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, consequentemente, 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, escuma, 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

A Revista DAE está licenciada sob a Licença Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 m³) 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 Wageningem e da empresa de consultoria Royal Haskoning, possibilitou a implantação de um reator UASB em escala de demonstração (64 m³) 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 m³) 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 marcantemente 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

A Revista DAE está licenciada sob a Licença Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 (PROSAB), 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 $g.L^{-1}$) 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 $kWh.Nm^{-3}$ (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.

A Revista DAE está licenciada sob a Licença Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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.

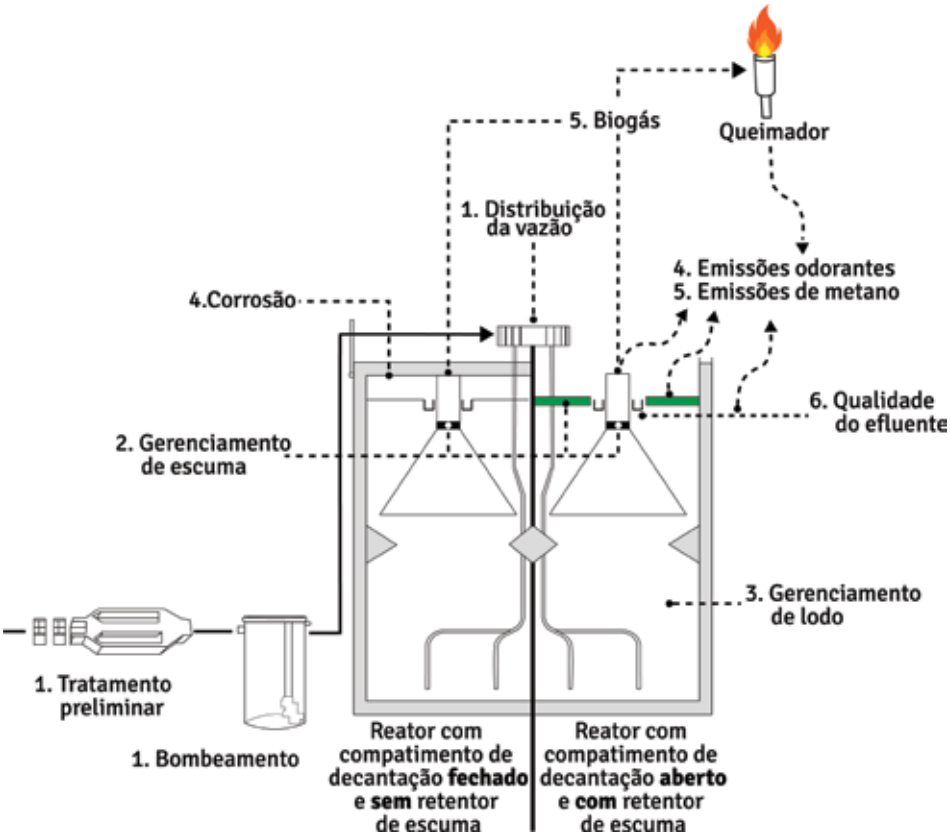

Figura 1 - Tópicos de interesse para o aprimoramento de reatores UASB

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.

A Revista DAE está licenciada sob a Licença Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 *et al.*, 2018);
2. Gerenciamento de escuma	Parte 3: Gerenciamento de lodo e escuma (LOBATO *et al.*, 2018);
3. Gerenciamento de lodo	
4. Corrosão e emissões odorantes	Parte 4: Controle de corrosão e emissões odorantes (BRANDT *et al.*, 2018);
5. Biogás e emissões fugitivas de metano	Parte 5: Biogás e emissões fugitivas de metano (POSSETTI *et al.*, 2018);
6. Qualidade do efluente	Parte 6: Qualidade do efluente (ALMEIDA *et al.*, 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	• Ocorrência de odores nas imediações do tratamento preliminar (TP) • Formação de depósitos de areia nos canais do TP • Empoçamento de líquido drenado das caçambas de resíduos removidos no TP	• 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); • 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; • Alterações da seção transversal de canais, ocasionando o decréscimo das velocidades de escoamento e a consequente deposição de sólidos de natureza orgânica; • Velocidades inferiores às mínimas previstas em projeto no início da operação da ETE; • Ausência de contenção e drenagem dos pátios onde são posicionadas as caçambas utilizadas para estocagem dos resíduos do TP.	• Implantar o confinamento, exaustão e tratamento dos gases extraídos dos locais com maior turbulência e emissão de gases dissolvidos (ver detalhes na Parte 4 desta Coletânea de NTs - BRANDT *et al.*, 2018); • Jogar cal sobre os resíduos na caçamba para neutralizar a emissão de odores; • Reduzir o tempo de estocagem da caçamba na ETE; • Avaliar alternativas de modulação de implantação do TP, objetivando assegurar a manutenção de velocidades mínimas de escoamento, especialmente no início de plano; • Utilizar pátios para posicionamento das caçambas com contenção e drenagem dos líquidos, que devem ser retornados para o TP. Adicionalmente, prever telhado sobre os pátios, a fim de evitar/reduzir o aporte de água de chuva.
	• Vazões de bombeamento não compatíveis com as vazões médias e máximas utilizadas no projeto dos reatores anaeróbios • Afogamento de grades implantadas a montante de estações elevatórias • Ausência de controle da frequência e das vazões de extravasamento da ETE	• 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; • 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; • Face ao exposto anteriormente, o hidrograma de vazões afluente ao reator UASB é diferente do hidrograma das vazões afluentes a ETE; • 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); • 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.	• 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); • Implantar medidor de vazão pós-estação elevatória, 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; • Implantar extravasores que efetivamente protejam as unidades subsequentes 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; • Implantar medidores de vazão 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.

A Revista DAE está licenciada sob a Licença Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

Tópicos de interesse	Problemas relacionados	Origem do problema	Possíveis aprimoramentos
1- Tratamento preliminar, bombeamento e distribuição de vazão	• Distribuição não uniforme de vazão para os tubos de alimentação do reator, podendo ocasionar: - acumulação de detritos nos locais em que ocorre estagnação do esgoto; - formação de zonas mortas e consequente elevação excessiva da concentração do lodo nos pontos não alimentados; - formação de fluxos preferenciais nas zonas que recebem alimentação em excesso; - eventualmente, pode haver queda na eficiência de retenção de sólidos e de remoção de matéria orgânica.	• Estruturas de distribuição projetadas e/ou executadas em materiais que não possibilitam acabamento adequado (p.ex.: concreto); • Baixa qualidade construtiva e/ou negligência/desatenção da equipe de fiscalização da obra; • Desnivelamento dos vertedores por falha durante a construção e/ou em decorrência de procedimento de limpeza; • Quebra de placas divisoras entre tubos de distribuição em decorrência de procedimento de limpeza; • Número de tubos de distribuição inferior ao recomendado na NBR 12.209 (ABNT, 2011) (mínimo de 1 tubo a cada 2 a 3 m²).	• Utilizar caixas de distribuição confeccionadas em materiais que possibilitem melhor acabamento (p.ex.: fibra de vidro, polipropileno); • Incluir caixas de recepção e distribuição de vazão de excesso de lodo aeróbio, de modo a permitir flexibilidade de manobra durante a alimentação desse excesso de lodo entre os módulos dos reatores UASB; • Rigor da equipe de fiscalização durante o acompanhamento da obra; • Verificar o nivelamento de vertedores no recebimento da obra e periodicamente após o início da operação. Proceder também a limpeza periódica dos vertedores, visando evitar sua obstrução parcial.
	• Entupimento frequente dos tubos de alimentação do reator, aumentando o trabalho do operador com a desobstrução dos mesmos • Fixação inadequada dos tubos de distribuição junto à caixa de distribuição e ao fundo do reator • Acúmulo de areia e detritos nos compartimentos de distribuição	• Elevada presença de detritos (lixo) no esgoto, em decorrência dos maus usos das instalações sanitárias e do sistema de esgotamento como um todo; • Unidades do tratamento preliminar projetadas e/ou executadas em não conformidade com a NBR 12.209 (ABNT, 2011); • Unidades do tratamento preliminar fora de operação por questões de manutenção; • Compartimentos de distribuição projetados com fundo plano e/ou com baixa inclinação; • 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.	• Realizar campanhas de sensibilização dos usuários do sistema de esgotamento sanitário, objetivando a redução do lançamento de detritos na rede de esgoto; • Utilizar unidades de tratamento preliminar (grades, peneiras e desarenadores) de comprovada eficiência e que atendam as prescrições da NBR 12.209 (ABNT, 2011); • Implantar estruturas de distribuição de vazão projetadas com fundo inclinado, de modo a minimizar o acúmulo de areia e detritos; • Aprimorar os projetos de tratamento preliminar para aumentar a confiabilidade, minimizar manutenção dos equipamentos e aumentar a eficiência (ver recomendações na Parte 2 desta Coletânea de NTs – BRESSANI-RIBEIRO *et al.*, 2018); • Garantir o rigor da equipe de fiscalização durante o acompanhamento da obra e instalação de equipamentos; • Adotar rotinas e procedimentos de limpeza das caixas de distribuição; • Utilizar dispositivo de desobstrução dos tubos de alimentação do reator.
2- Gerenciamento de escuma	• Acumulação de camada sólida e espessa de escuma 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 • Acumulação de camada superficial sólida e espessa de escuma no interior dos separadores trifásicos (STF). 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 • A camada de escuma do interior dos STF tende a impedir a liberação do biogás produzido no reator anaeróbio e, por sua vez: - 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; - Reduzir a recuperação de biogás para fins de queima e/ou de aproveitamento energético; - Reduzir o volume útil da câmara de gás e modificar sua pressão de operação. • O espessamento da camada de escuma pode impor esforços estruturais elevados nas paredes do separador trifásico (STF). Esses esforços, por sua vez, podem ocasionar danos e até mesmo a ruptura do STF, notadamente quando esses são confeccionados com materiais de menor resistência, a exemplo de lonas plásticas, chapas/telhas metálicas ou de amianto etc.	• A acumulação de escuma 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&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 "escuma"; • As características construtivas dos reatores e as condições hidráulicas de operação podem fazer com que boa parte da escuma seja formada por lodo flotado; • Ausência de acesso adequado e/ou falta de condições de segurança ocupacional para o procedimento de retirada de escuma; • Ineficiência do mecanismo de remoção de escuma do STF e/ou não remoção frequente e sistemática desse material flotado pode levar ao espessamento e solidificação da camada de escuma.	• Considerar melhorias no tratamento preliminar, de modo a reduzir a entrada de detritos, de sólidos flutuantes e de O&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 *et al.*, 2018); • Controlar o recebimento de descargas de efluentes não domésticos (END), tais como lodo de tanque séptico e efluentes de indústrias caracteristicamente com O&G elevados (laticínios, abatedouros, frigoríficos, lavanderias industriais etc.); • Utilizar STF equipados com dispositivos internos que possibilitem a remoção da escuma, a exemplo do Separador Étsus 1000 (ver detalhes na Parte 3 desta Coletânea de NTs - LOBATO *et al.*, 2018).; • Utilizar câmaras múltiplas piramidais, de modo a possibilitar o confinamento da escuma em menores áreas e facilitar sua remoção (ver detalhes na Parte 3 desta Coletânea de NTs - LOBATO *et al.*, 2018); • Quando não for possível a utilização de dispositivos internos de remoção de escuma, a parte superior do STF deve ser equipada com número suficiente de escotilhas de inspeção, 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 estanqueidade da câmara de gás e de acesso adequado para equipamentos de remoção de escuma, observando ainda os requisitos de segurança ocupacional dos operadores; • Considerar no projeto das unidades de processamento da fase sólida da ETE a previsão de recebimento da escuma removida dos reatores anaeróbios.

A Revista DAE está licenciada sob a Licença Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

Tópicos de interesse	Problemas relacionados	Origem do problema	Possíveis aprimoramentos
3 - Gerenciamento de lodo	• Grande parte dos reatores UASB existentes no Brasil opera com excesso de lodo, ocupando volumes além da capacidade de armazenamento no compartimento de digestão dos reatores. Isso decorre, normalmente, da falta de descartes sistemáticos de lodo e pode ocasionar: - 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; - 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; - Aumento da formação de escuma no compartimento de decantação do reator; - Acúmulo excessivo de areia no fundo dos reatores; - Diminuição do volume útil para o tratamento do esgoto bruto; - Sobrecarga e eventual comprometimento da unidade de pós-tratamento, notadamente daquelas que operam com algum meio de enchimento (p.ex.: biofiltros, filtros percoladores); - Dificuldades no gerenciamento do lodo aeróbio gerado na unidade de pós-tratamento, quando este é enviado para adensamento e estabilização no reator UASB; - O carreamento de sólidos com o efluente do reator UASB pode alterar os parâmetros cinéticos utilizados no dimensionamento da unidade de pós-tratamento.	• O acúmulo excessivo de lodo nos reatores e a falta de descartes sistemáticos estão associados a um ou mais dos seguintes fatores: - Manuais ou diretrizes de operação que não detalham adequadamente os procedimentos de descarte de lodo que devem ser seguidos pelos operadores; - Leitos de secagem e/ou equipamentos de desaguamento de lodo com capacidade aquém da necessidade de processamento da ETE; - 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; - Falhas de projeto de montagem mecânica do sistema de desaguamento, ocasionando elevada necessidade de manutenções corretivas; - Falta de remoção sistemática de lodo dos leitos de secagem, impedindo o descarte de lodo do reator; - Falta de remoção sistemática de lodo dos reatores UASB em decorrência de problemas logísticos / administrativos; - 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). • 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; • Número insuficiente de tubos para descarte e mal distribuídos ao longo do compartimento de digestão.	• Maior rigor, durante a fase de projeto, no cálculo da produção de lodo do reator, sendo de particular interesse o conhecimento das contribuições que a ETE receberá; • Obrigatoriedade de pontos de amostragem de lodo em diferentes profundidades em todos os módulos do reator UASB; • Prever tanques de recebimento / adensamento / homogeneização de lodo, localizados antes da unidade de desaguamento, de modo a conferir maior flexibilidade para o descarte de lodo dos reatores; • Na escolha da alternativa de desaguamento, dar preferência a processos mais robustos, adaptados à realidade local e ao porte da ETE; • Considerar melhorias no tratamento preliminar, 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 *et al.*, 2018); • Compatibilizar a operação dos equipamentos do sistema de desaguamento, de modo a permitir o controle de carga de ST nestas unidades; • Incluir no contrato do projeto a necessidade de elaboração de manuais ou diretrizes de operação que detalhem todos os procedimentos e rotinas operacionais para o adequado gerenciamento do lodo na ETE; • Incluir no contrato do projeto a necessidade de elaboração de especificações técnicas mais detalhadas, de modo a garantir a aquisição de equipamentos de desaguamento mais robustos e que ofereçam as condições mínimas necessárias de assistência técnica; • No caso da previsão de recebimento de lodo de tanque séptico na ETE, avaliar com rigor as quantidades esperadas e a possibilidade de implementar unidade específica para o recebimento desse tipo de contribuição; • Não permitir que os reatores UASB recebam lodo químico de ETAs. 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; • Atenção especial à qualidade do projeto, da construção e da operação da unidade de desarenação; • Instalar tubulações que possibilitem o descarte do lodo em diferentes níveis, conforme preconizado na NBR 12.209 (ABNT, 2011); • 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 *et al.*, 2018).

A Revista DAE está licenciada sob a Licença Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

Tópicos de interesse	Problemas relacionados	Origem do problema	Possíveis aprimoramentos
4 - Corrosão e emissões odorantes	• Os problemas de odores e de corrosão nas ETEs que empregam reatores UASB encontram-se associados principalmente ao gás sulfídrico (H_2S) gerado durante o processo de tratamento anaeróbio. Uma parte do H_2S formado permanece dissolvido na massa líquida, enquanto outra parte se desprende para a atmosfera gasosa. A maior parte do H_2S liberado da fase líquida passa a fazer parte do biogás, mas uma parcela importante é emitida de forma difusa 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. • O H_2S emitido para a atmosfera possui odor característico de ovo podre e é perceptível ao olfato humano em baixíssimas concentrações (~0,5 ppb), podendo causar impactos sobre o bem estar da população que vive no entorno da ETE. Em concentrações mais elevadas, pode causar riscos à saúde dos trabalhadores da ETE • O H_2S emitido para a atmosfera pode induzir a severos problemas de corrosão 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	• A geração de H_2S 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; • As emissões de H_2S 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; • O H_2S 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_2S e a corrosão das estruturas de concreto e metálicas nas imediações desses pontos de liberação; • Dessa forma, a origem do problema se relaciona a cinco fatores principais: i) presença de compostos de enxofre no esgoto bruto afluente ao reator anaeróbio; ii) existência de singularidades que causam turbulência ao longo do perfil hidráulico da ETE e possibilitam a liberação do H_2S dissolvido na fase líquida; iii) utilização de materiais e revestimentos não resistentes à corrosão; iv) baixa estanqueidade da câmara de gás e manejo inadequado das tampas de inspeção dos reatores; e v) baixa eficiência de combustão em alguns tipos de queimadores de biogás.	• Verificar criteriosamente os volumes e tempos de detenção hidráulica dos poços de sucção das estações elevatórias de esgoto. Havendo riscos de emanação de H_2S, prever o confinamento, a exaustão e o tratamento dos gases; • Ter atenção especial e verificar, durante a fase de projeto, a definição do perfil hidráulico da ETE, de modo a evitar singularidades que causem turbulência. Não sendo possível, prever o confinamento, a exaustão e o tratamento do H_2S oriundo dessas singularidades. Atenção especial deve ser dada também para linhas de retorno de lodo e pontos de recepção de lodo de tanques sépticos; • Considerar a direção dos ventos na definição do leiaute das unidades. Verificar conveniência de implantar "cortina verde" e afogamento do lançamento de efluentes anaeróbios; • Ter especial atenção, durante as fases de projeto e de obra, na especificação e execução dos dispositivos de coleta (p. ex.: testes de estanqueidade) e tratamento do biogás. Atenção especial deve ser dada para problemas de corrosão e de vazamento nesses dispositivos, e também para a baixa eficiência de combustão em alguns tipos de queimadores de biogás; • Utilizar materiais resistentes à corrosão ou especificar produtos anticorrosivos para revestimento de todos os materiais e estruturas não resistentes à corrosão; • Minimizar a geração e liberação de H_2S. 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 escuma que evitem a abertura de escotilhas; e v) promover a dessorção, exaustão e tratamento dos gases dissolvidos na fase líquida; • Realizar diagnósticos permanentes (p. ex.: estanqueidade das tampas de inspeção dos reatores) e campanhas de medição para identificar eventuais pontos de fuga de biogás e de gases residuais.

A Revista DAE está licenciada sob a Licença Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

Tópicos de interesse	Problemas relacionados	Origem do problema	Possíveis aprimoramentos
5- Biogás e emissões fugitivas de metano	• Emissão de gases odorantes (sulfeto de hidrogênio)	• Conforme apontado no item anterior (corrosão e emissões odorantes), parte das emissões de H_2S 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.	• 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 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; • Ter maior rigor, durante as fases de projeto e de obra, na especificação e 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. Exigir a realização de testes de estanqueidade periódicos na câmara de gás do separador trifásico e na linha de gás; • Quanto à entrada excessiva de água de chuva 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; • Em relação às emissões fugitivas de CH_4, liberadas ao longo do percurso do efluente líquido, podem ser previstos dispositivos para dessorção, exaustão e tratamento desse gás ou, eventualmente, a utilização de técnicas mais avançadas para recuperação do metano dissolvido (ver detalhes na Parte 4 desta Coletânea de NTs - BRANDT *et al.*, 2018); • Realizar avaliação técnico-econômica da possibilidade de substituição dos queimadores de biogás abertos por queimadores enclausurados, tendo em vista a maior eficiência de queima desses últimos; • Assegurados os aprimoramentos que permitam maior recuperação de biogás, listados anteriormente, realizar análise de viabilidade técnico-econômica sobre a possibilidade de geração de energia elétrica e/ou térmica, de acordo com as diretrizes do Guia Brasileiro de Aproveitamento Energético de Biogás (BRASIL, 2016); • Efetuar manutenções preventivas dos componentes (válvulas, filtros, medidores) presentes na linha de biogás.
	• Emissão de gases de efeito estufa (metano)	• O metano (CH_4), 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; • 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; • 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; • Projetos antigos ou inadequados que negligenciam o gerenciamento da fase gasosa inerente ao tratamento de esgoto em reatores UASB.	
	• Baixo potencial de aproveitamento energético nos reatores anaeróbios	• 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; • Entrada excessiva de água de chuva na rede de esgoto durante os períodos chuvosos, o que pode ocasionar grande diluição do esgoto e consequente redução da produção de biogás. Adicionalmente, o excesso de vazão pode provocar sobrecarga hidráulica no reator, resultando em perda de biomassa e consequente perda de eficiência de geração de biogás.	
	• Aspectos de segurança vinculados à criação de espaços confinados e formação de área classificadas como atmosferas explosivas	• 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_2S) podem ser superiores aos limites tóxicos a seres humanos.	• Instalar medidores de vazão e monitoramento da produção de biogás nos reatores UASB. 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%; • Elaborar mapas de risco e instalação de componentes de identificação de atmosferas explosivas. Identificar áreas de espaço confinado e execução de atividades de operação / manutenção nessas áreas de acordo com os critérios de segurança ocupacional cabíveis; • Executar as atividades de operação/manutenção dos reatores de forma a evitar o aporte de ar para as câmaras e tubulações de gás e a consequente formação de misturas explosivas; • Definir metas de redução das emissões de gases de efeito estufa.

A Revista DAE está licenciada sob a Licença Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

Tópicos de interesse	Problemas relacionados	Origem do problema	Possíveis aprimoramentos
	• Perda de sólidos no efluente	• 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; • Falta de protocolos ou protocolos inadequados para descarte de lodo de excesso nos reatores UASB, conforme caracterizado no Tópico 3; • Dificuldades para se implantar adequadas rotinas de envio de lodo aeróbio para adensamento e digestão no reator UASB; • Fuga de gases do interior do STF para o compartimento de decantação do reator UASB, ocasionando o arraste de sólidos; • Vertedores desnivelados / obstruídos causando zonas de sobrecarga hidráulica e arraste de sólidos; • Recebimento de efluentes não domésticos; • Sobrecarga hidráulica e velocidades ascensionais elevadas associadas a entrada excessiva de água pluvial na rede coletora de esgoto; • 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).	• Obrigatoriedade de pontos de amostragem de lodo em diferentes profundidades em todos os módulos do reator UASB; • 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; • 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; • 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); • 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); • Controlar o recebimento de efluentes não domésticos (END).
6 - Qualidade do efluente	• Não atendimento a padrões de lançamento	• 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.	• 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-amoniacal pode ser sistematicamente obtida em sistemas de pós-tratamento compostos por lodo ativado, filtros aerados submersos, wetlands, lagoas de polimento e filtros biológicos percoladores. • 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; • A precipitação química de fósforo pode ser uma alternativa quando a remoção desse elemento é necessária; • Buscar alternativas de uso do efluente, inclusive nas próprias instalações da ETE (p.ex.: para preparo de soluções de polímero e irrigação de jardins).
	• Deficiências da unidade de pós-tratamento	• 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); • 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.	• Avaliar o impacto da perda de sólidos no efluente anaeróbio sobre a unidade de pós-tratamento; • Maior rigor durante a fase de projeto quanto à especificação do material de enchimento para sistemas de pós-tratamento de biomassa aderida; • Rigor da equipe de fiscalização durante o acompanhamento da obra.

A Revista DAE está licenciada sob a Licença Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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/dificulta 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-

A Revista DAE está licenciada sob a Licença Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 escuma. **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.

A Revista DAE está licenciada sob a Licença Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.