

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 UTFPR 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.

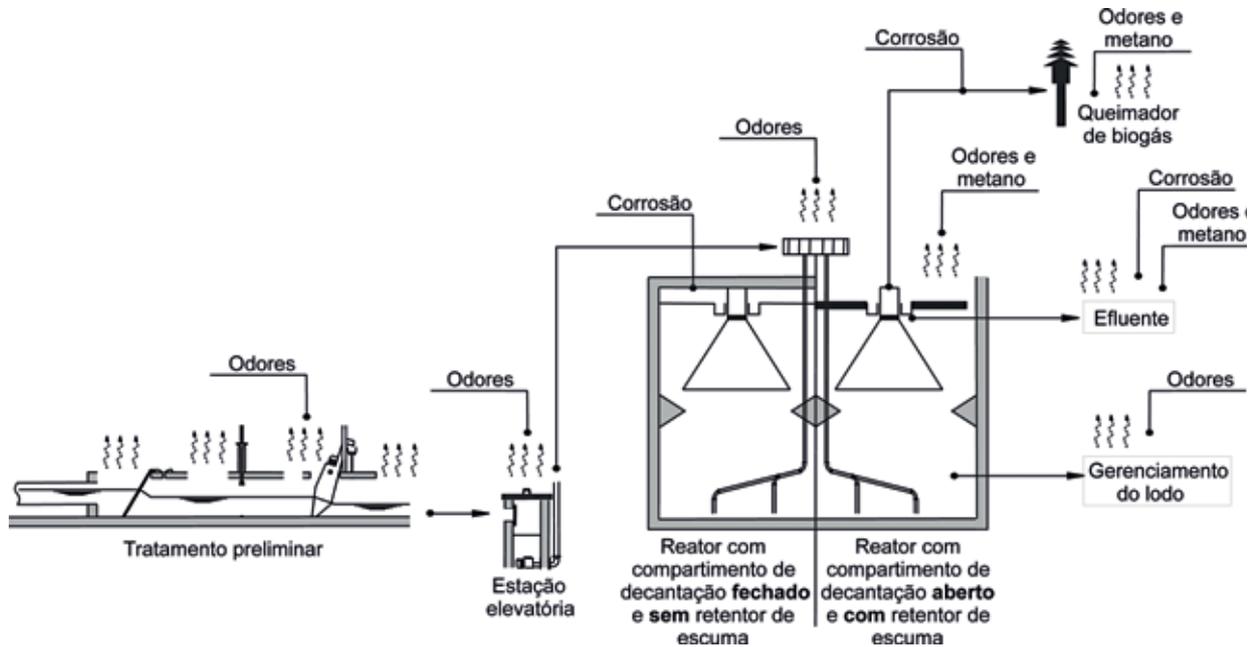


Figura 1 – Emissões gasosas fugitivas nas diversas etapas de uma ETE, com destaque para os reatores UASB.

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_v) e 100 ppbv (0,1 ppm_v) (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_v por 6-7 h), perda momentânea de consciência e outros efeitos graves como edema pulmonar e convulsão (exposições de 100-200 ppm_v por cerca de 20min) e até a morte (exposições acima de 900 ppm_v por aproximadamente 1 min). Altas concentrações de H₂S no ar atmosférico (150-200 ppm_v) 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 H₂S e de outros compostos odorantes, estudos recentes mostraram a presença do meta-

no (CH₄) dissolvido em altas concentrações (6 a 25 mg.L⁻¹) 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 CH₄ até 6,4%_{v/v} (64.000 ppm_v) 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 H₂S em elevatórias de esgoto (EE) e nas etapas do tratamento preliminar, cujas imediações apresentam concentrações típicas de H₂S da ordem de 0,4 a 40 ppm_v (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 H₂S podem atingir 50 ppm_v (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 CH₄, mas que também contém quantidades significativas de H₂S, entre 1.000 e 5.000 ppm_v (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 CH₄ 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 captores 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 captores 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"> - Inclusão de dispositivos para permitir a remoção de sedimentos acumulados nos canais das grades e dos desarenadores (p. ex.: pontos de jato de água). - 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. - 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.
	Emissões fugitivas nos reatores UASB	<ul style="list-style-type: none"> - 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). - Projeto de reatores UASB com decantadores estanques a gases (p.ex.: tampas hermeticamente fechadas, adoção de técnicas de enclausuramento, previsão da impermeabilização de superfícies). - Evitar quedas hidráulicas na coleta e condução do efluente tratado.
	Emissões fugitivas gerais	<ul style="list-style-type: none"> - 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).
Operação	Emissões fugitivas nas unidades de tratamento preliminar da ETE	<ul style="list-style-type: none"> - Remoção e destinação final adequada e frequente de resíduos do tratamento preliminar. - Adição de ar e/ou agentes químicos na rede coletora, em estações elevatórias e no tratamento preliminar – consultar Brandt <i>et al.</i> (2017). - 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). - As unidades devem ser limpas e lavadas após as intervenções operacionais diárias e pintadas após manutenção.
	Emissões fugitivas nos reatores UASB	<ul style="list-style-type: none"> - Remoção frequente da espuma acumulada em reatores UASB – ver Parte 3 desta Coletânea de Notas Técnicas (LOBATO <i>et al.</i>, 2018). - Realização de testes de estanqueidade nas câmaras de biogás e nos decantadores. - Manejo adequado das tampas de inspeção nas câmaras de biogás e nos decantadores.
	Emissões fugitivas nas etapas de gerenciamento de lodo	<ul style="list-style-type: none"> - Restrição ao manuseio de lodo não estabilizado. - Evitar o cisalhamento de lodo em bombas. - Remoção diária de lodo desidratado. - Adição de permanganato ou sais de ferro ao lodo – consultar Brandt <i>et al.</i> (2017). - 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).
	Emissões fugitivas gerais	<ul style="list-style-type: none"> - 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). - Monitoramento adequado da concentração de sulfato afluente à ETE, de modo a facilitar a identificação de contribuições industriais. - 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).

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"> - Permite apenas o acesso limitado à área confinada, por meio de comportas ou janelas. - Minimiza o volume enclausurado e a vazão de gás para tratamento. - Indicação: canais; caixas de distribuição; pequenos tanques.
	Em arco ou telhado de duas águas	<ul style="list-style-type: none"> - Permite apenas o acesso limitado à área confinada, por meio de comportas ou janelas. - 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. - Indicação: canais; tanques.
	Galpão ou cúpula	<ul style="list-style-type: none"> - Permite acesso irrestrito à área confinada. - Apresentam maiores custos de implantação e operação (geram maiores vazões de gás para exaustão e tratamento). - Indicação: tratamento preliminar; unidades de gerenciamento de lodo; decantadores; filtros biológicos percoladores pós-UASB.

Critério de projeto		Especificação técnica
Materiais construtivos das coberturas e sistema de exaustão	Concreto	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo e elevada capacidade de suportar cargas. - Módulos pesados e espessos, o que dificulta acesso de operadores. - Suscetível à corrosão (aplicar proteção de PRFV, poliuréia; poliuretanos elastoméricos; pintura de epóxi etc.). - Indicação: cobertura de reatores UASB; construção das unidades de tratamento dos gases residuais.
	Alumínio	<ul style="list-style-type: none"> - Elevado custo e boa capacidade de suportar esforços de tensão. - São leves e facilitam o acesso de operadores. - Possui boa resistência em atmosferas com H_2S, mas podem ser atacados pelo H_2SO_4. - Indicação: confecção de elementos das coberturas (com revestimento epóxi) como portas, janelas, esquadrias; dutos de transporte de gases.
	Aço inoxidável	<ul style="list-style-type: none"> - Elevado custo e ótima capacidade de suportar esforços de tensão. - São relativamente leves e facilitam o acesso de operadores. - Elevada resistência à corrosão. São utilizados aços inoxidáveis do tipo AISI 316. - Indicação: confecção de todas as estruturas, em razão da durabilidade do material.
	Materiais poliméricos e elastoméricos	<ul style="list-style-type: none"> - PRFV, PVC, PEAD, PP ou PPR, borracha. - Elevado custo, mas baixo peso específico e elevada resistência à corrosão. - Podem ser moldados em diversas formas. - Indicação: tubos e conexões; cobertura de canais e tanques em geral.
Sistema de exaustão	Vazão de exaustão	<ul style="list-style-type: none"> - 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. - 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 $6,4 m.s^{-1}$), com a garantia da não ocorrência de emissões fugitivas. - Concentração dos gases: devido à mistura do O_2 (originado do ar atmosférico introduzido na cobertura) com CH_4 e H_2S, as vazões devem garantir que não sejam formadas misturas dentro dos limites inferior e superior de inflamabilidade ou explosividade: $5\%_{v/v}$ a $15\%_{v/v}$ para o CH_4; $4\%_{v/v}$ a $44\%_{v/v}$ para o H_2S. Eventualmente pode ser necessário o monitoramento das concentrações de CH_4 no sistema de exaustão.
	Dutos de transporte de gases	<ul style="list-style-type: none"> - Podem ser de seção circular ou retangular. - Devem ser inclinados para possibilitar o encaminhamento da umidade condensada para os pontos baixos da rede de exaustão. - Nos pontos mais baixos da rede de exaustão devem ser instalados dispositivos para drenagem de condensado. - 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).
	Ventilador / exaustor	<ul style="list-style-type: none"> - Arranjo pode ser a montante ou a jusante da unidade de tratamento dos gases. - São utilizados ventiladores centrífugos com rotor de pás inclinadas para frente, radiais ou inclinadas para trás. - Devem ser confeccionados em material resistente à corrosão por solução de ácido sulfúrico a 10%. - 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.

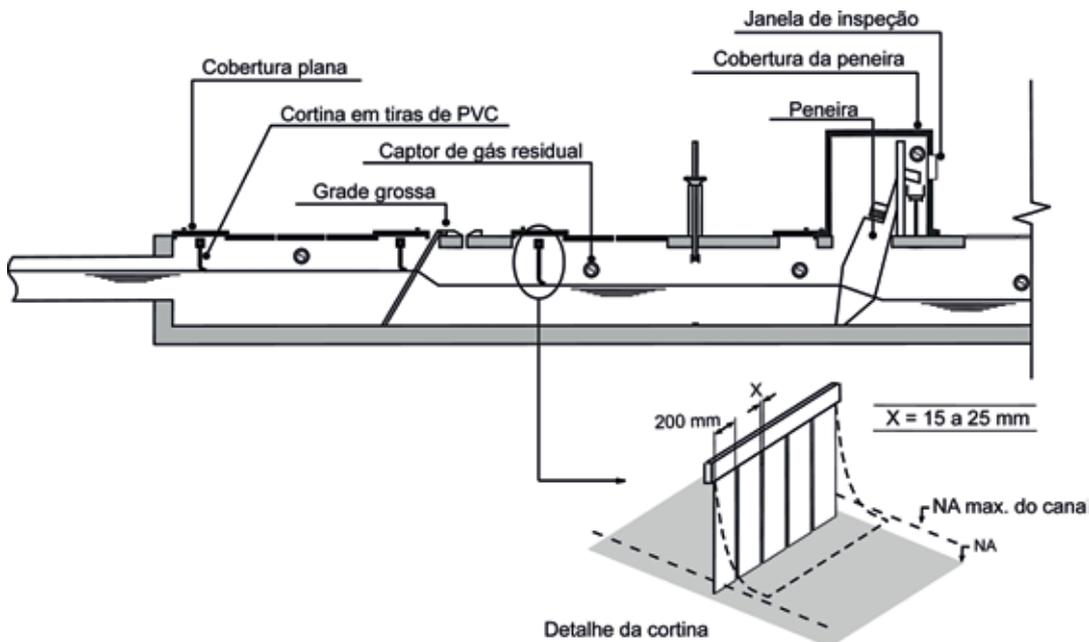


Figura 3 – Esquema da contenção de odores e gases corrosivos no tratamento preliminar.

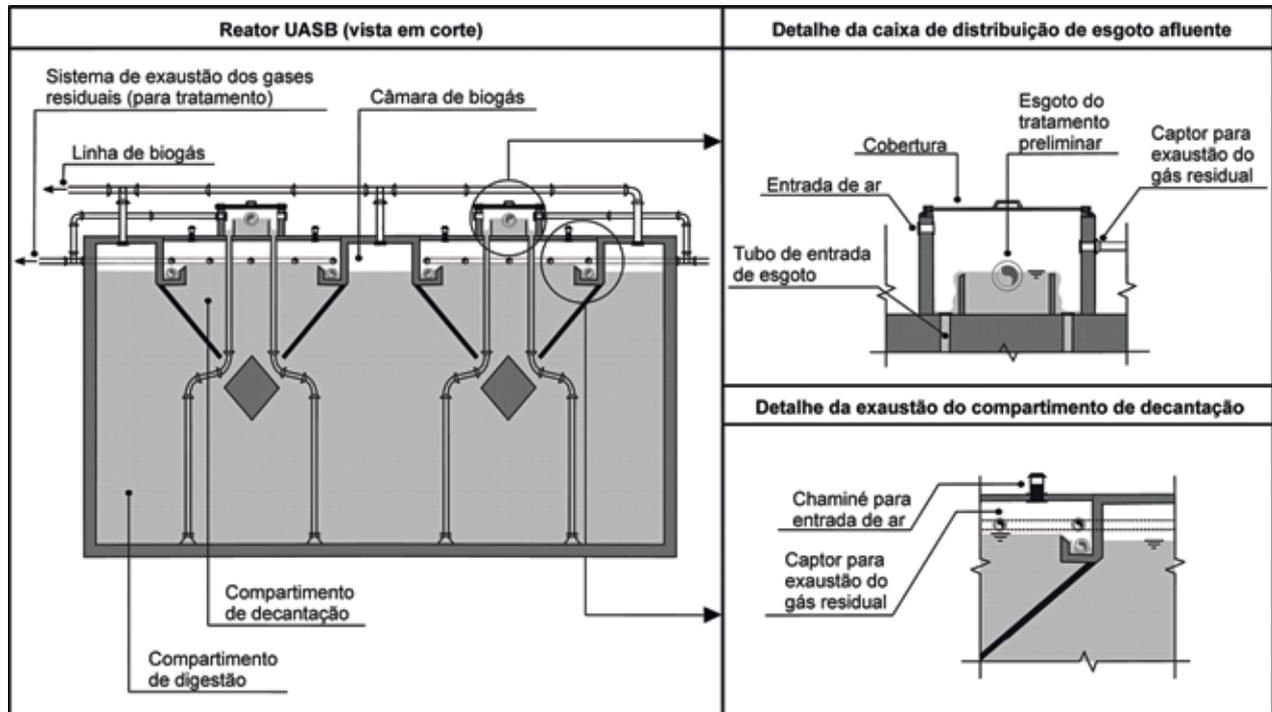


Figura 4 – Esquema da contenção de odores e gases corrosivos em reatores UASB.

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.

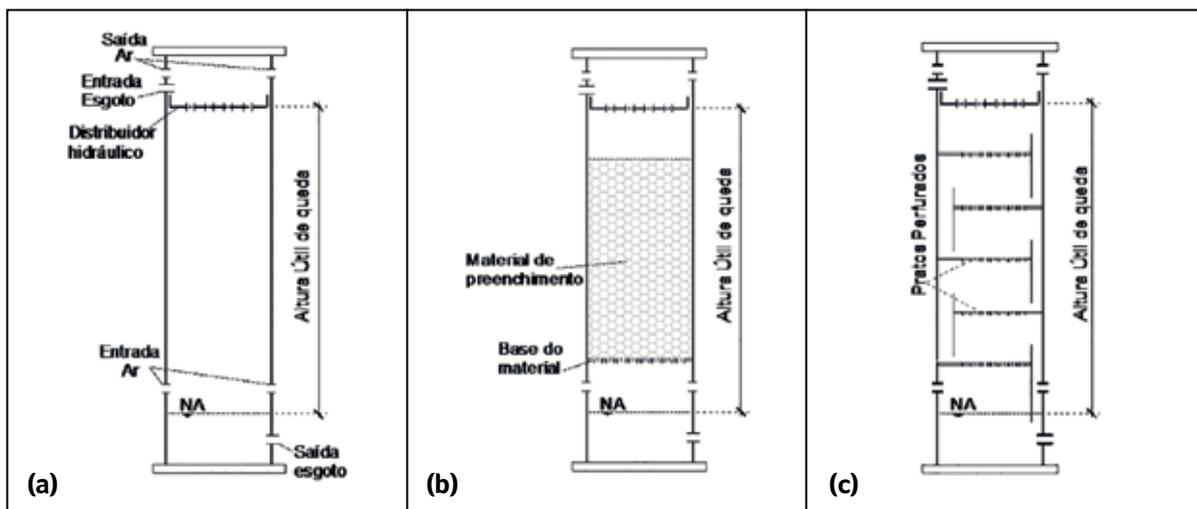


Figura 5 – Esquema de câmara de dessorção: a) sem enchimento; b) com enchimento; c) com pratos.

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

CH₄ 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 CH₄ 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 H₂S em câmaras de dessorção (resultados obtidos em pesquisas piloto)

Tipo de câmara de dessorção	Altura útil (H) ^(a) (m)	Taxa de aplicação superficial (TAS) ^(b) (m ³ .m ⁻² .min ⁻¹)	Qg.Qℓ ⁻¹ (rQ) ^(c)	Eficiência de remoção de H ₂ S (%)	Concentração de H ₂ 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 ^(d)	1,2 a 1,5	0,15 - 0,30	3 a 4	65 - 85	200 - 600

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

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

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

^(d) 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 H₂S dissolvido nos efluentes dos reatores UASB. A perspectiva é de se gerar como gás residual um fluxo com concentração de H₂S de cerca de 400 ppm (e CH₄ 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 m³.m⁻².min⁻¹;
- 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⁻¹ ou (0,6 m³.min⁻¹)

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).

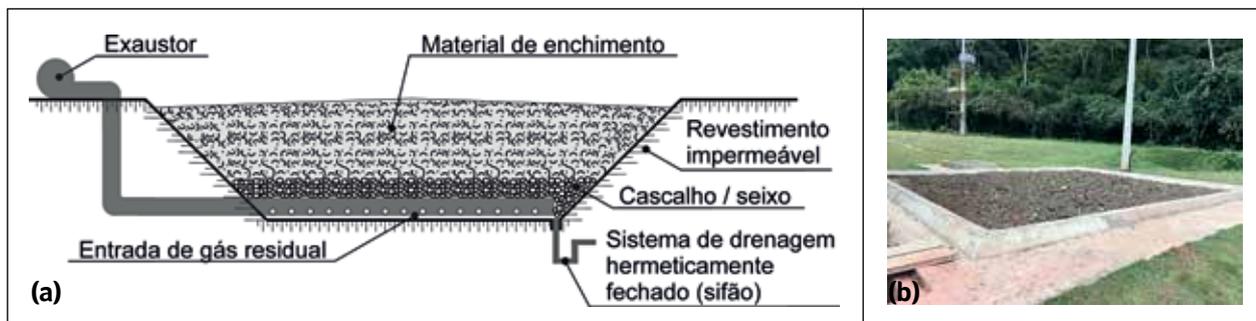


Figura 6 – Biofiltro não estruturado com enchimento de fundo: a) desenho esquemático; b) foto em uma ETE.

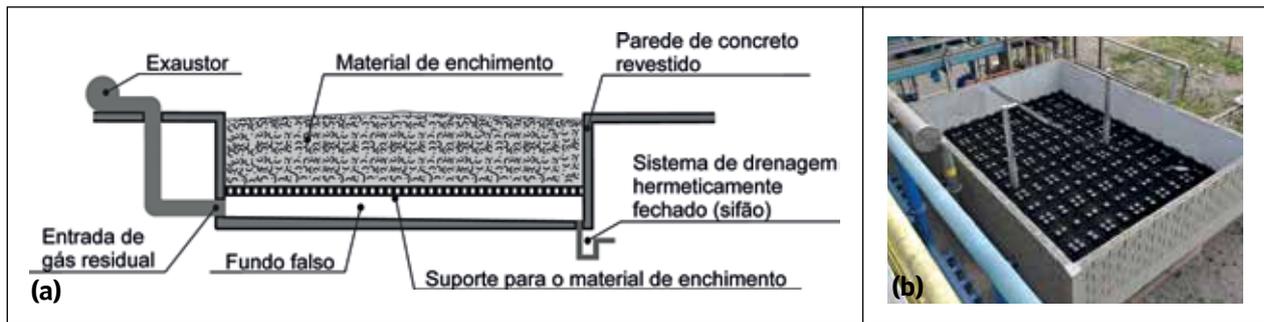


Figura 7 – Biofiltro estruturado e com fundo falso: a) desenho esquemático; b) foto em uma ETE.

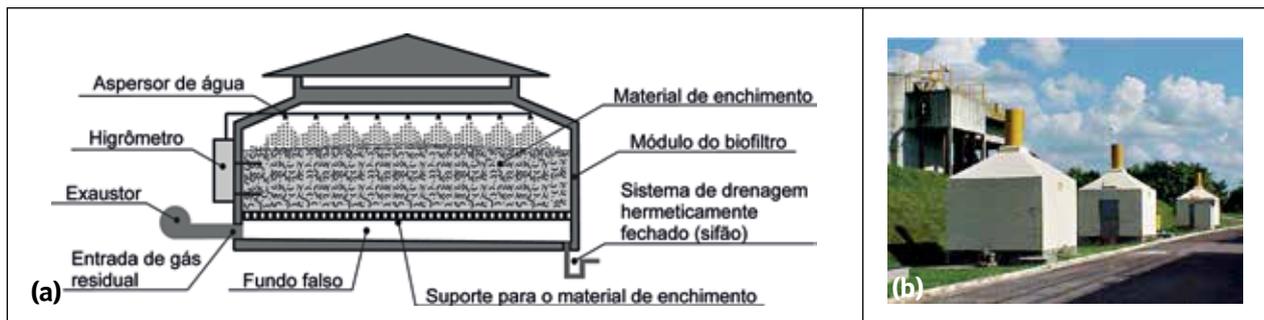


Figura 8 – Biofiltro pré-fabricado: a) desenho esquemático; b) foto em uma ETE.

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 CH₄ 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"> - Apresenta menores custos de aquisição (até 20 vezes menores em relação ao queimador enclausurado). - Operação simples. - Apresenta boa dispersão dos gases de combustão. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior área de exclusão. - Aplicável somente para menores vazões de biogás (<7 Nm³.h⁻¹). - Geralmente não é possível o monitoramento ou supervisão da queima (temperatura de queima, estabilidade da chama, vazão e tempo de residência do biogás etc.). - Baixas eficiências de destruição do CH₄ (<50%) e de compostos odorantes.
Enclausurado	<ul style="list-style-type: none"> - Maiores eficiências de destruição do CH₄ (>98%) e de compostos odorantes (>95% no caso do H₂S). - Menor área de exclusão. - 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.). 	<ul style="list-style-type: none"> - Maiores custos de aquisição. - Maior complexidade operacional. - Baixa dispersão dos gases de combustão. - Pode ser necessário instalação de gasômetro para auxiliar na regularização da vazão de biogás enviado ao queimador.

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⁻¹.K⁻¹ 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 eletronico. **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 Odoante**. 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: O2WQ1374A, 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, Florianopolis,

Brasil. **Proceedings...** Florianopolis, 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: Biogás 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.