

# Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 4: Control de corrosión y emisiones gaseosas

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

- **Fecha de entrada:**  
01/08/2018
- **Fecha de aprobación:**  
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.2018.041es

## Resumen

Las emisiones gaseosas fugitivas están directamente relacionadas con los problemas de olor y corrosión en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) que emplean procesos anaerobios. En este sentido, la implementación de actividades preventivas y/o correctivas para el control de las emisiones y de procesos corrosivos asociados es fundamental para garantizar el bienestar de las personas trabajadoras y de la población vecina a la PTARs. Estas medidas representan una reducción potencial de los gastos operativos de mantenimiento y reparación de estructuras dañadas, además de que extiende la vida útil de los equipos. Esta Nota Técnica tiene por objetivo caracterizar los problemas, junto con sus respectivos orígenes, relacionados con las emisiones gaseosas, así como presentar las técnicas más relevantes para el diseño, la construcción y la operación de reactores UASB para el control de la corrosión y de las emisiones fugitivas. En síntesis, las mejoras relacionadas con este tema consideran la posibilidad de aplicar técnicas preventivas para reducir las emisiones; como también la aplicación de un control correctivo, usando sistemas de desorción, contención, extracción y tratamiento de los gases, así como la utilización de materiales resistentes a la corrosión y revestimientos anticorrosivos. Las emisiones gaseosas y el riesgo de corrosión son inherentes al uso de reactores UASB para el tratamiento de las aguas residuales urbanas o domésticas, sin embargo, es posible adoptar técnicas que actúen eficazmente en la mitigación de estos impactos.

**Palabras clave:** Contención de gases, desorción de gases disueltos, olor, sulfuro de hidrógeno, ventilación

**Emanuel Manfred Freire Brandt** – Químico Industrial de la Universidad Federal de Ouro Preto (UFOP), Brasil. Máster y Doctor en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Profesor adjunto del Departamento de Ingeniería Sanitaria de la UFJF, Brasil.

**Juliana Mattos Bohrer Santos** – Ingeniera Ambiental de la Universidad Federal de Juiz de Fora (UFJF), Brasil. Máster en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Doctoranda en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la UFMG, Brasil. Miembro del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs Sustentáveis por sus siglas en portugués).

**Cláudio Leite de Souza** – Ingeniero Civil de la Universidad Federal de Viçosa (UFV), Brasil. Máster y Doctor en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la UFMG, Brasil. Miembro del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs Sustentáveis por sus siglas en portugués).

**Gustavo Rafael Collere Possetti** – Ingeniero Ambiental e Ingeniero Electricista de la Universidad Tecnológica Federal del Paraná (UTFPR), Brasil. Máster y Doctor en Ciencias de la Universidad Tecnológica Federal del Paraná (UTFPR), Brasil. Gerente de la Asesoría de Investigación y Desarrollo de la Compañía de Saneamiento del Paraná (Sanepar). Profesor del programa de Maestría Profesional en Gobernanza y Sostenibilidad del Instituto Superior de Administración y Economía (ISAE). Miembro del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs Sustentáveis por sus siglas en portugués).

**Thiago Bressani Ribeiro** – Ingeniero Ambiental de la Universidad Fundación Minera de Educación y Cultura (FUMEC), Brasil. Máster en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Doctorando en Saneamiento de la Universidad de Ghent, Bélgica y de la UFMG, Brasil. Miembro del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs Sustentáveis por sus siglas en portugués).

**Antônio Neves de Carvalho Júnior** – Ingeniero Civil de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Doctor en Ingeniería Metalúrgica y de Minas de la UFMG, Brasil. Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería de Materiales y Construcción de la UFMG, Brasil. Coordinador del Laboratorio de Concreto y Morteros del Departamento de Ingeniería de Materiales y Construcción de la Escuela de Ingeniería de la UFMG, Brasil.

**Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (\*)** – Ingeniero Civil de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Doctor en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Newcastle upon Tyne, UK. Profesor titular del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la UFMG, Brasil. Coordinador del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs Sustentáveis por sus siglas en portugués).

(\*) **Dirección para correspondencia:** 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 INTRODUCCIÓN

A pesar de sus reconocidas ventajas y de su amplio uso para el tratamiento de aguas residuales urbanas, los reactores anaerobios de manto de lodo y flujo ascendente (UASB, por sus siglas del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket) presentan algunas limitaciones relacionadas a las emisiones gaseosas fugitivas, tal como fue descrito en la Parte 1 de esta Colección de Notas Técnicas (NT) (CHERNICHARO *et al.*, 2018). En caso de no ser abordadas adecuadamente, estas limitaciones pueden perjudicar una aplicación más extendida de esta tecnología en Brasil y el resto de Latinoamérica. Según lo presentado esquemáticamente en la Figura 1, las emisiones fugitivas corresponden a los gases responsables por lo olores y la corrosión, los cuales son generados en las diversas etapas de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), y más particularmente en la etapa de tratamiento anaerobio. Una preocupación adicional recae sobre la presencia de gases disueltos en los efluentes de los reactores UASB, los cuales, dependiendo de las condiciones de turbulencia del líquido, pueden ser liberados para la atmósfera, intensificando los olores y los procesos corrosivos, además de representar una posible fuente de emisión difusa de gases de efecto invernadero (GEI). Adicionalmente, los problemas de olor y corrosión también pueden estar relacionados con la línea de tratamiento de biogás, así como con las unidades de manejo de lodo.

En ese sentido, el control de las emisiones gaseosas y de los procesos corrosivos por medio de medidas preventivas y/o correctivas, es esencial para garantizar el bienestar de las personas trabajadoras y residentes en las cercanías de la PTAR, además de reducir los gastos relacionados con el mantenimiento y reparación de las estructuras dañadas por la corrosión y extender la vida útil de los equipos y accesorios. De esta forma, el objetivo de este documento es presentar las técnicas más relevantes para el diseño, la construcción y la operación de reactores UASB para el control de la corrosión y de las emisiones gaseosas, discutiendo sobre las condiciones más importantes necesarias para su implementación.

Una parte importante de estas técnicas fue desarrollada o adaptada a la realidad brasileña a partir de estudios en el ámbito del Programa de Investigaciones en Saneamiento Básico Brasil (PROSAB por sus siglas en portugués), del Proyecto Brasil-Alemania de Fomento al Aprovechamiento Energético de Biogás en Brasil (PRO-BIOGÁS por sus siglas en portugués), de la Red Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas Descentralizados (RENTED por sus siglas en portugués), del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs Sustentáveis por sus siglas en portugués) y por investigaciones desarrolladas en el ámbito del Programa de posgrado en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG) y de otros programas de posgrado en Brasil.

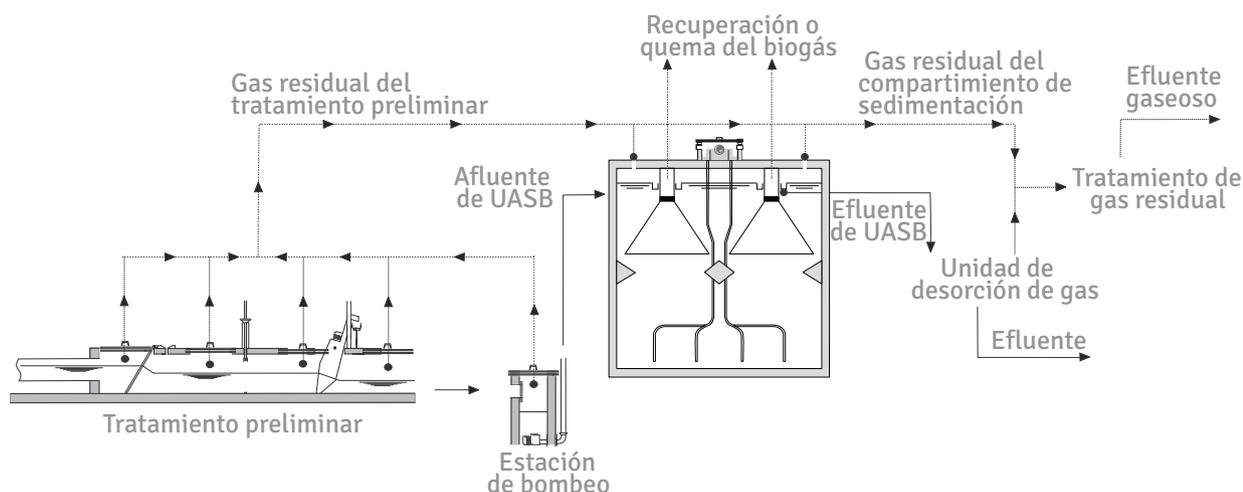


Figura 1 – Emisiones gaseosas fugitivas en las diversas etapas de una PTAR, con énfasis para los reactores UASB

## 2 ORIGEN Y PROBLEMAS RELACIONADOS CON LAS EMISIONES GASEOSAS

Varios compuestos odorantes son biológicamente formados a partir de las aguas residuales en condiciones anaerobias, siendo el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), producto de la reducción biológica del sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) o tiosulfato ( $S_2O_3^{2-}$ ) presentes en el agua cruda, el compuesto más comunmente asociado a la formación de olores (STUETZ & FRECHEN, 2001). El  $H_2S$  presenta un límite de detección para los humanos que varía entre 0,47 ppbv (0,00047 ppmv) y 100 ppbv (0,1 ppmv) (METCALF & EDDY, 2016). Adicionalmente, otros compuestos de azufre (por ejemplo: mercaptanos), ácidos orgánicos volátiles, aldehídos, alcoholes, fenoles, amoníaco y aminas también pueden contribuir para la percepción de los olores (CHERNICHARO, 2007; METCALF & EDDY, 2016).

El sulfuro producido por la actividad de microorganismos se difunde en el agua residual, pudiendo encontrarse en su forma ionizada (el hidrógeno sulfuro o bisulfuro -  $HS^-_{(aq)}$  y el ión sulfuro -  $S^{2-}_{(ac)}$ ) o asociado al hidrógeno (ácido sulfhídrico -  $H_2S_{(ac)}$ ), según el pH del agua. Para valores de pH inferiores a 7, la forma no disociada ( $H_2S_{(ac)}$ ) es el principal componente disuelto, el  $HS^-$  predomina para va-

lores de pH entre 7 y 13. El  $S^{2-}$  solamente predominará para valores de pH extremadamente elevados. El  $H_2S_{(ac)}$  es la única forma de sulfuro capaz de desprenderse del medio líquido y ser liberado para la atmósfera, generando malos olores. Las emisiones de  $H_2S$  dependen, en primer lugar, de que existan las condiciones necesarias para el desarrollo de microorganismos (anaerobios), pero también dependen de otros factores como: su concentración en el agua residual, el área superficial del líquido expuesta a la atmósfera, características constructivas de los reactores anaerobios, grado de turbulencia del fluido, pH y temperatura del agua residual.

Además de la preocupación de emanación de olores, en presencia de humedad y pequeñas cantidades de oxígeno, el  $H_2S$  puede ser oxidado a ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), que posee propiedades corrosivas, causando daños a estructuras metálicas o de concreto (Figuras 2 (a-c)). Adicionalmente, cuando se mezcla con la atmósfera, el  $H_2S$  puede presentar riesgos a la salud humana, inclusive en bajas concentraciones. Los efectos sobre la salud humana comienzan con la irritación ocular (exposiciones por encima de 10 ppmv por 6-7 h), pérdida momentánea de conciencia y otros efec-

tos graves como edema pulmonar y convulsión (exposiciones de 100-200 ppmv por cerca de 20 min) y hasta la muerte (exposiciones por encima de 900 ppmv por aproximadamente 1 min). Elevadas concentraciones de H<sub>2</sub>S en el aire atmosférico (150-200 ppmv) pueden perjudicar las glándulas olfativas de seres humanos, produciendo la pérdida del sentido olfativo en aproximadamente 2-15 min. Esta pérdida del olfato puede llevar a una falsa sensación de seguridad (WEF, 2004).

Además del H<sub>2</sub>S y de otros compuestos odorantes, estudios recientes mostraron la presencia de metano (CH<sub>4</sub>) disuelto en elevadas concentraciones

(6 a 25 mg.L<sup>-1</sup>) en muestras líquidas colectadas en las superficies de sedimentadores de reactores UASB (SOUZA, 2010; SOUZA *et al.*, 2011; NELTING *et al.*, 2015), advirtiendo sobre la posibilidad de su liberación para la atmósfera. De hecho, concentraciones de CH<sub>4</sub> hasta 6,4%<sub>v/v</sub> (64.000 ppmv) ya fueron documentadas en ambientes confinados del compartimiento de sedimentación y de unidades hidráulicas receptoras de los efluentes de reactores UASB, siendo concentraciones que se ubican dentro del rango de inflamabilidad y explosividad del gas (SOUZA, 2010; SOUZA *et al.*, 2012; GLÓRIA *et al.*, 2016).



**Figura 2** - Fotos de detalles de la corrosión en: a) pasarela metálica; b) estructura de concreto; c) estructuras metálicas de barandas.

Para el contenido presentados en la presente NT, los siguientes términos fueron adoptados:

- Cuando los gases son liberados para la atmósfera de forma difusa y sin una medida de control, se denominan **emisiones fugitivas**. Por ejemplo, la emisión de H<sub>2</sub>S en estaciones de bombeo de aguas residuales (EBAR) y en las etapas del tratamiento preliminar, cuyas inmediaciones presentan concentraciones típicas de H<sub>2</sub>S del orden de 0,4 a 40 ppmv (CHERNICHARO *et al.*, 2010).
- Cuando se confina la fuente de emisión fugitiva y se induce una corriente gaseosa por medio de un exhaustor, el flujo se denomina **gas residual**. Por ejemplo, el confinamiento y extracción de los gases de las EBAR y de las etapas del tratamiento preliminar. Otro ejemplo es la extracción de la atmósfera

confinada en el compartimiento de sedimentación de reactores UASB cerrados, cuyas concentraciones de H<sub>2</sub>S pueden alcanzar 50 ppmv (CHERNICHARO *et al.*, 2010), provocando con frecuencia la corrosión de la losa que cubre el reactor cuando no se protege apropiadamente.

- Cuando se realiza la captación de los gases generados en el compartimiento de digestión de los reactores UASB, a partir de la cámara de gas del separador trifásico, el flujo gaseoso se denomina **biogás**, un gas rico en CH<sub>4</sub>, pero que también contiene cantidades significativas de H<sub>2</sub>S, entre 1.000 y 5.000 ppmv (NOYOLA *et al.*, 2006).
- Cuando los gases son emitidos a partir de la combustión de biogás en quemadores y en unidades de aprovechamiento energético, el flujo gaseoso

se denomina **emisión puntual**. En esos casos es importante destacar que los dispositivos de combustión no garantizan 100% de eficiencia en la destrucción del  $\text{CH}_4$  o de los gases odorantes, especialmente en el caso de los quemadores abiertos (BRASIL, 2017; KAMINSKI *et al.*, 2018).

### 3 POSIBLES MEJORAS RELACIONADAS CON EL CONTROL DE LA CORROSIÓN Y DE LAS EMISIONES GASEOSAS

El control de corrosión y de las emisiones gaseosas debe priorizar la aplicación de acciones preventivas para reducir las emisiones fugitivas, aunque eventualmente pueden ser necesarias acciones correctivas que impliquen la contención y extracción de los gases residuales para su tratamiento. Adicionalmente, es posible utilizar métodos para forzar la liberación (desorción) de los gases disueltos en los efluentes de los reactores UASB.

#### 3.1 Control preventivo de las emisiones gaseosas

Los esfuerzos para reducir las emisiones fugitivas deben ser considerados desde la fase de diseño, además de los requeridos durante la operación de las PTARs, tal como se sintetiza en el Cuadro 1.

#### 3.2 Control correctivo de las emisiones gaseosas

##### 3.2.1 Contención y extracción de los gases

Incluso después de aplicar acciones preventivas, dependiendo de las condiciones de formación de los gases, puede ser indispensable: i) confinar las fuentes de emisión por medio de cerramientos/coberturas; ii) la introducción de aire atmosférico dentro de las áreas confinadas; y iii) la captación/extracción de los gases residuales generados. En el Cuadro 2 se presentan los principales aspectos técnicos de interés para el dimensionamiento de cerramientos y sistemas de extracción de los gases residuales. La discusión que sigue proporciona más detalles y propuestas de diseño para la contención de las emisiones fugitivas y extracción de los gases residuales en

las etapas del tratamiento preliminar y en los reactores UASB.

La contención total de los olores y de los gases corrosivos generados en el tratamiento preliminar es una medida que demanda una inversión significativa, ya que su efectividad será garantizada únicamente en caso de construir una cobertura o cerramiento que confine todo el tratamiento preliminar, lo que produce caudales de gas residual considerables a tratar. En los casos en los que no sea necesario un control riguroso de las emisiones gaseosas en el tratamiento preliminar, se recomienda optar por una medida que demande una inversión menor. Una alternativa a los cerramientos se presenta en la Figura 3, que consiste en tapar los canales del tratamiento preliminar, creando una zona de presión negativa debajo de la losa/tapa en la proximidad de las rejillas, punto por el que ingresaría el aire de forma natural. Para promover zonas de presión negativa cerca de las rejillas, aguas arriba y aguas abajo de las barras, deben ser instaladas bocas de ventilación conectadas al sistema de extracción de gases, así como cortinas formadas con perfiles de policloruro de vinilo (PVC). Esta cortina permite disminuir el área libre de la sección transversal del canal (entre el nivel de agua y la losa/tapa) con lo que se promueve una mayor velocidad del gas en las aberturas entre los perfiles de PVC.

En el caso de los reactores UASB, la contención de los olores y gases corrosivos se puede realizar cubriendo y ventilando tanto los dispositivos de distribución de caudal que alimentan los reactores, como el compartimiento de sedimentación y las canaletas de colecta del efluente de los reactores (Figura 4). Es necesario prever coberturas que permitan el acceso para limpieza y mantenimiento, tales como sistemas deslizantes o tapas de inspección. En el caso del compartimiento de sedimentación, es necesario prever aberturas en la losa superior para permitir el acceso de aire atmosférico en la superficie del sedimentador, así como bocas de ventilación de gases residuales en las paredes laterales de los reactores, próximos al nivel de agua y a las canaletas de colecta

del efluente. De manera alternativa, se puede prever la entrada de aire en el compartimiento de sedimentación a través de rendijas prefabricadas colocadas entre las baldosas de la losa superior. Sin embar-

go, esta medida solo se recomienda para reactores UASB de pequeña escala, ya que no garantiza un flujo adecuado de gases en toda la atmósfera confinada.

**Cuadro 1** – Acciones preventivas para la reducción de las emisiones fugitivas en PTARs

Etapa	Problema	Acción necesaria
Diseño	Emisiones fugitivas en las unidades de tratamiento preliminar de la PTAR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inclusión de dispositivos que permitan la remoción de sedimentos acumulados en los canales de las rejillas y de los desarenadores (por ejemplo: puntos de lavado con chorro de agua)</li> <li>- En las situaciones en las que los canales del tratamiento preliminar no estén confinados, priorizar el régimen hidráulico laminar, con el fin de mantener los gases odorantes disueltos en la fase líquida;</li> <li>- En las situaciones en las que los canales del tratamiento preliminar estén confinados, evaluar la posibilidad de que la llegada del agua residual a esa unidad se dé en régimen turbulento (por ejemplo: colocar las tuberías de llegada por encima del nivel máximo de agua), de modo a facilitar el desprendimiento, extracción y el tratamiento de los gases disueltos en el agua residual afluente.</li> </ul>
	Emisiones fugitivas en los reactores UASB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incluir un dispositivo para evitar la acumulación de nata dentro de los separadores trifásicos de los reactores UASB (por ejemplo: remoción hidrostática de nata) – ver Parte 3 de la Colección de Notas Técnicas (LOBATO <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>- Diseñar los reactores UASB con sedimentadores impermeables a gases (por ejemplo: tapas herméticamente cerradas, adopción de técnicas de confinamiento y impermeabilización de las superficies);</li> <li>- Evitar caídas hidráulicas en la colecta y conducción del efluente tratado.</li> </ul>
	Emisiones fugitivas generales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de barreras físicas en el perímetro de la PTAR que promuevan la turbulencia atmosférica (por ejemplo: árboles/cortinas verdes y muros de por lo menos 4 m de altura).</li> </ul>
Operación	Emisiones fugitivas en las unidades de tratamiento preliminar de la PTAR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoción y disposición final adecuada y frecuente de los residuos del tratamiento preliminar;</li> <li>- Adición de aire y/o agentes químicos en la red colectora, en estaciones de bombeo y en el tratamiento preliminar – consultar Brandt <i>et al.</i> (2017);</li> <li>- Establecimiento de puntos, procedimientos (entrada sumergida y gradual) y horarios para la recepción de lodo de tanques sépticos (de preferencia durante el mayor caudal de agua residual entrante a la PTAR);</li> <li>- Las unidades deben limpiarse y lavarse después de intervenciones operacionales, además de ser pintadas al darles mantenimiento.</li> </ul>
	Emisiones fugitivas en los reactores UASB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoción frecuente de la nata acumulada en los reactores UASB – ver Parte 3 de la Colección de Notas Técnicas (LOBATO <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>- Realización de pruebas de estanqueidad en las cámaras de biogás y en los sedimentadores;</li> <li>- Manejo adecuado de las tapas de inspección en las cámaras de biogás y en los sedimentadores.</li> </ul>
	Emisiones fugitivas en las etapas de manejo del lodo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Restricción a la manipulación de lodo no estabilizado;</li> <li>- Evitar esfuerzos cortantes o cizallamiento en el lodo al ser bombeado;</li> <li>- Remoción diaria del lodo deshidratado;</li> <li>- Adición de permanganato o sales de hierro al lodo – consultar Brandt <i>et al.</i> (2017);</li> <li>- Contención, extracción y tratamiento de los gases residuales que contengan amoníaco, emitidos a partir de la estabilización alcalina prolongada del lodo (en el caso de adoptar esa opción para la higienización del lodo).</li> </ul>
	Emisiones fugitivas generales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementación de un programa para la recepción de efluente no domésticos, de modo a restringir el vertido de elevadas cargas de compuestos precursores de olores (nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, azufre orgánico, sulfato, tiosulfato, ácidos orgánicos volátiles, entre otras especies químicas odorantes);</li> <li>- Monitoreo adecuado de la concentración de sulfato afluente a la PTAR, de modo a facilitar la identificación de aportes industriales;</li> <li>- Monitoreo de las emisiones fugitivas y elaboración de mapas de olores en el entorno de la PTAR (análisis para identificar y cuantificar los compuestos odorantes; uso de nariz electrónica; elaboración de estudios olfatométricos por medio de jurado) – consultar CEN (2003); Lisboa <i>et al.</i> (2009, 2010); Miranda (2017); Blanco-Rodríguez <i>et al.</i> (2018).</li> </ul>

**Cuadro 2** – Especificaciones técnicas para cerramientos y sistemas de extracción de los gases residuales

Criterio de diseño	Especificación técnica	
Tipo de cerramiento	Plano	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite un acceso limitado al espacio confinado, por medio de compuertas o ventanas de inspección;</li> <li>- Minimiza el volumen confinado y el caudal de gas a tratar;</li> <li>- Recomendado para: canales, cajas de distribución, tanques pequeños.</li> </ul>
	En arco o techado de dos aguas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite un acceso limitado al área confinada, por medio de compuertas o ventanas de inspección;</li> <li>- Pueden implicar costos menores a los cerramientos del tipo plano (en función del menor espesor del material), pero aumentan el volumen confinado y el caudal de gas a tratar;</li> <li>- Recomendado para: canales, tanques.</li> </ul>
	Cúpula o hangar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite acceso completo al área confinada;</li> <li>- Presenta mayores costos de inversión inicial y de operación (generan mayores caudales de gas para extracción y tratamiento);</li> <li>- Recomendado para: tratamiento preliminar, unidades de manejo de lodo, sedimentadores, filtros biológicos percoladores como posttratamiento de reactores UASB.</li> </ul>

Criterio de diseño	Especificación técnica
Materiales constructivos de los cerramientos y del sistema de extracción	<p>Concreto</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo costo y elevada capacidad de soportar cargas;</li> <li>- Módulos pesados y espesos, lo que dificulta el acceso del personal de operación;</li> <li>- Susceptible a la corrosión (requiere aplicación de revestimiento de PRFV, poliúrea, poliuretanos elastoméricos, pinturas epóxicas etc.);</li> <li>- Recomendado para: cerramiento de reactores UASB, construcción de unidades de tratamiento de gases residuales.</li> </ul>
	<p>Aluminio</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevado costo y buena capacidad para soportar esfuerzos de tensión;</li> <li>- Son leves y facilitan el acceso del personal de operación;</li> <li>- Posee buena resistencia en atmósferas con H<sub>2</sub>S, pero puede ser atacado por el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>;</li> <li>- Recomendación: confección de cerramientos (con revestimiento epóxico) en puertas, ventanas de inspección, marcos, ductos de transporte de gases.</li> </ul>
	<p>Acero inoxidable</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevado costo y óptima capacidad de soportar esfuerzos de tensión;</li> <li>- Son relativamente leves y facilitan el acceso del personal de operación;</li> <li>- Elevada resistencia a la corrosión. Son utilizados aceros inoxidables del tipo AISI 316;</li> <li>- Recomendación: confección de todas las estructuras, en razón de la durabilidad del material.</li> </ul>
	<p>Materiales poliméricos y elastoméricos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- PRFV, PVC, PEAD, PP o PPR, caucho;</li> <li>- Elevado costo, pero bajo peso específico y elevada resistencia a la corrosión;</li> <li>- Pueden ser moldeados en diversas formas;</li> <li>- Recomendación: tubos y conexiones, tapas de canales y tanques en general.</li> </ul>
Sistema de extracción de gases	<p>Caudal de extracción</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tasa de renovación de la atmósfera confinada (introducción de aire): en áreas no visitables (acceso restringido), las tasas varían entre 4 a 6 renovaciones/h; en ambientes visitables (entrada del personal de operación), las tasas son del orden de 10 renovaciones/h;</li> <li>- Presión diferencial: se deben controlar las aberturas de los cerramientos hacia el exterior, además de someter el ambiente interno a una presión inferior a la atmosférica (presión diferencial mínima de 2,5mm c.a.), proporcionando condiciones para que el aire entre por las rendijas y aberturas (velocidad mínima de 6,4 m.s<sup>-1</sup>), con la garantía de no ocurrencia de emisiones fugitivas;</li> <li>- Concentración de los gases: debido a la mezcla del O<sub>2</sub> (proveniente del aire atmosférico introducido en el cerramiento) con CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S, los caudales deben garantizar que no se formen mezclas dentro de los límites inferior y superior de inflamabilidad o explosividad: 5%<sub>v/v</sub> a 15%<sub>v/v</sub> para el CH<sub>4</sub>; 4%<sub>v/v</sub> a 44%<sub>v/v</sub> para el H<sub>2</sub>S. Eventualmente puede ser necesario dar seguimiento a las concentraciones de CH<sub>4</sub> en el sistema de extracción.</li> </ul>
	<p>Ductos de transporte de gases</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pueden ser de sección circular o rectangular;</li> <li>- Deben tener una inclinación que posibilite la conducción de la humedad condensada hacia los puntos bajos de la red;</li> <li>- En los puntos más bajos de la red de extracción deben instalarse dispositivos para el drenaje del condensado;</li> <li>- Debe instalarse <i>dampers</i> o válvulas de tipo aguja en cada punto de extracción de los gases y en los puntos de las ramificaciones de la red de ductos de extracción (permiten ajustes de caudal y presión en cada ramificación de la red y son utilizados para aislar una determinada área del sistema de control de olores durante labores de mantenimiento).</li> </ul>
	<p>Ventilador / exhaustor</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Su colocación puede ser antes o después de la unidad de tratamiento de gases;</li> <li>- Se utiliza ventiladores centrífugos con rotor de paletas inclinadas hacia adelante, radiales o inclinadas hacia atrás;</li> <li>- Deben estar contruidos en algún material resistente a la corrosión por solución de ácido sulfúrico al 10%;</li> <li>- Utilizar componentes electromecánicos recomendados para áreas clasificadas como zonas de riesgo según la Directiva 1999/92/EC del Parlamento y Consejo europeo, con certificación ATEX (Equipos Eléctricos para Atmósferas Explosivas), según la Directiva 1994/9/EC del Parlamento y Consejo Europeo.</li> </ul>

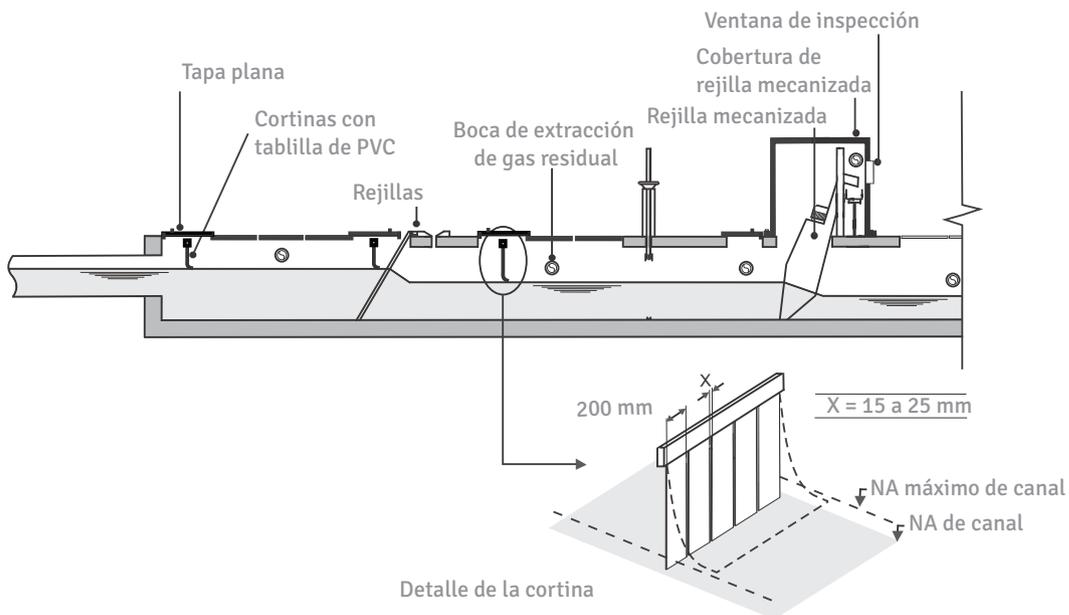
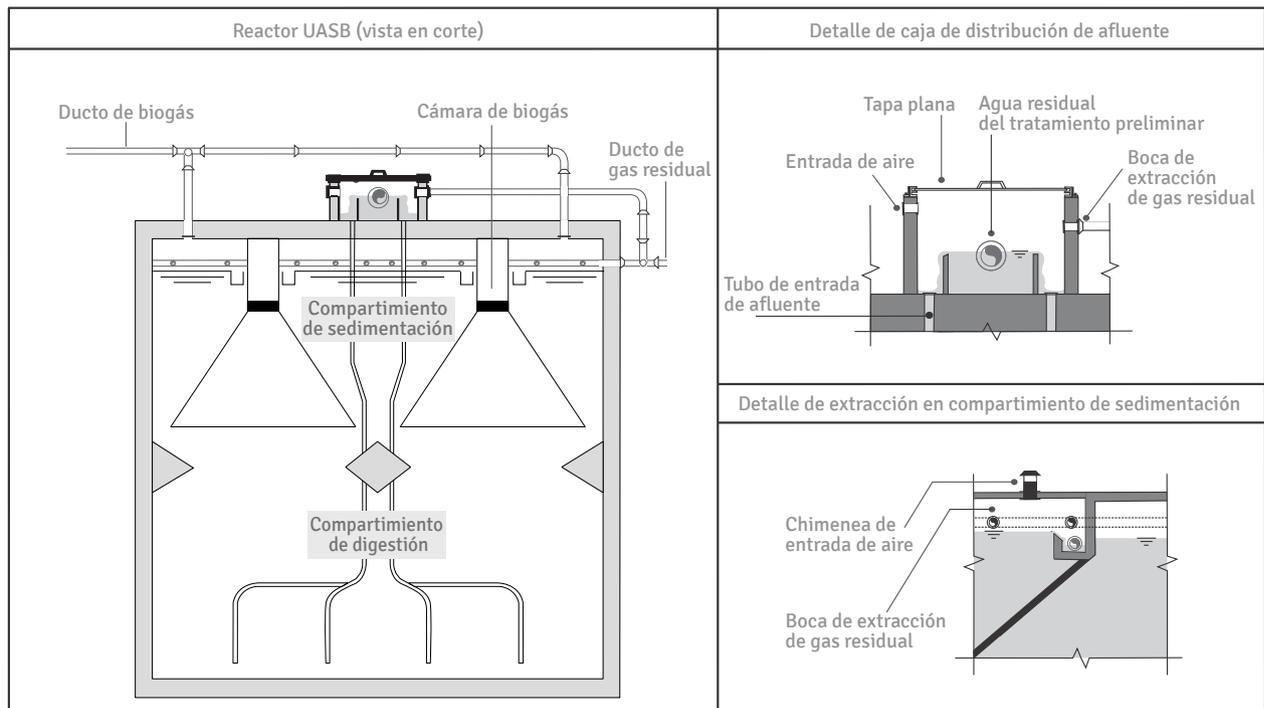


Figura 3 – Esquema de la contención de olores y gases corrosivos en el tratamiento preliminar.



**Figura 4** – Esquema de la contención de olores y gases corrosivos en reactores UASB

El flujo de gases en la atmósfera confinada del compartimiento de sedimentación debe ser siempre descendente, reduciendo el riesgo de condensación de humedad en la losa superior y protegiéndola contra la corrosión. Además, el  $H_2S$  y otros gases odorantes en general poseen densidades mayores a las del aire, lo que favorece su acumulación en las regiones inferiores del volumen confinado. Como el volumen confinado en los compartimientos de sedimentación puede ser significativamente elevado, se recomienda la aplicación de tasas de renovación menores en esta atmósfera confinada (3 a 4 renovaciones. $h^{-1}$ ), aun suficientes para impedir la acumulación de humedad en las estructuras internas (WEF, 2004). Con esta práctica se economizan gastos en el sistema de extracción y tratamiento de los gases residuales.

Con respecto a los compartimientos de sedimentación de los reactores UASB, en el medio técnico/científico existe un gran debate en relación a la construcción de reactores sin losa superior (abiertos a la atmósfera), ya que algunos estudios y resultados prácticos demostraron que, en el caso de reactores

diseñados sin losa superior en el área de sedimentación, la acumulación de nata sobre la superficie puede ayudar en el control de olores debido a la presencia de microorganismos oxidadores de sulfuro (SOUZA *et al.*, 2006; GARCIA, 2009). De este modo, en los casos en los que no sea necesario un control riguroso de las emisiones gaseosas en los reactores UASB, es posible evaluar la posibilidad de retener la nata en los sedimentadores abiertos a la atmósfera, reduciendo significativamente los costos constructivos y controlando los olores y la corrosión. Adicionalmente, existen defensores de la idea de cubrir los compartimientos de sedimentación y conectarlos a la cámara de gas en el interior del separador trifásico. Esta alternativa fue experimentada en reactores UASB modificados y en reactores anaerobios de lecho fluidizado (RALFs) en el estado de Paraná (Brasil), adoptada como una opción para el aumento de la tasa de recuperación de biogás. Sin embargo, se advierte que es necesario ampliar los estudios que permitan validar la eficacia de esta solución, esclareciendo sus ventajas y desventajas, pues va en sentido contrario al concepto original de los

reactores UASB clásicos, en los cuales la conexión del compartimiento de sedimentación con la cámara de gas no se permite.

### 3.2.2 Desorción de los gases disueltos en efluentes de reactores UASB

La presencia de gases disueltos en los efluentes de los reactores UASB puede agravar significativamente la emisión de olores y de gases de efecto invernadero ( $CH_4$ ), así como los procesos corrosivos en las PTARs. Según se discutió en el ítem anterior, es posible minimizar la liberación de gases confinando y ventilando las canaletas de salida del efluente. Sin embargo, solo es posible garantizar un control efectivo de la remoción del  $H_2S$  en efluentes de reactores UASB maximizando su desprendimiento en una unidad simple, compacta, confinada y dotada de ventilación, enviando el gas residual generado hacia un trata-

miento adecuado. Este proceso de transferencia de masa que involucra la remoción de gases disueltos de un efluente líquido para un flujo gaseoso se conoce como desorción. En la Figura 5 (a-c) se muestran los principales tipos de cámaras de desorción (CD) que pueden utilizarse para la remoción de gases disueltos en efluentes de reactores UASB. El funcionamiento de las CD se fundamenta en mecanismos elementales de agitación de la fase líquida en el interior de una estructura cerrada con el flujo del agua en caída libre y presión interna igual a la atmosférica. Un flujo de gas (aire atmosférico) es aplicado en el sentido opuesto al flujo de agua residual, aumentando la tasa de transferencia de masa entre las fases líquida y gaseosa. De esta forma, en la parte superior de la CD se tiene la entrada de agua residual y la salida del aire (gas residual), mientras que en la parte inferior está la salida del agua y la entrada del aire (limpio).

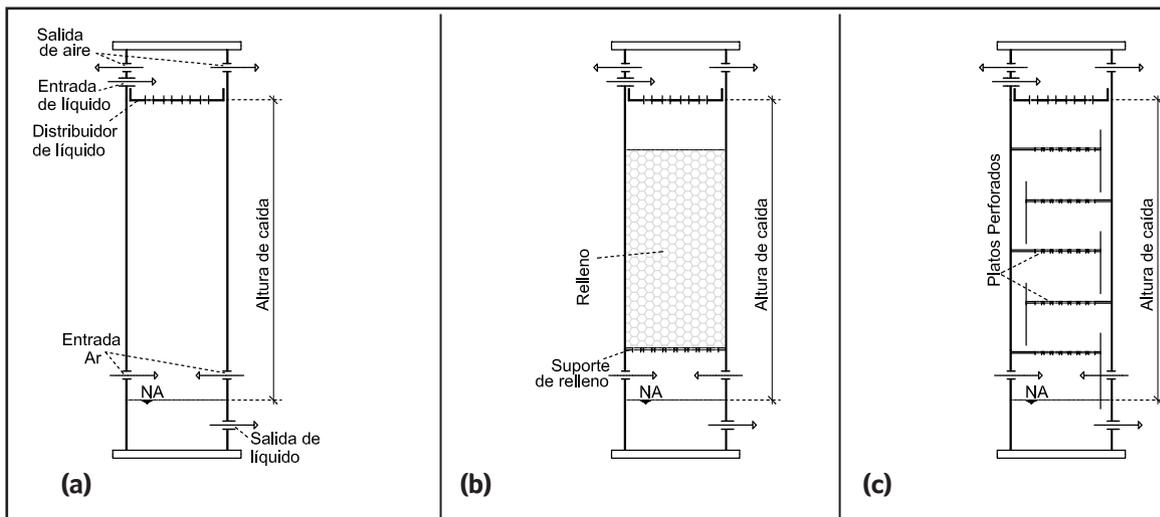


Figura 5 – Esquema de cámara de desorción: a) sin relleno, b) con relleno, c) con platos o bandejas

La CD sin relleno (Figura 5a) es la técnica más económica, pues a diferencia de las otras opciones, no posee ningún atributo interno especial, basándose únicamente en la caída del agua. En general, la CD sin relleno alcanza eficiencias más bajas que las demás CDs, pero que pueden ser suficientes para posibilitar la minimización de

problemas asociados a las emisiones fugitivas de  $H_2S$  en efluentes de reactores UASB (GLÓRIA *et al.*, 2016). En el Cuadro 3 se sintetizan las eficiencias de remoción de  $H_2S$  que han venido siendo medidas, así como los principales parámetros de diseño que han sido identificados y puestos a prueba. Las CD permiten también la remoción

del CH<sub>4</sub> en los efluentes de reactores UASB, una preocupación más reciente que viene ganando un notorio interés en el medio técnico y científico. En este sentido, existen propuestas de mejora de este proceso a partir del uso de membranas desgasificadoras (COOKNEY *et. al*, 2012; COOKNEY *et. al*, 2016.) y del uso de sistemas al vacío, como la tecnología DiMeR (*Dissolved Methane Recovery*), recientemente evaluada en el estado

de Paraná (NELTING & TRAUTMANN, 2015). Más información sobre la cuantificación, desorción y recuperación del CH<sub>4</sub> disuelto puede consultarse en los trabajos realizados por Souza (2010), Nelting *et al.* (2015), Glória *et al.* (2016), Nelting *et al.* (2017), Souza *et al.* (2018), los cuales se detallan en la Parte 5 de esta Colección de NTs (POSSETTI *et al.*, 2018).

**Cuadro 3** – Síntesis de los principales parámetros de diseño y eficiencias de remoción de H<sub>2</sub>S en cámaras de desorción (resultados obtenidos en investigaciones piloto)

Tipo de cámara de desorción	Altura útil (H) <sup>(a)</sup> (m)	Tasa de aplicación superficial (TAS) <sup>(b)</sup> (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .min <sup>-1</sup> )	Qg.Q <sub>l</sub> <sup>-1</sup> (rQ) <sup>(c)</sup>	Eficiencia de remoción de H <sub>2</sub> S (%)	Concentración de H <sub>2</sub> S en el gas residual (ppm)
Sin relleno	1,0 a 1,5	0,10 - 0,30	2 a 10	40 - 70	100 - 400
Con relleno <sup>(d)</sup>	1,2 a 1,5	0,15 - 0,30	3 a 4	65 - 85	200 - 600

<sup>(a)</sup> Altura de caída del agua: determina la altura útil de caída, y por lo tanto, el tiempo de flujo en caída;  
<sup>(b)</sup> Tasa de aplicación superficial (TAS): determina el área de la sección transversal, y por lo tanto, el tamaño en planta de la cámara;  
<sup>(c)</sup> Razón (rQ) entre los caudales de aire (Qg) y de líquido (Ql): determina el caudal de ventilación de la atmósfera interna en la CD a partir del caudal de agua residual;  
<sup>(d)</sup> Anillos plásticos.  
**Fuente:** Santo (2017), Glória (2018), Machado (2018).

**Ejemplo simplificado de dimensionamiento de una CD con relleno**

Para este ejemplo fueron adoptados los parámetros considerados más promisorios hasta la fecha, de modo a obtener eficiencias del orden de 80% para la remoción de H<sub>2</sub>S disuelto en los efluentes de los reactores UASB. Con ello se espera generar un gas residual con una concentración de H<sub>2</sub>S de cerca de 400ppm (y CH<sub>4</sub> de cerca de 0,5 % o 5.000 ppmv). Los parámetros más adecuados, según lo presentado en el Cuadro 3 son:

- H = 1,50 m (útil);
- TAS = 0,25 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>;
- rQ = 4 veces;
- Modificaciones internas: relleno con un estrato de 1 m de anillos plásticos;
- Altura total de 2,0 m compuesta por: 0,25 m (desde la tapa hasta el distribuidor del afluente) + 0,25 m (del distribuidor hasta el inicio del relleno) + 1,0 m (del inicio del relleno hasta la placa de soporte) + 0,25 m (de la placa de soporte hasta el nivel de agua NA) + 0,25 m (del nivel de agua NA hasta el fondo de la cámara).

Procedimiento de dimensionamiento:

Considerando un caudal de agua residual afluente: Q<sub>l</sub> = 10 L.s<sup>-1</sup> ou (0,6 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>)

Primeramente, se calcula el área de la unidad:

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

Siendo: rQ = 4, el caudal de ventilación (aire) será:

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

*Nota: Este caudal de ventilación, rico en gases residuales extraídos de la CD, deberá ser enviado para una unidad de tratamiento, según lo que se expone en el siguiente ítem.*



### 3.2.3 Tratamiento de los gases residuales

Una vez confinados, desorbidos y extraídos, los gases residuales deben ser tratados adecuadamente. Derivadas a partir de una vasta experiencia adquirida en proyectos de sistemas en escala real, las técnicas más utilizadas para el tratamiento de olores y gases corrosivos en PTARs son: absorción físico-química, adsorción y biofiltración (BELLI FILHO *et al.*, 2001; NOYOLA *et al.*, 2006). Si la PTAR utiliza un sistema de lodo activado como postratamiento del efluente del reactor UASB, una posibilidad simple y económica para el control de olores y gases corrosivos es enviar el gas residual para el fondo del tanque de aireación. La biomasa aerobia del tanque de aireación oxidará los sulfuros y otros compuestos odorantes. Otra posibilidad bastante económica para el tratamiento de los gases residuales es enviarlos hacia los quemadores de biogás. En este caso el biogás será utilizado como combustible para la destrucción de los compuestos odorantes y corrosivos presentes en los gases residuales. Para esta aplicación debe revisarse la eficiencia de los quemadores (ver siguiente ítem).

De entre las técnicas físicas, químicas y biológicas citadas anteriormente, los aspectos económicos (costos de inversión inicial, operación, mante-

nimiento, requisitos de energía y de productos químicos) son ampliamente favorables al uso de biofiltros (CHERNICHARO *et al.*, 2010; ESTRADA *et al.*, 2012). Por este motivo, en esta NT se presenta únicamente los aspectos relacionados a la biofiltración. Más detalles con respecto a los procesos de absorción físico-química y de adsorción pueden consultarse en Kohl & Nielsen (1997), Belli Filho *et al.* (2001) y Stuetz & Frechen (2001).

El proceso de biofiltración consiste en usar un lecho fijo de material de relleno para el desarrollo de una biomasa adherida (biofilme), a través del cual el gas residual es introducido en sentido ascendente o descendente. Un grupo aerobio de bacterias se desarrollan en el biofilme y convierte el  $H_2S$  en  $S_0$  o  $SO_4^{2-}$ . Para la formación y el crecimiento del biofilme, el medio de soporte debe ser humidificado frecuentemente. El material de relleno también tiene por objetivo proveer nutrientes para el crecimiento de los microorganismos.

Los biofiltros pueden ser clasificados en tres tipos principales: biofiltro no estructurado y con fondo de relleno (excavado en el suelo) (Figura 6 (a-b)); biofiltro estructurado y con fondo falso (Figura 7 (a-b)); biofiltro prefabricado (Figura 8 (a-b)) (CHERNICHARO *et al.*, 2011).

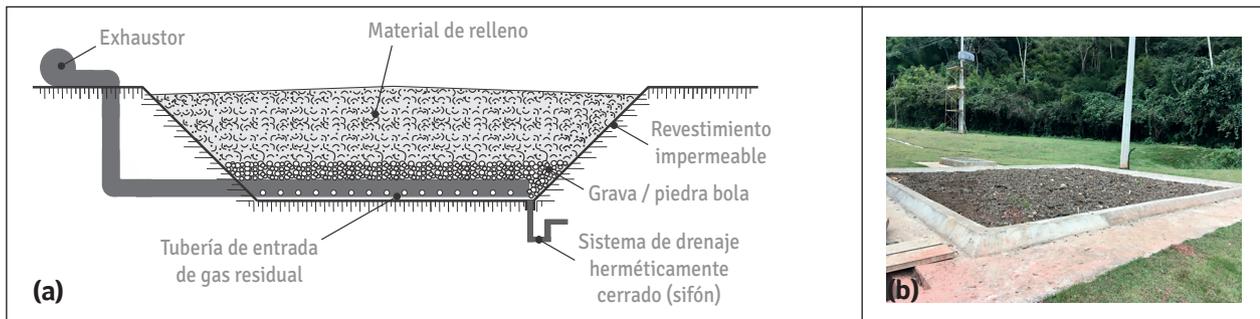
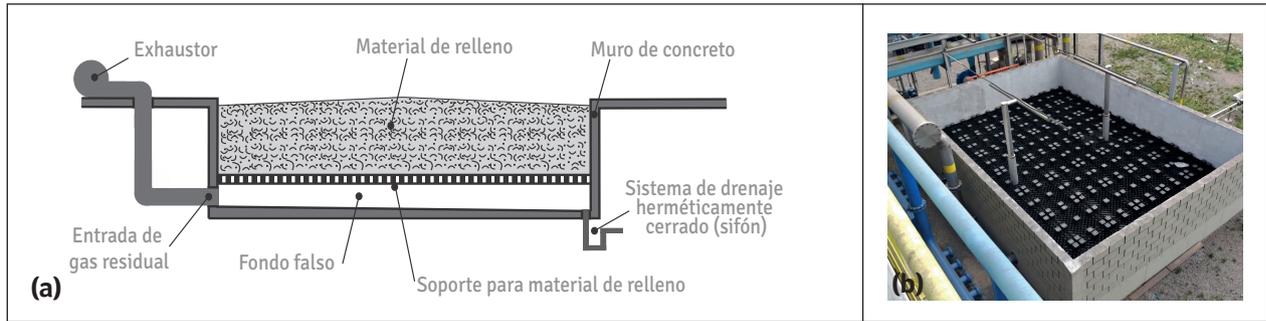
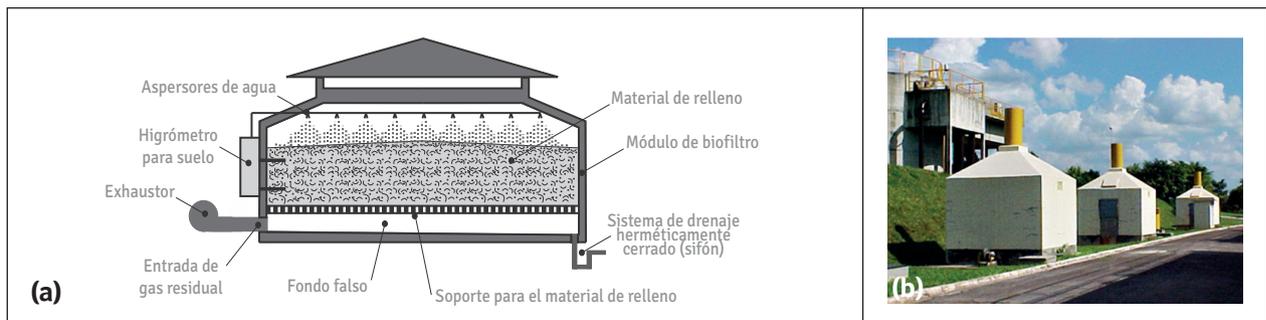


Figura 6 – Biofiltro no estructurado con fondo de relleno: a) diseño esquemático; b) foto en una PTAR.



**Figura 7** – Biofiltro estructurado y con fondo falso: a) diseño esquemático; b) foto en una PTAR.



**Figura 8** – Biofiltro prefabricado: a) diseño esquemático; b) foto en una PTAR.

Varios factores afectan la biofiltración de los gases residuales ricos en  $H_2S$ . La composición y el caudal del gas residual, las características y la humedad de los materiales de relleno son determinantes para el proceso, aunque otros factores como el pH y la temperatura también desempeñan un papel fundamental. El dimensionamiento del biofiltro es hecho a partir de tres parámetros principales: i) tiempo de contacto del gas con el medio de soporte; ii) tasa de aplicación superficial; y iii) carga volumétrica. La experiencia práctica muestra que, para el caso del tratamiento de gases residuales de PTARs, la concentración del  $H_2S$  será muy baja, así como la carga volumétrica aplicada al biofiltro. De esta forma, los parámetros que definirán las dimensiones del biofiltro serán el tiempo de contacto del gas con el medio de soporte y la tasa de aplicación superficial, ambos estrictamente dependientes del caudal de gas residual. Más detalles sobre la selección de los materiales de relleno, parámetros de dimensionamiento y criterios de diseño de los biofiltros se presentan en la norma NBR 12.209 (ABNT, 2011),

en Chernicharo *et al.* (2011) y en Souza *et al.* (2018). En el caso de que exista interés en el dimensionamiento de un biofiltro para reducir el  $CH_4$  residual liberado a partir de efluentes de reactores UASB (tema más reciente), se recomienda consultar a Brandt (2016) y a Souza *et al.* (2018). Si se desea reducir tanto los olores como el  $CH_4$ , se recomienda instalar dos biofiltros en serie, siendo el primero para dar tratamiento a los compuestos odorantes y el segundo para el tratamiento del  $CH_4$ . Esto se debe a que las condiciones ácidas frecuentemente encontradas en biofiltros de  $H_2S$  pueden restringir la actividad de las bacterias oxidadoras de  $CH_4$ .

### 3.2.4 Control de las emisiones puntuales de olores y de GEI

Los quemadores, también conocidos como *flares*, son esenciales para toda PTAR anaerobia. En PTARs sin unidad de aprovechamiento energético del biogás, el quemador reduce las emisiones de GEI y de olores por medio de la combustión del

CH<sub>4</sub> y de los compuestos odorantes. En el caso de PTARs con unidades de aprovechamiento energético, el quemador debe ser instalado para los excesos de producción de biogás o para paros en las unidades de aprovechamiento energético (BRASIL, 2017). De acuerdo a la presión necesaria del gas, los quemadores pueden ser clasificados en dos tipos: atmosféricos (8 mbar), o de aire forzado (15 mbar). Los quemadores atmosféricos obtienen aire para la combustión desde el ambiente por autosucción. En los quemadores de aire forzado el aire es aportado por un soplador (FNR, 2010). En lo que concierne el confinamiento de la llama, existen dos tipos principales de quemadores:

abiertos y cerrados. En ambos casos la ignición puede ser realizada por llama piloto o por chispa eléctrica. Las ventajas y desventajas de cada tipo de quemador se presentan en el Cuadro 4. Los requisitos y recomendaciones de seguridad y demás informaciones específicas pueden consultarse en la Guía Técnica de Aprovechamiento energético de Biogás en PTARs (BRASIL, 2017), en la norma NBR 12.209 (ABNT, 2011), en la norma alemana DWA\_M\_212 - Equipo Técnico de Digestores Anaerobios en PTARs (DWA, 2008; KAMINSKI *et al.*, 2018) y en la Parte 5 de esta Colección de NTs (POSSETTI *et al.*, 2018).

**Cuadro 4** – Comparación entre tipos de quemadores de biogás

Quemador	Vantagens	Desvantagens
Abierto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenta menores costos de inversión inicial (hasta 20 veces menores a los de los quemadores cerrados);</li> <li>- Operación sencilla;</li> <li>- Presenta buena dispersión de los gases de combustión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor área de retiro debido a la radiación</li> <li>- Aplicable únicamente para caudales pequeños de biogás (&lt; 7 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>);</li> <li>- Generalmente no es posible dar seguimiento o supervisar la quema (temperatura de quema, estabilidad de la llama, caudal y tiempo de residencia del biogás etc.);</li> <li>- Bajas eficiencias de destrucción del CH<sub>4</sub> (&lt;50%) y de los compuestos odorantes.</li> </ul>
Cerrado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayores eficiencias de destrucción del CH<sub>4</sub> (&gt;98%) y de los compuestos odorantes (&gt;95% en el caso del H<sub>2</sub>S);</li> <li>- Menor área de retiro debido a la radiación;</li> <li>- Posibilidad de controlar y dar seguimiento al proceso (medición del caudal de biogás y de la temperatura de quema, puntos para toma de muestras y gases de combustión etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayores costos de inversión inicial;</li> <li>- Mayor complejidad operativa;</li> <li>- Baja dispersión de los gases de combustión;</li> <li>- Puede ser necesario instalar un gasómetro para facilitar la regulación del biogás enviado al quemador.</li> </ul>

Fuente: Adaptado de BRASIL (2017) y Kaminski *et al.* (2018).

### 3.2.5 Uso de materiales resistentes a la corrosión y revestimientos anticorrosivos

Con el fin de minimizar los problemas de corrosión en las líneas de colecta de biogás, los tubos y las conexiones deben ser de acero inoxidable o de un plástico adecuado. Debido a la mayor resistencia a la corrosión, se recomienda el uso de acero inoxidable AISI 316Ti (EN 1.4571) en lugar de acero AISI 304 (EN 1.4301). El espesor mínimo de las paredes de los tubos de acero inoxidable debe seguir lo recomendado por la norma ISO 4200 Serie A (Brasil, 2017). Tubos y conexiones de polietileno de alta densidad (PEAD) se consideran adecuados para la conducción del biogás, a diferencia de los tubos y conexiones de polícloruro de vinilo (PVC). En el caso de usar PEAD, de-

ben usarse tubos conductores con resistencia eléctrica menor a 109 Ohm y coeficiente de expansión térmica de 0,20 mm.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> con el fin de minimizar el riesgo de incendio. En el caso del PEAD, debido a la baja estabilidad estructural del plástico, es indispensable colocar un número suficiente de soportes para mantener los elementos suspendidos, evitando así curvaturas o pandeos indeseables propensos a la acumulación de condensado (BRASIL, 2017).

El material más frecuentemente utilizado para la construcción de reactores UASB es el concreto reforzado. Para protegerlo de la corrosión, debe aplicarse un revestimiento interno anticorrosivo, principalmente en las regiones que quedan por encima del nivel de líquido. El separador trifásico, por estar

en la parte superior del reactor, está más expuesto a la corrosión, por lo que debe fabricarse en un material más resistente, o bien ser revestido con más rigor (CHERNICHARO, 2007). Debe señalarse que los separadores trifásicos construidos en concreto han proporcionado experiencias negativas debido a problemas con fugas de gas y corrosión, además del elevado peso y volumen de su estructura. Algunos materiales más resistentes a la corrosión y con menor peso y volumen, como el polipropileno (PP) y el plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV), son alternativas que han ganado importancia en los últimos años.

Para el caso de reactores construidos en acero, la protección anticorrosiva a partir de revestimientos es la técnica más difundida, siendo necesario un control riguroso de los revestimientos utilizados y/o el uso de aceros especiales. Es recomendable el revestimiento con pintura epóxica de elevado espesor (>400  $\mu\text{m}$ ), aplicado después de un tratamiento abrasivo de la superficie. Los aceros inoxidables que contienen molibdeno (AISI 316L) poseen una mayor resistencia a la corrosión.

Para los reactores en concreto reforzado, el cuidado de la protección anticorrosiva de la estructura debe darse desde el inicio de la fase constructiva de la unidad, usando un concreto de resistencia química adecuada. Algunos aspectos a considerar para alcanzar tasas reducidas de absorción y de permeabilidad son: usar un concreto con baja relación agua/cemento; vibración rigurosa del concreto; proceso de cura apropiado; escogencia de un tipo de cemento adecuado, por ejemplo, el Portland puzolánico (CHERNICHARO, 2007).

Se destaca que omitir los aspectos mencionados anteriormente, no especificando cuidadosamente los materiales y técnicas de ejecución, puede conducir a una reducción significativa de la vida útil de la estructura de concreto, según lo expuesto a continuación: i) una elevada relación agua/cemento produciría una estructura con mayor porosidad/capilaridad

debido a la salida del agua no ligada químicamente (agua agregada con el fin de aumentar la trabajabilidad de la mezcla), facilitando la entrada de agentes agresivos en el concreto; ii) la vibración deficiente del concreto podría resultar en la obtención de una estructura no homogénea (vacíos de concreto conocidos popularmente como “nidos de piedra” u “hormigueros”), lo que podría facilitar la penetración de agua y gases en el interior de este material y, por consiguiente, el ataque y oxidación de la armadura. Nótese que los productos de la corrosión ocupan un volumen de 3 a 10 veces el volumen original del acero en el interior de la masa de concreto, originando tensiones internas con valores superiores a 40 MPa (CÁNOVAS, 1988); iii) un proceso inadecuado de cura produciría un concreto con fisuras debido a la retracción hidráulica. Éstas, a su vez, posibilitarían la penetración del agua y de gases y, una vez más, el ataque y la oxidación de la armadura; y iv) el uso de un tipo inadecuado de cemento reduciría la resistencia del concreto a los ataques químicos producidos por los agentes agresivos del medio.

Adicionalmente, la aplicación de revestimientos resistentes a ácidos en la estructura de concreto disminuye o inhibe los efectos de la corrosión. Pintar el reactor con esmalte de caucho clorado (espesor mínimo de 4 mm) o con pintura epoxi bituminosa (espesor mínimo de 400  $\mu\text{m}$ ) son posibles soluciones de revestimiento (FORTUNATO *et al.*, 1998). El esmalte de caucho clorado, a pesar de ser menos costoso, posee baja resistencia a los ácidos. Por otro lado, la pintura epoxi bituminosa es más costosa, pero presenta mayor resistencia a los ácidos, pudiendo ser aplicada en un menor número de capas de pintura (manos) (FORTUNATO *et al.*, 1998). Recientemente, la aplicación de poliuretanos elastoméricos ha resultado exitosa, en ocasiones en combinación con mallas de geotextil (por ejemplo: Polibrid®/Zebron®) (Figura 9a). También se ha venido usando exitosamente PRFV para el revestimiento de estructuras de concreto y de acero, según se muestra en la Figura 9b.



Figura 9 – Revestimiento interno de reactores UASB: a) aplicación de Polibrid; b) aplicación de PRFV.

#### 4 CONSIDERACIONES FINALES

Debe reconocerse que las emisiones gaseosas (olores y gases de efecto invernadero) y la posibilidad de corrosión, son inherentes al uso de los reactores UASB para el tratamiento de las aguas residuales urbanas o domésticas. Aun así, según lo discutido en esta NT, es posible utilizar técnicas efectivas para el control preventivo y correctivo de estos aspectos. En el medio técnico y científico existe información suficiente para utilizar esas técnicas en el diseño, la construcción y la operación de reactores UASB. Debe destacarse el elevado nivel de producción técnico-científica aplicada a esos desafíos, lo que de cierta forma es motivo de orgullo nacional y coloca a Brasil como uno de los países más maduros en el uso de la tecnología anaerobia para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Bajo esta perspectiva, es importante que en futuros proyectos y en adecuaciones de los sistemas existentes, se consideren los principales avances alcanzados para el control de las emisiones gaseosas, con el fin de que Brasil continúe a la cabeza del liderazgo y diseminación del uso de reactores UASB para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Debe enfatizarse en los siguientes puntos:

- Algunos cuidados durante la fase de diseño (por ejemplo: régimen hidráulico del flujo del agua residual, dispositivos para la remoción de la nata, reactores UASB impermeables a gases, materiales y estructuras resistentes a la corrosión), y durante la operación de las PTARs con procesos anaerobios (por ejemplo: adición de agentes químicos, remoción de nata y gestión

adecuada del lodo) pueden minimizar o hasta eliminar muchos problemas relacionados con las emisiones fugitivas.

- El confinamiento de las fuentes de emisión y el tratamiento de los gases residuales generados pueden ser indispensables cuando se pretende el control de los olores. Sin embargo, para garantizar el control y la remoción del  $H_2S$  disuelto en los efluentes de los reactores UASB es necesario utilizar cámaras de desorción de gases aguas abajo de los reactores).
- Para el tratamiento de los gases residuales generados en las zonas confinadas y en las cámaras de desorción, la biofiltración es la técnica más adecuada si se consideran aspectos económicos y de eficiencia del tratamiento.
- En el diseño de los separadores trifásicos y dispositivos de colecta y transporte de gases debe optarse por el uso de materiales resistentes a la corrosión, atendiendo también aspectos de seguridad relacionados con el riesgo de explosión.

#### 5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido del Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico - CNPq (*Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*), de la Coordinación de Mejoramiento de Personal de Nivel Superior – CAPES (*Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*), de la Fundación de Amparo a la Investigación del Estado de Minas Gerais

– FAPEMIG (*Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais*) y del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (*INCT ETEs Sustentáveis* por sus siglas en portugués).

Este trabajo forma parte de la serie de publicaciones del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (*INCT ETEs Sustentáveis* por sus siglas en portugués).

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Asociación Brasileña de Normas Técnicas. NBR 12209: **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. 2ª edición. 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 edición. 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-RAMÍREZ, 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. Tesis (Doctorado en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos). Escuela de Ingeniería, Universidad 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 Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad 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. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas. **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. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 1: Temas de interés. **Revista DAE** – edición 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 Universidad Católica del Paraná – Instituto de Saneamiento Ambiental, 1998.

GARCIA, G.P.P. **Caracterização dos microrganismos oxidadores de sulfeto e metano em reator UASB**. 2009. Disertación (Maestría en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos). Escuela de Ingeniería, Universidad 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. Tesis (Doctorado en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos). Escuela de Ingeniería, Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

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

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

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

LISBOA, H.M., ELLER, M.Q., BELLI FILHO, P., CARMO JR, G.N.R., SCHIRMER, W.N., HOINASKI, L., Oliveira, V.V., CAMARA, V.F., GODKE, M. **Metodologias Olfatométricas para a Avaliação do Impacto Odorante**. 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. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 3: Gestión de lodo y nata. **Revista DAE** – edición especial, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

MACHADO, L.M. **Avanços na aplicação de câmaras de dessorção para a remoção e recuperação dos gases metano e sulfeto de hidrogênio dissolvidos em efluente de reator UASB no tratamento de esgoto doméstico**. 2018. Disertación (Maetría en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos). Escuela de Ingeniería, Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

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

MIRANDA, G.A. **Dispersão atmosférica de sulfeto de hidrogênio emitido pela estação de tratamento de esgoto do ribeirão do Onça em Belo Horizonte/MG**. 2017. Trabajo Final de Graduación. (Graduación en Ingeniería Ambiental y Sanitaria). Escuela de Ingeniería, Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

NELTING, K., CAICEDO, C., WEICHHREBE, 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, Viña del Mar, Chile. Proceedings...Viña del Mar, Chile: International Water Association – IWA, 2015.

NELTING, K., TRAUTMANN, N. DiMeR (Dissolved Methane Recovery) – Vorrichtung zur Rückgewinnung von gelöstem Methan in anaerob behandelten Abwässern. Bundesministerium für Bildung und Forschung, FKZ: 02WQ1374A, 2015.

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

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

POSSETTI, G.R.C., RIETOW, J.C., COSTA, F. J.O.G., WAGNER, L.G., LOBATO, L.C.S., BRESSANI-RIBEIRO, T., MELO, D.F., REIS, J.A., CHERNICHARO, C.A.L. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 5: Biogás y emisiones fugitivas de metano. **Revista DAE** – edición especial, v. 66, n. 214, p. 73-89, 2018.

SANTO, B.C.E. **Estudo do desenvolvimento da câmara de dessorção e remoção de metano e sulfeto de hidrogênio dissolvido em efluente de reator UASB tratando esgoto doméstico**. 2017. Disertación (Maestría en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos). Escuela de Ingeniería, Universidad 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 formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB**. 2010, 127 p. Tesis (Doctorado en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos). Escuela de Ingeniería, Universidad 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.) **Caracterização, tratamento, e gerenciamento de subprodutos de correntes de esgotos segregados e não 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.