gerados nas zonas confinadas e em câmaras de dessorção, a biofiltração apresenta-se como a técnica mais adequada se considerados os aspectos econômicos e de eficiência de tratamento.
- Na concepção dos separadores trifásicos e dispositivos de coleta e transporte de gases, deve-se optar pelo uso de materiais resistentes à corrosão, bem como atentar para aspectos de segurança relacionados ao risco de explosão.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfei-

çoamento 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 12209: **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2011. 57 p.

BELLI FILHO, P., COSTA, R. H. R., GONÇALVES, R. F., CORAUCCI FILHO, B.; LISBOA, H. M. **Tratamento de odores em sistemas de esgotos sanitários**. In: PROSAB/FINEP/CNPq (Ed.). Pós tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. 1ª ed. Belo Horizonte: Segrac Editora e Gráfica, 2001. p. 455-490.

BLANCO-RODRÍGUEZ, A., CAMARA, V.F., CAMPO, F., BECHERÁN, L., DURÁN, A., VIEIRA, V.D., LISBOA, H.M., GARCIA-RAMIREZ, A.R. Development of an electronic nose to characterize odours emitted from different stages in a wastewater treatment plant. **Water Research**, v. 134, p. 92-100, 2018.

BRANDT, E.M.F. **Biofiltração e biopercolação de metano presente em gases residuais gerados em processos anaeróbios**. 2016, 196 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

BRANDT, E.M.F., SOUZA, C.L., CHERNICHARO, C.A.L. Alternativas para o controle de odores e corrosão em sistemas de coleta e tratamento de esgoto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n.4, p.611-623, 2017.

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

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo, Pini, 1988.

CEN. **Air Quality - Determination of Odour Concentration by Dynamic Olfactometry, EN 13725 British Standard**. Brussels: European Committee for Standardization, 2003.

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., STUETZ, R. M., SOUZA, C. L., MELO, G. C. B. Alternativas para o controle de emissões odorantes em reatores

anaeróbios tratando esgoto doméstico. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 229-236, 2010.

CHERNICHARO, C. A. L., STUETZ, R. M., SOUZA, C. L., MELO, G. C. B. Contribuição para o projeto de biofiltros aplicados ao tratamento de emissões odorantes provenientes de reatores anaeróbios. **Revista DAE**, v. 186, n. 1767, p. 56-62, 2011.

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.

COOKNEY, J., CARTMELL, E., JEFFERSON, B., MCADAM, E.J. Recovery of methane from anaerobic process effluent using polydimethylsiloxane membrane contactors. **Water Science & Technology**, v. 33, n. 5 p. 604-610, 2012.

COOKNEY, J., MCLEOD, A., MATHIOUDAKIS, V., NCUBE, P., SOARES, A., JEFFERSON, B., MCADAM, E.J. Dissolved methane recovery from anaerobic effluents using hollow fibre membrane contactors. **Journal of Membrane Science**, v. 502, n. 15, p. 141-150, 2016.

DWA. M 212 - **Equipamento técnico de usinas de biogás de esgoto em ETEs**. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef 2008.

ESTRADA, J. M., KRAAKMAN, N. J. R., LEBRERO, R., MUÑOZ, R. A sensitivity analysis of process design parameters, commodity prices and robustness on the economics of odour abatement technologies. **Biotechnology Advances**, v. 30, n. 6, p. 1354-1363, 2012.

FNR. **Guia Prático do Biogás – Geração e Utilização**. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Leipzig, 2010.

FORTUNATO, C. M., GOMES, C. S., ANDREOLI, F. N., AISSE, M. M. **Monitoramento de reatores anaeróbio tipo RALF – Relatório n. 5: Agressividade de sulfetos ao concreto dos RALFs**. Pontifícia Universidade Católica do Paraná – Instituto de Saneamento Ambiental, 1998.

GARCIA, G. P. P. **Caracterização dos microrganismos oxidadores de sulfeto e metano em reator UASB**. 2009. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

GLÓRIA, R. M., MOTTA, T. M., SILVA, P. V. O., COSTA, P., BRANDT, E. M. F., SOUZA, C. L., CHERNICHARO, C. A. L. Stripping and dissipation techniques for the removal of dissolved gases from anaerobic effluents. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 33, n. 3, p. 713-721, 2016.

GLÓRIA, R. M. **Estudo da remoção dos gases metano e sulfeto de hidrogênio dissolvidos em efluentes de reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2018. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

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:Universitat Stuttgart, UFPR, SENAI e ABES-PR, 2018.

KOHL, A., NIELSEN, R. **Gas Purification**. 5ª ed. Houston: Gulf Publishing Company, 1997. 1395 p.

LISBOA, H.M., PAGE, T., GUY, C. Gestão de odores: fundamentos do nariz eletrônico. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, p.9-18, 2009.

LISBOA, H.M., ELLER, M.Q., BELLI FILHO, P., CARMO JR, G.N.R., SCHIRMER, W.N., HOINASKI, L., Oliveira, V.V., CAMARA, V.F., GO-DKE, M. **Metodologias Olfatometricas para a Avaliaao do Impacto Odovente**. 1ª ed. Florianópolis: prefixo editorial junto a Biblioteca Nacional: 913483, 2010. 48p.

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

MACHADO, L. M. **Avanos na aplicaao de câmaras de dessorao para a remoao e recuperaao dos gases metano e sulfeto de hidrogenio dissolvidos em efluente de reator UASB no tratamento de esgoto doméstico**. 2018. Dissertaao (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

METCALF, L., EDDY, H. P. **Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse**. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2016. 1980 p.

MIRANDA, G.A. **Dispersao atmosférica de sulfeto de hidrogenio emitido pela estaao de tratamento de esgoto do ribeirao do Ona em Belo Horizonte/MG**. 2017. Trabalho de Conclusao de Curso. (Graduaao em Engenharia Ambiental e Sanitária). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

NELTING, K., CAICEDO, C., WEICHGREBE, D., ROSENWINKEL, K.-H. Influence of UASB reactor configuration and operation conditions on the dissolved methane quantities in the effluent. In: **14th World Congress on Anaerobic Digestion** – AD14, 2015, Via del Mar, Chile. **Proceedings...** Via del Mar, Chile: International Water Association – IWA, 2015.

NELTING, K., TRAUTMANN, N. DiMeR (Dissolved Methane Recovery) – Vorrichtung zur Ruckgewinnung von gelostem Methan in anaerob behandelten Abwassern. Bundesministerium für Bildung und Forschung, FKZ: 02WQ1374A, 2015.

NELTING, K., TRAUTMANN, N., CAICEDO, C., WEICHGREB, 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 2017, 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., RIETOW, J. C., COSTA, F. J. O. G., WAGNER, L. G., LOBATO, L.C.S., BRESSANI-RIBEIRO, T., MELO, D. F., REIS, J.A., CHERNICHARO, C. A. L. Contribuiao para o aprimoramento de projeto, construao e operaao de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 5: Biogas e emissoes fugitivas de metano. **Revista DAE** – ediao especial, v. 66, n. 214, p. 73-89, 2018.

SANTO, B. C. E. **Estudo do desenvolvimento da câmara de dessorao e remoao de metano e sulfeto de hidrogenio dissolvido em efluente de reator UASB tratando esgoto doméstico**. 2017. Dissertaao (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SOUZA, C. L., SILVA, S. Q., AQUINO S. F., CHERNICHARO C. A. L. Production and characterization of scum and its role in odour control in UASB reactors treating domestic wastewater. **Water Science & Technology**, v. 54, n. 9, p. 201-208, 2006.

SOUZA, C. L. **Estudo das rotas de formaao, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogenio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB**. 2010, 127 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

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.

SOUZA, C. L., CHERNICHARO, C., MELO, G. Methane and hydrogen sulfide emissions in UASB reactors treating domestic wastewater. **Water Science & Technology**, v. 65, n. 7, p. 1229-1237, 2012.

SOUZA, C. L., CHERNICHARO, C. A. L., BRANDT, E. M. F., POSSETTI, G. R. C. Subprodutos gasosos do tratamento de esgoto. In: SANTOS, A. B. (org.) **Caracterizaao, tratamento, e gerenciamento de subprodutos de correntes de esgotos segregados e no segregados em empreendimentos habitacionais**. Fortaleza:Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizados – RENTED, 2018. FINEP/CNPq.

STUETZ, R. M., FRECHEN, F. B. **Odours in Wastewater Treatment: measurement, modelling and control**. 1 ed. London: IWA Publishing, 2001. 456 p.

WEF. **Control of odors and emissions from wastewater treatment plants. Manual of Practice 25**. 1 ed. Alexandria: Water Environment Federation, 2004. 566 p.

# 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.

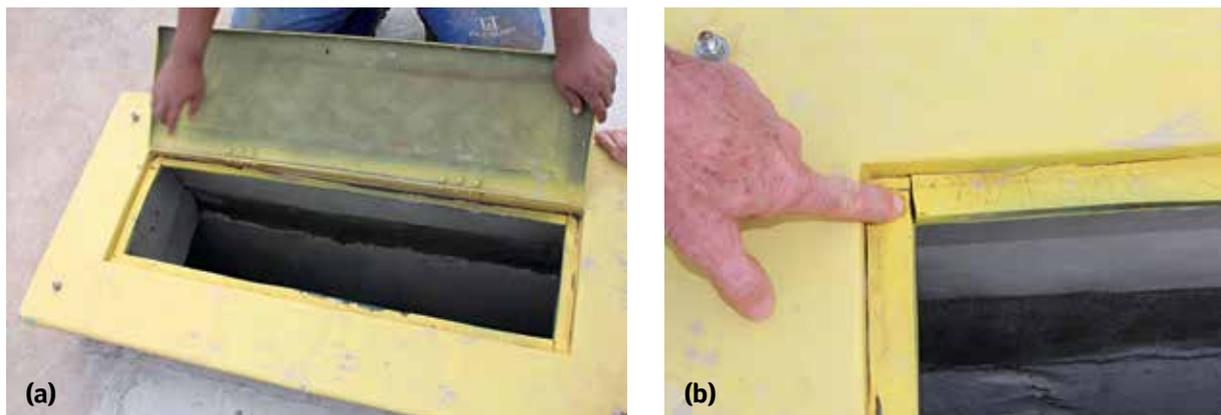
É comum encontrar STFs confeccionados em lonas, a maioria de policloreto de polivinila (PVC), as quais são normalmente fixadas nas estruturas de concreto dos reatores por suportes de alumínio. Devido ao acúmulo de lodo no compartimento de decantação do reator ou ao espessamento da espuma na parte interna 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,

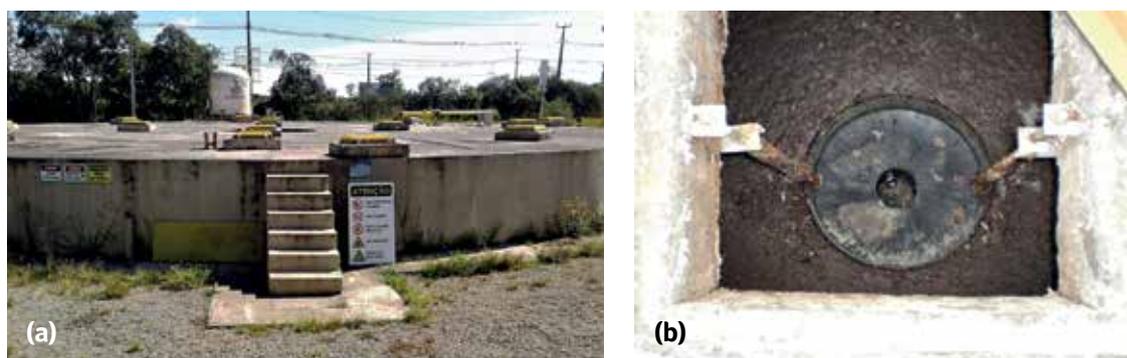
por exemplo, de problemas de cura do concreto e orifícios, eventualmente ocasionados pelo mau acabamento de agulhas de travamento de formas durante a concretagem.

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 CH<sub>4</sub> dissolvida no efluente

A quantificação do CH<sub>4</sub> no biogás é de suma importância para a viabilização do seu aproveitamento energético. Entretanto, verifica-se que existem grandes perdas de CH<sub>4</sub> dissolvido no efluente de reatores UASB tratando esgoto sanitário. Em estudo realizado por Souza *et al.* (2011), foram registradas concentrações de CH<sub>4</sub> dissolvi-

do no efluente variando entre 17 e 22 mg.L<sup>-1</sup>, 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 CH<sub>4</sub> 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).

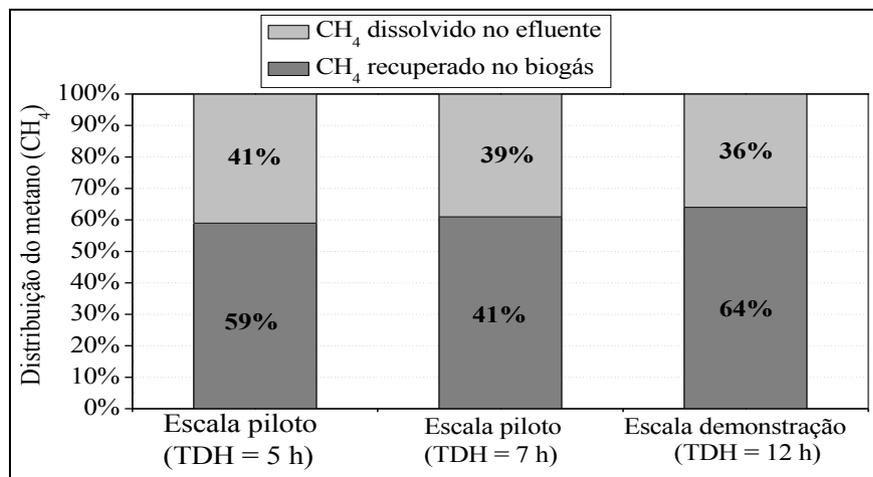


Figura 4 – Perdas de CH<sub>4</sub> dissolvido em efluente de reatores UASB e recuperado no biogás.

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 ( $\text{CH}_4$ ) e odorantes ( $\text{H}_2\text{S}$ ). 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 CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>S

A recuperação do CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>S 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 H<sub>2</sub>S também se aplicam para as emissões fugitivas de CH<sub>4</sub>. 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 anaeróbico é coletado no interior do compartimento de decantação, uma vez que, segundo Nelting *et al.* (2017), quanto maior a profundidade no interior do reator anaeróbico, maior a concentração de CH<sub>4</sub> dissolvido. O sistema de recuperação de CH<sub>4</sub> 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 CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>S 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 CH<sub>4</sub> 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 CH<sub>4</sub> 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"> <li>• Bons resultados em baixa pressão;</li> <li>• Sem partes móveis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longa distância linear de medição necessária;</li> <li>• Elevado custo.</li> </ul>
Medidor vórtex	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sem partes móveis;</li> <li>• Elevada acurácia;</li> <li>• Resistente à corrosão;</li> <li>• Baixa perda de carga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longa distância linear de medição necessária;</li> <li>• Necessitam de medições complementares de temperatura e pressão.</li> </ul>
Medição por meio de pressão dinâmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada durabilidade;</li> <li>• Pouca influência de gases sujos;</li> <li>• Variações de pressão não têm influência negativa na acurácia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabalha melhor em alta pressão;</li> <li>• Difícil calibração;</li> <li>• Erro de 1,5 a 5%;</li> <li>• Longa distância de medição.</li> </ul>
Fluidistor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sem partes móveis;</li> <li>• Elevada acurácia;</li> <li>• Baixo custo;</li> <li>• Fácil de limpar, manusear e trocar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cálculo complexo de vazão;</li> <li>• Erro de 1,5%;</li> <li>• Sensível a vibrações.</li> </ul>
Medidor de turbina	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo de investimento;</li> <li>• Tecnologia de medição simples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depósitos causam problemas;</li> <li>• Manutenção onerosa e rotineira;</li> <li>• Baixa resolução.</li> </ul>
Medidor mássico por dispersão térmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil instalação;</li> <li>• Baixo custo de investimento;</li> <li>• Baixa perda de carga;</li> <li>• Recomendado para controle de processo e levantamento de potenciais;</li> <li>• Medições precisas até em flutuações de pressão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensível à umidade e às partículas do gás;</li> <li>• Longa distância linear de medição necessária;</li> <li>• Calibração necessita de gás padrão;</li> <li>• Caso o fluido tenha a sua composição variável ao longo da medição, a sua vazão deve ser corrigida.</li> </ul>

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 CH<sub>4</sub>, uma vez que ele define o potencial

de recuperação energética. Adicionalmente, a obtenção da concentração de CH<sub>4</sub> pode servir de base para a supervisão e controle do processo de degradação anaeróbia ocorrida no interior do reator. Os teores de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e O<sub>2</sub> 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  $\text{CH}_4$  e de  $\text{CO}_2$  e as células eletroquímicas na medição dos teores de  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{O}_2$ .

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  $\text{CH}_4$  produzido: 6,8 a 13,7  $\text{NL.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$  e 42,2 a 81,3  $\text{NL.m}^{-3}$ esgoto.
- Volume unitário de biogás produzido: 9,8 a 17,1  $\text{NL.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$  e 60,3 a 101,6  $\text{NL.m}^{-3}$ esgoto.
- Potencial energético unitário: 0,4 a 0,8  $\text{kWh.m}^{-3}$  esgoto e 7,0 a 8,0  $\text{kWh.Nm}^{-3}$ 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  $\text{CH}_4$  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.

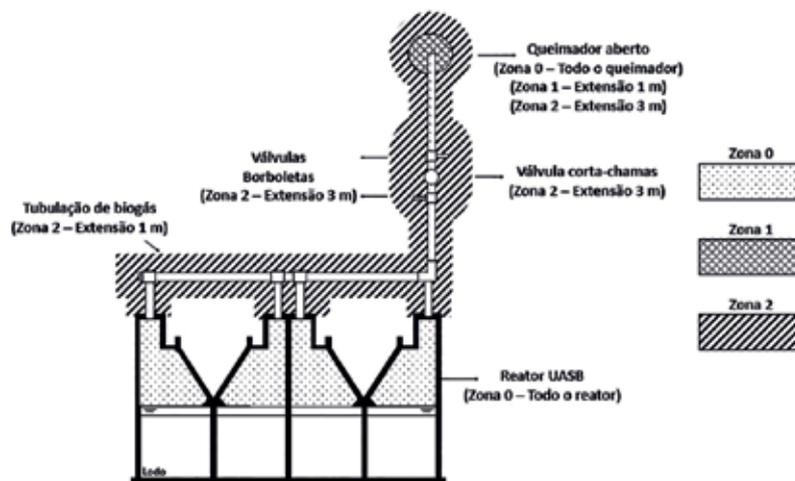
As áreas classificadas como atmosferas explosivas devem ser divididas em zonas de riscos, as quais são baseadas na frequência de ocorrência e duração de uma atmosfera explosiva. Desse modo, as zonas podem ser divididas em (NBR IEC 60079-10-1 - ABNT, 2009): i) zona 0 - área na qual uma atmosfera explosiva 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 CH<sub>4</sub> 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

# Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 6: Qualidade do efluente

*Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage – Part 6: Effluent quality*

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

Paulo Gustavo Sertório de Almeida / Thiago Bressani Ribeiro / Bruno Sidnei da Silva / Lariza dos Santos Azevedo / Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (\*)

DOI: 10.4322/dae.2018.043

## Resumo

A qualidade do efluente de estações de tratamento de esgoto que possuem reatores UASB como parte integrante do tratamento biológico do esgoto depende essencialmente de aspectos de projeto, construção e operação que permitam o necessário gerenciamento do lodo anaeróbio, bem como a adequada operação da etapa de pós-tratamento por processos aeróbios. A presente Nota Técnica essencialmente apresenta um *conteúdo complementar* à Parte 3 desta Coletânea de Notas Técnicas, no sentido de discutir a origem de problemas e os possíveis aprimoramentos de projeto, construção e operação para reatores UASB seguidos de etapa de pós-tratamento por filtros biológicos percoladores. São discutidos: i) aspectos de projeto e operação que influenciam a perda de sólidos com o efluente anaeróbio, incluindo a influência do envio do lodo aeróbio a reatores UASB; ii) aspectos associados aos requisitos de lançamento em corpos receptores; e iii) deficiências em unidades de pós-tratamento por filtros biológicos percoladores. Especial atenção é dada: i) aos aspectos de sistematização operacional para o controle do lodo no sentido de evitar a perda de sólidos com o efluente; ii) à remoção de matéria orgânica, visando o atendimento a padrões de lançamento; e iii) a fatores que podem influenciar o desempenho de filtros biológicos percoladores pós-reatores UASB.

**Palavras-chave:** Melhoria da qualidade do efluente; sistematização operacional; pós-tratamento.

## Abstract

*The effluent quality of sewage treatment plants comprised by UASB reactors essentially depends on design, construction and operational aspects that allow the necessary management of the anaerobic sludge, as well as the appropriate*

**Paulo Gustavo Sertório de Almeida** – Engenheiro Civil pela UFJF. Mestre e Doutor 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.

**Bruno Sidnei da Silva** – Engenheiro Ambiental pela UFSC. Mestre em Engenharia Hidráulica e Ambiental pela EPUSP. Engenheiro da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp).

**Lariza dos Santos Azevedo** – Engenheira Ambiental e Sanitarista pela UFJF. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

**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 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

operation of the aerobic post-treatment step. This Technical Note is a complementary material to Part 3 of these Technical Notes series aiming to present the problems and their respective origins, as well as the possible improvements of design, construction and operation of UASB reactors followed by trickling filters (TF). The discussed topics are: i) design and operation aspects that affect solid washouts in UASB effluent, including the influence of aerobic sludge return, ii) the compliance to discharge standards, and iii) deficiencies related to the post-treatment step. Special attention is given to: i) operational control of the sludge in order to avoid solids washouts; ii) organic matter seeking to comply with discharge standards; and iii) factors influencing the performance of trickling filters following UASB reactors. **Keywords:** Effluent quality improvement; operational control; post-treatment.

## 1 INTRODUÇÃO

Conforme discutido no conjunto de Notas Técnicas (NTs) que compõem a presente Coletânea, a qualidade do efluente final de reatores UASB é influenciada por aspectos de projeto, construção e operação, os quais podem afetar também a etapa de pós-tratamento. Neste caso, o controle da **perda de sólidos com o efluente anaeróbio** é um aspecto crucial para o desempenho global do sistema. Na presente NT, maior destaque é dado aos filtros biológicos percoladores (FBP), por se tratarem da alternativa de pós-tratamento mais empregada nas ETEs brasileiras que utilizam reatores anaeróbios como primeiro estágio do tratamento (CHERNICHARO *et al.* 2018a). Todavia, devido à importância do envio de lodo aeróbio proveniente da etapa de pós-tratamento para adensamento e digestão nos reatores UASB, também os sistemas de lodo ativado são contextualizados nessa NT.

A sistematização operacional de reatores UASB, em termos do controle da perda de sólidos com o efluente, depende em grande parte de **definições de projeto**, a exemplo da previsão e detalhamento de adequados sistemas de descarte de lodo e de espuma. Da mesma forma, a compatibilização da **produção efetiva de lodo** na ETE com o dimensionamento das **unidades de gerenciamento da fase sólida** é importante condicionante para o sucesso operacional de sistemas com reatores UASB seguidos de etapa de pós-tratamento. Consecutivamente, a **elaboração e a implementação efetiva**

de protocolos de descarte de lodo e de espuma são etapas da maior relevância para a operação bem sucedida das unidades que compõem a ETE.

Quanto à influência da operação da etapa de pós-tratamento na qualidade do efluente do reator UASB e nas unidades de gerenciamento da fase sólida, em que pesem as vantagens associadas ao envio do lodo aeróbio para adensamento e digestão em reatores UASB, esta estratégia tem sido apontada como uma das causas da perda de sólidos com o efluente. A presença excessiva de sólidos no efluente anaeróbio tende a promover maior resistência à transferência de massa em sistemas com biofilme, bem como redução no tempo de residência da biomassa aeróbia em sistemas de lodo ativado. Em casos extremos, a colmatção de leitos de pedra em FBPs pela elevação da carga de sólidos encaminhada com o efluente anaeróbio tem sido observada. No caso do pós-tratamento por lodo ativado, a perda excessiva de sólidos com o efluente dos reatores UASB, associada a uma baixa capacidade de remoção do lodo aeróbio excedente, refletem nos requisitos de oxigênio no tanque de aeração e no consumo de energia.

Embora o controle da perda de sólidos com o efluente anaeróbio a partir do gerenciamento adequado do lodo seja um importante fator para a qualidade do efluente de reatores UASB, outros aspectos são também considerados relevantes para o atendimento a padrões de qualidade. So-

brecargas hidráulicas ou picos de vazão em virtude do aporte de águas pluviais ou falhas na operação de elevatórias são exemplos de fatores intervenientes que devem ser considerados. Adicionalmente, a remoção de nitrogênio, fósforo e surfactantes não é esperada em reatores UASB. Neste caso, a etapa de pós-tratamento pode ser necessária não somente para o polimento do efluente em termos de concentrações de matéria orgânica. Contudo, deficiências e falhas operacionais em relação às unidades de pós-tratamento podem comprometer sobremaneira o desempenho global do sistema.

Considerando os aspectos anteriormente reportados, a presente NT discute a origem de problemas e os possíveis aprimoramentos associados a projeto, construção e operação de reatores UASB, incluindo a etapa de pós-tratamento por FBPs. Uma vez que vários aspectos para aprimoramento de projeto e operação de reatores UASB foram contextualizados na Parte 3 desta Coletânea de NTs (LOBATO *et al.*, 2018), neste documento a abordagem sobre o controle do lodo assume um *caráter complementar* em relação a: i) aspectos de projeto e operação que influenciam a perda de sólidos no efluente anaeróbio, considerando o envio de lodo aeróbio para reatores UASB; ii) aspectos associados ao não atendimento aos requisitos de lançamento em corpos receptores; e iii) deficiências em unidades de pós-tratamento.

## 2 ORIGEM E PROBLEMAS RELACIONADOS À PERDA DE SÓLIDOS NO EFLUENTE ANAERÓBIO

### 2.1 Excesso de lodo no interior dos reatores UASB

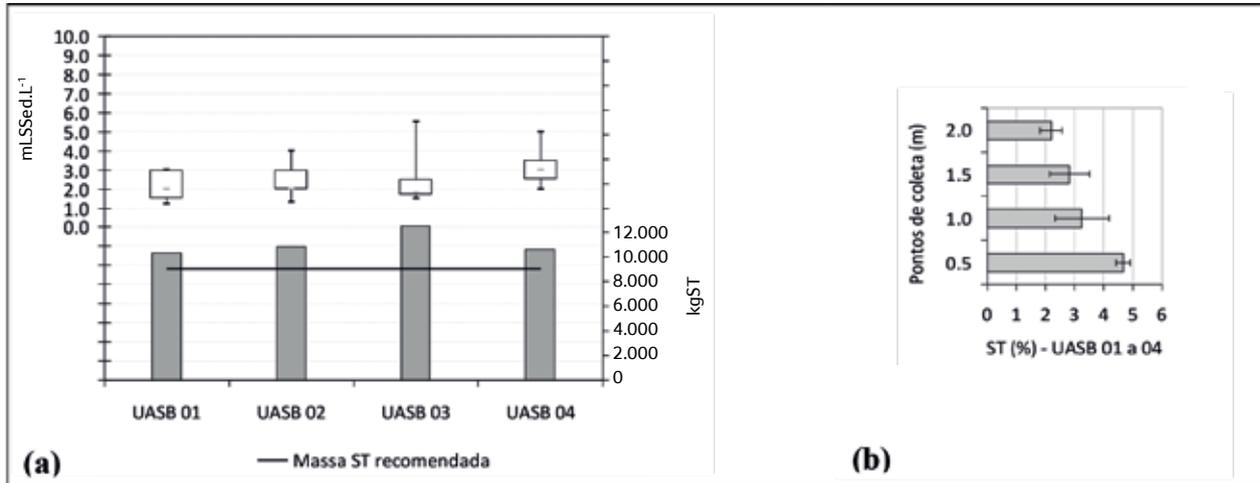
Conforme abordado na Parte 3 desta Coletânea de NTs (Lobato *et al.*, 2018), a fim de se evitar a perda indesejada de sólidos junto ao efluente anaeróbio, deve-se manter a massa de lodo no interior do reator UASB limitada a **um valor má-**

**ximo**, dependente da capacidade de retenção de lodo no mesmo. Concomitantemente a uma massa máxima que o reator consegue armazenar, também a concentração de lodo no ponto mais elevado do compartimento de digestão deve ser baixa (inferior a 0,5 % ST).

A título de exemplo, na Figura 1a são apresentadas as massas de lodo e as concentrações de sólidos sedimentáveis no efluente de quatro reatores UASB de mesmo volume que integram uma ETE em escala plena. Por sua vez, na Figura 1b são apresentadas as concentrações de lodo (sólidos totais - ST) ao longo da altura do compartimento de digestão dessas mesmas quatro unidades. Nota-se que todos os reatores estão com massa de lodo acima da máxima recomendada, definida especificamente para os quatro reatores em questão como da ordem de 9.000 kgST (Figura 1a). Adicionalmente, também as concentrações de lodo no ponto de amostragem mais elevado, a 2,0 m do fundo dos reatores, estão acima de 0,5 % ST (da ordem de 2,5 % ST - Figura 1b).

Como resultado, verifica-se que todos os quatro reatores UASB apresentam elevadas concentrações de sólidos sedimentáveis no efluente (medianas variando entre 2 e 3 mL.L<sup>-1</sup> - Figura 1a), o que confirma que esses reatores estão com massas de lodo acima de suas capacidades de armazenamento. Cabe ressaltar que reatores UASB operados adequadamente (sem excesso de lodo) potencialmente produziram efluentes com concentrações de sólidos sedimentáveis abaixo de 1 mL.L<sup>-1</sup>.

A origem do problema de excesso de lodo encontra-se possivelmente relacionada aos seguintes aspectos: i) falta de capacidade da unidade de desaguamento para receber o lodo de descarte anaeróbio; e/ou ii) falta de protocolos sistematizados de descartes.



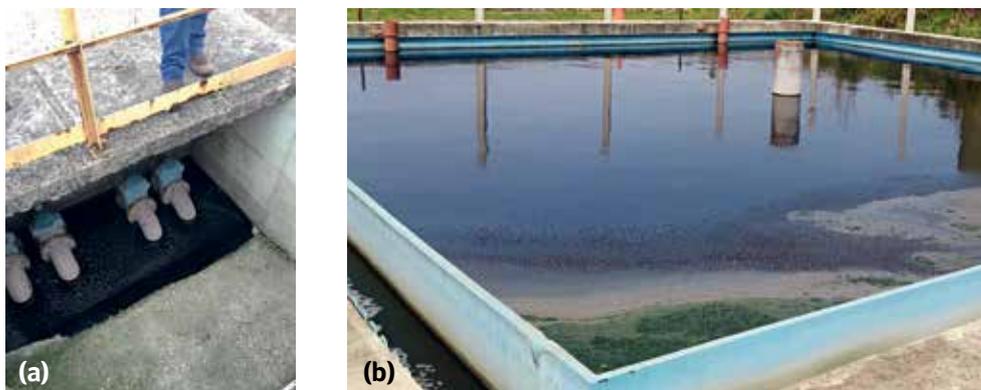
**Figura 1** – a) Relação entre massa de lodo (kgST) no compartimento de digestão e concentração de sólidos sedimentáveis no efluente dos reatores UASB (mL.L<sup>-1</sup>); b) perfil de sólidos ao longo da altura do compartimento de digestão dos reatores UASB.

## 2.2 Rotina inadequada de envio de lodo aeróbio para reatores UASB

Conforme apresentado na Parte 3 desta Coletânea de NTs (LOBATO *et al.*, 2018), o envio do lodo aeróbio excedente para adensamento e digestão em reatores UASB tem sido apontado como uma das causas da perda de sólidos no efluente desses reatores. Existem vários relatos de operadores de ETEs que associam essa perda de sólidos às características do lodo aeróbio, que supostamente teria composição diferente do lodo anaeróbio e, portanto, tenderia a flotar e ser perdido com o efluente do reator UASB. Por outro lado, estudos criteriosos em duas ETEs em escala plena indicaram boas características de sedimentabilidade do lodo aeróbio enviado para os reatores UASB (CHERNICHARO *et al.*, 2013; FLORIPEZ, 2015) e apontaram que a causa da perda de sólidos no efluente anaeróbio estaria mais associada à ausência de um protocolo adequado de gerenciamento de lodo na ETE, envolvendo tanto o descarte de lodo dos reatores UASB, quanto o envio de lodo aeróbio das unidades de pós-tra-

tamento para adensamento e digestão nos reatores anaeróbios.

Ratifica esse entendimento o fato de que diversas ETEs apresentam sérias dificuldades no gerenciamento do lodo, sendo bastante comum a ocorrência de significativos passivos de lodo tanto nos reatores UASB como nos decantadores secundários das unidades de pós-tratamento. No caso particular dessas últimas, é comum encontrar concentrações muito elevadas de ST na etapa de decantação secundária (~ 4,0 %), muito acima das concentrações previstas em projeto (< 1,0 %). Embora tal condição pareça improvável, essa realidade tem sido observada com recorrência, muito possivelmente pela contribuição expressiva da parcela de lodo perdida no efluente anaeróbio que acaba chegando ao decantador secundário (DS), mais particularmente no caso de DS pós-FBPs. Uma indicação de que se trata de acúmulo de lodo anaeróbio nos decantadores secundários é a nítida produção de gases na superfície dessas unidades. Na Figura 2 é apresentado o aspecto do acúmulo excessivo de lodo anaeróbio em um DS pós-FBP.



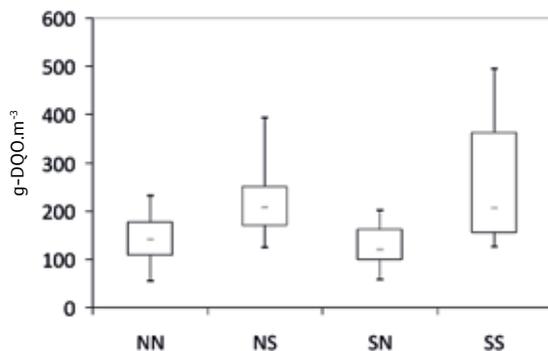
**Figura 2** – a) Lodo negro e concentrado descartado de DS pós-FBP; b) Lodo flotado e bolhas de gás na superfície de DS pós-FBP.

Entre as possíveis razões para o excessivo acúmulo de lodo anaeróbico nos DS pode-se citar: i) falta de capacidade instalada das unidades de desagüamento (mecanizadas ou por leito de secagem); ii) longos períodos de manutenção das unidades mecanizadas de desagüamento e/ou limpeza de leitos de secagem, o que impossibilita o descarte de lodo excedente; e iii) dificuldades logísticas associadas ao encaminhamento do lodo para a disposição final.

Face ao exposto, com vistas a eliminar o passivo de lodo acumulado nos DS, as vazões de lodo enviadas aos reatores UASB devem ser significativamente maiores (cerca de quatro vezes mais elevadas) em comparação às vazões que seriam praticadas se o lodo nos DS tivesse a concentração prevista em projeto, inferior a 1,0 %. Adicionalmente, estas vazões de envio de lodo são muitas vezes praticadas em bateladas tipicamente curtas (da ordem de poucas horas), muitas vezes coincidentes com momentos de vazões afluentes de esgoto mais elevadas, o que tende a ocasionar: i) incremento das velocidades ascensionais nos reatores UASB, o que, por sua vez, pode impactar na maior perda de sólidos com o efluente; e ii) redução significativa na capacidade de armazenamento de lodo nos reatores UASB, em função da

sobrecarga de sólidos recebida. Portanto, caso não ocorra a remoção concomitante dos passivos de lodo nos DS e nos reatores UASB, este lodo acabará por retornar, de forma cíclica, aos FBPs, aos DS e, por fim, novamente aos reatores UASB.

Um exemplo prático que demonstra o impacto do envio de lodo aeróbico proveniente de sistema de lodo ativado para reatores UASB, em decorrência do inadequado gerenciamento de lodo nos reatores anaeróbios, é apresentado a seguir: a partir de concentrações de demanda química de oxigênio (DQO) efluentes de um reator UASB obtidas para diferentes cenários operacionais (Figura 3), observa-se que quando o lodo de fundo do reator UASB não foi removido do compartimento de digestão (condições NN e SN), o envio do lodo aeróbico para o reator UASB praticamente não exerceu influência na qualidade do efluente anaeróbico. Quando a remoção de lodo de fundo do reator UASB foi efetuada, houve incremento das concentrações efluentes de DQO, mesmo sem o envio do lodo aeróbico (condição NS). Após o envio do lodo, uma maior variabilidade das concentrações de DQO (condição SS) foi observada. Ressalta-se que as mesmas tendências para concentrações de sólidos suspensos totais (SST) foram notadas.



**Figura 3** – Influência do envio de lodo aeróbio e descarte do lodo anaeróbio de fundo nas concentrações efluentes de DQO e SST do reator UASB. As siglas N (não); S (sim) se referem ao envio de lodo aeróbio para o reator UASB e remoção de lodo de fundo do UASB, respectivamente.

Fonte: Adaptado de Silva (2018).

Em última análise, o estudo de caso com sistemas UASB seguido por lodo ativado mostra que o sucesso operacional do envio do lodo aeróbio depende de dois aspectos: i) compatibilidade entre critérios operacionais para o controle da idade do lodo no tanque de aeração e para o envio do lodo aeróbio; e ii) sistematização operacional para o descarte de lodo de excesso de reatores UASB visando a manutenção do lodo de maior sedimentabilidade no fundo da unidade.

### 2.3 Estratégia de controle da idade do lodo aeróbio em sistema de lodo ativado

A remoção do lodo aeróbio excedente para o controle da idade do lodo nos sistemas de lodo ativado pode ser realizada por meio de duas alternativas: i) pela remoção de fração do lodo ativado diretamente do tanque de aeração (opção conhecida como “descarte hidráulico”); ou ii) pela remoção de fração do lodo sedimentado nos decantadores secundários. As duas alternativas apresentam vantagens e desvantagens em relação ao controle da idade do lodo no tanque de aeração e encaminhamento do lodo aeróbio excedente aos reatores UASB para adensamento e digestão.

- *Envio do lodo aeróbio excedente diretamente do tanque de aeração.* Com o uso dessa alternativa, a concentração de descarte é a própria concentração de sólidos no tanque de aeração. Neste caso, o controle da idade do lodo torna-se mais simples, sendo uma razão entre o volume do reator (tanque de aeração) e o volume de lodo removido diariamente. Tendo em vista que o lodo aeróbio excedente é encaminhado para o reator UASB a partir do tanque de aeração, o volume de lodo encaminhado tende a ser maior (cerca do dobro), em comparação com a estratégia de envio do lodo aeróbio de excesso a partir dos decantadores secundários.

- *Envio de fração do lodo sedimentado nos decantadores secundários.* Neste caso, o controle da idade do lodo é efetuado a partir da concentração de sólidos em suspensão voláteis no tanque de aeração e no lodo sedimentado nos decantadores secundários (lodo de recirculação). Apesar da maior complexidade para a determinação da idade do lodo, o lodo excedente é encaminhado para os reatores UASB a partir da linha de recirculação dos decantadores secundários e, portanto, em menor volume, tendo em vista a maior concentração em termos de sólidos.

Portanto, o critério adotado para o controle da idade do lodo no tanque de aeração altera o volume de lodo aduzido aos reatores UASB para adensamento e digestão. O encaminhamento de maiores volumes de lodo aos reatores UASB pode exercer influência na qualidade do efluente anaeróbio, principalmente durante os picos de vazão afluente à ETE.

Ressalta-se, no entanto, que qualquer que seja a alternativa adotada, caso o lodo excedente aeróbio enviado para os reatores UASB seja arrastado para a superfície e perdido com o efluente do reator, isso causará um descontrole da idade do lodo ativado, pois parte do lodo considerada retirada do processo acaba voltando para o tanque de aeração.

#### 2.4 Fuga de gases do interior do Separador Trifásico (STF) para o compartimento de decantação

Tal como caracterizado na Parte 3 desta Coletânea de NTs (LOBATO *et al.*, 2018), a não remoção sistemática da camada de espuma que se acumula no interior do separador trifásico pode levar ao espessamento e solidificação do material acumulado. Isso acarreta em bloqueio parcial ou integral da interface de liberação dos gases formados durante a digestão anaeróbia. Dessa forma, o fluxo gasoso que ingressaria à câmara de gás do separador trifásico tende a escapar para o compartimento de decantação de reatores UASB, ocasionando o arraste de sólidos que retornariam ao compartimento de digestão, comprometendo, por consequência, a qualidade do efluente anaeróbio em termos da concentração de SST. Em sistemas que empregam unidades de pós-tratamento, a frequente sobrecarga de sólidos pode resultar em problemas de entupimentos/colmatação, especialmente em reatores de biomassa aderida (p.ex. filtros biológicos percoladores e *wetlands*). A utilização de separadores trifásicos equipados com dispositivo de remoção de espuma (a exemplo do mecanismo hidrostático proposto por Lobato *et al.* (2018)) é crucial para a mitigação da fuga de gases do interior do STF para o compartimento de decantação de reatores UASB.

#### 2.5 Desnívelamento de vertedores e acúmulo de espuma na superfície de decantadores

O desnívelamento de vertedores instalados nas canaletas de saída do efluente anaeróbio é um importante fator para o acúmulo de espuma na superfície do compartimento de decantação de reatores UASB. Em princípio, tal desnívelamento tende a criar um caminho preferencial para o efluente tratado e acúmulo progressivo de espuma em zonas de estagnação hidráulica parcial (locais onde menores vazões pelos vertedores são observadas). Nestas zonas de estagnação, o escoamento do lí-

quido parece não garantir a saída permanente de frações particuladas com o efluente, havendo, portanto, o acúmulo de material flotante (Figura 4).

O acúmulo de espuma na superfície dos compartimentos de decantação pode refletir em deterioração da qualidade do efluente anaeróbio pela elevação das concentrações de sólidos.



**Figura 4** - Acúmulo de espuma em decorrência de vertedores desnivelados.

#### 2.6 Sobrecargas hidráulicas e picos excessivos de vazão

Sobrecargas hidráulicas e picos excessivos de vazão podem provocar a expansão excessiva da manta de lodo na câmara de digestão dos reatores UASB, com a consequente sobrecarga dos compartimentos de decantação e perda excessiva de sólidos juntamente com o efluente anaeróbio. Eventos de sobrecargas hidráulicas e de picos de vazão (grande amplitude de variação entre vazões máximas e mínimas) podem estar relacionados a quatro situações principais: i) intrusão excessiva de águas pluviais; ii) vazões de bombeamento não compatíveis com as vazões médias e máximas utilizadas no projeto dos reatores anaeróbios, conforme abordado na Parte 2 desta Coletânea de NTs (BRESSANI-RIBEIRO *et al.*, 2018); iii) contribuições advindas de localidades muito pequenas (p. ex.: cidades com populações inferiores a 2.000 hab.),

que tendem a apresentar hidrogramas com picos de vazão dotados de grandes desvios em relação à vazão média de projeto; e iv) inadequação das condições de envio de lodo aeróbio de decantadores secundários da unidade de pós-tratamento para adensamento e digestão nos reatores UASB, conforme discutido anteriormente.

### 3 POSSÍVEIS APRIMORAMENTOS RELACIONADOS À PERDA DE SÓLIDOS NO EFLUENTE ANAERÓBIO

#### 3.1 Existência de pontos de amostragem de lodo nos reatores UASB

Conforme detalhado na Parte 3 desta Coletânea de NTs (LOBATO *et al.*, 2018), a existência de pontos de amostragem de lodo, adequadamente posicionados ao longo da altura do compartimento de digestão de reatores UASB, é essencial para que o operador tenha melhores condições de avaliar se o reator não está com excesso (passivo) de lodo em seu interior. Entende-se que a massa de lodo excedente é a diferença entre a massa de lodo atual no reator UASB (determinada a partir da implementação do perfil de sólidos no compartimento de digestão) e a massa de lodo a ser mantida no sistema (massa de lodo entre a massa mínima e máxima, conforme discutido em Lobato *et al.* (2018)).

De particular interesse é a amostragem sistemática de lodo no ponto mais elevado do compartimento de digestão, localizado imediatamente antes do defletor de gases. Segundo destacado por Lobato *et al.* (2018) no item "Definição das quantidades de lodo a serem mantidas e a serem descartadas do reator", a concentração de lodo nesse ponto mais elevado de amostragem deve ficar sempre abaixo de 0,5 % ST.

#### 3.2 Sistematização de procedimentos e rotinas operacionais para o gerenciamento de lodo

Além das recomendações para o gerenciamento do lodo produzido nos reatores UASB, descritas

na Parte 3 desta Coletânea de NTs (LOBATO *et al.*, 2018), os procedimentos e rotinas operacionais para o adequado manejo do lodo produzido nas unidades aeróbias de pós-tratamento (FBPs e lodo ativado) devem ser detalhados nos manuais ou diretrizes de operação. Dessa forma, é imprescindível que se considere no contrato do projeto a necessidade de elaboração de tais documentos, visando a sistematização do gerenciamento do lodo na ETE.

#### *(i) Gerenciamento do lodo e controle simultâneo da qualidade do efluente de reatores UASB*

Conforme ressaltado, a qualidade do efluente de reatores UASB em termos de concentrações de sólidos suspensos está estritamente associada à massa de lodo anaeróbio mantida no compartimento de digestão de tais unidades. *Os dados produzidos em termos de concentrações de parâmetros físico-químicos devem ser organizados em planilhas, não somente para fins de manutenção da base de dados, mas para efetivamente subsidiar o controle operacional do sistema de tratamento do esgoto de forma contínua.* No entanto, em muitos casos os dados de perfis de lodo (em termos de sólidos totais e voláteis) não são sistematicamente utilizados, e a sua correlação simultânea com dados de qualidade do efluente tende a ser ainda menos recorrente.

*Massa de lodo e concentração efluente de sólidos sedimentáveis.* A determinação da massa de lodo no compartimento de digestão é de fundamental importância para a *previsão de uma rotina de descarte do lodo de excesso.* A frequente determinação da concentração de sólidos sedimentáveis deve ser também considerada visando o monitoramento da qualidade do efluente do reator UASB, em função do controle da massa de lodo mantida no reator.

*Frequências recomendadas para a caracterização da massa de lodo nos reatores UASB e concentrações efluentes de sólidos sedimentáveis.* O plano de descarte de lodo de reatores UASB é baseado em per-

fis de ST implementados a partir da amostragem de lodo ao longo do compartimento de digestão. Em princípio, a amostragem e subsequente elaboração de perfis de lodo deveriam ser efetuadas com base no crescimento efetivo (ou operacional) do lodo no interior dos reatores UASB. Neste caso, os perfis de lodo e a quantificação do lodo de excesso (lodo a ser descartado) seriam executados no momento em que a massa estimada de lodo no compartimento de digestão excedesse ligeiramente a massa de lodo recomendada para o período operacional, em função da carga de matéria orgânica aduzida ao sistema com o esgoto bruto. Em última análise, adotando-se tal estratégia garantir-se-á a compatibilidade entre o dimensionamento das unidades de desaguamento e a produção de lodo estimada em projeto ( $Y_{\text{lodo}}$ ). A estimativa de volumes de lodo de desaguamento é apresentada na Parte 3 desta Coletânea de NTs (LOBATO *et al.* 2018).

Recomenda-se que a estrutura laboratorial e a respectiva equipe operacional da ETE sejam dimensionadas de forma a prover condições de implementação de perfis de ST associados a cada reator UASB: i) a cada 15 dias, no caso de reatores UASB sem recebimento de lodo aeróbio da unidade de pós-tratamento; e ii) *um perfil por semana por reator*, no caso de ETEs com reatores UASB recebendo lodo aeróbio proveniente dos decantadores secundários. Preferencialmente, as tomadas de amostras de lodo ao longo da altura do compartimento de digestão, para a determinação dos perfis de ST, devem ser feitas fora dos horários dos picos de vazão afluente aos reatores (p. ex.: meio da manhã ou meio da tarde).

Evidentemente, tanto as unidades de desaguamento do lodo, bem como a equipe de operação, devem ser definidas visando garantir a execução das demandas baseadas nos resultados laboratoriais para o gerenciamento da fase sólida. Para o acompanhamento da qualidade do efluente recomenda-se que as concentrações de sólidos

sedimentáveis sejam realizadas pelo menos duas vezes por semana, por reator, considerando preferencialmente amostragens compostas. Os dados considerados para a verificação da qualidade do efluente devem ser aqueles mais recentemente determinados, em relação ao último perfil de concentrações de ST fornecido.

#### *(ii) Controle operacional do lodo retido em decantadores secundários de FBPs e LA e critérios para o envio do lodo aos reatores UASB*

A remoção do lodo excedente nos reatores UASB em quantidade inferior à produção efetiva é causa potencial que contribui para a retenção de lodo de baixa sedimentabilidade nos reatores UASB. Adicionalmente, critérios inadequados para o envio do lodo de decantadores secundários para os reatores UASB podem contribuir para a elevação da carga de sólidos encaminhada a esses reatores e deterioração da qualidade do efluente anaeróbio. Neste sentido, além da compatibilização de estimativas de produção efetiva de lodo com o dimensionamento da etapa de desaguamento do lodo, as recomendações para a melhoria da qualidade do efluente em sistemas que adotam o envio do lodo aeróbio para os reatores UASB são:

**1. Preservação do lodo de melhor qualidade no fundo dos reatores UASB.** Conforme discutido em detalhes na Parte 3 desta Coletânea de NTs (LOBATO *et al.* 2018), o protocolo de descarte de lodo dos reatores UASB deve propiciar a preservação de parcela significativa do lodo de fundo (mais concentrado), de modo que este possa atuar como um "filtro" que auxilie na retenção e hidrólise dos sólidos suspensos contidos no lodo aeróbio enviado a partir dos decantadores secundários da unidade de pós-tratamento.

**2. Manutenção de baixas concentrações de lodo na parte superior do compartimento de digestão dos reatores UASB.** Conforme discutido anteriormente e também na Parte 3 desta Coletânea

de NTs (LOBATO *et al.* 2018), deve-se garantir que o reator não esteja com excesso (passivo) de lodo em seu interior. A forma mais simples de se atestar que não existe excesso de lodo no reator é por meio da verificação sistemática do teor de ST no ponto mais elevado do compartimento de digestão (imediatamente antes do defletor de gases). A concentração de lodo nesse ponto deve ficar sempre abaixo de 0,5 % ST.

**3. Manutenção de baixas concentrações de lodo nos decantadores secundários.** A compatibilização do crescimento efetivo de lodo nos reatores UASB com o dimensionamento do sistema de desaguamento tende a reduzir a demanda sobre a etapa de decantação secundária, em virtude de menores concentrações de SST no efluente anaeróbio e pós-tratamento por FBP ou LA. Por consequência, a carga de lodo aeróbio encaminhada aos reatores UASB tende a ser menor, assim como as concentrações de lodo nos decantadores secundários tendem a ser mais baixas. *Recomenda-se que a concentração de lodo na etapa de decantação secundária não ultrapasse 1,0 % ST.*

Duas possíveis alternativas para sanar a problemática de criação de passivo de lodo nos DS na ETE seriam: i) incrementar o descarte de lodo dos reatores UASB de modo a não se ultrapassar a massa máxima nem a concentração recomendada de lodo na parte superior do compartimento de digestão; e ii) remover o passivo de lodo dos DS sem considerar o envio para os reatores UASB (p.ex.: por meio de caminhões limpa-fossa).

**4. Estabelecimento do período e vazão de envio do lodo aeróbio para os reatores UASB.** Recomenda-se que o envio do lodo proveniente de decantadores secundários seja realizado no período do dia em que se observa a menor vazão de esgoto bruto afluente à ETE (via de regra, o período de menor vazão aduzida ocorre durante a madrugada). Neste caso, as bombas de envio de lodo devem ser operacionalizadas para o encami-

nhamento do lodo aeróbio *ao longo de todo o período de menor vazão*. Esta estratégia operacional visa manter o lodo de menor sedimentabilidade em regiões do compartimento de digestão onde se observa maior concentração de ST.

### 3.3 Verificação do nivelamento dos vertedores e da existência de fugas de gases do STF

A necessidade de nivelamento de vertedores pode ser definida a partir da observação de vazões irregulares ao longo do alinhamento de saída do efluente anaeróbio. Além do nivelamento de canaletas, a verificação de velocidades ascensionais e o tempo de detenção do líquido no compartimento de digestão e decantação, respectivamente, podem ser importantes aspectos a serem verificados, no sentido de se evitar o acúmulo de espuma. A justificativa para tal verificação reside no fato de que a má distribuição do líquido entre os reatores UASB também pode ser uma causa para o acúmulo de espuma na superfície do compartimento de digestão, conforme anteriormente mencionado.

### 3.4 Redução dos picos de vazões afluentes aos reatores

Conforme apontado na Parte 1 desta Coletânea de NTs (CHERNICHARO *et al.*, 2018b), os possíveis aprimoramentos visando reduzir os impactos decorrentes dos elevados picos de vazões de esgoto aduzidas aos reatores UASB estão relacionados a: i) utilização de bombas com variadores de velocidade (inversores de frequência) ou o mínimo de três bombas, sendo uma para rodízio e reserva; e ii) implantação de extravasores que efetivamente protejam as unidades subsequentes do tratamento quanto a sobrecargas hidráulicas. Um maior detalhamento das ações que podem ser empreendidas é discutido na Parte 2 desta Coletânea de NTs (BREISSANI-RIBEIRO *et al.*, 2018).

#### 4 ORIGEM E PROBLEMAS RELACIONADOS AO ATENDIMENTO A PADRÕES DE LANÇAMENTO

As legislações brasileiras que versam sobre os padrões de lançamento do esgoto tratado em corpos de água têm definido principalmente limites para concentrações de matéria orgânica. Os limites de lançamento referentes a concentrações de nitrogênio total, fósforo e surfactantes tendem a ser observados em casos específicos, como para o lançamento de efluentes em ambientes lênticos, ou ainda no contexto de legislações mais restritivas. Via de regra, tais parâmetros são contextualizados para padrões de qualidade de corpos receptores, para o que são consideravelmente restritivas. O tratamento anaeróbio, apesar de exercer um importante papel na redução de cargas orgânicas provenientes do esgoto sanitário, usualmente apresenta limitações para o atendimento aos requisitos de lançamento em corpos receptores. A seguir são apresentados alguns aspectos que dificultam o atendimento a padrões de qualidade considerando somente o uso da etapa anaeróbia na redução de cargas orgânicas e remoção de nutrientes e surfactantes.

##### 4.1 Remoção de matéria orgânica

Os reatores UASB são eficientes na redução da carga orgânica biodegradável do esgoto bruto, razão pela qual os padrões de qualidade para o corpo de água são potencialmente atendidos em condições em que se tem elevadas razões de diluição no corpo receptor. Contudo, no caso de inadequações de projeto, construção e operação, a elevada perda de sólidos com o efluente anaeróbio é um fator que tende a prejudicar o atendimento a padrões de lançamento e o desempenho da etapa de pós-tratamento. Cabe ainda ressaltar que a baixa concentração de oxigênio dissolvido em efluentes de reatores UASB também pode ser uma limitação, em termos do impacto do lançamento do efluente em um corpo receptor.

##### 4.2 Remoção de compostos nitrogenados

Da mesma forma que para o atendimento a padrões de qualidade associados à matéria orgânica, o atendimento a padrões de qualidade para concentrações de compostos nitrogenados apenas com reatores UASB tende a ser uma opção mais restrita. Considerando as condições operacionais impostas para a operação da etapa anaeróbia, a *assimilação* e a *amonificação* são os processos metabólicos de maior relevância associados ao ciclo do nitrogênio. Neste caso, as transformações de compostos nitrogenados praticamente não resultam em remoção de N-amoniacal ou nitrogênio, sendo este um aspecto inerente ao processo de digestão anaeróbia, e não propriamente um problema originado em definições de projeto, construção ou operação.

##### 4.3 Remoção de surfactantes

A composição de diversos produtos de limpeza e higiene pessoal inclui substâncias tensoativas ou surfactantes, com a finalidade de reduzir a tensão superficial da água. Tais compostos são precursores de espuma em ETEs ou em cursos d'água nos quais ocorre o lançamento de efluentes. A formação de espuma pode ocorrer a partir da ligação destes compostos com a superfície de bolhas de ar devido a eventuais turbilhonamentos presentes ao longo do processo de tratamento ou ao gradiente hidráulico existente entre o ponto de lançamento do efluente e o curso d'água. Embora o alquibenzeno linear sulfonado (LAS), surfactante mais utilizado em nível mundial, seja biodegradável, sua degradação sob condições anaeróbias é limitada, da ordem de 35% (Duarte *et al.*, 2008).

##### 4.4 Remoção de fósforo

A remoção de fósforo (P) em reatores anaeróbios é bastante restrita, sendo também esta uma limitação inerente ao processo de digestão anaeróbia e não propriamente um problema originado em de-

finições de projeto, construção ou operação. Apenas em condições de elevadas razões de diluição no corpo receptor é que os padrões de qualidade podem ser atendidos. Ainda que a etapa de pós-tratamento seja uma opção para o atendimento a padrões de qualidade em relação a concentrações de fósforo (p.ex.: em sistemas de lodo ativado pós-reator UASB), a remoção *biológica* deste componente em etapa de pós-tratamento encontra dois desafios: i) relação P/DQO superior aos valores desejados para desempenhos elevados; e ii) liberação de fósforo sob condições anaeróbias, no caso de encaminhamento do lodo para adensamento e digestão no reator UASB. Maiores detalhes sobre a remoção biológica de fósforo são apresentados em Chernicharo *et al.* (2001) e von Sperling (2017). Cabe ressaltar que há poucos processos de pós-tratamento que conduzem a elevadas remoções de fósforo.

#### 4.5 Recebimento de efluentes não domésticos

O recebimento de efluentes não domésticos (ENDs) em ETEs tratando esgoto doméstico tem sido uma realidade vigente no contexto brasileiro, principalmente em regiões onde a expansão industrial ocorre de forma mais eminente. A contribuição de efluentes advindos de aterros sanitários como lixiviados (chorume) também deve ser destacada, visto que, a depender da razão de diluição com o esgoto bruto, podem ocorrer problemas de toxicidade que impactariam a digestão anaeróbia. Adicionalmente, o recebimento de lodo de tanques sépticos pode induzir ao incremento do coeficiente de produção de lodo nos reatores UASB, o que tende a potencializar a perda de sólidos no efluente anaeróbio, caso o projeto não tenha contemplado o recebimento deste tipo de contribuição. Uma discussão mais aprofundada sobre a origem e problemas associados ao recebimento de lixiviado de aterro sanitário, de ENDs e de lodo de tanques sépticos em reatores UASB é apresentada na Parte 3 desta Coletânea de NTs (LOBATO *et al.*, 2018).

## 5 POSSÍVEIS APRIMORAMENTOS RELACIONADOS AO ATENDIMENTO A PADRÕES DE LANÇAMENTO

A melhoria da qualidade do efluente anaeróbio por meio de pós-tratamento é um tema vasto. Há uma série de sistemas naturais e mecanizados que devem ser levados em consideração a depender dos objetivos do tratamento, bem como dos requisitos necessários para a implantação e operação (demanda de área, custos, logística de gerenciamento de subprodutos). Tal como caracterizado na introdução desta NT, o presente item aborda exclusivamente a utilização de filtros biológicos percoladores (FBP), por se tratarem da alternativa de pós-tratamento mais empregada nas ETEs brasileiras que utilizam reatores anaeróbios como primeiro estágio do tratamento (CHERNICHARO *et al.* 2018b).

### 5.1 Remoção de matéria orgânica

As experiências associadas à remoção complementar de matéria orgânica em FBPs pós-reatores UASB encontram-se bem estabelecidas. Logo, a adoção de FBPs de alta carga com leito de pedra (cargas orgânicas volumétricas aplicadas em torno de 0,50-1,00 kg-DBO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>) permitem a obtenção de eficiências globais (UASB+FBP) de remoção de matéria orgânica usualmente acima de 85%.

### 5.2 Remoção de compostos nitrogenados

Para os casos em que a remoção de nitrogênio total se faz necessária, os filtros biológicos percoladores *preenchidos com leito de pedras* pós-reatores UASB são pouco eficazes, considerando as condições e estratégias operacionais usualmente estabelecidas. Da mesma forma, FBPs de alta carga pós-reatores UASB proporcionam uma remoção de N-amoniaco pouco satisfatória, em torno de 20%. Para um aumento da atividade nitrificante nos FBPs (remoção de N-amoniaco

acima de 50%) cargas orgânicas volumétricas aplicadas abaixo de  $0,24 \text{ kg-DBO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  devem ser utilizadas no projeto das unidades. Nestes casos, a etapa de decantação secundária pode não ser necessária, considerando os padrões de lançamento menos restritivos via de regra praticados no contexto nacional. A partir de experiência de longo termo em escala plena, a utilização de material de enchimento baseado em espuma de poliuretano parece ser uma potencial alternativa para a remoção de N-amoniaco e N-total em FBPs pós-reatores UASB (ONODERA *et al.*, 2016), todavia as experiências nacionais ainda são restritas a sistemas em escala de demonstração (BRESSANI-RIBEIRO *et al.*, 2017).

Em contraponto à lógica de remoção de nutrientes da fase líquida, ressalta-se que a utilização de sistemas de pós-tratamento associados à aplicação no solo (p.ex.: fertirrigação e/ou recarga de aquíferos) e a utilização do efluente para fins menos nobres (p. ex.: supressão de poeira em áreas com acesso público restrito) pode reduzir a necessidade de remoção de nutrientes. A discussão detalhada de tais possibilidades técnicas foge ao escopo desta NT.

### 5.3 Remoção de surfactantes

Conforme abordado anteriormente, a degradação de surfactantes sob condições anaeróbicas é limitada. Uma alternativa para se alcançar uma elevada degradação biológica de surfactantes presentes em efluentes de reatores UASB é a adoção de uma tecnologia de pós-tratamento aeróbia, uma vez que eficiências de degradação de LAS superiores a 99% são reportadas para processos aeróbios (BRUNNER *et al.*, 1988). Complementarmente, uma alternativa para minimizar a formação de espuma em cursos d'água está associada ao lançamento submerso do efluente, objetivando reduzir condições turbulentas precursoras da formação de espuma.

### 5.4 Remoção de fósforo

Dentre os processos atualmente passíveis de serem aplicados ao pós-tratamento de efluentes de reatores UASB visando à remoção de fósforo, destacam-se os físico-químicos. Embora a remoção de fósforo em ETEs possa ocorrer por via biológica, nos reatores UASB praticamente toda a matéria orgânica rapidamente biodegradável é consumida. Essa elevada remoção de matéria orgânica não propicia o estabelecimento de condições adequadas ao desenvolvimento de microrganismos acumuladores de fósforo na etapa de pós-tratamento por lodo ativado (von SPERLING, 2017).

No que se refere à remoção físico-química de fósforo, os produtos comumente utilizados são os sais de alumínio, ferro e cálcio. Adicionalmente, polímeros também têm sido utilizados a fim de auxiliar a floculação. A remoção de fósforo efetivamente ocorre a partir da formação dos fosfatos de metais e de cálcio, os quais podem ser posteriormente removidos por sedimentação, flotação e, eventualmente, filtração, a depender da concentração efluente desejada.

Cabe ressaltar que a dosagem de produtos químicos usualmente acarreta um aumento expressivo na produção de lodo no sistema, o que deve ser estritamente considerado no momento de concepção da tecnologia de tratamento de esgoto a ser empregada, quando a remoção de fósforo é um objetivo. Todavia, os processos físico-químicos são indispensáveis caso a remoção de fósforo seja almejada pós-reatores UASB. Neste caso, tal etapa poderia ocorrer entre o reator biológico (p.ex.: FBP ou lodo ativado) e o decantador secundário.

## 6 ORIGEM E PROBLEMAS RELACIONADOS AO PÓS-TRATAMENTO POR FBP

**Distribuição do efluente.** Nos casos em que o efluente não seja uniformemente distribuído sobre o meio suporte, o molhamento efetivo e o aprovei-

tamento da área superficial tendem a ser reduzidos. Consequentemente, parte do FBP será alimentado com maiores cargas hidráulicas, podendo, inclusive, ser a causa de frequentes empoçamentos pela elevação da carga de sólidos afluente. A depender da relevância em termos da má distribuição do efluente, é possível que o desempenho do sistema seja menor do que o esperado, fundamentalmente em virtude da redução da área superficial utiliza-

da para a colonização microbiana e formação do biofilme. Na Figura 5 (a-b) é apresentado um exemplo de má distribuição do efluente no topo de um FBP preenchido com leito de pedras e a ocorrência de empoçamentos pela colmatação na superfície do leito. Tal colmatação pode ser ainda acelerada devido ao preenchimento de FBPs com pedras britadas de granulometria inadequada, tal como discutido adiante.



**Figura 5** – a) Má distribuição do efluente no topo de filtro biológico percolador pós-reatores UASB; b) colmatação do leito de pedras por elevação da carga de sólidos.

Cabe ainda ressaltar que a obstrução de orifícios e/ou travamento dos braços distribuidores podem também ser uma eventual causa da má distribuição do efluente no topo do FBP (Figura 6). A origem de entupimentos dos orifícios é frequentemente associada à elevada perda de sólidos no reator UASB, em virtude de falhas no gerenciamento do lodo. A entrada de detritos em excesso nos reatores UASB por deficiências nas unidades do tratamento preliminar pode também ser uma causa potencial para tais obstruções. Já o travamento dos braços distribuidores associa-se usualmente à qualidade do equipamento e a deficiências de manutenção. Adicionalmente, em momentos de baixa vazão afluente, pode haver o comprometimento do número de passadas do braço previstas em projeto, especialmente para sistemas que não empregam motores periféricos de acionamento (situação usual no país).



**Figura 6** – Distribuição desigual de esgoto em FBP decorrente de obstrução de orifícios e/ou travamento dos braços rotatórios.

**Granulometria de leitos de pedra.** No contexto brasileiro os leitos de pedra são frequentemente utilizados como meio suporte. Neste caso, a colmatação devido à perda excessiva de sólidos com o efluente de reatores UASB torna-se mais prová-

vel, em virtude do baixo índice de vazios do meio suporte. A possibilidade de tal observação é aumentada quando a granulometria recomendada (britas n° 4 e 5: granulometria entre 50-100 mm de diâmetro) não é respeitada. Em alguns casos, experiências práticas apontam o recebimento de volumes de pedra britada em considerável desacordo com as recomendações de projeto, incluindo a presença de materiais finos, como mostrado na Figura 7 (a-b).

Esta constatação reside no fato de que as pedras britadas n<sup>os</sup> 4 e 5 não são frequentemente utiliza-

das na construção civil. Assim, o controle de produção e qualidade do referido material tende a ser menos consistente. Para o fornecimento de grandes volumes de material, como é o caso observado para o preenchimento de filtros biológicos percoladores em escala plena, as limitações em termos de fornecimento parecem ser ainda mais relevantes. *Portanto, as limitações para o controle de qualidade em relação a leitos de pedra como material de enchimento e um menor rigor operacional para o controle do lodo em reatores UASB são elementos potenciais para o mau funcionamento de FBPs como etapa de pós-tratamento.*



**Figura 7** - (a-b) Fornecimento de pedra britada em desacordo com especificações de projeto, incluindo a presença de materiais finos na composição do material de enchimento.

A colmatação do meio suporte provoca a criação de caminhos preferenciais para a passagem do ar e líquido, impondo dificuldades em relação ao atendimento de requisitos de oxigênio para as reações aeróbias na etapa de pós-tratamento (TCHOBANOUGLOUS *et al.*, 2003). Adicionalmente, tem sido observada a redução da atividade nitrificante com o aumento de concentrações de materiais particulados no líquido, tanto em estudos laboratoriais (FIGUEROA e SILVERSTEIN, 1992) como a partir de dados operacionais referentes a sistemas em escala de demonstração (ALMEIDA, 2011). Nestes casos, a maior presença de matéria orgânica, a menor disponibilidade de oxigênio e a

maior resistência à transferência de massa explicariam a redução da atividade nitrificante em sistemas com biofilme.

**Escolha do meio suporte.** O desempenho de um FBP pós-reator UASB tende a estar associado ao meio suporte utilizado para o preenchimento do volume reacional. Em princípio, espera-se que o uso de meios suportes com maior área superficial específica (p.ex.: meios plásticos) resultem em maior desempenho ao FBP, em termos de remoção de matéria orgânica e N-amoniacal. *No entanto, a falta de uma acurada observação de projeto em relação ao molhamento efetivo do meio suporte, bem como em relação às cargas orgânicas aplicadas,*

*podem vir a serem causas para um menor desempenho de FBPs preenchidos com meios suportes de maior área superficial específica.*

Considerando uma condição específica de cargas orgânicas aplicadas ( $0,25-0,45 \text{ kg-DBO.m}^3.\text{d}^{-1}$ ) e taxas de aplicação superficial ( $10-20 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ) em um estudo objetivando a escolha de meio suporte para o preenchimento de FBPs, Almeida (2007) observou que o uso de meios plásticos (área superficial específica entre  $80 \text{ e } 200 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}$ ) não trouxe nenhum benefício significativo para a melhoria da qualidade do efluente, em comparação com o leito de pedras para remoção de matéria orgânica e N-amoniacal. As baixas cargas orgânicas aplicadas certamente exerceram influência no desempenho dos FBPs preenchidos com meios suportes de maior área superficial específica. Adicionalmente, a recirculação contínua do efluente não foi considerada, sendo este um aspecto relevante para o aumento da eficiência de molhamento de meios suporte, a depender das condições operacionais impostas.

## 7 POSSÍVEIS APRIMORAMENTOS RELACIONADOS AO PÓS-TRATAMENTO POR FBP

### 7.1 Distribuição do afluente em FBPs

Nos casos excepcionais em que a distribuição do efluente seja realizada de forma irregular sobre a superfície do FBP é importante que haja uma revisão do equipamento utilizado, visando o reposicionamento e/ou a revisão do diâmetro de orifícios. O objetivo de tais redimensionamentos é tornar uniforme a distribuição do efluente no topo dos FBPs e, por consequência, promover melhorias em termos do molhamento efetivo do meio suporte (Figura 8 (a-b)). Para sistemas rotativos de distribuição, recomenda-se que tais redimensionamentos considerem o número de passadas por minuto sobre o meio suporte, conforme definido em projeto. A utilização de sistemas motorizados (moto-redutor fixado a um dos braços distribuidores e apoiado na parede externa do FBP) visando manter a rotação dos braços pode ser uma alternativa efetiva nos casos em que o número de passadas definido em projeto seja incompatível com a energia hidráulica proveniente do efluente anaeróbio.



**Figura 8** - (a-b) Revisão do posicionamento de orifícios nos braços de um distribuidor rotativo.

## 7.2 Meio suporte para FBPs

Caso as definições de projeto indiquem o uso de leito de pedras para o preenchimento dos FBPs pós-reactores UASB, deve-se atentar para o adequado atendimento às especificações e à fiscalização durante a aquisição do material e preenchimento dos filtros. As recomendações a seguir devem ser consideradas:

**Especificação de projeto.** Deve constar do projeto que o leito de pedras de granito, gnaisse ou basalto deverá ser composto de pelo menos 95 % do material retido em peneira com diâmetro entre 50-100 mm (britas nº 4 e 5), não havendo a possibilidade de admissão de material com a presença de materiais finos em frações visualmente excessivas. Esta verificação deverá ser efetuada antes do envio do material ao canteiro, junto ao fornecedor. Pedras “chatas” mais alongadas e de baixa espessura devem ser evitadas em quantidades representativas.

**Recebimento do material em canteiro de obra.** *Rigor da fiscalização no recebimento do material.* Para tal, recomenda-se que uma verificação granulométrica em campo deva ser realizada por meio de amostragens, no sentido de evitar a necessidade de eventuais substituições no meio de enchimento, uma prática potencialmente inviável. As amostragens deverão ser executadas para cada descarga de material nos FBPs. Adicionalmente, o canteiro de obra deverá dispor de área apropriada para a estocagem do material, de preferência limpa e pavimentada, de modo a evitar que o material se misture com materiais impróprios presentes no local (p. ex.: terra), mais especificamente quando do uso de pás carregadeiras para carga do material no interior dos FBPs.

**Colocação e espalhamento do material no interior do FBP.** Definição da técnica mais apropriada para colocação e espalhamento do material no interior do FBP, tendo em vista que a forma usual, por meio de pás carregadeiras, tem ocasionado

vários problemas (p. ex.: quebra das pedras e carregamento de solo juntamente com as pedras). Também a forma de espalhamento do material deve ser definida com rigor, a fim de evitar o uso de máquinas pesadas que possam causar a quebra das pedras e a geração de finos.

**Escolha do meio suporte.** Como mencionado anteriormente, os FBPs pós-reactores UASB em operação no Brasil são usualmente preenchidos com leito de pedras, quando projetados para a remoção de matéria orgânica. No entanto, (i) as dificuldades de atendimento às especificações granulométricas para sistemas de grande porte, (ii) a necessidade de atendimento a padrões de lançamento em termos de N-amoniaco, bem como (iii) o maior dispêndio de recursos com estruturas de concreto armado, podem ser fatores limitantes em relação à aplicabilidade de leito de pedras como material de enchimento. Nesses casos, os volumes reacionais tendem a ser bastante elevados, e a redução do tamanho e robustez dos FBPs passam a ser aspectos de maior relevância para a escolha do meio suporte, perante os menores custos de aquisição da pedra britada. Isto porque o peso específico de meios plásticos ( $30\text{-}60\text{ kg.m}^{-3}$ ) é significativamente menor em comparação ao leito de pedras ( $1.350\text{ kg.m}^{-3}$ ).

Em última análise, o uso de meio suporte com maior área superficial específica pode ser uma potencial alternativa para os casos em que:

- **a remoção de matéria orgânica não seja o único objetivo da etapa de pós-tratamento.** Nestes casos, o custo de aquisição de um meio suporte de maior área superficial e menor peso específico pode ser compensado pela redução do tamanho do volume reacional;
- **o maior controle de qualidade em termos do material de enchimento fornecido seja um aspecto de interesse.** O controle na produção de meios plásticos tende a ser melhor do que o que se observa para a produção de pedra britada com granulometria entre 50-100 mm.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificadas as recomendações para o projeto, construção e operações de reatores UASB, a qualidade do efluente anaeróbio requer o gerenciamento adequado do lodo na ETE, um aspecto que merece ainda mais atenção com o envio do lodo aeróbio proveniente da etapa de pós-tratamento aos reatores UASB, para adensamento e digestão. Cabe ressaltar que, independentemente da tecnologia de pós-tratamento utilizada, no caso do uso de decantadores secundários, a sistematização da estratégia operacional associada ao envio do lodo para os reatores UASB tende a seguir as mesmas recomendações observadas nesta Nota Técnica para o uso de FBPs pós-reatores UASB. Adicionalmente, uma atenção especial deve ser dada a aspectos que venham a produzir um efeito deletério para a qualidade do efluente anaeróbio, tal como o acúmulo de espuma em compartimentos de decantação e separadores trifásicos, bem como as sobrecargas hidráulicas que eventualmente possam vir a elevar as concentrações de lodo no compartimento de decantação dos reatores UASB.

Considerando tecnologias simplificadas para o pós-tratamento de efluentes de reatores UASB, o uso de FBPs preenchidos com meios plásticos ou baseados em espuma de poliuretano tende a ser uma potencial alternativa para a melhoria da qualidade do efluente final e atendimento a requisitos de lançamento em corpos receptores. Neste caso, a aplicação de tais meios suportes pode ser uma possibilidade em vista dos problemas observados a partir do preenchimento de volumes reacionais com pedra britada.

## 9 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem 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.*

## 10 REFERÊNCIAS

- ALEM SOBRINHO P., JORDÃO E.P. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios – uma análise crítica. Cap. 9. In: Chernicharo C.A.L (coordenador). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. FINEP/PROSAB, Rio de Janeiro, Brasil, 544 p, 2001.
- ALMEIDA, P.G.S. **Remoção de matéria orgânica e nitrogênio em filtros biológicos percoladores aplicados ao pós-tratamento de efluentes de reatores UASB**. 2011.196p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- BRESSANI-RIBEIRO, T., BRANDT, E.M.F., ALMEIDA, P.G.S., FLÓREZ, C.A.D. CHERNICHARO, C.A.L. Technological improvements in compact UASB/SBTF systems for decentralized sewage treatment in developing countries. **Desalination and Water Treatment**. p. 01-09, 2017.
- BRESSANI-RIBEIRO, T, LOBATO, L.C.S, MELO, V.R., PEGORINI, E., NONATO, S., CHERNICHARO, C.A.L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 2: Tratamento Preliminar. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 17-29, 2018.
- BRUNNER P.H, CAPRI S., MARCOMINI A., GIGER W. Occurrence and behaviour of linear alkylbenzene sulphonates, nonylphenol, nonylphenol mono-and nonylphenol diethoxylates in sewage and sewage sludge treatment. **Water Research**, v. 22, n. 12, p., 1465–1472, 1988.
- CHERNICHARO, C.A.L (coordenador). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. FINEP/PROSAB, Rio de Janeiro, Brasil, 544 p, 2001.
- CHERNICHARO, C.A.L., VON SPERLING, M., MONTEIRO, T.A.S. Evaluation of post-treatment alternatives for effluents from the UASB reactors of Onça Sewage Treatment Plant (Belo Horizonte–Brazil). In: **VIII Taller y Simposio Latino Americano sobre Digestion Anaerobia**, Punta del Este, Uruguay: IWA, 2005.
- CHERNICHARO, C.A.L., LOBATO, L. C. S., PAVIA JÚNIOR, C. A., BARBOSA, C. A., ALMEIDA, P. G. S., GONÇALVES, T. C. F., VAZ, E., SOUZA, J. R., SILVA, L. R., JUDICE, M. A. M., MORAES, O. J. Secondary sludge return for thickening and digestion in UASB reactors: case study of Onça STP - Brazil. In: **XI Taller y Simposio Latino Americano sobre Digestion Anaerobia**, La Havana, Cuba - IWA, 2013.

CHERNICHARO, C.A.L., BRESSANI-RIBEIRO, T., GARCIA, G.B., LERMONTOV, A., PEREIRA, C.B., PLATZER, C.J., POSSETTI, G.R.C., LEITES, M.A.L., ROSSETO, R. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. **Revista DAE**, vol. 66 (2013), p. 5-19, 2018a.

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, 2018b.

DUARTE, I. C. S., OLIVEIRA, L. L., SAAVEDRA, N. K. D., FANTINATTI-GARBOGGINI, F., OLIVEIRA, V. M., VARESCHE, M. B. A., Evaluation of the microbial diversity in a horizontal-flow anaerobic immobilized biomass reactor treating linear alkylbenzene sulfonate. **Bio-degradation**, v. 19, n. 3, p. 375-385, 2008.

FIGUEROA, L., SILVERSTEIN, J. The effect of particulate organic matter on biofilm nitrification. **Water Environment Research**, v. 64, n. 5, p. 728-733, 1992.

GONÇALVES, T.C.F. **Avaliação da prática de retorno de lodo secundário sobre o desempenho de reatores UASB em escala plena: estudo de caso da ETE Laboreaux, Itabira/MG**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

LOBATO, L.C.S., BRESSANI-RIBEIRO, T.B., SILVA, B.S., DIAS-FLÓREZ C.A., 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 do lodo e espuma. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

ONODERA, T.; OKUBO, T; UEMURA, S.; YAMAGUCHI, T.; OHASHI, A.; HARADA, H. Long-term performance evaluation of down-flow hanging sponge reactor regarding nitrification in a full-scale experiment in India. **Bioresource Technology**. 204. p. 177-184, 2016.

POSSETTI, G. R. C., RIETOW, J.C., COSTA, F.J.O.G., WAGNER, L.G., LOBATO, L. C. S., BRESSANI-RIBEIRO, MELO, D. F, REIS, J.A, CHERNICHARO, C. A. L. 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. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 73-89, 2018.

SILVA, B.S. **Desempenho de Reator UASB em escala plena no tratamento de esgoto sanitário e lodo ativado em excesso do pós-tratamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

TANDUKAR, M., OHASHI, A., HARADA, H. Performance comparison of a pilot-scale UASB and DHS system and activated sludge process for the treatment of municipal wastewater. **Water Research**, v. 41, n. 12, p. 2697-2705, 2007.

TCHOBANOGLIOUS, G., BURTON, F., STENSEL, H. **Wastewater engineering: treatment, and reuse**. New York: McGraw-Hill, 4th Ed., 2003, 1819 p.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados**. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2002. 428 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v4).

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2017. 452 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v1).

# Óleo e água não se misturam

A solução é reciclar

Não jogue óleo na rede de esgoto ou no solo, nem em ralos e vasos sanitários.

Cada litro de óleo de fritura pode poluir até 25 mil litros de água, se descartado de forma errada.

Uma solução mais responsável e ecológica é reciclar para fabricar sabão e biocombustível.

Ao se desfazer do óleo usado, utilize garrafas PET usadas, embalagens de amaciantes ou de sucos.

Leve seu óleo usado até um dos pontos de coleta para que seja descartado de forma correta.

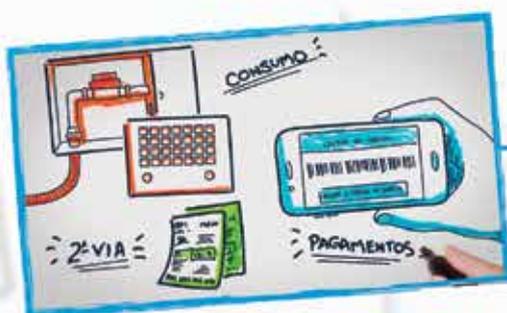
Conheça o PROL - Programa de Reciclagem de Óleo de Fritura no site [www.sabesp.com.br](http://www.sabesp.com.br)

Mês	Dias	Evento	Local
Novembro	4 a 7	National Water & Wastewater Conference 2018	Local: Hotel Bonaventure Montréal Montreal, Canadá Mais informações: <a href="http://www.wcowma-bc.com/event/national-water-wastewater-conference-2018/">www.wcowma-bc.com/event/national-water-wastewater-conference-2018/</a>
	6 a 8	XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas - FENAGUA 2018	Local: Expo D. Pedro, Av. Guilherme Campos, 500 - Bloco II Campinas - SP Mais informações: <a href="http://abas.org/xxcabas/">http://abas.org/xxcabas/</a>
	6 a 9	ECOMONDO 2018 Green Technology Expo +++ 3 <sup>rd</sup> European Nutrient Event at ECOMONDO	Local: Rimini, Itália Mais informações: <a href="https://en.ecomondo.com/">https://en.ecomondo.com/</a>
	7 a 9	1º Seminário Nacional ETES Sustentáveis - Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto	Local: Museu Oscar Niemeyer, R. Mal. Hermes, 999 – Centro Cívico. Curitiba, Paraná. Mais informações: <a href="http://www.seminarioetessustentaveis.com/">www.seminarioetessustentaveis.com/</a>
	8 a 9	I Seminário Nacional de Regulação e Políticas Públicas	Local: Jericoacoara, CE Mais informações: <a href="http://abar.org.br/agenda/i-seminario-nacional-de-regulacao-e-politicas-publicas/">http://abar.org.br/agenda/i-seminario-nacional-de-regulacao-e-politicas-publicas/</a>
	20 a 24	XIVSRHNE e XII ENAU	Local: Alagoas, Maceió Mais informações: <a href="https://eventos.abrh.org.br/xivsrhne/">https://eventos.abrh.org.br/xivsrhne/</a>
	26 a 30	15 <sup>th</sup> International Conference on urban Health: managing Urbanization for Health	Local: Kampala, Uganda Mais informações: <a href="http://www.isuhconference.org/">www.isuhconference.org/</a>
Dezembro	4 a 7	10º IPWE - International Perspective on Water Resources and the Environment	Local: Cartagena, Colômbia Mais informações: <a href="https://ipwe2018.uniandes.academy/index.php/en/">https://ipwe2018.uniandes.academy/index.php/en/</a>
Janeiro 2019	16 a 18	18 <sup>th</sup> International Electronics Recycling Congress Ierc 2019	Local: Salzburg, Áustria Mais informações: <a href="http://www.icm.ch/ierc-2019">www.icm.ch/ierc-2019</a>

# QUER GANHAR TEMPO E COMODIDADE?

## CONHEÇA O APLICATIVO SABESP MOBILE

BAIXE O NOVO APLICATIVO DA SABESP, DISPONÍVEL PARA ANDROID E IOS, E TENHA ACESSO FÁCIL E RÁPIDO A INÚMERAS FUNCIONALIDADES.



SEGUNDA VIA  
DE CONTAS



HISTÓRICO  
DE CONSUMO



AVISO DE  
VAZAMENTOS



INFORMAR  
FALTA DE ÁGUA



# O site da Revista DAE está repleto de novidades

Assine gratuitamente o boletim  
eletrônico, é só se cadastrar!



No site você  
pode baixar  
o conteúdo  
completo da  
Revista.