

revista

# DAE

Distribución gratuita



sabesp

214

Volumen 66

abril 2019

ISSN 0101-6040

**EDICIÓN ESPECIAL COLECCIÓN REACTORES UASB**

**Contribución para el perfeccionamiento del  
diseño, la construcción y la operación de  
reactores UASB aplicados al tratamiento de  
aguas residuales urbanas**



**inct**  
ETEs Sustentáveis

---

# mensajes

Varios de los desafíos actuales del diseño y de los problemas operacionales en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) de América Latina están relacionados con una carencia de capacitación por parte de gestores, diseñadores, constructores y operadores en el área de las aguas residuales. Adicionalmente, el desconocimiento acerca de los beneficios derivados de una PTAR sostenible genera desconfianza y desacuerdo en relación a la existencia de ese tipo de emprendimiento en el ambiente urbano, lo que denota la importancia de actividades que consideren mecanismos de construcción y transmisión de conocimiento para la sociedad, el sector empresarial y el gobierno.

En ese contexto, esta Colección de Notas Técnicas con el título "Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas" se convierte en un documento - práctico, integrado y completo - pensado para la orientación y consulta de aquellos que enfrentan de cerca la cotidianidad de las PTARs que operan con reactores UASB. Adicionalmente, este material ha venido siendo utilizado, por el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs Sustentáveis por sus siglas en portugués), en Foros Técnicos y Talleres de Capacitación, por ser un aporte estructurante capaz de ampliar la construcción de conocimientos, a partir de un diálogo propositivo entre el saber práctico y el saber teórico, promoviendo así un nuevo saber más adecuado a los cambios necesarios y urgentes para la universalización de los servicios de saneamiento.



**inct**  
ETEs Sustentáveis

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

COORDINADOR

BRASIL

Como parte de las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), las naciones del mundo se han propuesto lograr para el año 2030 el acceso universal, equitativo y asequible al agua potable para todas las personas, así como el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados que permitan eliminar sin riesgo las excretas humanas y las aguas residuales, y de esta manera reducir la morbilidad en todo el mundo. El saneamiento adecuado tiene incidencia positiva en la salud, la calidad de vida de las personas y en los índices de desarrollo humano.

En 2019, según datos expuestos durante la V Conferencia Latinoamericana de Saneamiento (LATINOSAN), de los más de 650 millones de personas que habitan en América Latina, únicamente 51,8% tienen acceso a servicios de saneamiento gestionados de manera segura. Los retos para el cumplimiento de los ODS y la Agenda 2030 son grandes y requieren del desarrollo de políticas públicas, así como la implementación de alternativas tecnológicas eficientes y sostenibles para garantizar el acceso a servicios de saneamiento asequibles sin dejar a nadie atrás.

La experiencia de Brasil en el perfeccionamiento de sistemas de tratamiento anaeróbico y particularmente en reactores Anaeróbicos de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (UASB por sus siglas en inglés), brinda la oportunidad de mostrar la principal tendencia tecnológica para el tratamiento de aguas residuales urbanas en la región y se perfila como un modelo viable para el resto de América Latina. Mediante esta tecnología se promueve un modelo de economía circular que persigue un desarrollo social y económico en armonía con el ambiente, a la par que se reducen las brechas en materia de saneamiento.

En este contexto, el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), contribuye en la adaptación al español de la publicación de la Revista del Departamento de Agua y Saneamiento de la Empresa de Saneamiento Básico del Estado de Sao Paulo (SABESP) que documenta esta experiencia titulada "Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas". Este aporte es parte de los esfuerzos del Proyecto Fortalecimiento de Acueductos comunales AyA-GEF-PNUD para enfrentar los efectos del cambio climático en zonas de estrés hídrico en Costa Rica, y constituye una medida de adaptación centrada en la eficiencia y el aprovechamiento de las aguas residuales. La iniciativa ha sido coordinada junto al Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) en el marco de LATINOSAN 2019.



José Vicente Troya

REPRESENTANTE RESIDENTE

COSTA RICA

---

# editorial

Estimados lectores,

Es con gran satisfacción que presentamos la edición especial de la REVISTA DAE sobre reactores UASB, resultado de una asociación con el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en PTARs Sostenibles (INCT PTARs Sostenibles).

El INCT PTARs Sostenibles fue creado con la intención de convertirse en un centro de referencia nacional (Brasil) e internacional para cuestiones relacionadas con el tratamiento de las aguas residuales, de forma a contribuir para la promoción de cambios estructurales y estructurantes por medio de la capacitación profesional, del desarrollo de soluciones tecnológicas apropiadas para las diversas realidades nacionales e internacionales, de la construcción de conocimiento y su transmisión para la sociedad, los órganos ambientales y el ámbito empresarial.

Esta edición fue compuesta a partir de artículos preseleccionados en el tema sugerido – Reactores UASB. De este modo, se creó un comité de evaluación de las Notas Técnicas, compuesto por los siguientes profesores: Eduardo Pacheco Jordão (UFRJ), Marcos von Sperling (UFMG), Mario Takayuki Kato (UFPE), Pedro Alem Sobrinho (EP-USP) y Roque Passos Piveli (EP-USP), bajo la coordinación del profesor Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, garantizando el rigor científico de los artículos.

Buena lectura,



Ing<sup>a</sup> Cristina Knorich Zuffo

EDITORA EN JEFE



Nº 214

edición especial de abril 2019

#### Misión

La Revista DAE tiene por objetivo la publicación de artículos técnicos y científicos originales en las áreas de saneamiento y medio ambiente.

#### Historia

Se inició con el título Boletín de la Repartición de Aguas y Aguas Residuales (*Boletim da Repartição de Águas e Esgotos* –RAE), en 1936, prosiguiendo así hasta 1952, con interrupciones en 1944 y 1945. Pasó a denominarse Boletín del Departamento de Aguas y Aguas Residuales (*Boletim do Departamento de Águas e Esgotos* - DAE) en 1954 y Revista del Departamento de Aguas y Aguas Residuales (*Revista do Departamento de Águas e Esgotos*) de 1955 a 1959. De 1959 a 1971, pasó a denominarse Revista D.A.E., y a partir de 1972, Revista DAE. Hubo una nueva interrupción de 1994 al 2007. Relanzada en el 2007, la revista está calificada por la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior- CAPES (por sus siglas en portugués) como periódico B2 y está indexada a dos directorios: Latindex y Diadorim.

#### Publicación

Trimestral (enero, abril, julio y octubre) Dirección de Tecnología, Emprendimientos y Medio Ambiente – T Superintendencia de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica – TX

Rua Costa Carvalho, 300 – Pinheiros – 05429 000

São Paulo – SP – Brasil

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

#### Editora en Jefe

MSc Engenheira Cristina Knorich Zuffo

#### Editora Científica

MSc Engenheira Iara Regina Soares Chao

#### Editores Asociados

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

#### Consejo Editorial

Prof. Dr. Pedro Alem Sobrinho (Universidad de São Paulo – USP), Prof. Dr. Cleverton Vitorio Andreoli (Compañía de Saneamiento del Paraná – Sanepar), Prof. Dr. José Roberto Campos (USP), Prof. Dr. Dib Gebara (Universidad Estadual Paulista – Unesp), Prof. Dr. Eduardo Pacheco Jordão (Universidad Federal de Rio de Janeiro), Prof. Dr. Rafael Kospchitz Xavier Bastos (Universidad Federal de Viçosa), Prof. Dr. Wanderley S. Paganini (Facultad de salud Pública da USP), Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Emilia Wanda Rutkowski (Universidad Estadual de Campinas – Unicamp), Prof. Dr. Marcos Tadeu (USP), Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Dione Mari Morita (Escola Politécnica da USP), Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Angela Di Bernardo Dantas (Universidad de Ribeirão Preto/UNAERP). Coordenação da Eng. Cristina Knorich Zuffo (Sabesp).

#### Capa

Crédito de la portada: colección SABESP. PTAR Várzea Paulista

#### Diseño Gráfico

Beatriz Martins Gomes

#### Diagramación

Tomás German

#### Adaptación al español

Viviana Solano Ramírez. Consultora PNUD.

#### Revisión

Alejandro Campos Castillo. PNUD

Natalia Meza Ramírez. PNUD

#### Apoyo

Banco Interamericano de Desarrollo (BID)

#### ISSN 0101-6040

Las opiniones y posiciones expresadas en los artículos son de total responsabilidad de sus autores y no significan necesariamente la opinión de la Revista DAE o de la Sabesp.

**Vea la revista electrónica en internet:**

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

Crédito: Acervo SABESP  
ETE Várzea Paulista

## en esta edición

### NOTAS TÉCNICAS

**5** 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

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

**17** Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 2: Tratamiento preliminar, bombeo y distribución de caudal

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

**30** Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 3: Gestión del lodo y la nata

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

**56** 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*

**73** 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

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

**90** Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 6: Calidad del efluente

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

## 110 EVENTOS

# 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

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

Fecha de entrada:  
01/08/2018

Fecha de aprobación:  
17/09/2018

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

DOI: 10.4322/dae.2018.038es

## Resumen

Brasil posee el mayor parque de reactores anaerobios del mundo si se considera la aplicación de esta tecnología para el tratamiento de las aguas residuales urbanas. A pesar de las reconocidas ventajas de los reactores de tipo UASB, algunos problemas han impedido su máximo desempeño operacional. Ignorar la existencia y postergar la solución de esos desafíos puede poner en riesgo los importantes avances alcanzados hasta la fecha, impactando el futuro de la tecnología anaerobia en el país y, en consecuencia, el del sector nacional de saneamiento en aguas residuales. Esta Nota Técnica (NT) tiene por objetivo presentar los principales temas de interés relacionados a la necesidad de perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB, a partir de un amplio levantamiento junto a especialistas del sector académico y prestadores de servicios de saneamiento de Brasil. Los temas identificados fueron relacionados a los problemas más propensos a ocurrir en los reactores UASB, así como a sus respectivos orígenes. Para cada tema y problemas identificados, se indicaron las principales soluciones que han sido adoptadas, derivadas a partir de las investigaciones más recientes y de las experiencias exitosas en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs) de Brasil. Los temas de interés se sintetizan en esta NT y son detallados en el conjunto de NTs que conforman la Colección “Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas”.

**Palabras clave:** Biogás, calidad del efluente, corrosión, lodo, nata, olor, reactores anaerobios

**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 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 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 Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs *Sustentáveis* por sus siglas en portugués).

**Eduardo Sabino Pegorini** – Ingeniero Agrónomo de la Universidad del Paraná (UFPR), Brasil. Máster en Ciencias del Suelo de la UFPR, Brasil. Ingeniero de la Unidad de Proyecto KFW en la Compañía de Saneamiento de Paraná (Sanepar), Brasil.

**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 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).

**Marcelo Kenji Miki** – Ingeniero Civil y Máster de la Escuela Politécnica de la Universidad Federal de São Paulo (USP), Brasil. Gerente del Departamento de Ejecución de Proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Compañía de Saneamiento del Estado de Sao Paulo (Sabesp), Brasil.

**Saulo Nonato de Souza** – Ingeniero Civil de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Ingeniero de Operación de la Compañía de Saneamiento de Minas Gerais (COPASA), Brasil. Estudiante de Maestría en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la UFMG, Brasil

(\*) **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**

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

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

**1 INTRODUÇÃO**

A partir de la experiencia con filtros anaerobios reportada en el artículo clásico de Young & McCarty (1969), un grupo de investigadores de la Universidad de Wageningen (Holanda), liderado por el profesor Gatze Lettinga, sugirió substituir el medio de soporte por un separador de fases (líquida, sólida y gaseosa) en la parte superior del reactor. Ese aspecto se configuró en el inicio del desarrollo de los reactores anaerobios de manto de lodo y flujo ascendente (UASB, por sus siglas del inglés *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) (LETTINGA, 2014). Las primeras investigaciones con los reactores UASB se asociaron al tratamiento de efluentes industriales del procesamiento de papas para la extracción de almidón y el procesamiento de remolacha para la obtención de azúcar. A mediados de la década de 1970, se realizaron las primeras pruebas con reactores UASB en escala de laboratorio (30-120 L) y piloto (6 m<sup>3</sup>) tratando aguas residuales urbanas de la comunidad de Bennekom (Holanda). No obstante, problemas asociados a la necesidad de calentar el agua residual, procurando simular las temperaturas de los países de clima tropical, motivaron la búsqueda de convenios para la implantación de reactores UASB en países en desarrollo. A partir de esto, un proyecto entre los gobiernos holandés y colombiano, con la participación de la Universidad de Wageningen y de la empresa consultora Royal Haskoning, posibilitó la implantación de un reactor UASB en escala de demostración (64 m<sup>3</sup>) en la ciudad de Cali

(LETTINGA, 2014). Los buenos resultados asociados al proyecto de investigación fomentaron la definición de bases iniciales para los criterios de diseño, operación y mantenimiento de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas. A partir de esa experiencia, entre las décadas de 1980 y 1990 se implantaron reactores en escala plena (~1.000 m<sup>3</sup>) en la propia ciudad de Cali, así como proyectos de investigación en India, Gana, Medio Oriente y América Latina, particularmente en Brasil, Colombia y México.

Específicamente en Brasil, el uso de reactores UASB para el tratamiento de aguas residuales urbanas fue introducido durante la década de 1980, cuando se iniciaron proyectos de varios grupos de investigación nacionales y de ingenieros actuantes en el sector. Específicamente en el estado de Paraná, debe mencionarse que los diseñadores de la Compañía de Saneamiento de Paraná (Sanepar) estuvieron en Holanda durante la década de 1980, lo que les permitió interactuar con el profesor Gatze Lettinga. De esa interacción resultó la concepción de los reactores anaerobios de lecho fluidizado (RALF), una variante del reactor UASB ampliamente usado por la Sanepar. Durante sus etapas iniciales, el diseño y la operación todavía incipientes de los reactores UASB crearon barreras a la credibilidad del sistema, culminando con el rechazo de la tecnología anaerobia por parte de algunos prestadores de servicios de saneamiento y órganos ambientales. Sin embargo, la confianza ha venido siendo restablecida en las décadas recientes como resultado

de la intensificación de estudios e investigaciones en el área, así como a partir de la experiencia obtenida con la operación de reactores en escala plena. Sin duda alguna, una importante contribución para la consolidación y la diseminación de la tecnología anaerobia para el tratamiento de las aguas residuales en Brasil se debe al Programa de Investigaciones en Saneamiento Básico (PROSAB, por sus siglas en portugués), desarrollado en Brasil entre los años 1997 y 2007 (CAMPOS, 1999; CHERNICHARO, 2001).

Es un hecho que las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) compuestas por reactores UASB seguidos de un postratamiento aerobio permiten, de manera general, una reducción de los costos de implantación (CAPEX) de entre 20-50% y de operación (OPEX) superior a 50%, cuando son comparadas con PTARs convencionales de lodos activados (SILVA, 1993; ALEM SOBRINHO & JORDÃO, 2001; von SPERLING & CHERNICHARO, 2005; CHERNICHARO, 2006). Esa es una de las razones detrás del incremento de los niveles del tratamiento de las aguas residuales en América Latina (CHERNICHARO *et al.*, 2015). En Brasil, los reactores UASB son actualmente la principal tendencia tecnológica para el tratamiento de aguas residuales urbanas, ya sea como unidades únicas, o bien seguidas de alguna forma de postratamiento. Según el levantamiento realizado por Chernicharo *et al.* (2018), cerca del 40% de las PTARs localizadas en las regiones Sur, Sudeste y Centro-Oeste de Brasil utilizan reactores UASB en su proceso de tratamiento. Esto permite afirmar que este país posee el mayor parque de reactores anaerobios del mundo, cuando se considera su aplicación para el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Además de la simplicidad operacional de los reactores UASB cuando se comparan a los procesos aerobios convencionales (lodo activado) o físico-químicos, y aparte de los aspectos financieros mencionados anteriormente, la concentración de la biomasa ( $2-6 \text{ g.L}^{-1}$ ) y la edad del lodo ( $> 30$  días) en el reactor son típicamente elevadas, lo que reduce significativamente su volumen en relación a otros procesos de tratamiento de efluentes. Otras ventajas de los reactores UASB

son la ausencia de un medio de soporte, debido al crecimiento disperso de la biomasa, la baja producción de lodo y el reducido consumo energético, típicos de los sistemas anaerobios. Adicionalmente, el lodo excedente a ser descartado ya se encuentra espesado y digerido, siendo posible enviarlo directamente a la unidad de deshidratación. Finalmente, se destaca la posibilidad asociada a la generación y colecta del biogás, el cual es aprovechable energéticamente debido a su composición rica en metano. De acuerdo a resultados recientes del Proyecto Brasil-Alemania de Fomento al Aprovechamiento Energético de Biogás en Brasil (PROBIOGÁS), el contenido promedio de metano en el biogás proveniente de reactores UASB tratando aguas residuales urbanas varía entre 70 y 81% (BRASIL, 2017), lo que corresponde a un poder calorífico de aproximadamente  $10 \text{ kWh.Nm}^{-3}$  (MORAN *et al.*, 2010).

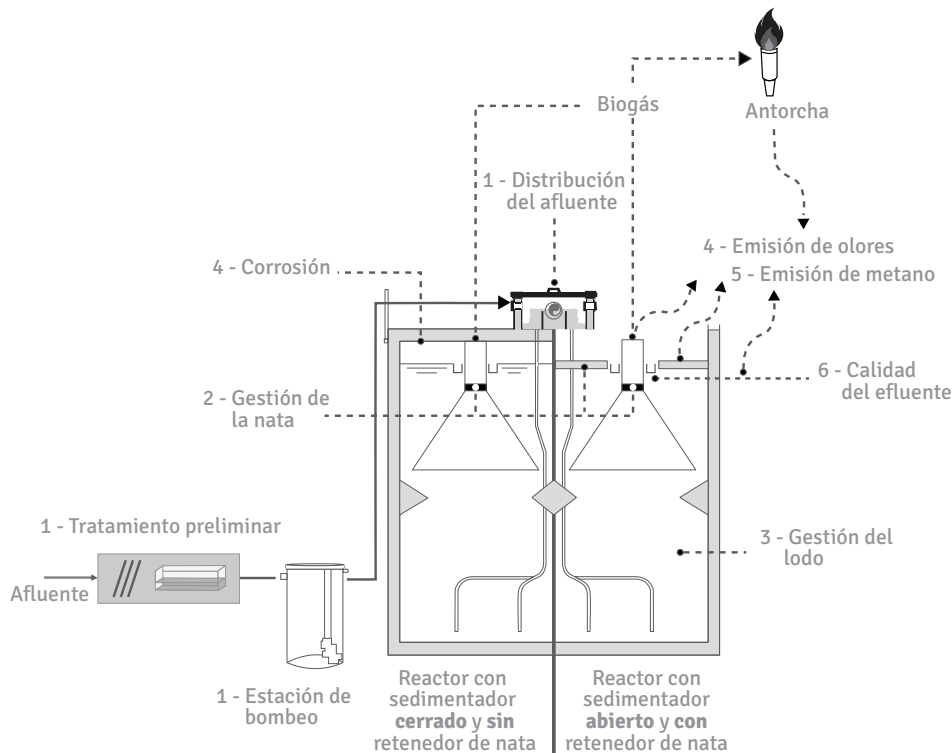
A pesar de estas reconocidas ventajas, el uso de reactores UASB en Brasil todavía presenta desafíos que impiden su máximo desempeño operacional. Parte importante de los problemas asociados a estos reactores anaerobios se origina en deficiencias durante las fases iniciales del diseño. Sin embargo, procesos constructivos inadecuados y problemas operacionales también han sido reportados por la literatura y por los prestadores de servicios de saneamiento en diversas regiones del Brasil (MIKI, 2010). Aparte de los problemas técnicos de diseño, construcción y operación, en ocasiones los problemas operacionales se producen por situaciones que escapan al control de las PTARs, como en el caso de problemas en la gestión de los sistemas, esto se refleja en fallas administrativas y financieras, que con frecuencia impiden la ejecución adecuada de procedimientos operacionales esenciales. Por lo tanto, ignorar su existencia y postergar la solución de estos problemas puede poner en riesgo los importantes avances conseguidos hasta la fecha, impactando el futuro de la tecnología anaerobia en Brasil. Esto constituiría un impacto sin precedentes para el sector nacional del tratamiento de aguas residuales, con riesgos enormes de incidir directamente en el estancamiento de los índices de cobertura del tratamiento de las aguas residuales en Brasil.

Es importante destacar que la mayoría de los problemas abordados en esta Colección de Notas Técnicas puede ser corregida de manera simple y efectiva, sin impactos significativos sobre los costos de los reactores, con la condición de que se dedique más atención a las etapas de diseño y de construcción, así como a una mejor capacitación de los operadores de las plantas de tratamiento. Muy probablemente, los problemas de administración están asociados a la mayoría de las PTARs, independientemente de la tecnología de tratamiento utilizada. Se cree, por lo tanto, que las informaciones contenidas en este conjunto de Notas Técnicas pueden contribuir decisivamente

para la corrección de casi la totalidad de los problemas de diseño, construcción y operación de reactores UASB.

## 2 CONSOLIDACIÓN DE LOS TEMAS DE INTERÉS

Los principales temas de interés relacionados a la necesidad de perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB están representados esquemáticamente en la Figura 1, como resultado de un amplio levantamiento realizado junto a especialistas del sector académico y de prestadores nacionales de servicios de saneamiento.



**Figura 1** - Temas de interés para el perfeccionamiento de los reactores UASB

Los temas de interés identificados se describen de forma sintética en la presente Nota Técnica (NT) y se detallan, según se muestra en el Cuadro 1, en las NTs complementarias que integran la colección “Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas”.

En el Cuadro 2, estos temas de interés fueron relacionados a los problemas susceptibles de ocurrir en reactores UASB, así como a sus respectivos orígenes, según las experiencias de PTARs en Brasil. Como elemento final del Cuadro 2 se indican las principales soluciones que han sido adoptadas en el Brasil para la solución de los problemas descritos.



**Cuadro 1:** Relación entre los principales temas de interés para el perfeccionamiento de los reactores UASB y Notas Técnicas correspondientes

Temas de interés	Nota Técnica correspondiente
1. Tratamiento preliminar, bombeo y distribución de caudal	Parte 2: Tratamiento preliminar, bombeo y distribución de caudal (BRESSANI-RIBEIRO <i>et al.</i> , 2018).
2. Gestión de la nata	Parte 3: Gestión del lodo y la nata (LOBATO <i>et al.</i> , 2018).
3. Gestión del lodo	
4. Corrosión y emisiones odorantes	Parte 4: Control de corrosión y emisiones odorantes (BRANDT <i>et al.</i> , 2018).
5. Biogás y emisiones fugitivas de metano	Parte 5: Biogás y emisiones fugitivas de metano (POSSETTI <i>et al.</i> , 2018).
6. Calidad del efluente	Parte 6: Calidad del efluente (ALMEIDA <i>et al.</i> , 2018).

**Cuadro 2:** Principales temas de interés para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB

Temas de interés	Problemas asociados	Origen del problema	Posibles mejoras
1 - Tratamiento preliminar, bombeo y distribución de caudal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocurrencia de <u>olores en las inmediaciones del tratamiento preliminar (TP)</u>;</li> <li>• Formación de <u>depósitos de arena en los canales</u> del TP;</li> <li>• <u>Empozamiento de lixiviados</u> en los contenedores de residuos removidos en el TP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existencia de puntos de turbulencia en las unidades del TP que favorecen la liberación de sulfuro de hidrógeno disuelto en la fase líquida (agua residual afluente a la PTAR);</li> <li>• Los sólidos removidos en el TP contienen materia orgánica, la cual puede entrar en descomposición y generar malos olores durante el período de almacenamiento de los contenedores utilizados para la acumulación de esos residuos;</li> <li>• Alteraciones de la sección transversal de los canales, ocasionando la disminución de las velocidades del flujo hidráulico y la consecuente deposición de sólidos de naturaleza orgánica;</li> <li>• Velocidades inferiores a las mínimas previstas en el diseño durante el inicio de operación de la PTAR;</li> <li>• Ausencia de contención y drenaje de las áreas en las que se colocan los contenedores para el almacenamiento de los residuos del TP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implantar el <u>confinamiento, extracción y tratamiento de los gases</u> procedentes de las áreas con mayor turbulencia y emisiones de gases disueltos (ver detalles en la Parte 4 de esta Colección de NTs – BRANDT <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>• <u>Lanzar cal sobre los residuos en el contenedor para neutralizar la emisión</u> de olores;</li> <li>• Reducir el tiempo de almacenamiento del contenedor en la PTAR;</li> <li>• Evaluar alternativas de <u>modulación para la implantación del TP</u>, con el fin de mantener velocidades mínimas de flujo hidráulico, especialmente al inicio de la operación del sistema;</li> <li>• Utilizar áreas específicas para colocar los contenedores <u>con contención y drenajes de los líquidos</u>, que deben ser devueltos para el TP. Adicionalmente, prever el techado de esas áreas para evitar/reducir el aporte de agua de lluvia.</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Caudales de bombeo</u> no compatibles con los caudales promedio y máximo utilizados para el diseño de los reactores anaerobios;</li> <li>• <u>Inundación de rejillas</u> implantadas aguas arriba de las estaciones de bombeo;</li> <li>• Ausencia de <u>control de la frecuencia y de los caudales que producen rebales</u> en la PTAR.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muchas estaciones de bombeo de aguas residuales (EBAR) de pequeña y mediana escala son diseñados con apenas dos bombas, siendo una para relevo y respaldo. En esas situaciones, el caudal nominal de cada bomba debe ser mayor o igual al caudal máximo de diseño de los reactores UASB;</li> <li>• A su vez, el dimensionamiento hidráulico de los reactores es realizado en base al caudal promedio de diseño, calculando y verificando el funcionamiento del sistema para una condición de caudal máximo (usando los coeficientes de caudal máximo diario y de caudal máximo horario), y limitando la operación del reactor en esa condición extrema a un período no mayor de 2 – 4 horas. Es decir, las EBARs que operan con apenas una bomba y que no disponen de variadores de frecuencia estarán bombeando siempre, un caudal igual o superior al caudal máximo de diseño de los reactores UASB, exponiéndolos a condiciones de sobrecarga hidráulica durante el bombeo;</li> <li>• Ante lo expuesto anteriormente, el hidrograma de caudales afluentes al reactor UASB es diferente al hidrograma de caudales afluentes a la PTAR;</li> <li>• El dispositivo de control de caudal pico (rebalse o vertedero) es comúnmente implantado junto a la pared lateral del canal de llegada al TP. Sin embargo, en PTARs en las que la EBAR de llegada está localizada aguas abajo del TP y, en las que existe riesgo de interrupción en la alimentación de la energía eléctrica, puede ocurrir la inundación de las unidades del TP localizadas aguas arriba de la EBAR, cuando esta unidad no posee un rebalse propio e independiente del TP;</li> <li>• Las PTARs usualmente no disponen de un registro de eventos de rebalse y control de caudales excesivos que son descargados directamente en el cuerpo de agua receptor.</li> </ul>

Temas de interés	Problemas asociados	Origen del problema	Posibles mejoras
<p><b>1 - Tratamiento preliminar, bombeo y distribución de caudal</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Distribución no uniforme del caudal en los tubos de alimentación de reactor, pudiendo ocasionar dentro del reactor:                     <ul style="list-style-type: none"> <li>acumulación de sólidos en los puntos en los que ocurre el estancamiento del agua residual;</li> <li>formación de zonas muertas y consecuente levantamiento de lodo excesivo en los puntos no alimentados;</li> <li>formación de flujos preferenciales en las zonas que reciben alimentación excesiva;</li> <li>eventualmente, puede haber una caída en la eficiencia de retención de sólidos y de remoción de materia orgánica.</li> </ul> </li> <li><u>Obstrucción</u> frecuente de los <u>tubos de alimentación</u> del reactor UASB, aumentando el trabajo del operador con la desobstrucción de los mismos;</li> <li><u>Fijación inadecuada de los tubos de distribución</u> junto a la caja de distribución y en el fondo del reactor;</li> <li><u>Acumulación de arena y sólidos</u> en los compartimientos de distribución.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estructuras de distribución diseñadas y/o ejecutadas en materiales que no posibilitan un acabado adecuado (ejemplo: concreto);</li> <li>Baja calidad constructiva y/o negligencia/desatención de la inspección de la obra;</li> <li>Desnivel de los vertedores por fallas durante la construcción o producidos por falta de limpiezas periódicas en la unidad;</li> <li>Número de tubos de distribución inferior a lo recomendado en la NBR 12.209 (ABNT, 2011) (requisito mínimo de un tubo para cada 2 a 3 m<sup>2</sup> de fondo de reactor UASB).</li> <li>Elevada presencia de sólidos (desechos) en el agua residual, como consecuencia de los malos usos de las instalaciones sanitarias y del sistema de alcantarillado como un todo;</li> <li>Unidades del tratamiento preliminar diseñadas o ejecutadas en no conformidad con la norma NBR 12.209 (ABNT, 2011);</li> <li>Unidades del tratamiento preliminar fuera de operación por cuestiones de mantenimiento;</li> <li>Compartimientos de distribución diseñados con fondo plano y/o baja inclinación;</li> <li>Tubos de alimentación del reactor con diámetro inferior al recomendado por la norma NBR 12.209 y/o con longitud excesiva y/o con cambios de dirección que dificultan el libre paso del agua residual (ABNT, 2011).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilizar cajas de distribución confeccionadas en <u>materiales que posibiliten un mejor acabado</u> (ejemplo: fibra de vidrio y polipropileno);</li> <li>Incluir <u>cajas de recepción y distribución de lodo aerobio de descarte</u>, de modo que permitan la flexibilidad de maniobra durante la alimentación de ese lodo de descarte entre los distintos módulos de los reactores UASB;</li> <li><u>Rigurosidad del equipo de inspección</u> durante el seguimiento de la obra;</li> <li>Verificar el <u>nivel de los vertedores</u> durante la recepción de la obra y periódicamente después del inicio de la operación. Realizar también limpiezas periódicas de los vertedores, evitando su obstrucción parcial.</li> <li>Realizar <u>campañas de sensibilización de los usuarios y usuarias</u> del sistema del alcantarillado sanitario, con el fin de reducir el lanzamiento de desechos sólidos en la red;</li> <li>Utilizar <u>unidades de tratamiento preliminar</u> (rejillas, tamices y desarenadores) <u>de comprobada eficiencia</u> y que cumplan con las prescripciones de la norma NBR 12.209 (ABNT, 2011);</li> <li>Instalar estructuras de <u>distribución de caudal diseñadas con fondo inclinado</u>, de modo que se minimice la acumulación de arena y sólidos;</li> <li>Mejorar los diseños del tratamiento preliminar para aumentar la confiabilidad, minimizar el mantenimiento de los equipos y aumentar la eficiencia (ver recomendaciones en la Parte 2 de esta Colección de NTs - BRESSANI-RIBEIRO <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>Garantizar la <u>rigurosidad del equipo de inspección</u> durante el acompañamiento de la obra e instalación de los equipos;</li> <li>Adoptar <u>rutinas y procedimientos de limpieza</u> de las cajas de distribución;</li> <li>Utilizar un <u>dispositivo de desobstrucción de los tubos</u> de alimentación del reactor UASB.</li> </ul>
<p><b>2 - Gestión de la nata</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acumulación de una capa sólida y espesa de nata (espuma densa) en la superficie de los sedimentadores. Este material es usualmente de difícil remoción y puede ocasionar daños a las canaletas de colecta del líquido y pérdida de calidad del efluente del reactor;</li> <li><u>Acumulación de una capa superficial sólida y espesa de nata en el interior de los separadores trifásicos (STF)</u>. Este material es de difícil remoción por parte del operador de la PTAR, constituyendo, por lo tanto, uno de los principales problemas operacionales de los reactores UASB implantados en Brasil;</li> <li>La capa de nata en el interior de los STF tiende a <u>impedir la liberación del biogás</u> producido en el reactor anaerobio y, al mismo tiempo:                     <ul style="list-style-type: none"> <li>Ocasionar el paso del biogás para el compartimiento de sedimentación, con impactos directos sobre la calidad del efluente (pérdida de sólidos) y sobre los niveles de emisión de gases odorantes y de efecto invernadero;</li> <li>Reducir la recuperación de biogás para fines de quema y/o aprovechamiento energético;</li> <li>Reducir el volumen útil de la cámara de gas y modificar su presión de operación.</li> </ul> </li> <li>El espesamiento de la capa de nata puede producir esfuerzos estructurales elevados en las paredes del STF. Estos esfuerzos pueden ocasionar daños y hasta la ruptura del STF, principalmente cuando éstos están confeccionados con materiales de menor resistencia, como por ejemplo lonas plásticas, láminas metálicas o de asbesto etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La acumulación de nata en la superficie de los sedimentadores y en el interior de los STF de reactores UASB depende de las características del agua residual cruda, particularmente en relación a la presencia de desechos sólidos (plástico, hisopos, cabello, hilo dental etc.) y de grasas y aceites. Parte de esos materiales, principalmente los de menor densidad, cuando no son adecuadamente removidos en el tratamiento preliminar (rejillas y tamices), tienden a flotar en el interior del reactor y se acumulan en la parte superior del STF, constituyendo la “nata”;</li> <li>Las características constructivas de los reactores y las condiciones hidráulicas de operación pueden producir que buena parte de la nata esté formada por lodo flotante; La ausencia de adecuados y/o falta de condiciones de seguridad ocupacional para el procedimiento de descarte de la nata;</li> <li>Ineficiencia del mecanismo de remoción de nata del STF y/o no remoción frecuente y sistemática de ese material flotante puede llevar al espesamiento y solidificación de la capa de nata.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Considerar mejoras en el tratamiento preliminar, de modo que se reduzca la entrada de desechos sólidos, sólidos flotantes y grasas y aceites en los reactores. De entre los aspectos recomendados, puede mencionarse la utilización de rejillas ultrafinas (6 a 10 mm) y de tamices de pequeña abertura (3 a 4 mm) (ver recomendaciones en la Parte 2 de esta Colección de NTs - BRESSANI-RIBEIRO <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>Controlar la recepción de descargas de efluentes no domésticos (END) tales como lodo de tanque séptico y efluentes de industrias con aceites y grasas usualmente elevados (lecherías, mataderos, sistemas frigoríficos, lavanderías industriales etc.);</li> <li>Utilizar STF equipados con dispositivos internos que posibiliten la remoción de la nata, como por ejemplo el Separador Etsus 1000 (ver detalles en la Parte 3 de esta Colección de NTs - LOBATO <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>Utilizar cámaras múltiples piramidales, de modo a posibilitar el confinamiento de la nata en menores áreas y así facilitar su remoción (ver detalles en la Parte 3 de esta Colección de NTs - LOBATO <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>Cuando no sea posible la utilización de dispositivos internos de remoción de nata, la parte superior del STF debe estar equipada con un número suficiente de tapas de inspección, de modo a posibilitar la efectiva remoción del material flotante. Sin embargo, esta alternativa no es la ideal, pues resulta en liberación de biogás a la atmósfera. Cuando se utilice, debe tenerse especial cuidado en garantizar la estanqueidad de la cámara de biogás y en tener acceso adecuado para los equipos de remoción de nata, manteniendo condiciones adecuadas de seguridad ocupacional para los operadores;</li> <li>Considerar durante el diseño de las unidades de tratamiento de la fase sólida de la PTAR la previsión de carga de sólidos correspondiente a la nata removida de los reactores anaerobios.</li> </ul>

Temas de interés	Problemas asociados	Origen del problema	Posibles mejoras
<p><b>3 - Gestión del lodo</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran parte de los reactores UASB existentes en Brasil operan con <u>exceso de lodo</u>, ocupando volúmenes mayores a la capacidad de almacenamiento en el compartimiento de digestión de los reactores. Esto sucede, normalmente, debido a la falta de descartes sistemáticos de lodo y puede ocasionar:             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Paso excesivo de lodo desde el compartimiento de digestión hacia el compartimiento de sedimentación, con el consecuente incremento de la pérdida de sólidos en el efluente del reactor;</li> <li>- La pérdida de sólidos en el efluente ocasiona la inmediata caída de la eficiencia física de remoción de materia orgánica del reactor, como consecuencia del aumento de la parcela de DQO y DBO particulada presente en el efluente;</li> <li>- Aumento de la formación de nata en el interior del compartimiento de sedimentación del reactor UASB;</li> <li>- Acumulación excesiva de arena en el fondo de los reactores;</li> <li>- Disminución del volumen útil para el tratamiento del agua residual;</li> <li>- Sobrecarga y eventual comprometimiento de la unidad de postratamiento, particularmente para aquellas que operan con algún medio de soporte (por ejemplo: biofiltros y filtros biológicos percoladores);</li> <li>- Dificultades en la gestión del lodo aerobio generado en la unidad de postratamiento, cuando éste es retornado para el espesamiento y digestión en el reactor UASB;</li> <li>- El arrastre de sólidos con el efluente del reactor UASB puede alterar los parámetros cinéticos utilizados para el dimensionamiento de la unidad de postratamiento.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La acumulación excesiva de lodo en los reactores y la falta de descartes sistemáticos están asociados a uno o más de los siguientes factores:             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Manuales o directrices de operación que no detallan adecuadamente los procedimientos de descarte de lodo que deben ser seguidos por los operadores;</li> <li>- Lechos de secado y/o equipos de deshidratación de lodo con capacidad inferior a la requerida para el procesamiento de la PTAR;</li> <li>- Equipos del sistema de deshidratación (bombas de lodo, dosificadoras de polímero, centrifugas, entre otros) fuera de operación, como consecuencia de dificultades para dar mantenimiento preventivo y correctivo a los mismos;</li> <li>- Fallas en la instalación mecánica del sistema de deshidratación, ocasionando necesidad elevada de mantenimiento correctivo;</li> <li>- Falta de remoción sistemática de lodo de los lechos de secado, impidiendo el descarte del lodo del reactor;</li> <li>- Falta de remoción sistemática de lodo de los reactores UASB como consecuencia de problemas logísticos/administrativos;</li> <li>- Coeficiente de producción de lodo superior al considerado en la fase de diseño, como consecuencia de la recepción en la PTAR de cargas no consideradas originalmente (por ejemplo: lodo de tanque séptico, lixiviado de relleno sanitario, lodo químico de plantas de agua potable y efluentes no domésticos).</li> </ul> </li> <li>• La acumulación de arena en el fondo de los reactores se debe, principalmente, a problemas en el desarenador. Estos problemas pueden estar relacionados con deficiencias de diseño, de construcción y/o de operación en esa unidad;</li> <li>• Número insuficiente de tubos para el descarte de lodos del reactor UASB y/o tubos mal distribuidos a lo largo del reactor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor rigor, durante la fase de diseño, en el <u>cálculo de producción de lodo del reactor</u>, siendo de particular interés el conocimiento preciso de las cargas que la PTAR recibirá;</li> <li>• Instalación obligatoria de <u>puntos de muestreo de lodo a diferentes profundidades</u> en todos los módulos del reactor UASB;</li> <li>• Prever <u>tanques de recepción / espesamiento / homogenización de lodo</u>, localizados antes de la unidad de deshidratación, de modo a promover una mayor flexibilidad para el descarte de lodos de los reactores;</li> <li>• Durante la escogencia de la tecnología de deshidratación, dar preferencia a los procesos más robustos, <u>adaptados a la realidad local y al tamaño de la PTAR</u>;</li> <li>• Considerar mejoras en el <u>tratamiento preliminar</u>, de modo a reducir la entrada de desechos sólidos en los reactores y posibilitar la obtención de un lodo de mayor calidad. Algunas recomendaciones son la utilización de rejillas ultrafinas (6 a 10 mm) y de tamices de pequeña abertura (3 a 4 mm) (ver recomendaciones en la parte 2 de esta Colección de NTs - BRESSANI-RIBEIRO <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>• <u>Compatibilizar la operación de los equipos del sistema de deshidratación</u>, permitiendo el control de la carga de sólidos totales en estas unidades;</li> <li>• Incluir en el contrato del diseño la necesidad de elaborar manuales y directrices de operación que <u>detallen todos los procedimientos y rutinas operacionales</u> para la adecuada gestión del lodo en la PTAR;</li> <li>• Incluir en el contrato del diseño la necesidad de elaborar especificaciones técnicas más detalladas, de modo a garantizar la <u>adquisición de equipos de deshidratación más robustos</u> y que ofrezcan las condiciones mínimas necesarias de <u>asistencia técnica</u>;</li> <li>• En el caso de considerar la <u>recepción de lodo de tanques sépticos</u> en la PTAR, evaluar rigurosamente las cantidades esperadas y la posibilidad de implementar una <u>unidad específica para la recepción</u> de este tipo de contribución;</li> <li>• No permitir que los reactores UASB reciban <u>lodo químico de plantas de agua potable</u>. Si esto no fuera posible, proceder a un estudio riguroso que posibilite probar que el material contenido en el lodo químico no provocará daños al funcionamiento del reactor ni a los equipos mecánicos de bombeo y deshidratación del lodo;</li> <li>• Dar atención especial a la calidad del diseño, la construcción y la operación del <u>desarenador</u>;</li> <li>• Instalar tuberías que posibiliten el <u>descarte de lodo a diferentes niveles</u>, según lo recomendado por la NBR 12.209 (ABNT,2011);</li> <li>• Evaluar el impacto de la pérdida de sólidos en el efluente anaerobio sobre la unidad de postratamiento (ver recomendaciones en la Parte 6 de esta Colección de NTs - ALMEIDA <i>et al.</i>, 2018).</li> </ul>

Temas de interés	Problemas asociados	Origen del problema	Posibles mejoras
<p><b>4 - Corrosión y emisiones odorantes</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los problemas de olores y corrosión en las PTARs que utilizan reactores UASB se encuentran asociados principalmente al sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) generado durante el proceso de tratamiento anaerobio. Una parte del H<sub>2</sub>S formado permanece disuelto en la masa líquida, mientras que otra parte se desprende para la atmósfera gaseosa. La mayor parte del H<sub>2</sub>S liberado de la fase líquida pasa a formar parte del biogás, pero <u>una parcela importante es emitida de forma difusa</u> a lo largo del recorrido de la fase líquida (vertedores, cajas de registro, distribuidores rotatorios y otros puntos que causan turbulencia). Adicionalmente, problemas de olores y de corrosión pueden ocurrir también en las estaciones de bombeo de aguas residuales, en las unidades de tratamiento preliminar, en los tanques de retorno y almacenamiento de lodo etc.;</li> <li>• El H<sub>2</sub>S emitido para la atmósfera posee un olor característico a huevo podrido y es perceptible para el olfato humano en bajísimas concentraciones (~0,5 ppb), pudiendo causar <u>impactos sobre el bienestar de la población</u> que vive en las cercanías de la PTAR. En concentraciones más elevadas, puede causar riesgos a la salud de los trabajadores de la PTAR;</li> <li>• El H<sub>2</sub>S emitido para la atmósfera puede producir <u>severos problemas de corrosión</u> en las estructuras de concreto reforzado y en materiales y equipos compuestos de acero al carbono y hierro fundido. Ejemplos de materiales y estructuras susceptibles a presentar corrosión son: cajas de registro, paredes, losas y tapas de inspección localizadas en la parte superior de los reactores; escaleras, pasarelas, barandas, barreras metálicas y tuberías en general; materiales y equipos utilizados en la línea de colecta y transporte de biogás.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La generación de H<sub>2</sub>S en los reactores anaerobios se debe a la presencia de compuestos de azufre en el agua residual cruda, los cuales son reducidos a sulfuro por la acción de bacterias reductoras de sulfato;</li> <li>• Las emisiones de H<sub>2</sub>S desde la fase líquida pueden ocurrir tanto de forma puntual (en el interior del separador trifásico, convirtiéndose en uno de los compuestos del biogás), como de forma difusa (a lo largo de recorrido del efluente líquido). De esta forma, el origen de los problemas de olor y corrosión puede estar relacionado tanto a la línea de colecta y tratamiento de biogás, como a las emisiones difusas a partir de la fase líquida;</li> <li>• El H<sub>2</sub>S que se desprende desde la fase líquida hacia la fase gaseosa puede promover la formación de ácido sulfúrico y detonar el proceso de corrosión. De esta forma, la existencia de vertedores, cajas de registro y otros puntos que causen turbulencia en la masa líquida favorecen la liberación de H<sub>2</sub>S y la corrosión de las estructuras de concreto y metálicas en las inmediaciones de esos puntos de liberación;</li> <li>• De esta forma, el origen del problema se relaciona a cinco factores principales: i) presencia de compuestos de azufre en el agua residual cruda afluente al reactor anaerobio; ii) existencia de singularidades que causan turbulencia a lo largo del perfil hidráulico de la PTAR y posibilitan la liberación del H<sub>2</sub>S disuelto en la fase líquida; iii) utilización de materiales y revestimientos no resistentes a la corrosión; iv) baja estanqueidad de la cámara de gas y manejo inadecuado de las tapas de inspección de los reactores; y v) baja eficiencia de combustión en algunos tipos de quemadores de biogás.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar cuidadosamente los volúmenes y tiempos de retención hidráulica de los pozos húmedos de las estaciones de bombeo de aguas residuales. Existiendo riesgos de emanación de H<sub>2</sub>S, prever el confinamiento, extracción y tratamiento de los gases;</li> <li>• Prestar especial atención y verificar, durante la fase de diseño, la <u>definición del perfil hidráulico de la PTAR</u>, de modo a evitar singularidades que causen turbulencia. Si esto no es posible, prever el confinamiento, extracción y tratamiento del H<sub>2</sub>S generado por esas singularidades. Atención especial debe ser dirigida también hacia las líneas de retorno de lodo y puntos de recepción de lodo de tanques sépticos;</li> <li>• Considerar la <u>dirección de los vientos en la definición de la distribución en planta de las unidades</u>. Verificar la conveniencia de implantar una “cortina verde” y de sumergir la entrada de efluentes anaerobios;</li> <li>• Prestar especial atención, durante las fases de diseño y de construcción, a la <u>especificación y ejecución de los dispositivos de colecta</u> (ejemplo: pruebas de estanqueidad) y de <u>tratamiento del biogás</u>. En particular, cuidar los problemas de corrosión y de fugas en esos dispositivos, y verificar también los problemas de <u>baja eficiencia de combustión</u> en algunos quemadores de biogás;</li> <li>• Utilizar <u>materiales resistentes a la corrosión</u> o especificar <u>productos anticorrosivos</u> para el revestimiento de todos los materiales y estructuras no resistentes a la corrosión;</li> <li>• <u>Minimizar la generación y liberación de H<sub>2</sub>S</u>. Algunas medidas son: i) implementar restricciones a la recepción de efluentes que contengan sulfato y/o sulfuro; ii) adicionar productos químicos al agua residual cruda que puedan oxidar o precipitar los sulfuros; iii) implementar microaeración en el interior del reactor anaerobio; iv) usar dispositivos de descarte de nata que no requieran la abertura de las tapas de inspección; y v) promover la desorción, extracción y tratamiento de los gases disueltos en la fase líquida;</li> <li>• Realizar diagnósticos permanentes (ejemplo: estanqueidad de las tapas de inspección de los reactores) y campañas de medición para <u>identificar eventuales puntos de fuga de biogás y de gases residuales</u>.</li> </ul>

Temas de interés	Problemas asociados	Origen del problema	Posibles mejoras
<p><b>5 - Biogás y emisiones fugitivas de metano</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisión de <u>gases odorantes</u> (sulfuro de hidrógeno).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Según lo presentado en el inciso anterior (4- Corrosión y emisiones odorantes), una fracción de las emisiones de H<sub>2</sub>S desde la fase líquida son puntuales y pasan a formar parte del biogás producido en los reactores. Problemas de estanqueidad en las cámaras y líneas de gas, la ineficiencia del separador trifásico y la baja eficiencia en los quemadores de biogás son las causas de las emisiones puntuales de gases odorantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El diseño de un sistema de colecta de biogás en reactores UASB presenta particularidades debido a sus características diferenciadas de: bajo caudal y baja presión; presencia de humedad y material particulado; y de potencial de corrosión. Esto se traduce en que el <u>diseño de las instalaciones de biogás sea distinto del de las aplicaciones usuales de gases</u>. Las personas encargadas del diseño deben estar atentas a los requisitos específicos del área del tratamiento de aguas residuales al conceptualizar y dar recomendaciones sobre el diseño de sistemas de colecta de biogás;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisión de <u>gases de efecto invernadero</u> (metano).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El metano (CH<sub>4</sub>), producido a partir de la degradación anaerobia de materia orgánica, es un gas inodoro y con elevado poder calorífico (aprovechable energéticamente) y al mismo tiempo con elevado potencial de efecto invernadero;</li> <li>• La mayor parte del metano formado en los reactores anaerobios es colectada como biogás, siendo aprovechable energéticamente. Sin embargo, una parcela significativa del metano formado (30 a 40%) se disuelve en el medio líquido y se desprende hacia la atmósfera de forma dispersa. Esa corriente gaseosa se conoce como emisiones fugitivas. Adicionalmente, pueden existir pérdidas de metano a lo largo de todo el sistema de colecta, transporte y quema del biogás. De esta forma, las emisiones de metano más significativas en reactores UASB se encuentran normalmente asociadas a: i) emisiones fugitivas de la parcela que se encuentra disuelta en el efluente y ii) fugas en los separadores trifásicos y/o en la línea de biogás, y/o combustión incompleta en los quemadores;</li> <li>• Diseño, materiales y/o instalación ineficientes de sistemas de remoción o de rompimiento de nata, que pueden volverse puntos vulnerables para emisiones fugitivas de biogás;</li> <li>• Diseños antiguos o inadecuados que obviaron la gestión de la fase gaseosa inherente al tratamiento de aguas residuales urbanas en reactores UASB.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tener mayor rigurosidad, durante las fases de diseño y de construcción, en la <u>especificación, ejecución e instalación de los dispositivos de colecta</u> (ejemplo: separador trifásico), <u>transporte</u> (ejemplo: línea de gas) y <u>tratamiento del biogás</u> (ejemplo: quemador). Debe prestarse especial atención a los problemas de fugas en estos dispositivos, y también a la <u>baja eficiencia de combustión</u> en algunos tipos de quemadores de biogás. Exigir la realización de <u>pruebas de estanqueidad</u> periódicas en la cámara de gas del separador trifásico y en la línea de gas;</li> <li>• Respecto a la <u>entrada excesiva de agua de lluvia</u> en la red de alcantarillado, ese es un problema grave y de solución compleja. Las posibles mejoras están relacionadas principalmente a: i) sensibilización de las personas usuarias; ii) fiscalización más rigurosa durante la ejecución de las conexiones al alcantarillado sanitario; iii) identificación y corrección de las conexiones ilícitas;</li> <li>• En relación a las emisiones fugitivas de CH<sub>4</sub>, liberadas a lo largo del recorrido del efluente líquido, pueden ser previstos <u>dispositivos para la desorción, extracción y tratamiento</u> de ese gas o, eventualmente, la utilización de técnicas más avanzadas para la <u>recuperación del metano disuelto</u> (ver detalles en la Parte 4 de esta Colección de NTs - BRANDT <i>et al.</i>, 2018);</li> <li>• Realizar una evaluación técnico-económica de la posibilidad de <u>substituir los quemadores de biogás abiertos</u> por quemadores cerrados, considerando la mayor eficiencia de quema de los segundos;</li> <li>• Una vez completadas las mejoras que permitan una mayor recuperación de biogás, listadas anteriormente, se debe realizar un análisis de viabilidad técnico-económica sobre la <u>posibilidad de generación de energía eléctrica y/o térmica</u>, de acuerdo a las directrices de la Guía Brasileña de Aprovechamiento Energético de Biogás (BRASIL, 2016);</li> <li>• Dar <u>mantenimiento preventivo</u> a los componentes de la línea de biogás (válvulas, filtros y medidores).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo potencial de <u>aprovechamiento energético</u> en los reactores anaerobios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevados niveles de fugas en las cámaras de gas de los separadores trifásicos y en la línea de gas son usualmente las principales causas de las elevadas pérdidas de biogás en los reactores UASB;</li> <li>• Entrada excesiva del agua de lluvia en la red de alcantarillado sanitario durante los periodos lluviosos, lo que puede ocasionar una importante dilución del agua residual, causando una reducción de la producción de biogás. Adicionalmente, el exceso de caudal puede provocar sobrecarga hidráulica en el reactor, generando una pérdida de biomasa y consecuente pérdida de eficiencia en la generación de biogás.</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aspectos de seguridad vinculados a la <u>creación de espacios confinados</u> e identificación y delimitación de espacios con <u>atmósferas explosivas</u>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El biogás se compone mayoritariamente por metano, un gas inflamable que, mezclado con oxígeno, puede generar una mezcla explosiva. Además de eso, en ambientes confinados, las concentraciones de algunas sustancias presentes en el biogás (ejemplo: H<sub>2</sub>S) pueden encontrarse en concentraciones superiores a los límites de toxicidad para seres humanos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalar <u>medidores de caudal y dar seguimiento a la producción de biogás en los reactores UASB</u>. De ser posible, verificar si la producción de biogás presenta una variación significativa entre los periodos secos y los lluviosos, y si la concentración del metano se encuentra dentro del rango usual de 70 a 80%.</li> <li>• Elaborar <u>mapas de riesgo e instalar elementos para la identificación de atmósferas explosivas</u>. Identificar y clasificar las <u>áreas de espacio confinado</u> y ejecutar las actividades de operación/mantenimiento en esas áreas de acuerdo con los criterios de seguridad ocupacional correspondientes;</li> <li>• Ejecutar las actividades de operación/ mantenimiento de los reactores de forma a <u>evitar la entrada de aire en las cámaras y tuberías de gas</u>, junto con la consecuente formación de mezclas explosivas;</li> <li>• Definir <u>metas de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero</u>.</li> </ul>

Temas de interés	Problemas asociados	Origen del problema	Posibles mejoras
<p>6 - Calidad del efluente</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de sólidos en el efluente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lechos de secado y/o equipos de deshidratación de lodo con fallas de instalación, con capacidad por debajo de la necesidad de procesamiento de lodo o inclusive fuera de operación;</li> <li>• Falta de protocolos o protocolos inadecuados para el descarte de lodo en exceso de los reactores UASB, conforme se describió en el inciso anterior (3 – Gestión del lodo);</li> <li>• Dificultades para implantar rutinas adecuadas de retorno de lodo aerobio para espesamiento y digestión en el reactor UASB;</li> <li>• Fuga de gases desde el interior del STF hacia el compartimiento de sedimentación del reactor UASB, ocasionando arrastre de sólidos;</li> <li>• Vertedores desnivelados / obstruidos causando zonas de sobrecarga hidráulica y arrastre de sólidos;</li> <li>• Recepción de efluentes no domésticos;</li> <li>• Sobrecarga hidráulica y velocidades ascensionales elevadas asociadas a la entrada excesiva de agua pluvial en la red de alcantarillado sanitario;</li> <li>• Picos de caudal excesivos y velocidades ascensionales elevadas debido a estaciones de bombeo mal dimensionadas o que operan con apenas una bomba y que no disponen de variadores de frecuencia, así como consideraciones de diseño inadecuadas en relación a la estimación del caudal máximo (de pico).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalar obligatoriamente <u>puntos de muestreo de lodo a diferentes profundidades</u> en todos los módulos del reactor UASB;</li> <li>• Enfatizar y detallar en los manuales o directrices de operación todos los procedimientos y rutinas operacionales para la <u>adecuada gestión del lodo en la PTAR</u>, contemplando el retorno de lodo aerobio, cuando sea necesario;</li> <li>• Definir una rutina periódica para la <u>verificación de la nivelación de los vertedores</u> y para detectar <u>fugas de gases</u> desde el separador trifásico hacia el compartimiento de sedimentación de los reactores UASB;</li> <li>• Con respecto a la <u>entrada excesiva de agua pluvial</u> en la red de alcantarillado sanitario, las posibles mejoras fueron indicadas en el inciso anterior (5- Biogás y emisiones fugitivas de metano);</li> <li>• Utilizar <u>bombas con variadores de velocidad</u> (variadores de frecuencia) o un mínimo de tres bombas, siendo una de relevo y respaldo, tal como se recomienda en el inciso 6.4.2 de la NBR 12.209 (ABNT, 2011);</li> <li>• Controlar la recepción de <u>efluentes no domésticos</u> (END).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incumplimiento de los <u>límites de calidad de vertido</u>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El proceso anaerobio tiene limitaciones intrínsecas asociadas a la eficiencia de remoción de materia orgánica, nutrientes y otros compuestos de menor biodegradabilidad, como por ejemplo los surfactantes. Sin embargo, dependiendo de la capacidad de autodepuración del cuerpo receptor, una única etapa anaerobia puede ser suficiente para cumplir con los objetivos de calidad del cuerpo hídrico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La <u>combinación en serie de procesos anaerobios y aerobios</u> (ejemplo: UASB/Filtro Biológico Percolador) tiende a aprovechar de la mejor manera las ventajas individuales de cada sistema. La remoción de surfactantes y N-amoniaco puede ser sistemáticamente obtenida en sistemas de postratamiento compuestos por lodos activados, filtros aerobios sumergidos, wetlands, lagunas de pulimento y filtros biológicos percoladores;</li> <li>• La utilización de sistemas de postratamiento asociados a la aplicación en el suelo y al reuso del efluente para fines con requisitos de calidad del efluente menos exigentes (ejemplo: humedecimiento del suelo para reducir el polvo) puede disminuir la <u>necesidad de remoción de nutrientes</u>;</li> <li>• La precipitación físico-química de fósforo puede ser una alternativa cuando la remoción de ese elemento sea necesaria;</li> <li>• <u>Buscar alternativas de uso del efluente</u>, inclusive en las propias instalaciones de la PTAR (ejemplo: preparación de soluciones de polímero e irrigación de jardines).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deficiencias de la <u>unidad de postratamiento</u>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La pérdida de sólidos en los reactores UASB puede resultar en sobrecargas en las unidades de postratamiento, pues tiende a perjudicar los procesos de transferencia de masa, consumo de oxígeno y remoción de contaminantes, contribuyendo también para la colmatación de sistemas de biomasa adherida (que utilizan algún medio de soporte);</li> <li>• El problema de colmatación tiende a agravarse en el caso de Filtros Biológicos Percoladores rellenos con piedra, principalmente cuando hay ausencia de una especificación adecuada para la granulometría durante la fase de diseño, o cuando hay fallas de inspección y fiscalización durante la etapa constructiva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar el impacto de la pérdida de sólidos en el efluente anaerobio sobre la unidad de postratamiento;</li> <li>• Mayor rigor durante la fase de diseño con respecto a la <u>especificación del material de relleno</u> para sistemas de postratamiento de biomasa adherida;</li> <li>• <u>Rigurosidad del equipo de inspección</u> durante el seguimiento de la obra.</li> </ul>

### 3 CONSIDERACIONES FINALES

Según lo expuesto en esta Nota Técnica, los problemas relacionados con el tratamiento de aguas residuales urbanas por reactores UASB pueden estar asociados a deficiencias de diseño, de construcción y de operación. Además, la ineficiencia de mecanismos de administración impide/dificulta el cumplimiento de procedimientos adecuados de contratación de proyectos, servicios tercerizados, compra de equipos, fiscalización de obras y disponibilización de recursos humanos calificados para la correcta operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Se aclara que estos problemas de administración ocurren en la mayoría de las PTARs, independientemente de la tecnología de tratamiento utilizada.

Con esta Colección de Notas Técnicas, se espera contribuir para un mejor entendimiento de los diferentes problemas y de sus orígenes, así como para el señalamiento de las mejoras necesarias de diseño, construcción y operación de reactores anaerobios aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas. *Aunque son muchos los problemas detectados, la gran mayoría puede ser corregida de manera simple y efectiva, sin impactos significativos para el costo de los reactores.*

En ese sentido, se incentiva a las personas encargadas de la administración, consultoría, diseño, construcción y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas basados en reactores UASB a que se actualicen y profundicen sus conocimientos sobre los temas de interés discutidos en esta Nota Técnica, los cuales son detallados en las otras cinco Notas Técnicas (Partes 2 a 6) que integran esta Colección.

### 4 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la estudiante de ingeniería civil de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Vanessa Rodrigues de Melo. A los ingenieros de la Sabesp, Bruno Sidnei da Silva y Luiz Yoshiharu Ito, por las contribuciones a lo largo de

la elaboración de esta Nota Técnica. Se agradece igualmente 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).

### 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEM SOBRINHO P., JORDÃO E.P. Pós-tratamiento de efluentes de reactores anaeróbios – uma análise crítica. Capítulo. 9. In: CHERNICHARO, C.A.L. (coordinador). **Pós-tratamiento de efluentes de reactores anaeróbios**. FINEP/PROSAB, Rio de Janeiro, 544 p., 2001.

ALMEIDA, P.G.S., BRESSANI-RIBEIRO, T.B., SILVA, B.S., AZEVEDO, L. S., CHERNICHARO, C.A.L. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 6: Calidad del efluente. **Revista DAE** – edición especial, v. 66, n. 214, p. 90-108, 2018.

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

BRASIL – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades/Probiogás. Resultados do projeto de medições de biogás em reatores anaeróbios. Brasília, Distrito Federal: Ministério das Cidades, 2017. 128 p.

BRESSANI-RIBEIRO T., LOBATO, L. C. S., SOUZA, S. N., PEGORINI, E. S., CHERNICHARO, C. A. L. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB

aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 2: Tratamiento Preliminar. **Revista DAE** – edición especial, v. 66, n. 214, p. 17-29, 2018.

CAMPOS, J. R. (coordinador). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. São Carlos: reatores anaeróbios. Belo Horizonte: FINEP, 464 p., 1999.

CHERNICHARO, C. A. L. (coordinador). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: FINEP/PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 544 p., 2001.

CHERNICHARO, C. A. L. Post-Treatment Options for the Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 5, n. 1, p. 73-92, 2006.

CHERNICHARO, C. A. L., VAN LIER, J.B., NOYOLA, A., BRESSANI-RIBEIRO, T. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 14, n. 4, p. 649-679, 2015.

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

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

LOBATO, L. C. S., BRESSANI-RIBEIRO, T., SILVA, B. S., FLÓREZ, C. A. D., NEVES, P. N. P., CHERNICHARO, C. A. L. Contribución para el

perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 3: Gestión del lodo y la nata. **Revista DAE** – edición especial, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

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

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

POSSETTI, G. R. C., RIETOW, J. C., COSTA, F. J. O. G., WAGNER, L. G., LOBATO, L.C.S., BRESSANI-RIBEIRO, T., MELO, D. F., REIS, J.A., CHERNICHARO, C. A. L. 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.

SILVA, S. M. C. P. **Desenvolvimento de uma nova concepção de tratamento de águas residuárias pela associação de processos anaeróbios e aeróbios**. Tesis (Doctorado). Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo. São Paulo, 1993.

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

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



# Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 2: Tratamiento preliminar, bombeo y distribución de caudal

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

- **Fecha de entrada:**  
01/08/2018
- **Fecha de aprobación:**  
17/09/2018

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

DOI: 10.4322/dae.2018.039es

## Resumen

La etapa de tratamiento preliminar es fundamental para el adecuado acondicionamiento del agua residual antes de su ingreso a los reactores UASB. El objetivo de esta Nota Técnica es discutir acerca de los principales problemas, sus respectivos orígenes y las posibles soluciones asociadas al tratamiento preliminar, bombeo y distribución de caudal en los reactores UASB. En síntesis, un adecuado tratamiento preliminar influenciará positivamente en: i) el mantenimiento de las estructuras de distribución de caudal y canales colectoras de efluente, evitando obstrucciones; ii) en la reducción de sedimentación y acumulación de arena en el fondo de los reactores UASB; iii) en el manejo del lodo, de modo a obtener un material sólido con menor contenido de residuos y arena y de mejor calidad estética; iv) en el manejo de la nata, sobre todo debido a que, cuando algunos materiales no son removidos adecuadamente en el tratamiento preliminar, tienden a flotar en el interior del reactor y a acumularse en la parte superior del separador trifásico (por ejemplo: plásticos o residuos livianos en general); y v) en la reducción significativa de problemas comunes asociados a la operación de unidades de procesamiento mecanizado de lodo y nata, tal como la paralización por obstrucciones de tuberías o la falla y pérdida de rendimiento de equipos debido al desgaste.

**Palabras clave:** Cribado, desarenador, olor, residuos de tratamiento preliminar, tamizaje

**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 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 Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs *Sustentáveis* por sus siglas en portugués).

**Livia Cristina da Silva Lobato** – Ingeniera Civil de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Doctora 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).

**Saulo Nonato de Souza** – Ingeniero Civil de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Ingeniero de Operación de la Compañía de Saneamiento de Minas Gerais (COPASA), Brasil. Estudiante de Maestría en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la UFMG, Brasil

**Eduardo Sabino Pegorini** – Ingeniero Agrónomo de la Universidad del Paraná (UFPR), Brasil. Máster en Ciencias del Suelo de la UFPR, Brasil. Ingeniero de la Unidad de Proyecto KFW en la Compañía de Saneamiento de Paraná (Sanepar), 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 Tratamiento 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

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

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

## 1 INTRODUCCIÓN

En una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas (PTAR), la etapa de tratamiento preliminar (TP) está compuesta típicamente por rejillas de barras y desarenadores. El principal papel de las unidades que componen el tratamiento preliminar es la remoción de sólidos que podrían comprometer el adecuado funcionamiento de las unidades posteriores del tratamiento - en este caso, los reactores anaerobios de manto de lodo y flujo ascendente (UASB, por sus siglas del inglés *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), sobre todo debido a las obstrucciones de tuberías, averías en equipamientos electromecánicos, acumulación de arena en el interior de los reactores y formación de nata. Esos problemas usualmente también se extienden a equipos y unidades de procesamiento de subproductos del tratamiento, como el lodo y la nata, generando paralizaciones frecuentes; las cuales pueden variar desde una simple limpieza y desobstrucción hasta la falla y daño de equipos de mantenimiento delicado y lento (por ejemplo: centrífugas).

Con respecto al cribado (separación con rejillas), el objetivo es adoptar un espaciamiento entre las barras que permita una remoción eficiente de residuos sólidos (por ejemplo: cabello, hisopos, toallas sanitarias, hilo dental, algodón, toallas húmedas, colas de cigarrillo y materiales plásticos). Se debe señalar que estos sólidos no deberían ser descartados por la población servida en las instalaciones sanitarias domiciliarias del

sistema de alcantarillado sanitario. Cuando se utiliza una secuencia de rejillas (generalmente dos), se adopta un espaciamiento entre barras gradualmente decreciente (rejillas gruesas, medianas, finas y ultra finas).

Usualmente la alternativa para la disposición final del material retenido en las rejillas (fase sólida) es la disposición en rellenos sanitarios, precedida por una etapa de remoción de humedad. Para PTARs de pequeña escala, esta disposición final puede realizarse en la propia área de la PTAR, en fosas adecuadamente preparadas y autorizadas para recibir estos desechos. Sin embargo, se debe observar que las condiciones técnicas para esta forma de disposición final son similares a las de un relleno sanitario, lo que puede implicar una excesiva demanda constructiva y operacional para una PTAR de pequeña escala. El aprovechamiento energético del material retenido en las rejillas (por ejemplo: el procesamiento conjunto en hornos de Clinker) todavía es incipiente en Brasil, pero existen reportes que indican un considerable poder calorífico inferior (PCI) y bajo contenido de cenizas asociados a residuos retenidos en la etapa de separación con rejillas finas (BORGES, 2014). Adicionalmente, la celulosa puede constituir la mayor fracción de demanda química de oxígeno (DQO) inerte presente en el agua residual (debido al papel higiénico) (RUIKEN *et al.*, 2013). En algunos países desarrollados su recuperación ya ha sido realizada en escala piloto y en escala

plena, con el objetivo del aprovechamiento energético, incorporación al asfalto, entre otros (MARCELIS & WESSELS, 2018).

En relación a los desarenadores, dependiendo de la escala de la PTAR, se puede considerar la utilización de unidades de: i) flujo horizontal y sección rectangular o cuadrada; ii) flujo en espiral (aireado); y iii) flujo en vórtice. Las opciones de manejo del material removido (fase sólida) normalmente están asociadas al secado y posterior disposición final en rellenos sanitarios. La recuperación de arena removida para fines de preparación de concreto no estructural o reposición en lechos de secado de la PTAR todavía es incipiente, pero se puede considerar como una importante alternativa de gestión de este subproducto a corto y a mediano plazo.

Existen escasos reportes en la literatura asociados a la caracterización cualitativa de los sólidos removidos en el tratamiento preliminar, aunque se sabe que la cantidad y la composición del material recuperado en la etapa de retención de sólidos dependen principalmente del espaciamiento entre barras. Sin embargo, las características de la cuenca de contribución de la PTAR influyen en el volumen y calidad del material removido, siendo posible enumerar los siguientes factores de influencia (adaptado de WEF, 1994; WEF, 1998):

- El tamaño y el tipo de ocupación de la cuenca de contribución;
- La configuración del sistema de alcantarillado: la presencia de estaciones de bombeo disminuyen la cantidad de material retenido en las rejillas, debido a la remoción previa antes del bombeo (por ejemplo: canastas en estaciones de bombeo de agua residual y disposición del material en el fondo del pozo de succión);
- Los hábitos y la educación sanitaria de la población atendida;
- Recepción de camiones transportadores de lodo séptico, efluentes no domésticos (END), residuos de otras PTAR (como nata y lodo), residuos de estaciones de bombeo. Es importante mencionar que la recepción de

estas contribuciones implica un aumento en la producción de lodo y en la formación y acumulación de nata en los reactores UASB, conforme lo presentado en la Parte 3 de esta Colección de Notas Técnicas (NTs) (LOBATO *et al.*, 2018).

El volumen de sólidos retenidos en el cribado varía usualmente entre 6 a 50 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de agua residual tratada (JORDÃO & PESSÔA, 2017). De acuerdo con una caracterización cualitativa y cuantitativa realizada por Borges (2014) en una PTAR de escala mayor (Población Equivalente - PE = 258.000 habitantes) en el interior del estado de São Paulo (Brasil), el material retenido en la etapa de cribado de material grueso (en términos de volumen y masa) fue principalmente constituido por materia orgánica putrescible (restos de alimentos, animales en descomposición, entre otros - 65% en volumen), seguido de plástico (17% en volumen), piedras (9% en volumen), tejido (6% en volumen) y papel (3% en volumen). Fue obtenida una configuración similar para la evaluación realizada en relación a los sólidos retenidos en el cribado de material fino. La composición del material retenido presentó una variación estacional significativa, indicando una fuerte influencia de la precipitación en el aumento de la cantidad de piedras. Éstas, a su vez, contenían precipitados de azufre, calcio y grasa solidificada.

En relación a la cantidad de arena presente en el agua residual cruda, esta depende de varios factores, entre ellos: i) el tipo de sistema (sistema combinado o separado de agua pluvial y residual) y el estado de las condiciones del sistema de alcantarillado y transporte de agua residual; ii) características de drenaje pluvial de la cuenca de contribución (colectores sujetos a inundación tienden a recibir mayor carga de sedimentos a través de las tapas de pozos de inspección); iii) el tipo de ocupación de la cuenca de contribución; y iv) el tipo de suelo de la cuenca de contribución y el grado de pavimentación de las calles. La cantidad de arena en sistemas separados varía usualmente entre 4 e 37 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de agua residual tratada (METCALF & EDDY, 2003).

## 2 PRINCIPALES CONFIGURACIONES PARA EL TRATAMIENTO PRELIMINAR

Las unidades que componen el tratamiento preliminar (TP) pueden ser implantadas de forma enterrada (Figura 1a), apoyada o elevada (Figura 1b) en relación al nivel del terreno. Las soluciones enterradas pueden facilitar el confinamiento del TP, tal como se muestra en la Figura 1a para el desarenador y la canaleta Parshall. Sin embargo, esta opción puede implicar una mayor dificultad operacional asociada a la rutina de limpieza de las unidades, además de que en la mayoría de las ocasiones demandan una estación de bombeo dentro de la PTAR. En esta configuración, el TP aguas arriba de la estación de bombeo puede tener un importante papel en la protección del conjunto motor-bomba, pero no hay cómo garantizar que este aspecto compense la mayor dificultad debido a la operación de las unidades enterradas. Se debe destacar que los aspectos asociados al confinamiento, extracción y tratamiento de olores en el TP son abordados en la Parte 4 de esta Colección de Notas Técnicas (BRANDT *et al.*, 2018).

Por otro lado, la solución apoyada o elevada puede demandar mayor costo de implantación en com-

paración con la solución apoyada, pero tiene la ventaja de permitir la descarga del fondo de los desarenadores por gravedad, lo que puede implicar la simplificación o eliminación de equipos electromecánicos (por ejemplo: clasificador de tornillo). Adicionalmente, el contenedor para la recolección del material retenido en el cribado puede ser colocado estratégicamente cerca del cribado, en un nivel inferior al TP. Esto contribuye para la mejora de las condiciones ergonómicas asociadas a la limpieza manual de las rejillas. Eventualmente, las unidades de cribado pueden estar conectadas a la estación de bombeo de agua residual cruda, satisfaciendo la necesidad de adoptar una estructura de control de caudales afluentes (rebalse o vertedero de excedencias) para prevenir la inundación de las rejillas. En este caso, se entiende que las rejillas son componentes de la estación de bombeo, de forma que las unidades del TP se reducirían al desarenador y, eventualmente, a un cribado fino y tamiz. En muchas situaciones, la elevación del TP elimina una estación de bombeo dentro de la PTAR, debido a que la ganancia en el nivel puede provenir de subir el propio nivel de la tubería de entrada, contribuyendo para que el perfil hidráulico esté a favor de la gravedad.

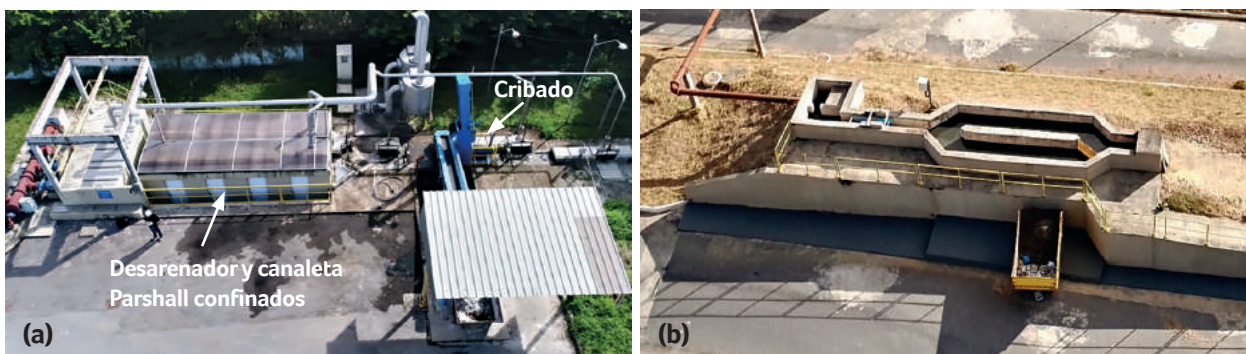


Figura 1 – Unidades del tratamiento preliminar: a) solución enterrada y confinada; b) solución elevada.

Lastuberías (o canales) que conducen el agua residual de las rejillas al desarenador normalmente son confeccionadas en concreto reforzado. Para PTARs de escala pequeña (Caudal -  $Q < 20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  o  $\text{PE} < 10.000$  hab.), las dimensiones de estos canales pueden ser muy pequeñas, al punto de dificultar la ejecución de obra en concreto, conforme lo presentado en secciones posteriores, en el ítem “Otros aspectos importantes del diseño, construcción y operación”.

### 3 DIRECTRICES PARA EL DISEÑO

#### 3.1 Parámetros y criterios de dimensionamiento

La lógica principal para el dimensionamiento de las unidades de tratamiento preliminar incluye asegurar velocidades de flujo adecuadas para la remoción de sólidos gruesos, evitando problemas de obstrucción, desgaste y trabamamiento en equipos electromecánicos, sensores y medidores de velocidad sumergidos. Sin embargo, se debe asegurar que tales velocidades no impliquen la sedimentación de materia orgánica particulada, pues esto puede propiciar la generación de olores. Las directrices de diseño para la etapa de tratamiento preliminar se encuentran detalladas en la Norma Brasileña (NBR) 12.209 (ABNT, 2011).

Los principales parámetros y criterios de dimensionamiento de las unidades que componen el tratamiento preliminar se muestran en el Cuadro 1. Las diferentes configuraciones recomendadas para el TP relacionadas a la selección de rejillas y desarenadores se presentan en la Figura 2 (en función de la población equivalente o caudal afluente a la PTAR). Se debe resaltar que estas configuraciones son originadas a partir de la experiencia operacional de PTARs en diversos estados brasileños, principalmente en las regiones sur y sureste. Estas configuraciones han sido extensamente discutidas junto a especialistas del sector de saneamiento de Brasil.

**Cuadro 1** – Principales parámetros y criterios de dimensionamiento para las unidades de tratamiento preliminar

Cribado (Rejillas)	
Parámetro	Valor
Velocidad máxima a través de las barras de rejillas para el caudal final <sup>a</sup>	1,20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Inclinación de las barras en relación al plano horizontal	45 a 60° - limpieza manual 60 a 90° - limpieza mecanizada
Pérdida de carga mínima a ser considerada (flujo aguas arriba)	0,15 m - limpieza manual 0,10 m - limpieza mecanizada
Desarenador <sup>b</sup>	
Parámetro	Valor
Velocidad de flujo	0,25 a 0,40 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Profundidad mínima para acumulación de material sedimentado	0,20 m
Carga hidráulica superficial	600 a 1.000 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$

**Nota:** el caudal de dimensionamiento de las unidades del TP debe ser el caudal máximo afluente

<sup>a</sup>Los canales o tuberías aguas arriba y aguas abajo de los dispositivos de remoción de sólidos gruesos deben garantizar (por lo menos una vez al día y desde el inicio de la operación) una velocidad igual o superior a  $0,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La velocidad mínima de flujo en estos canales debe ser idealmente superior a  $0,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , con el fin de evitar la disposición de arena en los canales o tuberías.

<sup>b</sup>Criterios válidos para desarenadores de flujo horizontal y sección rectangular (tipo canal).

**Fuente:** adaptado de la NBR 12.209 (ABNT, 2011)

#### 3.2 Configuraciones recomendadas para el tratamiento preliminar

En la NBR 12.209 no hay una recomendación explícita sobre las posibilidades de instalación de diferentes tipos de rejillas (en términos de espaciamiento entre barras y automatización de la limpieza), especialmente para PTARs de escala pequeña ( $Q < 20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  o  $\text{PE} < 10.000$  hab.) (ABNT, 2011). Específicamente para sistemas de pequeña escala, la experiencia operacional ha sido positiva al utilizar dos rejillas consecutivas de limpieza manual, con un espaciamiento libre entre las barras de 20 y 10 mm, respectivamente (Figura 2). Es importante resaltar que la posibilidad de utilizar rejillas de limpieza manual o mecanizada para esta escala de PTAR depende del prestador de servicios, en vista del volumen de material a ser retenido o de las dificultades operacionales (NBR 12.209 – ABNT, 2011).

En el caso de PTARs cuyo caudal afluente máximo sea igual o superior a  $100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , las rejillas deben ser de limpieza mecanizada.

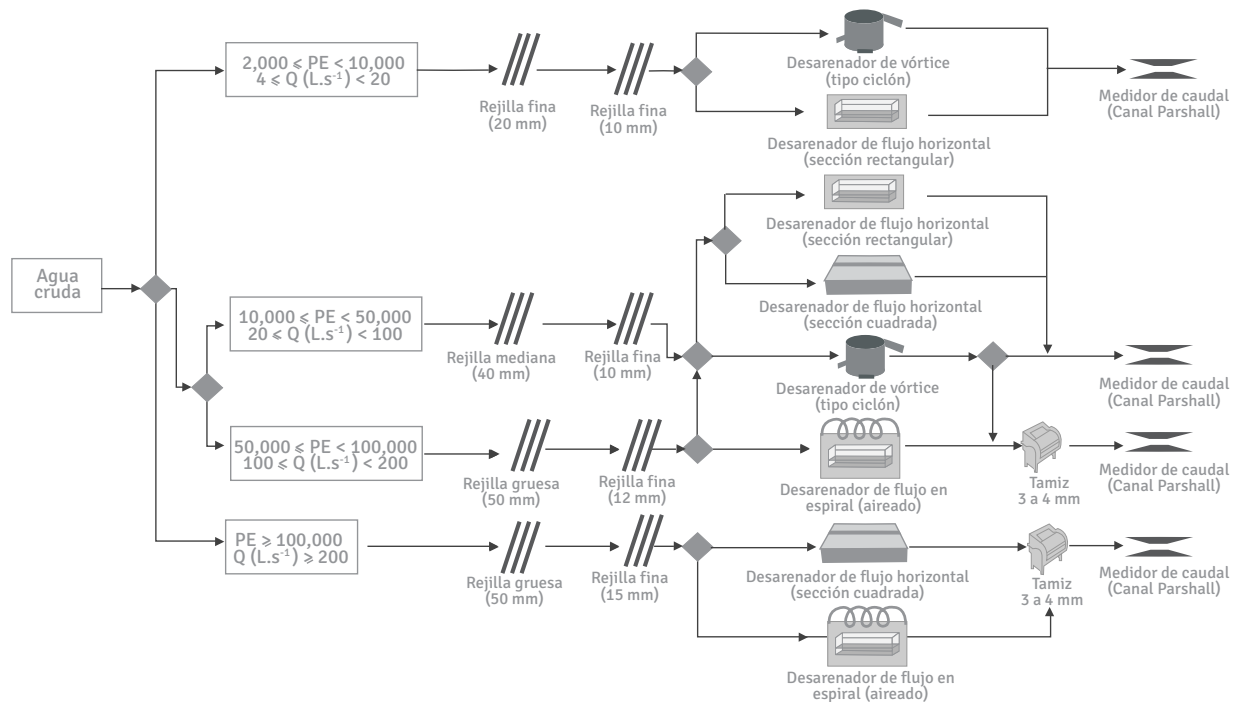
En el caso de PTARs que utilizan reactores UASB, es imprescindible la utilización de dispositivos de remoción de sólidos gruesos con aberturas iguales o inferiores a 12 mm para PTARs con caudal máximo hasta de  $100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  (NBR 12.209 – ABNT, 2011). Las experiencias operacionales con el uso de unidades de tamizaje estático (3 a 5 mm de abertura de malla) en PTARs de pequeña escala, como postratamiento del cribado, indican que estas unidades son importantes para evitar obstrucciones en las líneas de alimentación de reactores UASB (en vertederos y tuberías), así como en canaletas colectoras de efluente tratado. Para estaciones cuyo caudal máximo es superior a  $100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , es imprescindible el uso de tamices con aberturas iguales o inferiores a 6 mm, según la indicación de la norma NBR 12.209 (ABNT, 2011). En este caso, las experiencias operacionales han indicado el uso preferencial de tamices con aberturas de malla de 3 a 4 mm.

La calidad del lodo y de la nata descartadas, en términos de presencia de sólidos gruesos, también se refleja en la operación de los sistemas de deshidratación mecanizada, reduciendo la necesidad de mantenimiento debido problemas como la obstrucción de tuberías de alimentación de bombas y centrífugas, bloqueos de rotores y estatores de bombas y de mezcladores, rompimiento de sellos mecánicos, acumulación de residuos en tanques de ecuilización, entre otros. Adicionalmente, una remoción más eficiente de sólidos gruesos propicia la obtención de un lodo de mejor calidad estética, lo que puede favorecer su uso agrícola, además de disminuir la formación de nata en el interior de los reactores anaerobios.

En relación a los desarenadores para sistemas de pequeña escala ( $Q < 20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  o  $PE < 10.000 \text{ hab.}$ ), usualmente son adoptadas unidades de flujo horizontal y sección rectangular (tipo canal – Ver Figu-

ra 1b), con velocidad constante proporcionada por medio de una sección de control colocada aguas abajo del desarenador (normalmente una canaleta Parshall) y remoción no mecanizada de arena. Una opción bastante utilizada para los sistemas de pequeña y media escala ( $Q < 100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  o  $PE < 50.000 \text{ hab.}$ ), principalmente en la región sur de Brasil, es el desarenador de flujo de vórtice (tipo ciclón), con remoción de arena por medio de air lift. Para sistemas de escala mayor ( $Q \geq 100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  o  $PE \geq 50.000 \text{ hab.}$ ) comúnmente son adoptadas las unidades de flujo horizontal y sección cuadrada en planta. En este caso la remoción de arena retenida es efectuada por medio de brazos raspadores y lavador de arena. Unidades de escala mayor requieren atención especial para asegurar una distribución uniforme de caudal afluente en toda la sección de flujo del canal, además de una cuidadosa operación para identificar la ocurrencia de flujos preferenciales y/o colmatación en puntos específicos del canal, principalmente aguas arriba de las rejillas y en el inicio de operación de las PTARs.

Específicamente en relación a los desarenadores aireados (flujo en espiral), aunque sean equipos de reconocida eficiencia para la remoción de arena, las escasas experiencias brasileñas reportadas en la literatura indican una baja eficiencia de estos equipos en relación con la remoción de grasas y aceites. Entre los posibles motivos sugeridos se puede mencionar la diferencia de viscosidad del líquido en función de la temperatura, debido a que la mayoría de equipos son diseñados para condiciones de clima templado. Aun así, debe rescatarse que existen algunas experiencias exitosas de operación de desarenadores aireados que fueron observados por los autores en el estado de Rio de Janeiro, Brasil. La posibilidad de remoción de grasas y aceites en la etapa de tratamiento preliminar puede ser interesante para la reducción de formación de nata en reactores UASB, que especialmente en PTARs de escala mayor representa uno de los principales problemas operacionales.



**Figura 2** – Alternativas recomendadas para las unidades de tratamiento preliminar de PTARs de diferentes escalas.

**Nota:** las equivalencias entre Q y PE fueron determinadas a partir de. El dimensionamiento de las unidades del TP debe ser realizado utilizando  $Q_{max}$ .

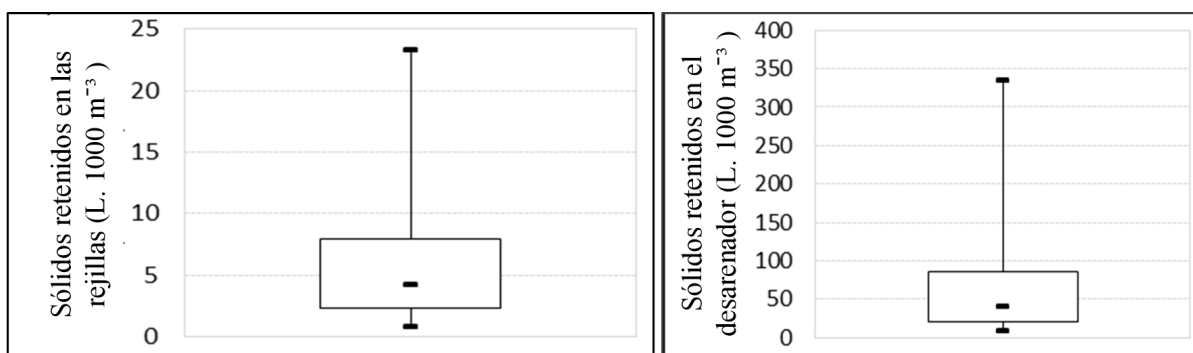
Adicionalmente a las alternativas recomendadas en la Figura 2, las posibilidades de modulación y de redundancia de las unidades del TP deben ser verificadas, específicamente para PTARs de mediana y gran escala ( $Q \geq 20 L.s^{-1}$  o  $PE \geq 10.000$  hab.), conforme lo indicado en el Cuadro 2. Para PTARs de pequeña escala ( $Q < 20 L.s^{-1}$  o  $PE < 10.000$  hab.), se recomienda la colocación de un canal o tubería de desvío (by-pass) que cuente con un cribado fino (rejillas con espaciamiento entre barras igual a 20 mm).

### 3.3 Material retenido en las unidades del tratamiento preliminar

Según los resultados de un estudio de 24 PTARs en la cuenca hidrográfica del Río de las Velhas (estado de Minas Gerais, Brasil), el volumen promedio de material retenido en las unidades de cribado es del orden de 4,2 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de agua residual tratada (Figura 3) (2,5 a 8,0 L.1.000 m<sup>-3</sup> – percentil 25 y 75% de los datos), muy cercano al límite inferior del rango de valores reportados en la literatura, el cual está entre 6 y 50 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de agua residual tratada (JORDÃO & PESSÔA, 2017). De cierta forma,

el bajo volumen de material retenido en el cribado es inesperado, pues es sabido que en la mayoría de ciudades brasileñas la cantidad de sólidos presentes en el agua residual cruda es elevada. Existe la duda de si la baja retención del material en las rejillas es consecuencia de un alto espaciamiento entre las barras de las rejillas, lo que en última instancia estaría contribuyendo con la elevada presencia de sólidos en el interior de los reactores (junto con la nata y el lodo).

Para 23 de las 24 PTARs investigadas, el volumen medio del material retenido en el desarenador fue del orden de 40 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de agua residual tratada (Figura 3) (20 a 85 L.1.000m<sup>-3</sup> – percentil 25 y 75% de los datos), ligeramente superior al límite máximo de 37 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de agua residual tratada, reportado por Metcalf & Eddy (2003). Esa elevada cantidad de arena puede ser atribuida a la infiltración en la red colectora y principalmente a la contribución pluvial de conexiones ilícitas, que parece ser una realidad en todo el territorio nacional brasileño. Como información complementaria, datos confiables indican que en el litoral paulista los volúmenes de arena retenidos son del orden de 60 litros por 1.000 m<sup>3</sup> de agua residual tratada.



**Figura 3** – Material retenido en las unidades de tratamiento preliminar de PTARs en la cuenca hidrográfica del Río de las Velhas: (a) sólidos retenidos en rejillas (L.1.000m<sup>-3</sup>); y (b) sólidos retenidos en el desarenador (L.1.000m<sup>-3</sup>).

De hecho, los volúmenes de sólidos gruesos y de arena retenidos en la etapa de tratamiento preliminar dependen de una serie de factores, tal como fue indicado anteriormente en estas Notas Técnicas. Estos factores deben ser cuidadosamente valorados en la etapa de diseño de las PTARs.

#### 4 ASPECTOS RELACIONADOS CON EL DISEÑO, LA CONSTRUCCIÓN, LA OPERACIÓN Y EL MANTENIMIENTO

Los principales aspectos a ser evaluados en el análisis de diseño de las unidades que componen el

tratamiento preliminar están sintetizados en el Cuadro 2. Al enumerarlos, se buscó definir el grado de importancia asociado al cumplimiento de cada aspecto, de acuerdo con los siguientes criterios:

- Grado de importancia media – aspectos que si no son cumplidos pueden comprometer la operación y mantenimiento adecuado del sistema.
- Grado de importancia alta– aspectos cuyo cumplimiento es imprescindible para la buena operación y mantenimiento del sistema.

**Cuadro 2** – Principales aspectos a evaluar en el diseño de las unidades que componen el tratamiento preliminar

Aspecto	Grado de importancia	
	Alto	Medio
<b>Generales</b>		
Consultar previamente a la unidad operacional y de mantenimiento electromecánico si la definición de la conceptualización del TP es adecuada (enterrado, elevado, aguas arriba de la estación de bombeo, equipos, posibilidad de recibir el lodo de camiones transportadores de lodo y efluentes no domésticos, forma de limpieza y vaciado de las unidades, necesidad de control de olores, entre otros).	X	
Dimensionar las unidades utilizando el caudal máximo afluente y asegurar las velocidades mínimas de flujo, de forma que se impida la sedimentación indeseada de solidos orgánicos (SSV).	X	
Justificar la elección de tratamiento preliminar manual o mecanizado.	X	
Verificar el perfil hidráulico de las unidades del TP. Deben ser consideradas las pérdidas de carga (tuberías, canales, compuertas y equipos) desde el punto de control de flujo (por ejemplo: canaleta Parshall) hasta la unidad de cribado, para la definición de la lámina de agua (aguas arriba y aguas abajo de cada unidad).	X	
Prever el dispositivo de rebalse (o vertedero de excedencias) cuando el caudal afluente es superior a la capacidad de diseño de la PTAR. Nótese que en PTARs en las cuales la estación de bombeo de entrada está localizada aguas abajo del TP y en PTARs donde hay riesgo de interrupción del abastecimiento de energía eléctrica, deben ser colocados dos rebalses: uno antes del TP y otro conectado a un pozo de succión en la estación de bombeo de entrada de la PTAR. Esta medida permite evitar la inundación de unidades colocadas aguas arriba de las estaciones de bombeo.	X	
En la tubería de rebalse de la PTAR se deben colocar medidores de caudal que aseguren el registro de la frecuencia y la magnitud de los caudales rebalsados y enviados al cuerpo receptor de agua.		X
Prever una válvula antirretorno (válvula check) si el rebalse es inundado, la válvula debe ser instalada cerca del tratamiento preliminar y se debe proveer un acceso para el mantenimiento de la válvula.	X	
El by-pass localizado aguas arriba del tratamiento preliminar deberá contar con un dispositivo para vaciar la arena depositada en la red de alcantarillado sanitario.	X	
Para PTARs de media y gran escala ( $Q \geq 20 \text{ L.s}^{-1}$ o $PE \geq 10.000 \text{ hab.}$ ) se debe colocar redundancia (duplicación) de las unidades del TP (cribado, desarenador y tamiz). Evaluar alternativas de modulación para la reducción de la inversión inicial. Sin embargo, se debe asegurar el mantenimiento de velocidades mínimas a fin de evitar el depósito o sedimentación indeseada de sólidos.	X	



Aspecto	Grau de importància	
	Alto	Medio
<b>Aspectos gerais</b>		
Para PTARs de pequeña escala ( $Q < 20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ o $\text{PE} < 10.000 \text{ hab.}$ ) se debe instalar un canal paralelo ( <i>by-pass</i> ) con una rejilla de separación 20 mm.	X	
Verificar la posibilidad o viabilidad técnica y económica de utilizar cribado mecanizado y/o tamiz estático para PTARs de pequeña a media escala ( $Q < 100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ o $\text{PE} < 50.000 \text{ hab.}$ ).		X
En caso de que no sea adecuado utilizar un cribado mecanizado, se debe evaluar la posibilidad de instalar rejillas manuales y secuenciales, compuestas por una rejilla gruesa, media y fina.		X
Prever el sistema de recolección, almacenamiento, transporte y disposición final de los residuos sólidos retenidos en el TP, considerando la rutina operacional (frecuencia de remoción y destino final) e incomodidad de la población cercana a la PTAR debido a la generación de olores.	X	
Prever compuertas aguas arriba y aguas abajo de las unidades, de forma que permitan la entrada, aislamiento, limpieza y desvío ( <i>by-pass</i> ) de las aguas residuales.	X	
En la especificación de compuertas y equipos, se debe considerar el uso de materiales resistentes a la corrosión.	X	
Para las estaciones de bombeo, se debe revisar la profundidad de pozo de succión, siendo preferiblemente menor a 8,0 m. En caso de pozos superiores a 8,0 m deberán ser previstas condiciones de acceso para el mantenimiento y limpieza (plataformas intermedias, rampa, escalera, barandas perimetrales, entre otros). Tanto para profundidades inferiores a 8,0 m como para superiores a 8,0 m se deben asegurar condiciones adecuadas para el acceso y limpieza.	X	
Prever contenedores menores en PTARs de pequeña escala, con el fin de no acumular residuos por largos períodos de tiempo con la consecuente generación de olores.		X
Evaluar la necesidad de prever dispositivos para cubrir los contenedores de residuos en función de las condiciones pluviométricas locales y de la necesidad de control de olores.	X	
Considerar la colocación de asfalto o aceras en el perímetro de las unidades durante el diseño paisajístico y urbanístico del tratamiento preliminar.	X	
Garantizar el acceso adecuado para vehículos utilizados durante la operación y retiro de contenedores, incluyendo los siguientes aspectos: inclinación adecuada de las rampas de acceso; área de maniobra suficiente y radios de curvas adecuados para el tránsito de camiones; base y pavimento adecuado para el tráfico de vehículos previsto.	X	
Prever el acceso adecuado de los operadores para que realicen las actividades de rutina y también de mantenimiento electromecánico de las unidades (labores tales como lubricación, retiro de motores, tornillos, entre otros).	X	
Considerar la recolección y el envío de los lixiviados de los contenedores hacia el afluente de la PTAR.	X	
En PTARs que reciban efluentes de camiones transportadores de lodo, nata, lodo de otras PTARs y de estaciones de bombeo, se debe considerar la instalación de una unidad específica para su recepción y control (por ejemplo: tanque de homogenización), considerando el impacto en la producción de lodo en el reactor UASB (ver Nota Técnica 3 – Lobato <i>et al.</i> , 2018).	X	
Garantizar la compatibilidad entre los equipos previstos en el diseño y aquellos que efectivamente son adquiridos, con el fin de evitar adecuaciones en la estructura civil y electromecánica de las unidades del tratamiento preliminar durante las fases de construcción y operación.	X	
<b>Cribado</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>
Para la estimación de sólidos gruesos y arena retenida se deben utilizar datos operacionales representativos de la realidad local (verificar las características de la cuenca de contribución, como la ocupación y la actividad económica).	X	
En el caso de las unidades mecanizadas, se debe prever un canal paralelo con una rejilla de limpieza manual con el mismo espaciamiento entre barras que la unidad mecanizada, de forma a contar con un respaldo de la unidad mecanizada.	X	
El cribado deberá ser realizado con barras de sección rectangular. No se deben utilizar barras de sección circular o barras horizontales (para el soporte de las barras principales), pues dificultan el libre paso del rastrillo utilizado para la limpieza.	X	
Para el tratamiento preliminar instalado aguas abajo de una estación de bombeo, se deberá prever cribado grueso aguas arriba de la estación de bombeo (notar que el espaciamiento entre barras debe ser inferior al diámetro del rotor de la bomba, evitando el paso de sólidos gruesos de dimensiones mayores). Adicionalmente, se deberá evaluar la posibilidad de implantar cribado medio y fino aguas arriba de la estación de bombeo.	X	
Para PTARs con deshidratación mecanizada de lodo y/o de nata, se debe prever una etapa de tamizaje con malla de hasta 6 mm (preferiblemente 3 o 4 mm) en el tratamiento preliminar, asegurando una adecuada operación y minimización de paros de esas unidades (por ejemplo: agitador de equalización, bombas de alimentación de equipos de deshidratación).	X	
En PTARs de mayor escala que posean cribado mecanizado, se debe evaluar la posibilidad de utilizar dispositivos de compactación para los residuos removidos, con el objetivo de reducir el volumen y la liberación de lixiviados en los contenedores, reducir olores y mejorar las características del material para su disposición final.		X
<b>Desarenador</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>
Cuando el ancho del desarenador sea inferior a 30 cm, se debe evaluar y proponer alternativas para su construcción, por ejemplo: un desarenador del tipo flujo en vórtice o confección de equipos de limpieza a la medida, compatibles con las dimensiones del canal. También se recomienda adoptar soluciones prefabricadas en materiales alternativos (por ejemplo: fibra de vidrio y polipropileno - PP)		X
Para desarenadores de limpieza manual, se debe verificar la existencia de un desnivel adecuado para la acumulación de arena en función de la frecuencia de limpieza adoptada por la operación.	X	
Donde la topografía lo permita, se debe utilizar el descarte de arena en el fondo, de manera que se reduzca el gasto en camiones cisterna.		X
Para los desarenadores mecanizados de sección cuadrada, el moldeo de la forma externa del raspador debe ser realizado dentro del propio desarenador en el que estará inscrito (contemplando redondeos o chaflanes en los vértices), utilizando el propio brazo del raspador.	X	
Para los desarenadores de sección cuadrada, se debe garantizar una distribución uniforme de caudal en el ancho de la unidad. Además de tener un dimensionamiento hidráulico adecuado en el canal de acceso, deberá existir la posibilidad de regular el caudal en cada punto de entrada.	X	
Para los desarenadores de sección cuadrada, se debe garantizar la posibilidad de acceso para la limpieza del canal afluente, considerando que en algunas situaciones puede haber sedimentación de arena en los extremos de ese canal debido a velocidades inferiores a las mínimas previstas en el diseño.	X	
Para los desarenadores de sección cuadrada, evaluar la posibilidad de prever descarga de fondo para el vaciado de las unidades, con el fin de permitir la limpieza y el mantenimiento del brazo raspador y del dispositivo clasificador.	X	

Nótese que la mayoría de los aspectos anteriormente listados fueron categorizados como de importancia alta. Este hecho refleja la importancia del tratamiento preliminar para el adecuado acondicionamiento del agua residual antes de su ingreso a los reactores UASB. En síntesis, un adecuado tratamiento preliminar influenciará positivamente en: i) el mantenimiento de las estructuras de distribución de caudal y canaletas colectoras del efluente, evitando obstrucciones; ii) la reducción de sedimentación/acumulación de arena en el fondo de los reactores UASB; iii) la gestión del lodo, debido a que será posible obtener un lodo con menor contenido de residuos sólidos y arena, y de mejor calidad estética; iv) la gestión de nata, sobre todo debido al hecho de que, cuando no son removidos adecuadamente en el tratamiento preliminar, algunos materiales tienden a flotar en el interior del reactor y a acumularse en la parte superior del separador trifásico; y iv) la reducción significativa de problemas habituales en la operación de unidades de procesamiento mecanizado de lodo y nata, como el paro por obstrucciones de tuberías, falla o pérdida de rendimiento de equipos por desgaste.

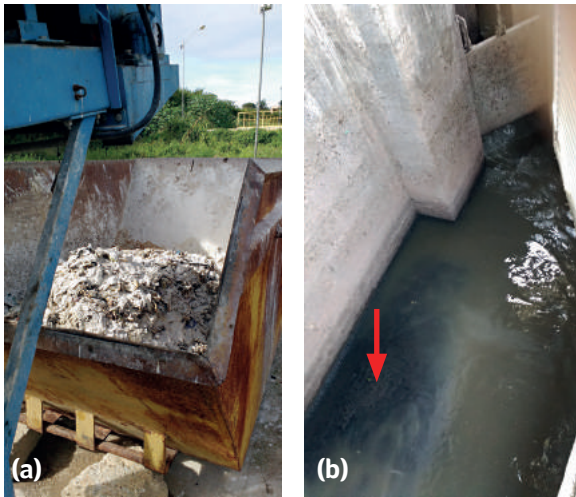
#### 4.1 Emisiones de olores en el tratamiento preliminar

Cuando los canales del TP no estén confinados, el perfil hidráulico de diseño y la implantación de las unidades debe evitar la formación de turbulencias, minimizando el desprendimiento de emisiones odorantes y con potencial de corrosión. Cuando los canales del TP estén confinados, se debe considerar una llegada de agua residual en régimen turbulento (por ejemplo: uso de tuberías con descarga encima del nivel de agua máximo operacional), de modo a facilitar el desprendimiento, emisión y tratamiento de los gases disueltos en el agua residual afluente. Además, deben ser utilizados materiales resistentes a la corrosión y se deben proteger las estructuras de

concreto en sitios de conocida emisión de gases, tal como se indica en la Parte 4 de esta Colección de NTs (BRANDT *et al.*, 2018).

La emisión de olores en el tratamiento preliminar en PTARs de pequeña escala también está asociada a la acumulación del material retenido en las rejillas cuando se descarga en los contenedores. Se recomienda el uso de contenedores de menor volumen, para que el material depositado no se mantenga almacenado por mucho tiempo. Eventualmente, la aplicación de cal virgen para controlar la emisión de olores puede ser necesaria (Figura 4 a). En estos casos, es necesario prever un sitio adecuado para el almacenamiento de esos productos en la PTAR. Por otro lado, para PTARs de gran escala ( $Q \geq 100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  o  $\text{PE} \geq 50.000$  hab.), pueden ser requeridas medidas de cobertura para los contenedores a base de materiales resistentes (por ejemplo: tapas con bisagra y fijación de lonas) y el cumplimiento de aspectos ergonómicos (por ejemplo: revisión del peso). El acceso de camiones para el retiro de contenedores también debe ser considerado en la etapa de diseño y construcción de la PTAR (por ejemplo considerar: declividad de rampas, radios de curvas, capacidad de soporte de pavimento, área de maniobra).

Otro aspecto importante es garantizar las velocidades mínimas de flujo en los canales aguas arriba y aguas abajo del cribado y del desarenador. Se recomienda que sean superiores a  $0,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para evitar el depósito indeseable de sólidos en esas estructuras, según se ejemplifica en la Figura 4b. Se debe prestar especial atención a los posibles cambios de sección transversal en el transcurso de estos canales. La eventual acumulación de materiales en esos puntos implica la emisión de malos olores, asociados a la descomposición de los sólidos orgánicos indebidamente retenidos, además de que puede comprometerse el funcionamiento de rejillas y compuertas.



**Figura 4** – (a) Manejo del material removido en la etapa de cribado, con aplicación de cal; (b) acumulación de sólidos en el canal del afluente al desarenador.

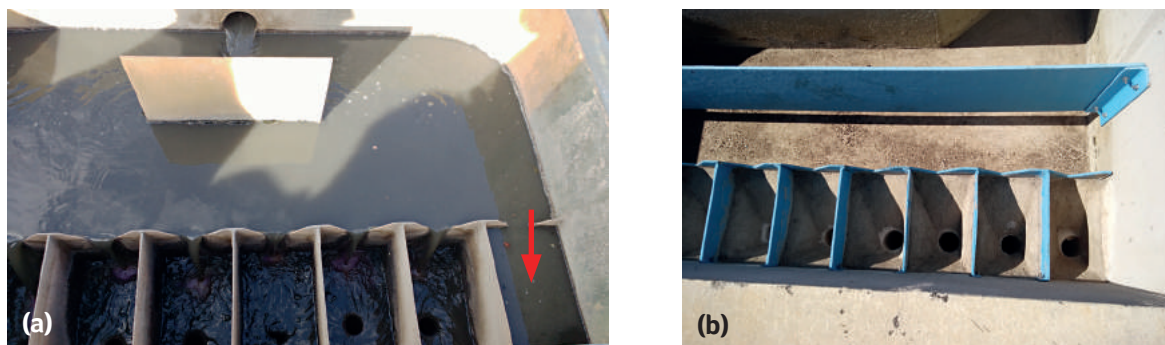
#### 4.2 Bombeo y distribución de caudal

La etapa del bombeo del agua residual que ingresa a la PTAR hacia el reactor UASB es un punto crucial para el adecuado desempeño de los reactores anaerobios. En los casos en los que hay necesidad de bombear el agua residual afluente hacia los reactores UASB, los diseños normalmente contemplan sólo dos bombas, siendo una para relevo y reserva; especialmente en plantas de pequeña y mediana escala ( $Q < 100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  o  $\text{PE} < 50.000 \text{ hab.}$ ). Cuando los reactores son expuestos a condiciones de sobrecarga hidráulica debido al bombeo constante de un caudal igual o superior al caudal máximo para el cual fueron diseñados, es posible que se presente pérdida de eficiencia de la retención de sólidos y remoción de materia orgánica.

Tal como se establece en el ítem 6.4.2 de la norma NBR 12.209, en el caso de alimentación por estación de bombeo, el caudal máximo de bombeo no puede exceder más del 25% del caudal máximo de agua residual afluente (ABNT, 2011). En este caso, se recomienda el uso de bombas con variadores de velocidad (variadores de frecuencia) o la instalación de un mínimo de tres bombas, siendo una para relevo y reserva. Adicionalmente, se re-

comienda la instalación de un medidor de caudal después de la estación de bombeo, con la intención de caracterizar el hidrograma del caudal afluente en el reactor UASB. Esta medida es de gran importancia, sobre todo cuando se reemplazan los equipos de bombeo, actividad de mantenimiento en la que es común instalar bombas con puntos de operación diferentes.

Respecto a las cajas de distribución de agua residual afluente a los reactores UASB, es común observar estructuras con el fondo plano o con poca inclinación (Figura 5a), lo que propicia la acumulación de arena y/o sólidos, especialmente cuando ocurren fallas en el tratamiento preliminar. En este sentido, se recomienda el uso de cajas con fondo inclinado (Figura 5b). También se recomiendan estructuras confeccionadas en materiales que permitan un mejor acabado (por ejemplo: fibra de vidrio – Figuras 5a y 5b), así como el correcto dimensionamiento y verificación de las láminas de agua en los vertedores triangulares para los caudales máximos de bombeo. Estos son aspectos importantes para garantizar una distribución uniforme de caudal dentro de los compartimientos que alimentan los tubos de distribución. Además, los tubos conectados al fondo de las cajas de distribución deben poseer diámetro de 75 mm, ya que mientras garantizan una velocidad descendente adecuada, también son suficientemente grandes para evitar obstrucciones frecuentes (obviamente cuando se tiene un funcionamiento satisfactorio del TP). Es importante garantizar la correcta fijación de los tubos a las estructuras de distribución, pues éstos pueden soltarse debajo de la losa sin que el operador perciba que un tubo está desconectado. En ese caso, el agua residual afluente entraría en el compartimiento de sedimentación del reactor UASB, en vez de ser distribuida en el fondo de la unidad.



**Figura 5** – Detalles de compartimientos de distribución de caudal afluente a los reactores UASB: a) Caja con fondo plano, resaltando la colmatación de un tubo; b) caja con fondo inclinado.

### 4.3 Otros aspectos importantes del diseño, la construcción y la operación

Específicamente para PTARs de pequeña escala ( $Q < 20 \text{ L.s}^{-1}$  o  $\text{PE} < 10.000 \text{ hab.}$ ), las dimensiones de algunas unidades del TP son diminutas. En el caso de los canales afluentes y efluentes al cribado y al desarenador, resulta difícil cumplir con las condiciones ideales de flujo previstas en la norma NBR 12.209 (ABNT, 2011). Por otro lado, el uso de estructuras de concreto armado colado en sitio puede no ser una solución adecuada para la construcción de las unidades, debido a la complejidad asociada al retiro de las formaletas y a la dificultad para cumplir con el recubrimiento mínimo de las armaduras (5 cm – NBR 6.118 - ABNT, 2014). En este caso, soluciones con estructuras prefabricadas en materiales alternativos pueden ser una opción adecuada, por ejemplo: estructuras de plástico reforzado con fibra de vidrio o de polipropileno.

La preocupación con criterios ergonómicos, de salud y de seguridad ocupacional debe ser integrada al diseño y la construcción de las unidades del TP, considerando por ejemplo: la instalación de barandas, escaleras de acceso resistentes a la corrosión, tomas de agua potable, aberturas mínimas para el paso de operadores y herramientas adecuadas para las operaciones de limpieza y mantenimiento. La previsión de dispositivos de vaciado de las unidades también permite que las

actividades de limpieza sean más ágiles y simples.

Es de fundamental importancia que el diseño considere las especificaciones de los equipos que serán **efectivamente adquiridos e implantados**, tales como: pérdida de carga efectiva, necesidad de disminución del nivel de agua, demanda de agua para limpieza, descarga de drenajes, apoyos para tornillos clasificadores y rejillas, accesos para mantenimiento electromecánico y limpiezas, entre otros. La compatibilidad entre los equipos previstos en el diseño y aquellos que efectivamente serán adquiridos es crucial para evitar cambios en la estructura civil y electromecánica de las unidades del TP durante las fases de construcción y operación. Estas adecuaciones durante la construcción y operación pueden representar costos significativos.

Finalmente, es importante prestar atención a problemas constructivos recurrentes, tanto de construcción como de instalación de equipos, tales como: equipos instalados con desniveles (compuertas, brazos raspadores de desarenadores, clasificadores de arena) y equipos que reducen la sección transversal del canal con elementos laterales.

## 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**. 2ª edición. Rio de Janeiro, 2011. 57 p.
- ABNT – Asociación Brasileña de Normas Técnicas. NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto* - Procedimento. 3ª edición. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- BORGES, N. B. **Aproveitamento dos resíduos gerados no tratamento preliminar de estações de tratamento de esgoto**. 2014. 238 p. Tesis (Doctorado en Ciencias: Ingeniería Hidráulica y Saneamiento). Universidad de São Paulo, São Paulo, 2014.
- BRANDT, E. M. F., SANTOS, J. M. B., SOUZA, C. L., POSSETTI, G. R. C., BRESSANI-RIBEIRO, T., CARVALHO-JÚNIOR, A. N., CHERNICHARO, C. A. L. 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 odorantes. **Revista DAE** – edición especial, v. 66, n. 214, p. 56-72, 2018.
- JORDÃO, E.P., PESSÔA, C.A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 8ª edición. Rio de Janeiro, ABES, 2017.
- MARCELIS, P., WESSELS, C. Recovery and valorisation of cellulose from sewage: the route to circularity. In: **12th European Waste Water Management Conference**, 2018, Manchester, UK. Anais. Manchester, UK, 2018.
- METCALF & EDDY, **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4th edición. New York, NY: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.
- LOBATO, L. C. S., BRESSANI-RIBEIRO, T., SILVA, B. S., FLÓREZ, C. A. D., NEVES, P. N. P., CHERNICHARO, C. A. L. Contribución para el perfeccionamiento de 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.
- RUIKEN, C.J., BREUER, G., KLAVERSMA, E., SANTIAGO, T., VAN LOOSDRECHT, M. Sieving wastewater – Cellulose recovery, economic and energy evaluation. *Water Research*, v. 47, p. 43-48, 2013.
- WEF - Water Environment Federation. **Preliminary Treatment for Wastewater Facilities**. Manual of Practice OM-2. Alexandria, VA. 1994.
- WEF - Water Environment Federation. **Design of Municipal Wastewater Treatment Plants**. Manual of Practice n. 8, ASCE Manual and Report on Engineering Practice n. 76. Alexandria, VA. 1998.

# Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 3: Gestión del lodo y la nata

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

- **Fecha de entrada:**  
01/08/2018
- **Fecha de aprobación:**  
17/09/2018

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

DOI: 10.4322/dae.2018.040es

## Resumen

La ausencia o ineficiencia de rutinas operacionales adecuadas para el descarte de lodo excedente y remoción de la nata provoca graves problemas de operación y la pérdida de eficiencia del sistema de tratamiento como un todo. Con el fin de garantizar la adecuada gestión de esos subproductos sólidos, es imprescindible establecer rutinas operacionales para el manejo del lodo y de la nata que puedan ser implementadas efectivamente en los reactores UASB. Esta Nota Técnica (NT) tiene por objetivo presentar los problemas y sus respectivos orígenes relacionados al manejo inadecuado de estos subproductos sólidos, así como las posibles mejoras del diseño, la construcción y la operación en reactores UASB. En síntesis, las mejoras relacionadas a la gestión del lodo y la nata se refieren a los siguientes aspectos principales: i) sensibilización de usuarios y usuarias; ii) mejoras en el tratamiento preliminar; iii) cálculos más precisos de producción de lodo en los reactores, tomando en consideración la recepción de todas las posibles contribuciones a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR); iv) definición de las cantidades de lodo que serán mantenidas y que serán descartadas en el reactor; v) definición de la estrategia de descarte compatible con las características del sistema de deshidratación; vi) control sobre la recepción de efluentes no domésticos, vii) mejor control sobre la formación de nata en el compartimiento de sedimentación; y viii) utilización de separadores trifásicos equipados con dispositivos de remoción de nata. Es importante resaltar que la gestión integrada de subproductos sólidos (lodo y nata), al igual que en el caso del biogás, puede traer importantes beneficios para las PTARs.

**Palabras clave:** Biogás; deshidratación; grasas y aceites; reactores anaerobios; separador trifásico; tratamiento preliminar

**Livia Cristina da Silva Lobato** – Ingeniera Civil de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Doctora 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).

**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 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 Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs *Sustentáveis* por sus siglas en portugués).

**Bruno Sidnei da Silva** – Ingeniero Ambiental de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil. Master en Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad de São Paulo (USP), Brasil. Ingeniero de la Compañía de Saneamiento del Estado de São Paulo (Sabesp), Brasil.

**Priscilla Natalie Pereira Neves** – Ingeniera Ambiental de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Estudiante de Maestría en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos 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 Tratamiento 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

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

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

## 1 INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales en los reactores anaerobios de manto de lodo y flujo ascendente (UASB, por sus siglas del inglés *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) genera subproductos sólidos (lodo y nata), los cuales deben ser adecuadamente gestionados con el fin de garantizar la eficiencia y las ventajas de este tipo de tecnología. Sin embargo, en gran parte de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Brasil esa gestión muchas veces es negligente, generando diversos problemas para el sistema de tratamiento.

Durante la puesta en marcha del sistema de tratamiento, la acumulación de lodo (biomasa y sólidos inertes) en los reactores UASB ocurre después de algunos meses de operación continua, a una tasa de acumulación que depende tanto del crecimiento de biomasa (síntesis de células microbianas) como también de la presencia de sólidos en suspensión inertes o no biodegradables. Estos últimos, aunque no forman parte de la biomasa responsable de la degradación de los compuestos orgánicos que in-

gresan al reactor, sí pueden contribuir de manera significativa con el aumento del *coeficiente de producción de lodo*, por lo que deben ser considerados en el cálculo de producción de lodo de los reactores anaerobios utilizados para el tratamiento de agua residual urbana.

Una de las principales características de los reactores UASB cuando son operados adecuadamente es su elevada capacidad de retención de lodo, resultando en edades de lodo elevadas y proporcionando un alto grado de estabilización del lodo. Esta elevada capacidad de retención de lodo es consecuencia de la existencia del separador trifásico, de las velocidades ascensionales impuestas al reactor y de la alta sedimentación según el tipo de lodo desarrollado en este sistema (LEITÃO *et al.*, 2010). Sin embargo, el reactor presenta una capacidad límite de retención y almacenamiento, definida principalmente por los volúmenes de sus compartimientos de digestión y de sedimentación. Estas capacidades no deben ser sobrepasadas, por lo que estrategias de descarte adecuadas deben ser adoptadas. De lo

contrario, se podría presentar la pérdida excesiva de sólidos y el deterioro de la calidad del efluente del reactor, además de otros problemas correlacionados, conforme lo descrito en la Parte 1 de esta colección de NTs (CHERNICHARO *et al.*, 2018). En ese sentido, es fundamental que el lodo en exceso sea removido periódica y apropiadamente.

En relación a la nata en el interior de los reactores UASB, su formación, acumulación y tipo dependen esencialmente de la composición de agua residual afluente a la unidad, principalmente en lo que se refiere a la presencia de residuos (por ejemplo: cabellos, hisopos, toallas sanitarias, hilo dental, algodón, toallas húmedas, colillas de cigarrillos y materiales plásticos) y grasas y aceites. Así como el lodo, la nata también debe ser removida con la frecuencia debida, pues su acumulación puede llevar al bloqueo del paso natural del gas, perjudicando su colecta (LETTINGA & HULSHOFF POL, 1991) También puede ocasionar la disminución de la eficiencia del tratamiento debido a la pérdida de partículas de nata junto con el efluente del reactor (SATO *et al.*, 2006), entre otros problemas igualmente graves, conforme lo descrito en la Parte 1 de esta Colección de NTs (CHERNICHARO *et al.*, 2018) y detallados en secciones posteriores de esta Nota Técnica.

La ausencia o ineficacia de la gestión del lodo y de la nata puede comprometer la eficiencia del sistema de tratamiento como un todo. Es fundamental la necesidad de mejoras en el diseño y en la construcción de los reactores UASB, así como el establecimiento de rutinas operacionales adecuadas para el manejo de estos subproductos que puedan ser implementadas de forma efectiva durante el mantenimiento de los reactores UASB.

## 2 ORIGEN Y PROBLEMAS RELACIONADOS AL LODO EXCEDENTE

Diversos reactores UASB en Brasil operan con cantidades de lodo que sobrepasan sus capacidades de retención y almacenamiento. Esto produce una disminución de la capacidad de almacenamiento y de retención del lodo en el interior del reactor. Como consecuencia principal, por regla general esos reactores presentan pérdida excesiva de sólidos, los cuales impactan negativamente la calidad del efluente y la eficiencia física de remoción del material particulado. Adicionalmente, la pérdida de sólidos con el efluente de los reactores UASB puede acarrear la sobrecarga en las unidades de postratamiento, un ejemplo es la colmatación del medio de soporte de filtros biológicos percoladores (FBP) (Figura 1). También, el envío de lodo aerobio de la unidad de postratamiento (por ejemplo: filtros biológicos percoladores y lodos activados), para espesamiento y estabilización en los reactores UASB, ha sido observado como una de las causas de pérdida de sólidos en el efluente de los reactores. Sin embargo, experiencias prácticas indican que el establecimiento e implantación de protocolos operacionales para el envío de ese lodo a los reactores UASB y para los descartes de lodo excedente de esas unidades, de forma sistematizada y con una frecuencia adecuada, hacen frente a las dificultades reportadas en el manejo del lodo secundario aerobio generado en la unidad de postratamiento. Este tema es abordado con mayor detalle en la Parte 6 de esta Colección de Notas Técnicas (ALMEIDA *et al.*, 2018).

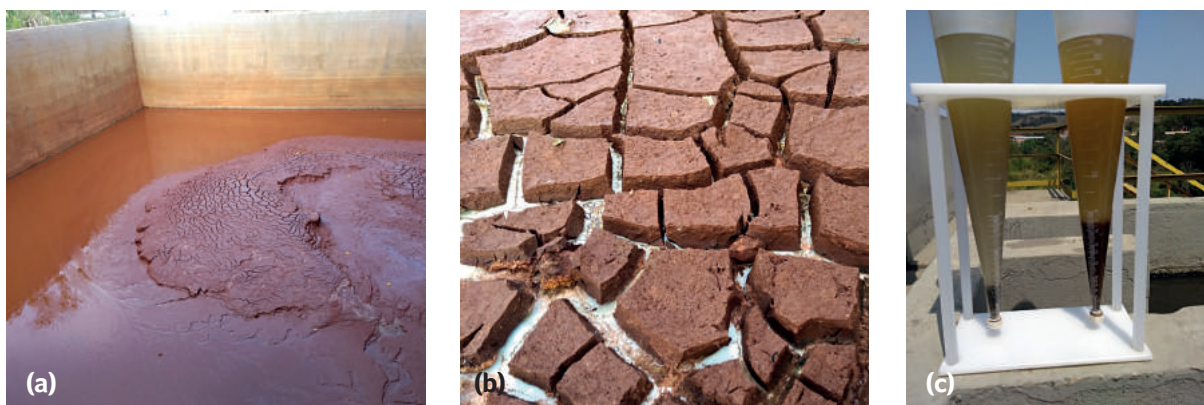




**Figura 1** – Impacto de la pérdida excesiva de sólidos sobre la unidad de postratamiento: a) colmatación del medio de soporte; b) inundación de filtros biológicos percoladores post-reactores UASB.

Una condición que aumenta la producción de lodo y consecuentemente impacta su gestión, es la recepción de contribuciones no consideradas durante la etapa de diseño de la PTAR (por ejemplo: lodos de tanques sépticos, lixiviados de rellenos sanitarios, lodo químico de plantas potabilizadoras de agua y efluentes no domésticos). Específicamente en relación al lodo de plantas potabilizadoras de agua, en la Figura 2 se ilustra el aspecto del lodo químico generado en la limpieza de floculadores y sedimen-

tadores en estado húmedo (Figura 2a) y después de su deshidratación (Figura 2b). Se percibe claramente, el aspecto “fangoso” del lodo, constituido básicamente por limo y arcilla. En la Figura 2c se muestra el impacto del vertido del lodo de planta potabilizadora en la red de alcantarillado de aguas residuales, siendo posible observar el aumento considerable, en cerca de 15 veces, del contenido de sólidos sedimentables en el agua residual que ingresa a la PTAR.



**Figura 2** – Lodo químico de una planta potabilizadora de agua: (a) retenido en tanque de almacenamiento luego del descarte de floculadores y decantadores; (b) luego de la etapa de deshidratación; (c) impacto sobre el contenido de sólidos sedimentables en el agua residual de una PTAR (cono a la izquierda: solo agua residual cruda - cerca de  $5 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ ; cono a la derecha: agua residual cruda + lodo químico de planta potabilizadora vertido en el alcantarillado sanitario - cerca de  $80 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

En estudios sobre la producción de lodo de una PTAR en escala plena, en la cual los reactores UASB fueron originalmente diseñados para tratar únicamente aguas residuales urbanas y el lodo secundario aerobio generado en la unidad de postratamiento, se ha observado que el coeficiente real de producción de lodo ( $Y_{\text{lodo}}$ ) era aproximadamente el doble del valor considerado en el diseño. Al investigar la razón de la diferencia entre  $Y_{\text{lodo}}$  de diseño y  $Y_{\text{lodo}}$  de campo, se identificó que la PTAR recibía contribuciones no consideradas en el diseño, tales como lixiviado de rellenos sanitarios, lodo de tanque séptico y lodo químico de una estación de tratamiento de aguas fluviales. Es decir, las decisiones tomadas a nivel de gestión del lodo no consideraron si el sistema de deshidratación de la PTAR poseía capacidad para procesar la cantidad adicional de lodo que sería generada en los reactores UASB debido a esas contribuciones.

Normalmente, la ausencia o ineficacia de una rutina operacional para los descartes sistemáticos de lodo de los reactores UASB está relacionada a uno o más de los siguientes factores:

- Puntos de muestreo para el monitoreo de la concentración de lodo a lo largo del compartimiento de digestión del reactor en número insuficiente y/o instalados en posición incorrecta, no correspondiente con lo especificado durante el diseño (Figura 3).
- Tuberías de descarte de lodo en número insuficiente o mal distribuidas a lo largo de la altura del compartimiento de digestión (Figura 4).

- Manuales y/o directrices de operación de los reactores UASB y de los sistemas de deshidratación que no detallan adecuadamente los procedimientos a seguir por los operadores.
- Falta de remoción sistemática de lodo de los reactores UASB y de los lechos de secado como consecuencia de problemas logísticos y administrativos (por ejemplo: contrato de prestación de servicios referentes al transporte de lodo no compatible con la frecuencia necesaria de retiro de lodo, impidiendo el descarte de lodo del reactor).
- Fallas en los diseños de sistemas de deshidratación natural o mecanizada, dimensionados con capacidad inferior a las necesidades de procesamiento de lodo en la PTAR o incompatibles con las características del lodo a ser deshidratado, pues no consideran las particularidades del sitio, las condiciones climáticas y operacionales (por ejemplo: cantidad de operadores, transporte de lodo, disponibilidad de productos químicos y piezas de reposición, necesidad de mantenimiento preventivo y posibilidad de paros en equipos debido a la necesidad de mantenimiento correctivo).
- Equipos del sistema de deshidratación mecanizada (por ejemplo: bombas de lodo, dosificadores de polímetro y centrifugas) fuera de operación, como consecuencia de dificultades con el mantenimiento preventivo y correctivo de los mismos.



**Figura 3** – Instalación del punto de muestreo encima del límite del compartimento de decantación, en discordancia con el diseño.



**Figura 4** – Tubería de descarte de lodo posicionada muy cerca del deflector de gases, en discordancia con el diseño.

Además de los problemas relacionados con la gestión de lodo propiamente dicha, conforme lo abordado anteriormente, también existen problemas que son ocasionados por el funcionamiento inadecuado de las unidades que conforman el tratamiento preliminar, siendo común el ingreso de elevadas cantidades de sólidos (basura). Los residuos sólidos en mayor proporción (y en algunos casos la arena) se depositan en el fondo de los reactores y pasan a formar parte del lodo. La agregación de sólidos y arena al lodo puede resultar en la disminución del volumen útil de los reactores y, cuando son removidos, puede causar la obstrucción en las tuberías de lodo y perjudicar el funcionamiento del sistema de deshidratación. Además, resultará en la generación de un subproducto sólido (lodo deshidratado) con calidad estética desagradable. En la Figura 5 se presentan fotografías de sólidos retenidos en un tamiz de 6mm (Figura 5a) y sólidos que se adentraron en el reactor y pasaron a formar parte del lodo descartado y deshidratado en lechos de secado (Figura 5b).



**Figura 5** – a) Sólidos retenidos en una unidad de tamizado de 6mm; b) presencia de sólidos en lodo y en nata deshidratada en lechos de secado.

### 3 POSIBLES MEJORAS RELACIONADAS A LA GESTIÓN DEL LODO

De lo expuesto anteriormente se desprende que la correcta gestión del lodo producido en los reactores UASB y en la PTAR es fundamental. Adoptar las medidas que se describirán a continuación puede contribuir significativamente para mejorar la gestión del lodo, solucionando varios de los problemas que ocurren actualmente en las PTARs que utilizan reactores UASB para el tratamiento de aguas residuales urbanas.

#### 3.1 Sensibilización de usuarios

Varios de los actuales problemas operacionales de las PTARs brasileñas son consecuencia de la inadecuada utilización de las instalaciones sanitarias en el interior de las residencias (y también de establecimientos comerciales, por ejemplo: restaurantes), lo que resulta en una alteración significativa de las aguas residuales generadas, en términos cualitativos y cuantitativos. Por ejemplo, la presencia excesiva de agua de lluvia, de detergente (surfactantes), de aceite de cocina y de sólidos (por ejemplo: cabello, hisopos, toallas sanitarias, hilo dental, algodón, toallas húmedas, colillas de cigarro y materiales plásticos). Así, la sensibilización de personas usuarias de los servicios de tratamiento de aguas residuales pasa a ser una acción esencial. Para ello es necesario crear espacios de diálogo en los que sea posible evaluar el nivel de conocimiento, la percepción y las perspectivas de la población en relación a la importancia del saneamiento en la comunidad, en especial para la generación, el tratamiento y la disposición de las aguas residuales. Además, en esos espacios es importante realizar debates sobre cómo cada persona usuaria es directamente responsable por el proceso en el origen, discutiendo acerca de lo que es razonable depositar en los servicios sanitarios.

#### 3.2 Mejora en tratamiento preliminar

Con el fin de reducir la entrada de detritos (desechos sólidos) y arena en los reactores UASB, un mayor cuidado en la selección de las unidades del tratamiento preliminar es de extrema importancia, siendo posible evitar que una fracción importante de esos sólidos forme parte del lodo (o de la nata) si las unidades del tratamiento preliminar son capaces de retener esos materiales. Entre las mejoras recomendadas, se pueden mencionar la utilización de rejillas ultrafinas y de tamices de pequeña abertura (3 a 4 mm). Otra posible mejora está asociada a la remoción de grasas y aceites, aguas arriba de los reactores UASB, en el tratamiento preliminar. Una alternativa que ha sido implementada en algunas PTARs que utilizan reactores anaerobios son los desarenadores aireados (flujo en espiral), conforme lo indicado en la Parte 2 de esta Colección de Notas Técnicas (BRESSANI-RIBEIRO *et al.*, 2018). Sin embargo, las escasas experiencias brasileñas reportadas en la literatura indican una baja eficiencia de estos equipos asociada a la remoción de grasas y aceites.

#### 3.3 Cálculo más preciso de la producción de lodo en los reactores UASB

Por lo general, las estimaciones de la producción de lodo son realizadas a partir del rango reportado en la literatura para el coeficiente de la producción de lodo ( $Y_{\text{lodo}}$ ), el cual varía de 0,10 a 0,20 kgST.kgDQO<sup>-1</sup>. Sin embargo, ese rango de valores se refiere únicamente a la producción de lodo en un reactor UASB utilizado exclusivamente para el tratamiento de aguas residuales urbanas. En los casos en que los reactores reciben otros tipos de contribución (por ejemplo: lodo aerobio producido en la unidad de postratamiento, lodo de tanque séptico, lixiviado de relleno sanitario, efluentes no domésticos), el valor de  $Y_{\text{lodo}}$  será obviamente más elevado. Por lo tanto, se vuelve **imprescindible que el diseño defina el valor de  $Y_{\text{lodo}}$  con la máxima confiabilidad posible**, pues este valor impactará directamente en: i) la producción de lodo del reactor; ii) el dimensiona-

miento del sistema de deshidratación; y iii) el establecimiento de las rutinas operacionales de descarte del lodo.

En el caso de recepción de **lodo de tanque séptico** en reactores UASB, es necesario evaluar rigurosamente los volúmenes esperados y la posibilidad **de implementar una unidad específica para la recepción de ese tipo de contribución**, permitiendo la separación y envío del sobrenadante hacia el reactor, y el lodo espesado hacia un digestor complementario o, si estuviera bien estabilizado, directamente para la unidad de deshidratación.

En lo que respecta a la recepción de **lixiviado de relleno sanitario y de efluentes no domésticos (END)** en los reactores UASB, se deben considerar las siguientes condiciones:

- Lixiviados de rellenos sanitarios jóvenes (usualmente con menos de cinco años de operación) presentan concentraciones bastante elevadas de los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sulfuros y amonio, de forma que eventuales impactos en la estabilidad y desempeño del reactor van a depender intrínsecamente del grado de dilución del lixiviado, en relación al caudal de agua residual afluente a la PTAR. Concentraciones más elevadas de DBO y de DQO en la mezcla de agua residual cruda y lixiviado contribuyen directamente al aumento de la producción de lodo en el reactor, sin embargo posibilitan el aumento en la producción de biogás, lo cual es de interés en los casos en que se realice el aprovechamiento energético de este subproducto. Al mismo tiempo, concentraciones elevadas de sulfuros y de amonio en la mezcla de agua residual cruda y lixiviado podrían causar toxicidad a los microorganismos anaerobios, principalmente las arqueas metanogénicas. Para que no haya riesgo de toxicidad, es importante verificar (y garantizar) que el factor de dilución sea elevado, para que las concentraciones de sulfuros y de amonio en la mezcla de agua residual y lixiviado resulten en valores mucho menores a los niveles considerados como tóxicos (CHERNICHARO, 2007).

- Lixiviados de rellenos sanitarios antiguos (normalmente con más de cinco años de operación) tienden a presentar elevadas relaciones de DQO/DBO (poca materia orgánica biodegradable), de tal forma que contribuyen poco al aumento de producción de lodo y de biogás en el reactor. Además, las concentraciones de sulfuros, amonio y compuestos recalcitrantes son típicamente elevadas, de forma que eventuales problemas de toxicidad continúan dependiendo de los factores de dilución de esos constituyentes, conforme a lo abordado anteriormente.

- En cuanto a los efluentes no domésticos (ENDs), la capacidad del reactor anaerobio en tratarlos conjuntamente con el agua residual urbana, depende intrínsecamente del tipo de END en cuestión. ENDs de naturaleza esencialmente orgánica y con bajas concentraciones de sólidos suspendidos (por ejemplo: efluentes de cervecerías, fábricas de refrescos) usualmente pueden ser recibidos sin mayores problemas, pero siendo necesario que durante el diseño se consideren los aspectos relacionados a la mayor producción de lodo y de biogás. También se deben considerar los riesgos de acidificación del reactor, en el caso de que la alcalinidad del agua residual no sea suficiente para la neutralización de los ácidos orgánicos formados a partir de esos ENDs (que se acidifican muy rápido). Para otros tipos de ENDs de naturaleza orgánica, se debe proceder a un análisis más riguroso, con atención especial a la presencia de elevadas concentraciones de sólidos suspendidos y de elementos potencialmente tóxicos (por ejemplo: sulfuros, amonio, metales pesados). ENDs de naturaleza inorgánica (por ejemplo: galvanoplastia) no deben ser enviados para su tratamiento en PTARs que utilicen procesos biológicos. Como complemento, se recomienda que las PTARs dispongan, como mínimo, de sensores de medición en línea de pH en la entrada del agua residual cruda, con el fin de hacer posible la identificación de cambios bruscos en los valores de ese parámetro. A pesar de la dificultad de implementar acciones de remediación cuando se detectan valores de pH fuera del rango usual del agua residual (6,5 a 7,5), el registro de mediciones podría ayudar

en la identificación del origen del problema y en la definición de las medidas a ser consideradas.

En relación al **lodo químico de plantas potabilizadoras, este no debe ser enviado a los reactores UASB** debido a que sus características pueden perjudicar el funcionamiento y la eficiencia del reactor. El lodo resultante de la limpieza de floculadores y decantadores, presenta un elevado contenido de sólidos inorgánicos - 0,5 a 1,0% (principalmente limo y arcilla). Por lo tanto, en caso de ser vertido en la red de alcantarillado sanitario, es muy probable que se acumule en el fondo de los reactores, reduciendo el volumen útil de los mismos. Además, esos sólidos son de difícil remoción con el sistema de extracción de lodo utilizado en los reactores UASB. En el caso de que sea considerada la posibilidad de enviar el lodo químico de planta potabilizadora a PTARs con reactores UASB, deberá ser realizado un estudio técnico riguroso que compruebe que los elementos contenidos en el lodo químico no ocasionarán la formación de bancos de sedimentos en el fondo del reactor. Además, se deben considerar eventuales riesgos de daños a las bombas y otros equipos (por ejemplo: centrifugas).

La recepción de lodo químico de planta potabilizadora en PTARs también puede generar impactos en la actividad microbiana, como se observó en el estudio realizado por Scalize (2003), al evaluar los efectos de la recepción de lodo de planta potabilizadora (con uso de sulfato de aluminio como coagulante) en los sedimentadores primarios de una

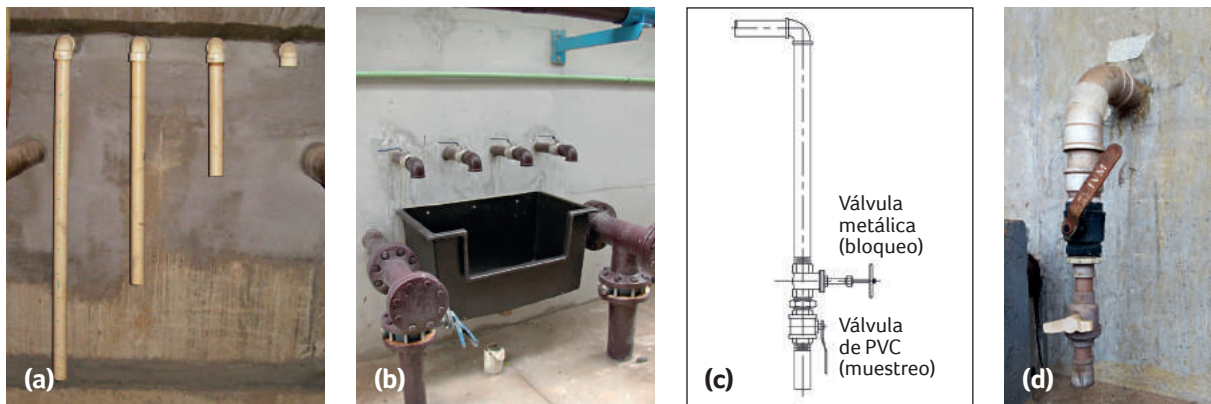
PTAR. A partir de pruebas de actividad metanogénica se observó una mayor producción de metano en el frasco control (que no contenía lodo de planta potabilizadora) y una decreciente producción de metano a medida que se aumentó la fracción de lodo de planta potabilizadora en los frascos. Además, especies de microorganismos del género *Methanothrix sp* fueron inhibidas, siendo encontradas en mayor número en el frasco control y en menor cantidad en los frascos donde se agregó lodo de planta potabilizadora. De esto es posible inferir que el lodo de la planta potabilizadora fue tóxico para los microorganismos metanogénicos, pudiendo perjudicar el proceso de digestión anaerobia.

### 3.4 Previsión del adecuado sistema de muestreo de lodo a lo largo de la altura del reactor

Para el establecimiento de estrategias de descarte (cantidad y frecuencia) es necesario el monitoreo continuo del lodo presente en el reactor, a partir de la determinación del perfil y de la masa de sólidos (CHERNICHARO, 2007). Para ello es esencial que el reactor disponga de un sistema de muestreo que permita la adecuada identificación de la altura y de la concentración de lodo en el interior del compartimiento de digestión del reactor, siendo necesarias las características descritas en el Cuadro 1 y ejemplificadas en la Figura 6.

**Cuadro 1** – Principales directrices para diseño y construcción del sistema de muestreo de lodo

- Previsión de puntos verticales de muestreo de lodo a lo largo de toda la altura del compartimiento de digestión del reactor, con una separación máxima de 0,50 m entre sí. El primer punto debe localizarse a la misma altura del descarte de fondo (0,20 a 0,30 m) y el último debe localizarse en la interface de los compartimientos de digestión y sedimentación. Los demás puntos de muestreo deben ser distribuidos equitativamente entre el primero y el último punto de muestreo, siendo lo ideal un mínimo de cuatro puntos de muestreo (Figura 6a).
- Previsión de una caja de maniobra para las válvulas de muestreo de lodo que permita el adecuado trabajo del operador, considerando la necesidad de manipulación de los frascos de muestreo y de limpieza de las instalaciones (Figura 6b).
- Las válvulas deberán ser de tipo bola, siendo recomendable el uso de una válvula metálica seguida de una de PVC en todos los puntos de muestreo de lodo (Figura 6c y 6d).
- Deben ser previstos conjuntos de puntos verticales de muestreo que permitan la caracterización representativa de lodo de todo el volumen del compartimiento de digestión del reactor.
- Las tuberías y válvulas de muestreo deben poseer un diámetro interno mínimo de 50 mm.



**Figura 6** – Sistema de muestreo de lodo de reactor UASB: a) vista interna de los puntos verticales de muestreo en el interior del compartimento de digestión, con una separación de 50 cm; b) vista externa de los puntos de muestreo y de la caja de maniobra de válvulas; c) y d) detalle de válvula metálica seguida de válvula de PVC.

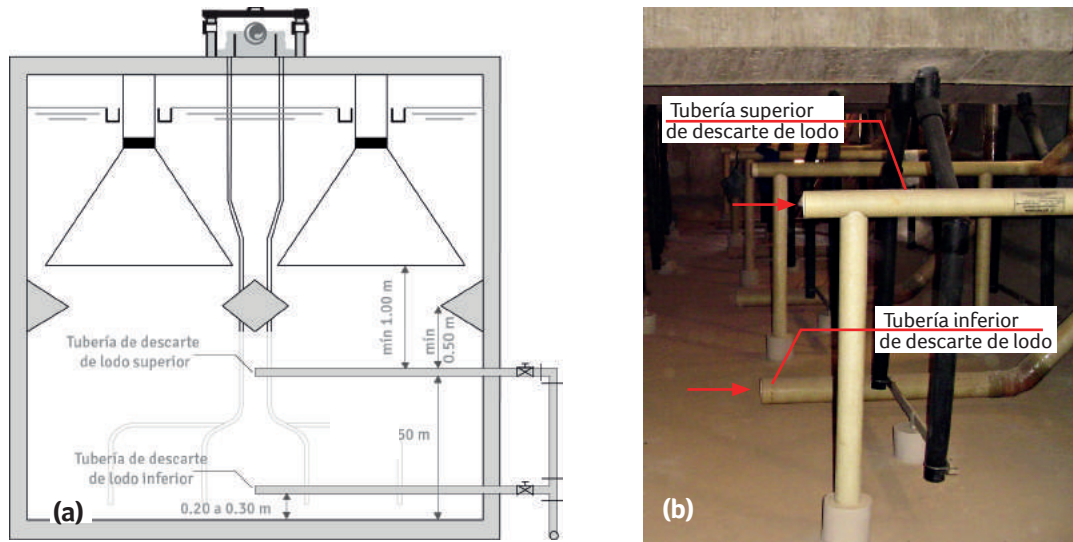
### 3.5 Previsión de un adecuado sistema de descarte de lodo de los reactores

Para brindar mayor flexibilidad operacional, se recomienda la previsión de conjuntos de tuberías de descarte de lodo en dos profundidades diferentes en el interior del compartimento de digestión del reactor: un **conjunto inferior**, localizado entre 0,20 y 0,30 m encima del fondo del reactor; y un **conjunto superior**, localizado entre 1,00 y 1,50 m encima del fondo del reactor. El conjunto inferior de tuberías permite el descarte de lodo más concentrado, que presenta mejores condiciones de sedimentación, mientras el conjunto superior permite el retiro de lodo menos concentrado, con peores condiciones de sedimentación (Figura 7). Esa configuración de sistema de descarte (superior e inferior) busca permitir la **remoción programada de lodo de peor calidad** (superior, me-

nos concentrado) y **la preservación de lodo de mejor calidad** (inferior, más concentrado), de modo a proporcionar: i) la obtención de una mayor edad de lodo y, consecuentemente, el descarte de un lodo más estabilizado; ii) el mantenimiento de un lecho de lodo denso en el fondo del reactor, de forma que pueda actuar como un filtro que auxilie en la retención de sólidos suspendidos por tiempo suficiente para que puedan ser hidrolizados; y iii) menor pérdida de sólidos para el comportamiento de sedimentación, reflejándose directamente en la mejoría de calidad del efluente del reactor. Además, la fracción de lodo descartada del fondo permite la remoción parcial de sólidos inertes (arena) que ingresaron en el reactor. El sistema de descarte de lodo debe presentar las características descritas en el Cuadro 2 y ejemplificadas en la Figura 7.

**Cuadro 2** – Principales directrices para diseño y construcción del sistema de descarte de lodo

- Previsión de conjuntos de tuberías de descarte de lodo en dos diferentes alturas del compartimento de digestión del reactor: tuberías inferiores localizadas entre 0,20 y 0,30 m del fondo; y tuberías superiores localizadas entre 1,00 y 1,50 m del fondo. Considerar que las tuberías superiores de descarte de lodo deben quedar posicionadas por lo menos 0,50 m abajo del deflector de gases, de modo que se permita la remoción efectiva de lodo menos concentrado (Figura 7a y 7b). De acuerdo con la NBR 12209, la tubería superior de descarte de lodo debe ser posicionada por lo menos 1,00 m abajo de la entrada al compartimento de sedimentación (ABNT, 2011) (Figura 7a).
- Previsión de una tubería de descarte de lodo del fondo para cada 20 a 30 m<sup>2</sup> de área del reactor. Para el descarte de lodo superior, menos concentrado, pueden ser utilizadas áreas de influencia más elevadas (30 a 50 m<sup>2</sup>), o evaluar la posibilidad de utilizar una única tubería, de gran diámetro, interconectada a ramales colectores, de 100 a 150 mm. La tubería de gran diámetro debe ser dimensionada con el fin de alcanzar una pérdida de carga próxima a cero, considerando el caudal total proveniente de la suma de los ramales de colectores interconectados a ella.
- Las tuberías y válvulas de descarte de lodo inferior deben poseer diámetro un interno mínimo de 150 mm. Para las tuberías y válvulas de descarte de lodo superior, puede ser adoptado un diámetro interno de 100 mm. Las válvulas deben ser, preferiblemente, de tipo cuchilla (guillotina).



**Figura 7** – Sistema de descarte de lodo del reactor UASB: a) representación esquemática e la posición de las tuberías inferiores y superiores de descarte de lodo; b) vista interna de las tuberías inferiores y superiores de descarte de lodo.

### 3.6 Definición de cantidades de lodo a ser mantenidas y descartadas en el reactor

Con el fin de evitar la pérdida indeseable de sólidos con el efluente final, se debe mantener la masa de lodo en el interior del reactor **entre un valor mínimo**, correspondiente a la biomasa suficiente para digerir la carga orgánica afluente, **y un valor máximo**, correspondiente a la capacidad de retención de lodo en el reactor UASB. El cálculo de masa mínima

es realizado a partir de la carga orgánica aplicada al reactor y de la actividad metanogénica específica (AME) del lodo anaerobio. La AME se define como la capacidad **máxima** de producción de metano por un grupo de microorganismos anaerobios, determinada en condiciones controladas de laboratorio, para permitir la actividad bioquímica máxima de conversión de substratos orgánicos en metano (CHERNICHARO, 2007).

**Ejemplo 1:** Calcular la masa mínima a ser mantenida en un reactor para el tratamiento de agua residual urbana. Considerar los siguientes datos de diseño:

- Población contribuyente:  $P = 10.000 \text{ hab.}$
- Contribución *per cápita* de DQO:  $QPC_{DQO} = 0,10 \text{ kgDQO.hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$
- Eficiencia de remoción de DQO:  $E_{DQO} = 70\%$
- Actividad metanogénica específica del lodo:  $AME = 0,20 \text{ kgDQO}_{CH_4} \cdot \text{kgST}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  (valor típico entre 0,10 e 0,20  $\text{kgDQO}_{CH_4} \cdot \text{kgST}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )

Solución:

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

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

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

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

3) Masa mínima ( $M_{min}$ ):

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



Para definir la masa máxima de lodo que el reactor puede almacenar sin que se presente el escape de lodo hacia el compartimiento de sedimentación y pérdida excesiva de sólidos en el efluente, deben ser observados los resultados de monitoreo de sólidos suspendidos y sólidos sedimentables en el efluente del reactor, así como las concentraciones de sólidos totales (ST) a lo largo de toda la altura del compartimiento de digestión (perfil del lodo). Con esto se busca inferir a partir de cuál masa de lodo en el interior del reactor inicia la mayor pérdida de sólidos y deterioro de la calidad del efluente. Otra posibilidad, cuando no se posee una serie histórica de datos que permita la definición de la masa máxima, es mantener la concentración de ST de lodo muestreado en el punto más elevado del compartimiento de digestión (localizado inmediatamente antes del deflector de gases) **siempre debajo de 0,5% ST**.

### 3.7 Definición de estrategia de descarte

A partir de la estimación de la producción de lodo en el reactor y de la masa de lodo a ser descartada, se calcula el volumen de lodo a descartar de acuerdo con la estrategia de descarte adoptada. Una estrategia que viene siendo recomendada es

la de **descartar por lo menos 50% de masa de lodo excedente a partir de la tubería superior** (1,00 a 1,50 m encima del fondo). Para compensar los mayores volúmenes de descarte resultantes de esta práctica, se debe prever en los nuevos diseños, una **unidad de espesado y homogenización de lodo** antes de la unidad de deshidratación. El espesado parcial del lodo permite que el sobrenadante sea retornado para el reactor UASB, y que la fracción más concentrada sea adecuadamente homogenizada para alcanzar el rango ideal de contenido de ST exigida por el equipo de deshidratación mecanizada. El descarte de lodo superior favorece el mantenimiento de bajas concentraciones de ST en la interface de los compartimientos de digestión y sedimentación, la cual debe permanecer siempre debajo de 0,5% ST, conforme lo comentado anteriormente.

Es recomendable el retiro programado y continuo de lodo excedente para que el reactor opere cíclicamente de la forma más estable posible. Los ejemplos siguientes ilustran los cálculos de las capacidades necesarias de sistemas de deshidratación natural y mecanizada para el procesamiento de lodo descartado, en función de la producción de lodo en el reactor anaerobio y de la estrategia de descarte adoptada.

**Ejemplo 2:** Dimensionar el sistema de deshidratación natural de lodo de reactores UASB, considerando los siguientes datos de diseño:

- Población contribuyente:  $P = 10.000$  hab.
- Carga orgánica aplicada:  $CO_{apl} = 1.000$  kgDQO.d<sup>-1</sup>
- Coeficiente de producción de lodo en el reactor UASB (0,10 a 0,20 kgST.kgDQO<sup>-1</sup>):  $Y_{lodo} = 0,20$  kgST.kgDQO<sup>-1</sup>
- Masa específica del lodo (usualmente en el orden de 1.020 a 1.040 kgST.m<sup>-3</sup>):  $\gamma = 1.020$  kgST.m<sup>-3</sup>

Observación: Los ejemplos 2 y 3 contemplan únicamente el coeficiente de producción de lodo en el reactor UASB. En caso de que la PTAR reciba otros tipos de contribuciones (por ejemplo: lodo aerobio producido en la unidad de postratamiento, lodo de tanque séptico, lixiviado de relleno sanitario, efluentes no domésticos, entre otros) y/o sea adoptado el envío de lodo aerobio de la unidad de postratamiento (por ejemplo: FBP, lodos activados) para espesado y estabilización en los reactores UASB, se debe considerar en el cálculo del sistema de deshidratación el aumento en el valor del coeficiente de producción de lodo debido a esas contribuciones.

Solución:

1) Producción diaria de lodo en el reactor ( $P_{lodo}$ )

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

2) Establecimiento de la rutina de descarte de lodo y tiempo del ciclo (tc) de los lechos de secado

Considerando:

- Frecuencia de descarte -  $f_d$ : 7 días
- Tiempo del ciclo de lechos de secado -  $t_c$ : 21 días
- El tiempo del ciclo de lechos de secado debe ser definido en función de las condiciones climáticas del sitio y aspectos operacionales de cada PTAR.

3) Volúmenes de lodo a descartar de cada punto (superior e inferior)

Considerando:

- Concentración esperada para el lodo superior e inferior:

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

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

- Porcentajes de descarte de lodo superior e inferior:

- Lodo superior: 50% em massa

- Lodo inferior: 50% em massa

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

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

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

4) Masa de lodo excedente descartada de los reactores ( $M_{\text{lodo}}$ )

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

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

5) Volumen de lodo excedente descartado de los reactores ( $V_{\text{lodo}}$ )

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

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

6) Dimensionamiento de los lechos de secado

- Altura de lámina de lodo en el lecho de secado ( $H_{\text{leito}}$ )

- Se adopta  $H_{\text{leito}} = 0,35 \text{ m}$ .

- Área necesaria para cada lecho de secado ( $A_{\text{leito}}$ )

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

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

- Número de unidades y geometría de los lechos de secado

- Considerando la realización de descartes semanales y tiempo del ciclo de 21 días, se adoptan cuatro módulos.

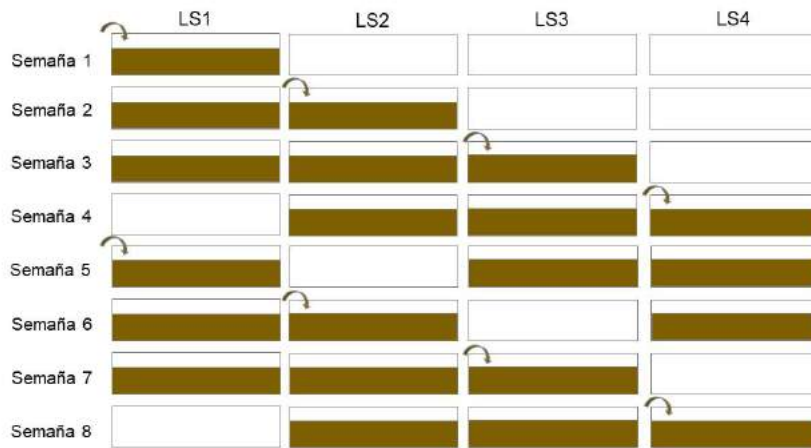
- Tasa de aplicación de sólidos resultantes en cada lecho de secado ( $T_{x-ST}$ )

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

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

- De acuerdo con la norma NBR 12.209, la descarga de lodo en los lechos de secado no puede exceder la carga de sólidos en suspensión totales de 15 kgST-m<sup>-2</sup> de área de secado, en cada ciclo de operación (ABNT, 2011).

En la Figura 8 se presenta un esquema de la rutina de descarte de lodo y limpieza de los lechos de secado (LS).



**Figura 8** – Ilustración esquemática de la rutina de descarte de lodo y limpieza de lechos de secado del Ejemplo 2.

**Ejemplo 3:** Dimensionar el sistema de deshidratación mecanizada de lodo de reactores UASB, considerando los siguientes datos de diseño:

- Población contribuyente:  $P = 100.000$  hab.
- Carga orgánica aplicada:  $CO_{apl} = 10.000 \text{ kgDQO} \cdot d^{-1}$
- Coeficiente de producción de lodo en el reactor UASB (0,10 a 0,20  $\text{kgST} \cdot \text{kgDQO}^{-1}$ ):  $Y_{lodo} = 0,20 \text{ kgST} \cdot \text{kgDQO}^{-1}$
- Masa específica del lodo (usualmente en el orden 1.020 a 1.040  $\text{kgST} \cdot \text{m}^{-3}$ ):  $\gamma = 1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3}$

Solución:

1) Cálculo de la producción diaria de lodo ( $P_{lodo}$ )

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

2) Cálculo de los volúmenes diarios de lodo a descartar de cada punto (superior e inferior)

- Concentración esperada para el lodo superior e inferior:

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

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

- porcentajes de descarte de lodo superior e inferior:

- Lodo superior: 50% en massa

- Lodo inferior: 50% en massa

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

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

3) Volumen diario de lodo a ser descartado ( $V_{lodo}$ )

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

4) Concentración promedio de lodo enviado a la centrifuga ( $C_{\text{lodo-média}}$ )

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

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

5) Carga de sólidos a ser procesada diariamente por la centrifuga

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

6) Dimensionamiento del sistema de deshidratación mecanizada del lodo por medio de centrifuga

• Definición del número de centrifugas

- Se considera: 1 unidad en operación + 1 para relevo y respaldo.

- Se destaca que el número de unidades en operación y respaldo es función de la escala de la PTAR y de la cantidad de lodo generado, así como de la estructura de mantenimiento a ser implantada y de la disponibilidad de rutas alternativas de disposición de lodo.

• Definición de rutina operacional

- Se considera: 5 días por semana y 8 horas diarias de funcionamiento.

• Cálculo de la capacidad de centrifuga necesaria para procesar el lodo excedente ( $C_c$ ):

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

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

- El sistema de deshidratación debe ser capaz de procesar diariamente  $96,0 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  o  $2.742,9 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1}$ , con el fin de compensar el no procesamiento durante los fines de semana.

- Considerando 8 horas diarias de funcionamiento, la centrifuga debe ser capaz de procesar  $12 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  ou  $342,9 \text{ kgST} \cdot \text{h}^{-1}$ .

- Es importante resaltar que el volumen (y la masa) total del lodo a ser procesado diariamente deberá ser dividido por el número de reactores que integran la PTAR, de modo que se mantenga la masa de lodo en cada reactor siempre por encima de la mínima recomendada (ver Ejemplo 1). Además, el volumen a ser descartado de cada reactor debe ser dividido por el número de válvulas superiores e inferiores, siendo efectuado primero el descarte de la línea de lodo superior y después de la línea de lodo inferior.

- Para facilitar y agilizar la operación de descarte de lodo, una alternativa es realizar el descarte de lodo únicamente de algunos reactores por día, en esquema de rotación entre todos los reactores de la PTAR, de modo que la masa de lodo en cada reactor sea mantenida siempre por encima de la mínima recomendada.

• Selección de equipo

- Para la selección de equipo disponible comercialmente las siguientes informaciones deben ser enviadas a los proveedores: (i) caudal de agua residual afluente a la PTAR; (ii) volumen y carga de sólidos a ser procesados por día; (iii) concentraciones de sólidos del lodo a ser procesado; y (iv) datos sobre la rutina operacional (número de horas de funcionamiento por semana).

### 3.8 Definición de las características de los sistemas de deshidratación

Para el dimensionamiento del sistema de deshidratación de lodo, sea natural o mecanizado, además de la estimación de la producción de lodo considerando todas las posibles contribuciones que puedan impactar el coeficiente de producción de lodo ( $Y_{\text{lodo}}$ ), es de fundamental importancia considerar las particularidades de cada sitio, las condiciones climáticas, las condiciones operacionales, así como las cuestiones logísticas y administrativas. Además, **es esencial considerar la posibilidad de descartar el lodo a dos alturas**, conforme lo ejemplificado anteriormente, lo que produce un mayor volumen de lodo de descarte. Debe resaltarse que esta desventaja puede ser minimizada con la previsión de una unidad de espesamiento y homogenización de lodo, como se comentó anteriormente.

#### 3.8.1 Deshidratación natural

En PTARs con deshidratación natural en lechos de secado, los descartes deben ser realizados en lote, de modo que la frecuencia de descarte sea compatible con la capacidad de almacenamiento de lodo en los reactores, el tiempo promedio de secado (de acuerdo con las condiciones climáticas del sitio) y el contrato con el prestador de servicios referente al retiro y transporte de lodo deshidratado.

En relación al dimensionamiento de lechos de secado, se debe considerar la necesidad de modulación (en cantidad y dimensiones), la cual debe estar muy bien relacionada a la planificación (frecuencia y volumen) de descarte de lodo y de limpieza de los lechos de secado; de modo a evitar la realización de descartes sobre un descarte de lodo previo. O dicho de otro modo, realizar una descarga de lodo en los lechos de secado y luego realizar otra descarga sobre la anterior; pues esto puede acelerar la colmatación de estas unidades.

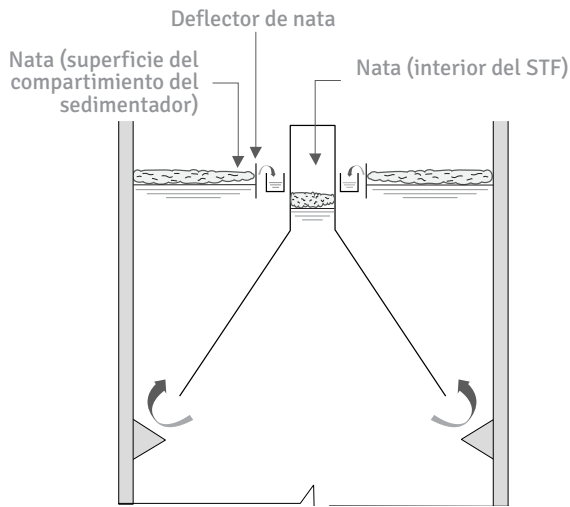
#### 3.8.2 Deshidratación mecanizada

En PTARs donde se utilicen procesos de deshidratación mecanizada, el descarte de lodo debe ser realizado diariamente y la magnitud de los descartes debe corresponder a la producción diaria de lodo, considerando todos los reactores. Sin embargo, esta rutina operacional debe ser adoptada solamente cuando la masa de lodo en los reactores esté abajo del valor máximo adoptado o la concentración de ST en el punto de muestreo superior sea inferior al 0,5%. En situaciones de exceso de lodo en los reactores UASB, las operaciones de descarte y de funcionamiento de sistema de deshidratación mecanizada deben ser intensificadas.

La definición de una rutina operacional de descarte de lodo debe ser compatible con los siguientes aspectos principales: i) la cantidad de operadores; ii) los contratos de prestadores de servicios referentes al transporte de lodo deshidratado y a la realización de mantenimiento preventivo y correctivo; iii) la posibilidad de paros en los equipos; y iv) la disponibilidad de productos químicos y piezas de reposición. Adicionalmente, se debe evaluar la posibilidad de redundancia de los equipos críticos y/o la previsión de lechos de secado, como alternativa en caso de paros y/o mantenimiento de equipos del sistema de deshidratación, evitando así situaciones de pasivo de lodo en el interior de los reactores, pues esto podría generar pérdida de sólidos con el efluente.

### 4 ORIGEN Y PROBLEMAS RELACIONADOS A LA ACUMULACIÓN DE NATA

En reactores UASB, la formación de nata puede ocurrir en dos sitios distintos: i) en la superficie del compartimento del sedimentador; ii) en el interior del separador trifásico (STF), en la interfase de liberación de los gases formados durante la digestión anaerobia (Figura 9).



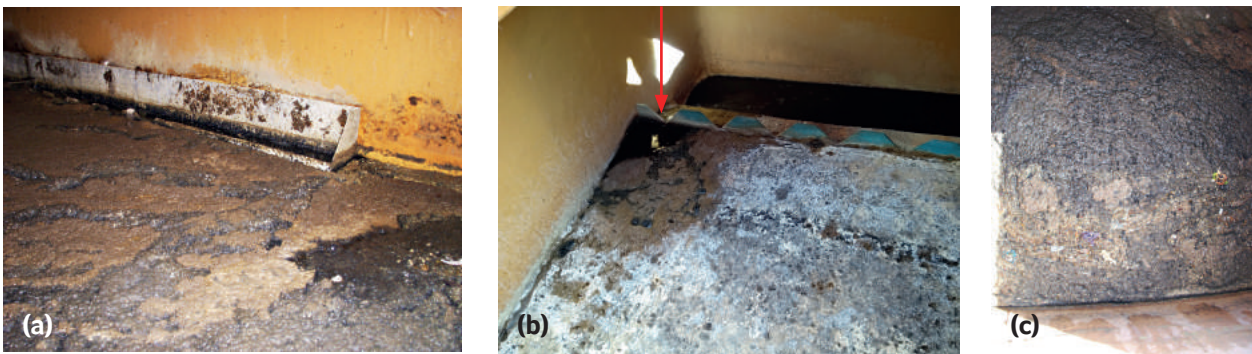
**Figura 9** – Identificación de puntos de acumulación de nata en reactores UASB.  
Fuente: Chernicharo (2007)

#### 4.1 Nata acumulada en la superficie del compartimiento del sedimentador

La nata acumulada en la superficie de los compartimientos de sedimentación de los reactores UASB, aunque se caracteriza por ser un residuo muy concentrado, presenta coeficientes de acumulación relativamente bajos, siendo posible diseñar los compartimientos de sedimentación sin retenedores de nata con el fin de permitir que ese material sea descargado junto con el efluente sin deteriorar

excesivamente su calidad. Sin embargo, es **esencial garantizar la adecuada nivelación y fijación de las canaletas colectoras de efluente y el sellado completo de las juntas durante la instalación de los vertedores**, con el fin de evitar flujos preferenciales que produzcan la acumulación de nata en la parte superior de los compartimientos de sedimentación, conforme lo mostrado en las Figuras 10a y 10b.

Es importante resaltar que la tasa de acumulación de nata en los compartimientos de sedimentación depende también del adecuado manejo del lodo excedente. La ausencia o el descarte de lodo excedente en una frecuencia no compatible con la producción de lodo en el sistema puede generar una mayor pérdida de sólidos para el compartimiento de sedimentación. Una vez en el sedimentador, ese lodo se agrega a la capa de nata y pasa a adquirir un aspecto de "lodo flotante" junto con la nata (Figura 10c). Esta situación tiende a agravarse cuando el reactor opera con sobrecarga hidráulica y velocidades ascensionales más elevadas que las previstas en el diseño. Si no es gestionado adecuadamente, la acumulación excesiva de nata en el compartimiento de sedimentación puede contribuir al deterioro de la calidad del efluente del reactor UASB.



**Figura 10** – Acumulación de nata en el compartimiento de sedimentación debido a: (a) canaletas colectoras de efluente desniveladas; (b) falta de sellado de juntas en la instalación de vertedores (el efluente pasa entre la placa vertedora en fibra de vidrio y la canaleta colectoras de concreto); (c) falta de descarte de lodo y sobrecarga hidráulica en el reactor.

#### 4.2 Nata acumulada en el interior del separador trifásico

La ausencia o ineficacia de los dispositivos de remoción de la nata debido a las condiciones precarias de acceso, la falta de condiciones de seguridad ocupacional y la ausencia de un protocolo sistematizado para la remoción de ese material, puede llevar al espesamiento y solidificación de la capa de nata (Figura 11a).

Esta capa de nata puede impedir el paso natural del biogás generado en el reactor, pudiendo ocasionar su entrada en el compartimiento de sedimentación, comprometiendo la retención de sólidos y causando el deterioro de la calidad del efluente (LETTINGA e HULSHOFF, 1991; SOUZA *et al.*, 2006). En algunos casos, impedir el paso natural del biogás genera su acumulación y el aumento de la presión sobre la capa espesa de nata, resultando en la generación de

**esfuerzos estructurales elevados en las paredes del separador trifásico.** Dependiendo de la magnitud de esos esfuerzos y de la calidad estructural de las paredes del separador trifásico, pueden presentarse daños como desnivelamiento, torsión, incluso puede presentarse la ruptura de esta estructura (Figura 11b y 11c). Además, el rompimiento abrupto de la capa de nata por el biogás bajo una presión excesiva puede provocar el movimiento de placas solidificadas de nata y la torsión de las paredes del separador trifásico (RAMOS, 2008; MIKI, 2010; van LIER *et al.*, 2011). La posibilidad de ruptura del separador trifásico se encuentra fuertemente asociada al tipo de material empleado en esas estructuras, principalmente cuando son confeccionados con materiales de menor resistencia, por ejemplo lonas plásticas, placas y tejidos de asbesto, e incluso fibra de vidrio de calidad inferior.



**Figura 11** – (a) Nata solidificada en el interior de un separador trifásico; (b y c) Rompimiento del separador trifásico.

El paso del biogás al compartimiento de sedimentación también tiene un impacto directo en el aumento de los niveles de emisión de gases odorantes y de efecto invernadero. Adicionalmente, genera la reducción de la recuperación de biogás para fines de quema y/o aprovechamiento energético. En este caso son válidas las mismas consideraciones realizadas anteriormente para el “lodo flotante” que se agrega a la capa de nata del compartimiento del sedimentador, como consecuencia del exceso de lodo

en el compartimiento de digestión y de sobrecargas hidráulicas en el reactor.

También existen preocupaciones relacionadas a los sólidos no retenidos en el tratamiento preliminar y que ingresan al reactor. Una fracción significativa de residuos sólidos menos densos flotará y se agregará a la capa de nata en el interior del separador trifásico o en la superficie del compartimiento de sedimentación.

## 5 POSIBLES MEJORAS RELACIONADAS A LA GESTIÓN DE LA NATA

Adoptar las medidas descritas a continuación puede contribuir significativamente a mejorar la gestión de la nata. Cabe resaltar que las medidas de sensibilización de usuarios, y la mejora del tratamiento preliminar también son fundamentales para la gestión de este subproducto, debido a que gran parte de esos residuos sólidos pueden constituir la capa de nata. Además, las medidas descritas para la gestión del lodo impactan la formación y la acumulación de nata en los reactores UASB, por lo que deben ser consideradas junto con las medidas descritas a continuación.

### 5.1 Control sobre la recepción de efluentes no domésticos

Algunos tipos de efluentes no domésticos, tales como lodo de tanques sépticos y efluentes

industriales con elevado contenido de grasas y aceites (por ejemplo: lácteos, mataderos y sistemas frigoríficos), pueden contribuir al incremento de la formación y acumulación de nata en los reactores UASB y, consecuentemente, agravar los problemas mencionados anteriormente. Se recomienda, por lo tanto, un riguroso control en la recepción de estas y de otras contribuciones que puedan colaborar para el agravamiento de la formación de nata en los reactores UASB.

### 5.2 Mejor control sobre la formación de nata en el compartimiento de sedimentación

Para alcanzar un mejor control sobre la formación de nata en la superficie del compartimiento de sedimentación, se deben considerar las directrices presentadas en el Cuadro 3.

**Cuadro 3** – Principales directrices para el diseño, la construcción y la operación relacionadas con el control de formación de nata en el compartimiento de sedimentación

- Mejorar el diseño, la confección y la instalación de canaletas colectoras de efluente (garantizar una lámina vertedora mínima de 15mm y con fijación adecuada que garantice la nivelación y la resistencia a torsión).
- El correcto dimensionamiento de la estructura de descarga de agua residual y/o de la estación de bombeo de alimentación de los reactores, de modo a evitar sobrecargas hidráulicas y velocidades excesivas en los compartimientos de digestión y de sedimentación del reactor.
- Correcta gestión del lodo, de modo a evitar el paso excesivo y “flotación” de lodo en el compartimiento de sedimentación.

### 5.3 Utilización de separadores trifásicos equipados con dispositivo de remoción de nata

En la evaluación de las alternativas de mejoramiento de los reactores UASB, los diseños más recientes han incorporado canaletas de colecta de nata en el interior del separador trifásico (Figura 12), de forma a permitir la remoción hidrostática. Algunos diseños, adicionalmente incorporan aspersores con chorros presurizados de agua, con el

fin de auxiliar el arrastre de nata hacia los canales de colecta. No se tiene certeza acerca de la real necesidad de esos aspersores, teniendo en cuenta que la nata removida con mayor frecuencia (2 a 3 veces por semana) es bastante fluida y no necesita de chorros de agua para su remoción efectiva (ROSA *et al.*, 2012; SANTOS, 2014; DÍAZ FLÓREZ, 2016).

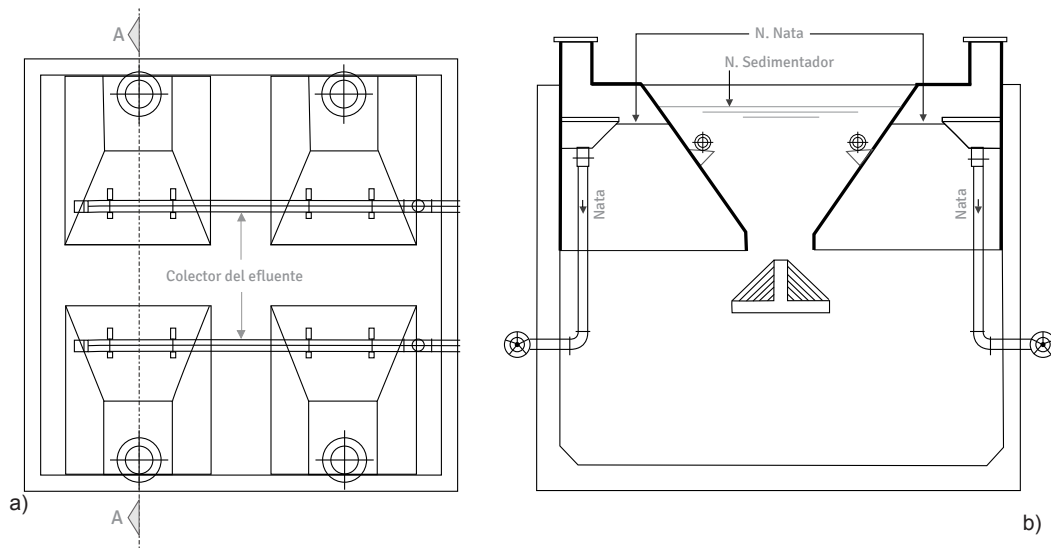




**Figura 12** – Separadores trifásicos con canaleta interna de colecta de nata: a) STF confeccionado en concreto y lona, con canaleta en aluminio; b) STF confeccionado en concreto, con canaleta en PRFV; c) STF confeccionado en PRFV, con canaleta en PRFV.

Una alternativa a la utilización de separadores trifásicos continuos (tronco-piramidal rectangular – ver Figura 13), equipados con canaletas largas, es la utilización de separadores trifásicos

menores, tronco-piramidales cuadrangulares, equipados con colectores de nata en la forma de copa en su parte interna, conforme lo mostrado en la Figura 13.



**Figura 13** – Separador trifásico tronco-piramidal cuadrangular equipado con colector interno de nata: a) vista en planta; b) corte transversal.

El procedimiento de remoción hidrostática se basa en la alteración del nivel de agua en el interior del separador trifásico, posibilitando el vertido de la nata hacia la canaleta interna al separador y su envío hacia la tubería de descarte externa al reactor. La alteración del nivel de agua en el interior del separador trifásico se

alcanza gracias al incremento o la reducción de la presión en la línea de gas comprendida entre el separador trifásico y el sello hidráulico localizado en la parte superior de cada reactor UASB. En la Figura 14 se muestra la representación esquemática del sistema para remoción hidrostática de nata.

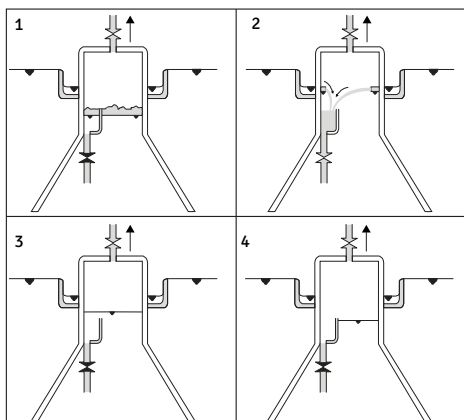


Figura 14 – Representación esquemática del sistema para remoción hidrostática de la nata.

Secuencia de procedimiento

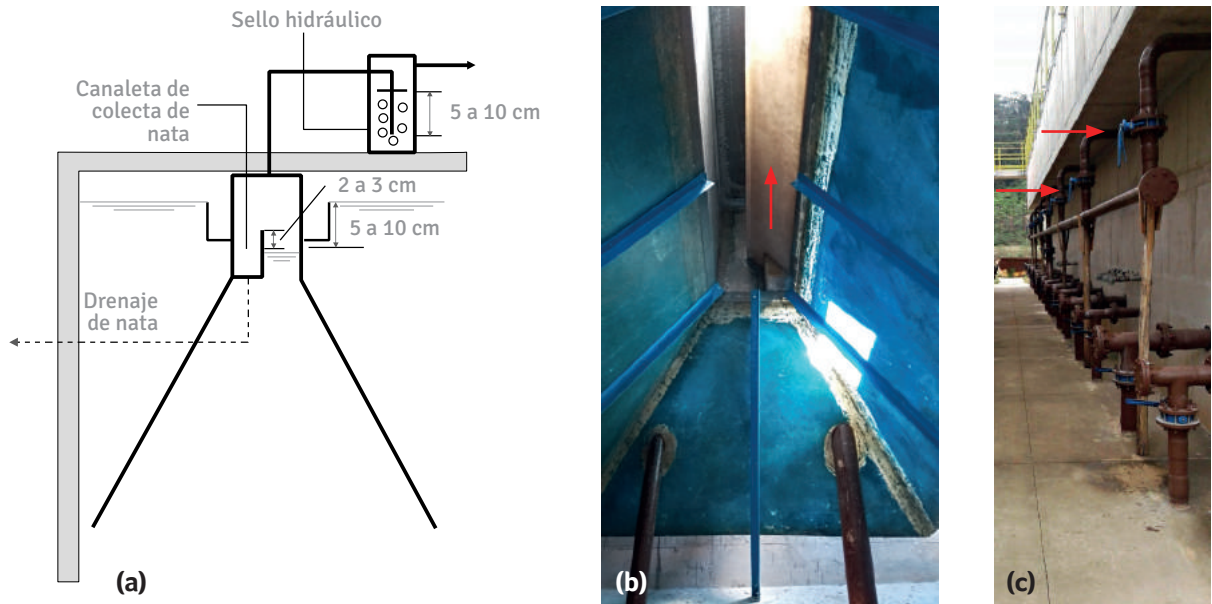
1. Niveles de nata durante la operación normal del reactor (línea de gas presurizada, de modo que mantenga el nivel de nata 2 a 3 cm abajo del borde superior de la canaleta interna).
2. Elevación del nivel de nata, conseguido gracias al alivio de la presión de la línea de gas, de forma a permitir la entrada de nata en la canaleta interna.
3. Cierre de la válvula de vaciado de la canaleta interna.
4. Aumento de la presión de la línea de gas, retornando a la condición operativa mostrada en 1.

Este dispositivo para remoción hidrostática fue probado con buenos resultados en reactores UASB en escala de demostración y plena, siendo observadas eficiencias de remoción entre 75% y 90% (ROSA *et al.*, 2012; SANTOS, 2014; DÍAZ FLÓREZ, 2016). Se resalta que este dispositivo solo funcio-

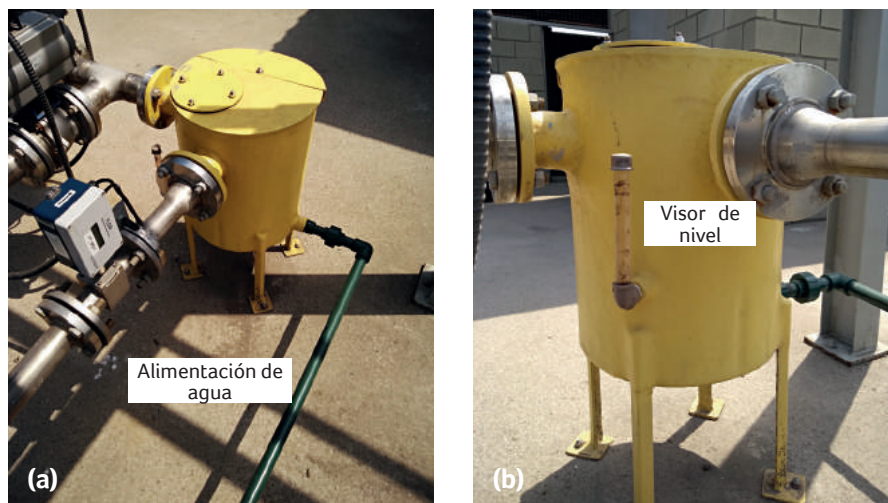
na adecuadamente para la remoción de nata en su estado fluido (no excesivamente espesada y solidificada). En el Cuadro 4 se presentan las principales directrices a ser consideradas en el diseño, construcción y operación de los dispositivos de remoción de nata.

**Cuadro 4 – Directrices para el diseño, la construcción y la operación del dispositivo de remoción de nata**

- La cantidad de nata acumulada en el interior del separador trifásico debe ser verificada para cada condición específica, considerando la calidad del agua residual cruda, la eficiencia del tratamiento preliminar y las características constructivas del reactor, al inicio de la operación del dispositivo de remoción de nata.
- El separador trifásico debe ser integrado al sello hidráulico para permitir el control de presiones internas y, consecuentemente, el ajuste de los niveles de agua en relación a la canaleta de colecta de nata (Figuras 15a y 16).
- Las canaletas de colecta de nata deben ser preferiblemente posicionadas junto a una de las paredes del separador trifásico y no en el centro. El posicionamiento de la canaleta junto a una de las laterales posibilita mayor área de lámina vertiente y mayor eficiencia en la remoción de nata. En la Figura 15b se muestra una canaleta de sección triangular.
- Correcto posicionamiento de la canaleta de colecta de nata durante la construcción, considerando que la instalación en niveles diferentes de los especificados en diseño puede inviabilizar la adecuada presurización y funcionamiento del dispositivo.
- Prever puntos de inspección y válvulas en las tuberías de salida de la nata de cada separador trifásico, con el fin de identificar puntos de obstrucción y pérdidas de carga hidráulica similares, la cual sólo se observa con la instalación de una válvula (Figura 15c).
- Prever boquillas de extracción a lo largo de la canaleta de colecta de nata, con el fin de permitir condiciones hidráulicas más adecuadas para el vaciado de la nata (Figura 17).
- Con base en las experiencias relacionadas al desarrollo del separador trifásico modular *Étsus-1000*, para la configuración de múltiples boquillas de extracción, un ancho de 15cm para la canaleta de colecta de nata es suficiente para garantizar caudales adecuados de vaciado, y también adecuadas tasas de liberación de biogás (tasa de liberación mínima  $1,0 \text{ m}^3 \text{ biogás} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) en el área exterior a la canaleta de colecta de nata.
- Garantizar la estanqueidad del compartimiento de gas, de modo a permitir el establecimiento de pequeñas presiones en la línea de biogás (5 a 10 cm.c.a).
- La frecuencia ideal de remoción de nata en el interior de los separadores trifásicos debe ser establecida a partir de la inspección visual, que puede ser definida a partir de la abertura de las tapas de inspección de cierre hermético (o a través de visores transparentes, si estuvieran disponibles), antes y después de cada operación de descarte. La práctica operacional del reactor permitirá establecer la mejor rutina de descarte (frecuencia y tiempo de descarte, grado de abertura de las válvulas, volúmenes removidos).
- Siempre que sea posible, se deben colocar válvulas motorizadas para facilitar la operación de remoción de nata.



**Figura 15** – Dispositivo de remoción hidrostática de nata: (a) ilustración esquemática del control de presión y nivel de nata en el interior del STF; (b) vista de canaleta de colecta de nata en sección triangular; (c) válvulas en las tuberías de salida de nata de cada separador trifásico.



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

### 5.3.1 Separador trifásico modular Étsus-1000

El separador trifásico modular Étsus-1000 (Figura 17) es un producto en fase final de desarrollo, fruto de la asociación entre la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), por medio del Instituto Nacional de Ciencias y Tecnología en Plantas de Tra-

tamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETES Sustentaveís - por sus siglas en portugués), con compañías estatales de saneamiento y fabricantes de elementos de fibra de vidrio. Este producto es confeccionado en plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y busca contribuir para la solución

de diversos problemas operacionales de reactores UASB, tales como: i) el adecuado manejo de nata; ii) la colecta eficiente del biogás, sin pérdidas por fugas; iii) la adecuada colecta del efluente líquido tratado, evitando el desprendimiento de gases residuales y la presencia de cortos-circuitos hidráulicos. Las principales ventajas asociadas al producto son:

- Estructura modular de separación trifásica que incorpora aspectos de ligereza, resistencia, estanqueidad y facilidad de transporte e instalación.

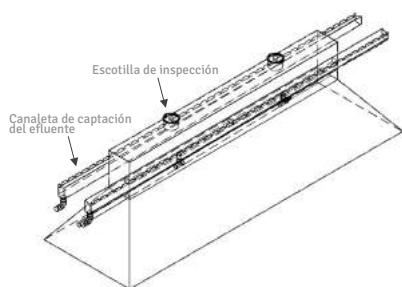
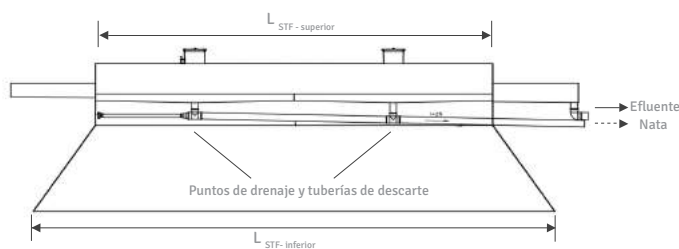


Figura 17 – Perspectiva esquemática del separador trifásico modular – Étsus 1000.



### 5.5 Manejo y disposición final

Luego de la remoción de la nata de los reactores UASB, el adecuado manejo y disposición final de este subproducto es de extrema importancia. En Brasil, algunas PTARs han considerado los lechos de secado como una etapa importante para su manejo. Sin embargo, la inclusión de una etapa previa de tamizado es necesaria, con el fin de separar la elevada cantidad de material grueso presente en la nata de la fracción tamizada. El material retenido en el tamiz debe ser enviado para su disposición final en relleno sanitario y la fracción tamizada debe ser enviada para su deshidratación en lechos de secado.

Adicionalmente, en función de los **elevados volúmenes del líquido descartado junto con la nata**, la fracción tamizada puede ser enviada a un **tanque de espesado** con el fin de separar la nata en tres fases: i) fracción sobrenadante; ii) fracción clarificada; iii) fracción sedimentada. Una investigación realizada en un sistema piloto de espesado indicó

- Incorporación del sistema de remoción de nata que se acumula en el interior del separador trifásico, contribuyendo directamente para la mejora de aspectos operacionales de los reactores UASB y de reducción y eliminación de emisiones odorantes y de pérdidas de biogás.
- Incorporación de sistema de colecta de efluente acoplado al cuerpo del separador trifásico, con un dispositivo de verificación de nivel.

que 5% de la nata tamizada corresponde a la fracción sobrenadante, 89% corresponde a la fracción clarificada y un 6% a la fracción sedimentada. La caracterización de la fracción clarificada presentó concentraciones medianas de ST, DQO, DBO y grasas y aceites dentro de los rangos usuales para el agua residual cruda; indicando, por lo tanto, que esa fracción puede ser retornada al inicio del sistema de tratamiento sin perjudicar el funcionamiento y la eficiencia de esas unidades. En ese sentido, la previsión de un tanque de espesado para recibir la fracción tamizada de nata es de gran importancia para permitir la separación de la fracción clarificada (que representa un gran volumen), para el retorno al tratamiento de la fase líquida. Con esto, únicamente las fracciones sobrenadantes y sedimentadas son encaminadas a la deshidratación en lechos de secado, en conjunto o separadas. Como el volumen de esas dos fracciones corresponde a un poco más del 10% del volumen total tamizado, la inclusión de la etapa de espesado, antes de la deshidratación en lechos de secado, contribuye para

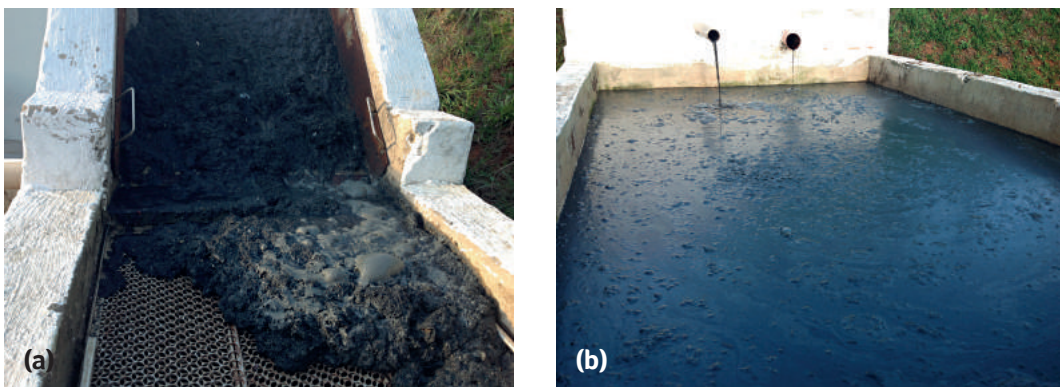
una reducción sustancial del área de esas unidades (DÍAZ FLÓREZ, 2016).

De esta forma, los diseños más recientes han recomendado que la nata (fluida) removida de reactores UASB sea enviada a una unidad de tamizado, seguida de una unidad de espesado, conforme lo descrito a continuación:

i) la unidad de tamizado (# 1,0 mm) permite la separación del material grueso (sólidos) contenidos

en la nata (Figura 18a), para la posterior disposición final en relleno sanitario;

ii) la unidad de espesado, localizada después de la unidad de tamizado, permite la separación de la fracción clarificada de las demás fracciones (sobrenadante y sedimentada), con el retorno de la fracción clarificada para la unidad de tratamiento preliminar, o para su propio reactor UASB, y las demás fracciones para los lechos de secado (Figura 18b).



**Figura 18** – a) Fracción gruesa de nata retenida en la unidad de tamizado; b) Fracción sobrenadante de nata enviada al lecho de secado.

## 6 GESTIÓN INTEGRADA DE LODO Y NATA

El uso de las mejoras presentadas en esta NT y la gestión integrada de los subproductos sólidos (lodo y nata) son de fundamental importancia para garantizar la eficiencia del sistema de tratamiento. En la Figura 19 se presentan alternativas para la gestión integrada de lodo y nata (y biogás), las cuales pueden traer importantes beneficios para las PTARs. Se destacan las siguientes posibilidades:

- Uso del biogás para el secado térmico del lodo y de la nata.

- Envío del lodo y de la nata para tanques de espesado, de modo a permitir la separación y retorno del exceso de agua para la unidad de tratamiento preliminar, o para el propio reactor UASB.

- Higienización del lodo y la nata en lechos de secado (calentados con biogás), en secadores solares o en secadores térmicos, los cuales pueden propiciar que el material deshidratado sea aprovechado en actividades agropastoriles o en unidades de aprovechamiento energético, en vez de disponerlo en rellenos sanitarios.

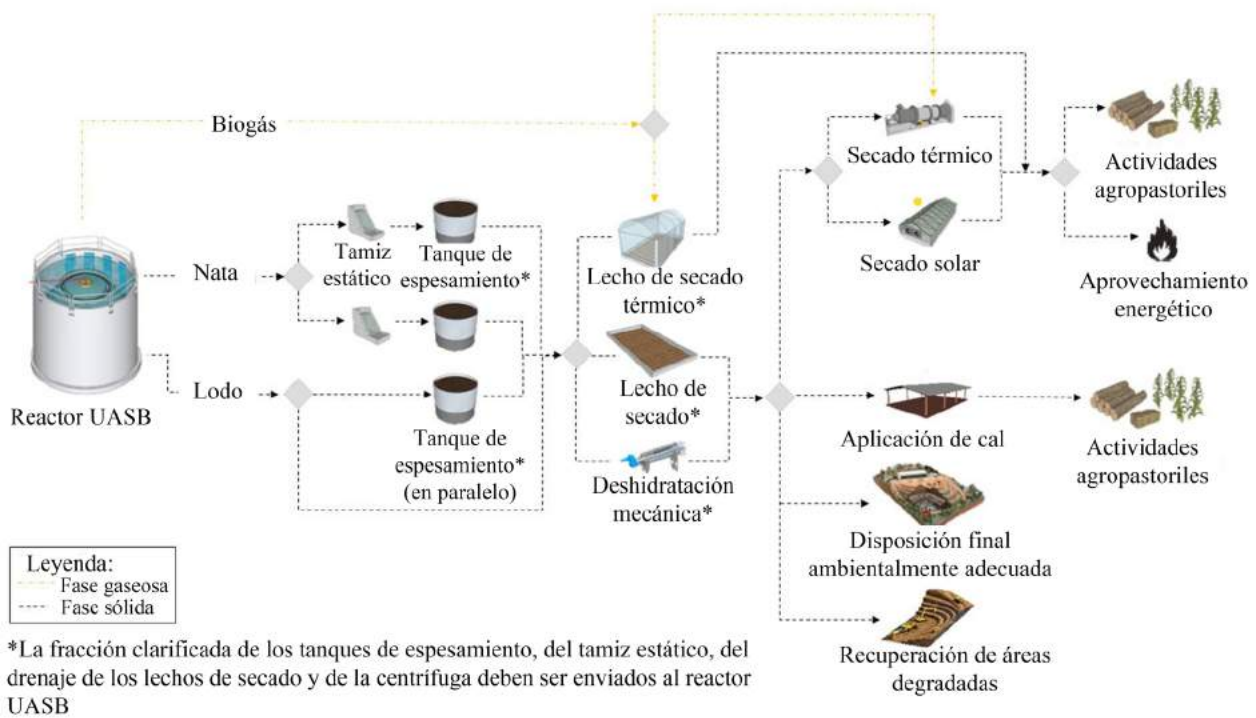


Figura 19 – Alternativas para la gestión integrada de lodo y nata.

## 7 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las contribuciones de Isabel Cristina Chiodi de Freitas y Ayana Lemos Emrich en la elaboración de esta NT y a las empresas Biofibra y Fibrasa por el trabajo conjunto en el desarrollo del separador trifásico *Étsus-1000*. Agradecen el apoyo recibido por el Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico - CNPq (*Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*), por la Coordinación de Mejoramiento de Personal de Nivel Superior – CAPES (*Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*), por 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 (*INCT ETEs Sustentáveis* por sus siglas en portugués).

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12209: **Elaboração de projetos hidráulico-sanitarios de estações de tratamento de esgotos sanitários**. 2ª edición. Rio de Janeiro, 2011. 57 p.
- ALMEIDA, P. G. S., BRESSANI RIBEIRO, T., SILVA, B. S., AZEVEDO, L. S., 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 6: Calidad del efluente. *Revista DAE* – edición especial, v. 66, n. 214, p. 90-108, 2018.

BRESSANI-RIBEIRO, T., LOBATO, L.C.S., MELO, V.R., PEGORINI, E., NONATO, S., CHERNICHARO, C.A.L. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 2: Tratamiento Preliminar. **Revista DAE** – edición especial, v. 66, n. 214, p. 17-29, 2018.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reactores anaeróbios**. 2<sup>a</sup> edición. 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., 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.

DÍAZ FLÓREZ, C. A. **Avaliação de protocolos de descarte e desidratção da espuma acumulada no interior de separadores trifásicos de reatores UASB**. 2016, 83 p. Disertación (Maestría en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos). Escuela de Ingeniería, Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

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

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

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

RAMOS, R. A. **Avaliação da influência da operação de descarte de lodo no desempenho de reatores UASB em estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal**. 2008, 135 p. Disertación (Maestría en Tecnología Ambiental y Recursos Hídricos). Universidad de Brasília, 2008.

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

SANTOS, A. **Remoção, tratamento e valoração de espuma proveniente de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto doméstico**. 2014. 115 f. Tesis. (Maestría en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos). Escuela de Ingeniería, Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014

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

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

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

# 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.

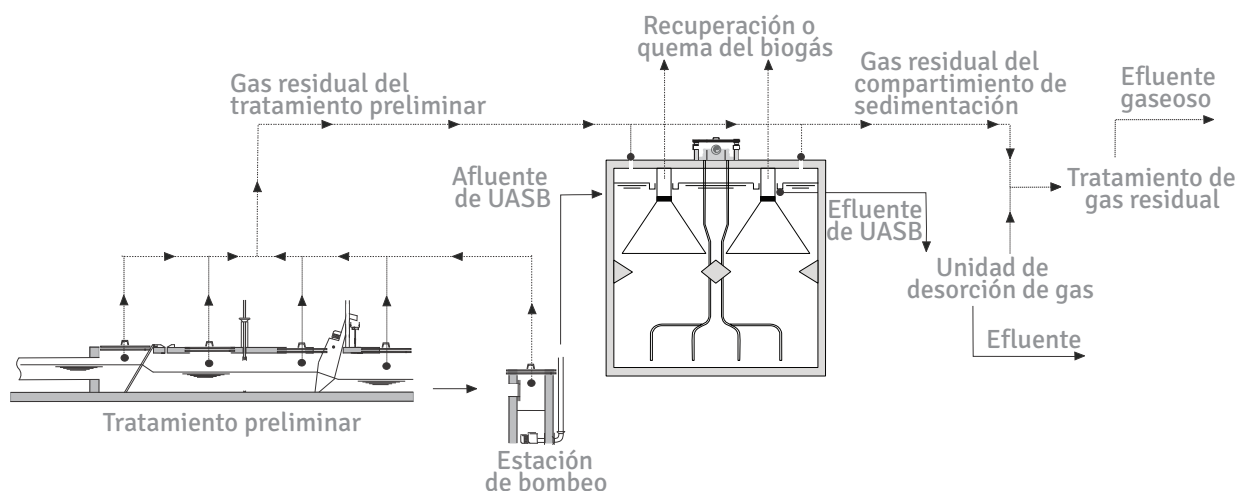


Figura 1 – Emisiones gaseosas fugitivas en las diversas etapas de una PTAR, con énfasis para los reactores UASB

## 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>

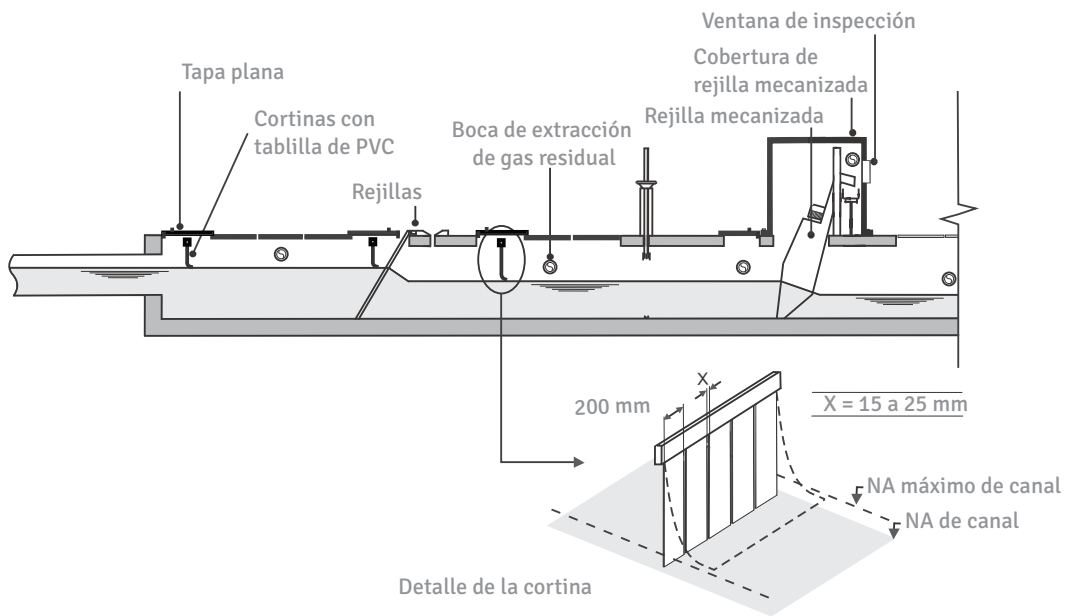
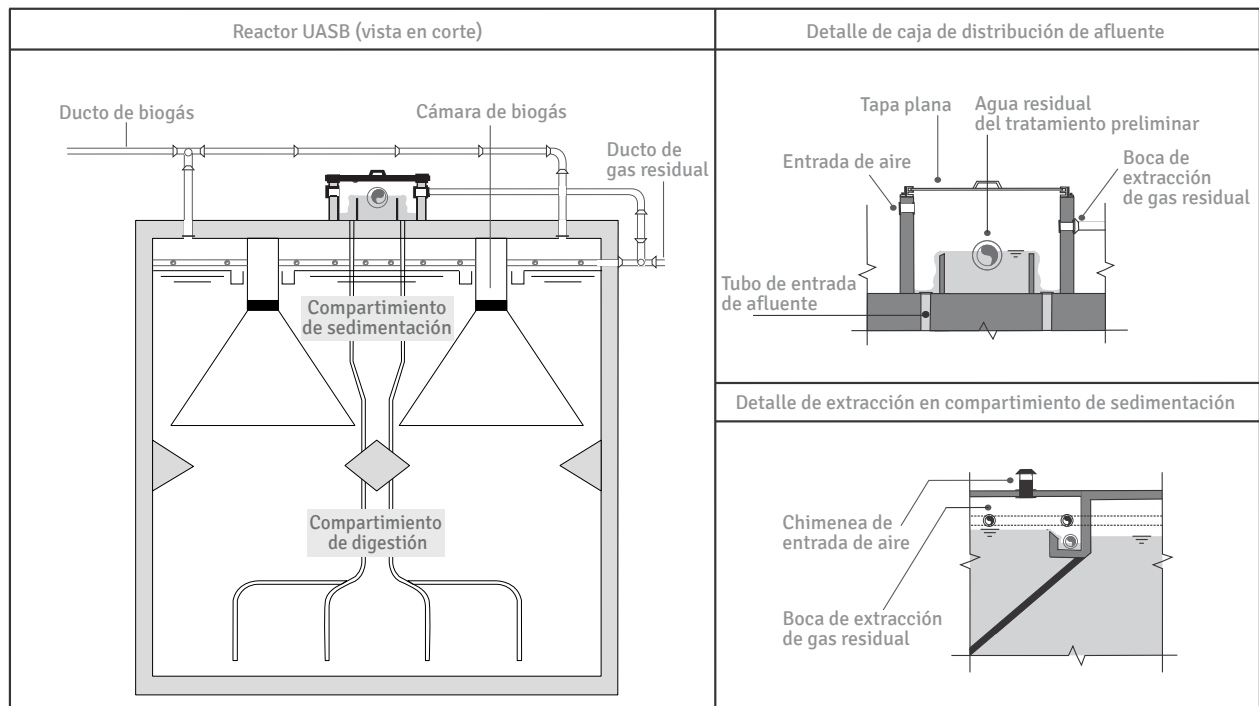


Figura 3 – Esquema de la contención de olores y gases corrosivos en el tratamiento preliminar.



**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).

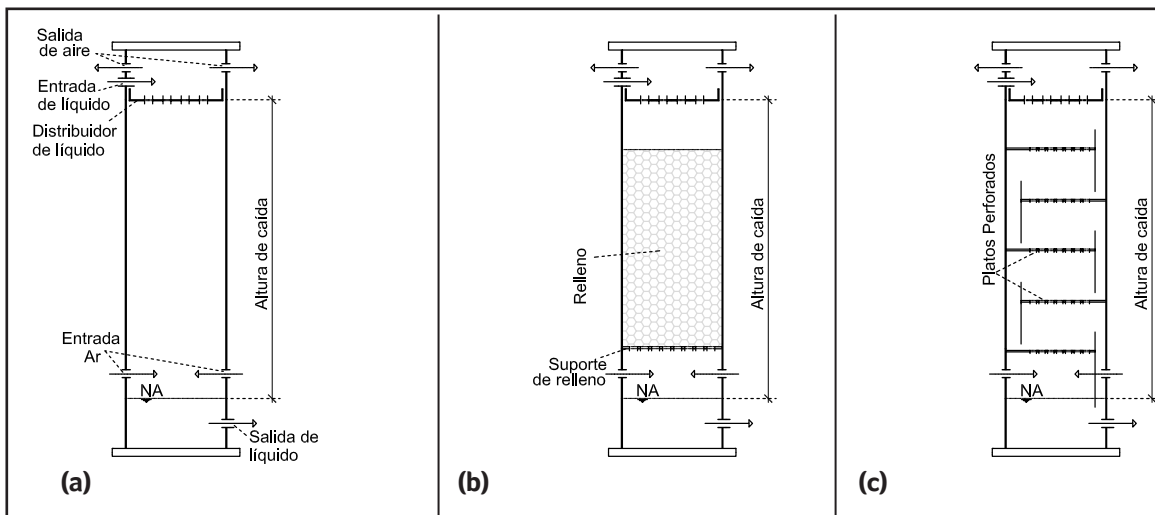


Figura 5 – Esquema de cámara de desorción: a) sin relleno, b) con relleno, c) con platos o bandejas

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).

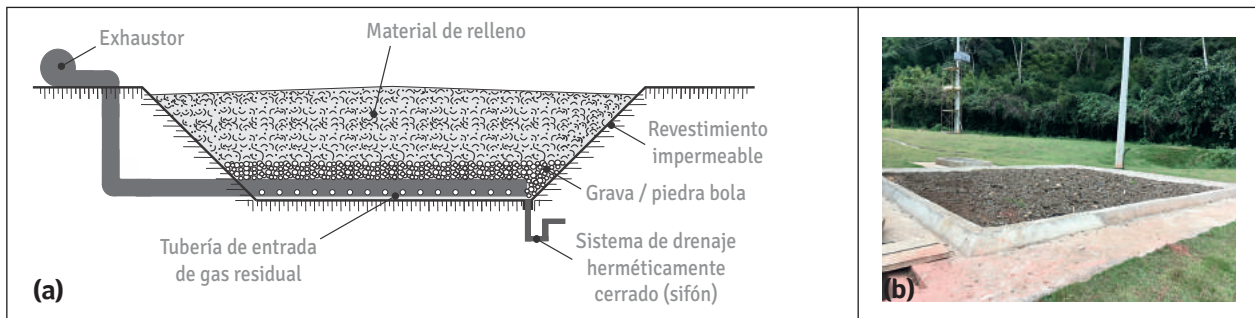
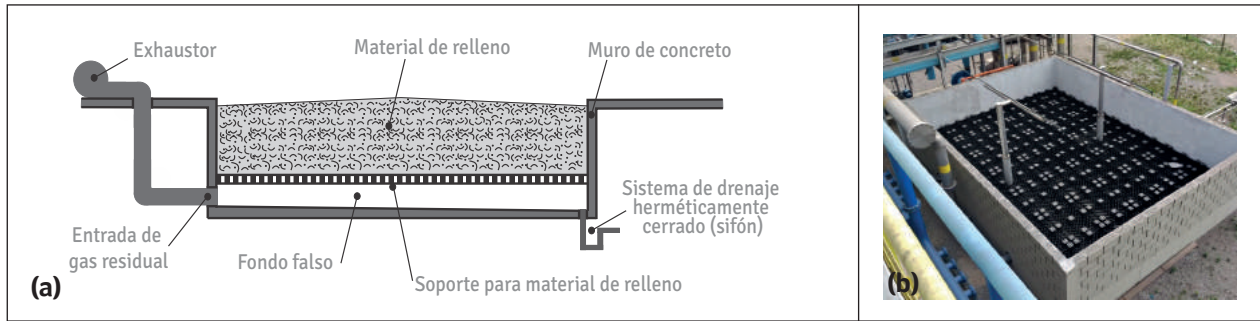
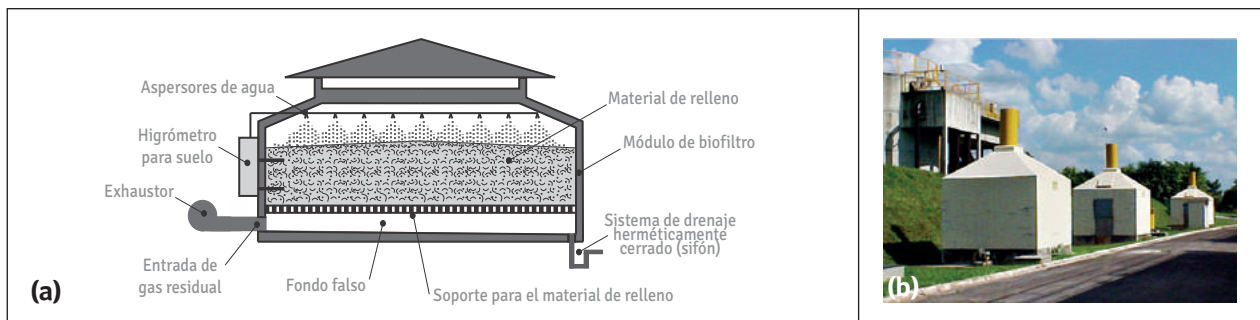


Figura 6 – Biofiltro no estructurado con fondo de relleno: a) diseño esquemático; b) foto en una PTAR.



**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 - Associação Brasileira 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 anaeróbios 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 Olfatómicas 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.



# 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

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

- **Fecha de entrada:**  
01/08/2018
- **Fecha de aprobación:**  
17/09/2018

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

DOI: 10.4322/dae.2018.042es

## Resumen

Durante varios años, la gestión de la fase gaseosa inherente al tratamiento de aguas residuales urbanas no fue debidamente considerada en el diseño, la construcción y la operación de reactores UASB. Debido a la necesidad de cumplir con requisitos de sostenibilidad asociados a la prestación de servicios de saneamiento, la gestión de los gases y su recuperación pasaron a ser relevantes, considerándolos como una posibilidad para la producción de energía limpia y renovable. Con esto, se mitigan las emisiones odorantes y de gases de efecto invernadero, protegiendo además la infraestructura y la seguridad ocupacional de quienes operan las PTARs. Bajo esta perspectiva, esta Nota Técnica presenta los principales problemas, junto con sus respectivos orígenes, asociados al biogás proveniente de reactores UASB alimentados con aguas residuales urbanas. Además, se discuten las mejores prácticas de ingeniería recomendadas para mitigar las emisiones fugitivas y maximizar la recuperación del biogás.

**Palabras clave:** Energía, gas de efecto invernadero, mitigación de olores, recuperación de gases disueltos, seguridad operacional.

**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 UTFPR, Brasil. Gerente de la Asesoría de Investigación y Desarrollo de la Compañía de Saneamiento del Paraná (Sanepar), Brasil. 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).

**Julio Cezar Rietow** – Ingeniero Ambiental y de Seguridad del Trabajo de la Universidad Pontificia Católica de Paraná (PUCPR), Brasil. Máster y Doctorando en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambiental de la Universidad Federal de Paraná (UFPR), 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).

**Fernanda Janaína Oliveira Gomes da Costa** – Ingeniera de Alimentos de la Universidad Estatal de Ponta Grossa (UEPG) e Ingeniera Química de la Universidad Pontificia Católica de Paraná (PUCPR), Brasil. Máster en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad Estatal de Ponta Grossa (UEPG) y Doctora en Ingeniería de Alimentos de la Universidad Tecnológica Federal del Paraná (UTFPR), Brasil. Ingeniera de la Compañía de Saneamiento de Paraná (Sanepar), Brasil.

**Luiz Gustavo Wagner** – Tecnólogo en Construcción Civil y Especialista en Energía Renovables de la Universidad Tecnológica Federal de Paraná (UTFPR), Brasil. Técnico de la Compañía de Saneamiento de Paraná (Sanepar), Brasil.

**Livia Cristina da Silva Lobato** – Ingeniera Civil de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Doctora 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).

**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 Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs Sustentáveis por sus siglas en portugués).

**Déborah de Freitas Melo** – Ingeniera Bioenergética de la Universidad Fundación Minera de Educación y Cultura (FUMEC), Brasil. Máster y doctoranda en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil.

**Juliana Albano Reis** – Ingeniera Ambiental de la Universidad Federal de Minas Gerais (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 Tratamiento 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

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

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

## 1 INTRODUCCIÓN

El uso de procesos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales urbanas o domésticas presenta diversas ventajas cuando se compara con los procesos aerobios. Uno de ellos es la producción de biogás, un gas que puede ser convertido en energía debido a su elevada concentración de metano (70 a 81%), un compuesto con elevado poder calorífico (BRASIL, 2017a). Esta energía química puede convertirse y usarse, por ejemplo, dentro de la misma Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) como energía mecánica, térmica y/o eléctrica. En ese sentido, el uso energético del biogás presenta diversas posibilidades, tales como activación de bombas y de equipos eléctricos, o higienización y secado del lodo y de la nata. Sin embargo, todavía existe una limitación intrínseca al aprovechamiento energético del biogás que se debe, principalmente, a las pérdidas por fugas (emisiones fugitivas) y a variaciones en su cantidad y composición. Estas variaciones se relacionan con aspectos del diseño, la construcción y la operación de los reactores anaerobios de manto de lodo y flujo ascendente (UASB, por sus siglas del inglés *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), pero también se deben a las características del agua residual afluyente (por ejemplo: concentración de demanda química de oxígeno - DQO y temperatura), las cuales pueden estar asociadas a la esta-

cionalidad climática. En conjunto, las pérdidas de biogás contribuyen directamente a la reducción del potencial de aprovechamiento energético de la PTAR, así como al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de gases odorantes hacia la atmósfera.

Por este motivo, el conocimiento y dominio del proceso de producción y captación del biogás es esencial para viabilizar el aprovechamiento de este subproducto. Esta práctica colabora con la gestión y reducción de las emisiones de GEI de la PTAR, mitiga eventuales problemas de malos olores en las cercanías de las PTARs y protege la infraestructura de la PTAR y las condiciones de salud ocupacional de operadores. Bajo esta perspectiva, el objetivo de este documento es profundizar en la discusión iniciada en la Parte 1 de esta Colección de NTs (CHERNICHARO *et al.*, 2018), tratando los problemas, sus respectivos orígenes y las posibles mejoras relacionadas al diseño, la construcción y la operación de reactores UASB que influyen en la producción y recuperación del biogás. Esta NT no profundiza sobre el uso del biogás para fines energéticos, pero presenta los requisitos necesarios para que esta práctica se viabilice según las mejores prácticas de ingeniería disponibles a la fecha, considerando la maximización de las tasas de producción y recuperación de biogás y la minimización de emisiones fugitivas de metano.

## 2 ORIGEN Y PROBLEMAS RELACIONADOS A LA PRODUCCIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS Y A LAS EMISIONES FUGITIVAS DE METANO

En la digestión anaerobia, el proceso de degradación biológica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno genera subproductos como el biogás. Compuesto por diversas sustancias en proporciones variables, el biogás proveniente de los reactores UASB se compone mayoritariamente por metano ( $\text{CH}_4$ ) (70 a 81%), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) (10 a 25%) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (6 a 14%). En menor proporción, el biogás también presenta pequeñas cantidades de hidrógeno (0 a 3%), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (233 a 2.470 ppm) y otros gases traza (BRASIL, 2017a).

Por su alto contenido de  $\text{CH}_4$ , el biogás posee un elevado poder calorífico, lo que posibilita su recuperación y aprovechamiento energético. El poder calorífico inferior (PCI) del  $\text{CH}_4$  puro es de  $35,9 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ , resultando en un PCI del biogás, con 70 a 81% de  $\text{CH}_4$ , que varía entre  $25,1$  y  $29,1 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ , que corresponden, respectivamente, a 78,9 y 91,5% del PCI típico del gas natural ( $31,8 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ ). Por otro lado, el  $\text{CH}_4$  es considerado uno de los GEI más importantes, con un potencial de calentamiento global, para el horizonte de 100 años, 28 veces superior al del  $\text{CO}_2$  (IPCC, 2014). Por este motivo, la recuperación energética y la destrucción del  $\text{CH}_4$  presente en el biogás han sido incentivadas, no solamente como una medida que puede generar eventuales beneficios financieros, sino también como parte de un plan de reducción de las emisiones de GEI.

Cabe resaltar que la elevada concentración de  $\text{N}_2$  presente en el biogás puede atribuirse a la solubilización de este gas en el agua residual afluente, que una vez en el interior del reactor UASB, se desprende de la fase líquida debido a la reducción de la presión parcial de  $\text{N}_2$  atmosférico (NOYOLA *et al.*, 2006). A su vez, las bajas concentraciones de  $\text{CO}_2$  se atribuyen a la elevada solubilidad del gas, asociada a las elevadas cargas hidráulicas normalmente aplicadas a los reactores UASB tratando aguas residuales urbanas (CHERNICARO *et al.*, 2015).

Aunque se encuentre en bajas concentraciones en el biogás, el  $\text{H}_2\text{S}$  merece atención especial debido a su potencial corrosivo y a sus otras propiedades que causan molestias de malos olores y eventuales riesgos ocupacionales, según se detalla en la Parte 4 de esta Colección de NTs (BRANDT *et al.*, 2018).

En el contenido presentado a continuación se exponen los principales problemas relacionados con la producción y recuperación de biogás y con las emisiones fugitivas de  $\text{CH}_4$  en reactores UASB, tal y como se anticipó en la Parte 1 de esta Colección de NTs (CHERNICARO *et al.*, 2018).

### 2.1 Emisiones fugitivas de gases de efecto invernadero ( $\text{CH}_4$ ) y de gases odorantes ( $\text{H}_2\text{S}$ )

Los compuestos presentes en el biogás poseen diferentes grados de solubilidad en el agua residual. En consecuencia, se comportan de maneras distintas en ese medio, pudiendo permanecer disueltos en el medio líquido o desprendiéndose para la fase gaseosa. Según las definiciones utilizadas en la Parte 4 de esta Colección de NTs (BRANDT *et al.*, 2018), el término emisiones fugitivas se refiere a los gases que son liberados hacia la atmósfera de forma difusa y sin una medida de control.

Debido a su baja solubilidad en el agua, el  $\text{CH}_4$  tiende a desprenderse para la fase gaseosa, llegando a constituir la mayor parte del biogás colectado en los separadores trifásicos (STF) y de modo que sea posible su aprovechamiento energético. Por otro lado, estudios realizados por Souza *et al.* (2011) y Nelting *et al.* (2017) mostraron concentraciones considerables de  $\text{CH}_4$  disuelto en efluentes de reactores UASB con riesgo de desprenderse de la fase líquida hacia la atmósfera (emisiones fugitivas) debido a la supersaturación de  $\text{CH}_4$  en la fase líquida. Adicionalmente, pueden existir emisiones fugitivas de biogás a lo largo del sistema de colecta, transporte y quema del biogás, producto de fugas en los STF y/o en la línea de biogás. Las emisiones fugitivas también pueden ser consecuencia de una baja eficiencia de recuperación de biogás en el STF o de emisiones puntuales asociadas a una combustión incompleta en los quemadores. Diseños antiguos o inadecua-

dos que omitieron la gestión de la fase gaseosa; así como diseños, materiales y/o ejecución ineficientes de sistemas de remoción de nata, también puede ser factores de vulnerabilidad para la presencia de emisiones fugitivas de biogás.

En el caso del  $H_2S$ , según se abordó en la Parte 4 de esta Colección de NTs (BRANDT *et al.*, 2018), su formación se da a partir de la ruta metabólica de sulfatogénesis, correspondiente a la reducción biológica del sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) por las bacterias reductoras de sulfato (CHERNICHARO, 2007). El pH influye fuertemente sobre la presencia de sulfuro en el medio líquido. Para un pH en torno a 7 (valor usual en la operación de reactores UASB tratando aguas residuales urbanas),  $H_2S_{(ac)}$  y  $HS_{(ac)}^-$  están presentes en solución en una relación igual a 50% (CHERNICHARO, 2007; NOYOLA *et al.*, 2006). Debido a la elevada solubilidad del  $H_2S$  en el medio líquido, una importante parte de este gas puede permanecer disuelta y salir con el efluente final del reactor; o incluso ser liberado hacia la atmósfera, dependiendo de los siguientes factores: presencia de turbulencias en el líquido, área superficial de la interfase líquido-atmósfera (compartimiento de sedimentación) y temperatura del líquido. Parte de esas emisiones de  $H_2S$  a partir de la fase líquida son puntuales y pasan a formar parte del biogás producido en los reactores. De este modo, problemas de estanqueidad en las cámaras y líneas de gas, ineficiencia de los STF's y baja eficiencia de los quemadores de biogás son las principales causas de las emisiones puntuales de gases odorantes.

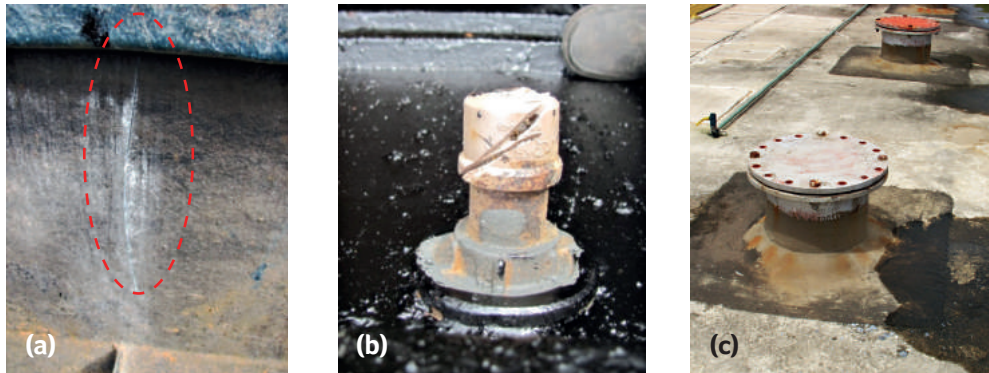
## 2.2 Bajo potencial de aprovechamiento energético del biogás

El bajo potencial de aprovechamiento energético del biogás se debe principalmente a las pérdidas y emisiones fugitivas, las cuales están asociadas a los siguientes aspectos: i) fugas en los STF's y/o en la línea de biogás; ii) sistemas ineficientes y vulnerables para la remoción de nata; iii) entrada excesiva de agua pluvial en el alcantarillado sanitario; y iv) emisiones fugitivas de la fracción de  $CH_4$  que se encuentra disuelta en el efluente.

### 2.2.1 Fugas en los separadores trifásicos y/o en la línea de biogás

Las emisiones fugitivas de biogás ocasionadas por fugas en los STF's y/o en tuberías también contribuyen con la reducción del potencial de recuperación y aprovechamiento energético del biogás, así como para las emisiones de GEI y de gases odorantes. Estas fugas están asociadas a problemas de diseño y de construcción, uso de materiales inapropiados en las cámaras de gas de los STF's, en las tapas de inspección y en las tuberías de biogás.

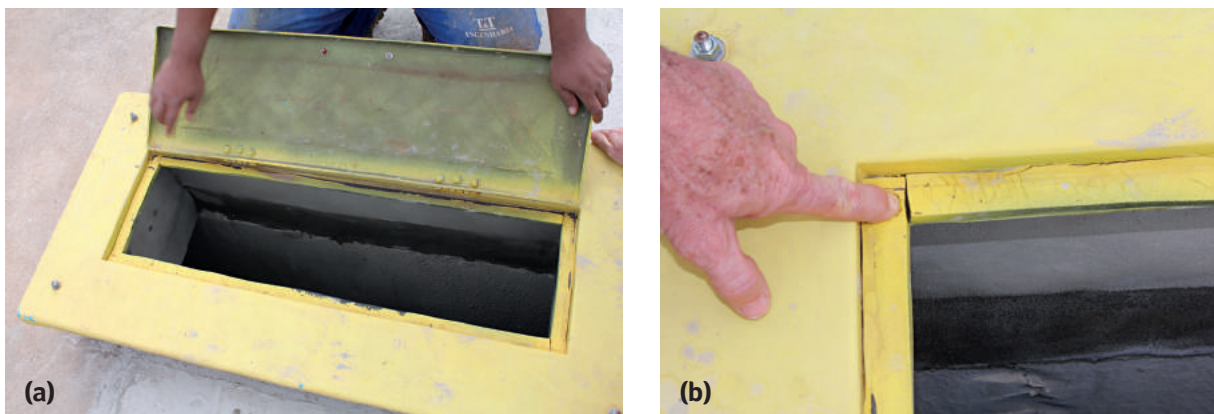
Es común encontrar STF's confeccionados a partir de lona, la mayoría a base de policloruro de polivinilo (PVC), que son fijadas a las estructuras de concreto de los reactores por medio de soportes de aluminio. Debido a la acumulación de lodo en el compartimiento de sedimentación del reactor o al espesamiento de la nata en el interior del STF, puede haber un bloqueo del paso de biogás y también la ruptura de las lonas y/o soportes de fijación. Según se discutió en la Parte 3 de esta Colección de NTs, la obstrucción del paso natural de biogás producido por el espesamiento de la capa de nata en el interior del STF genera esfuerzos importantes en las paredes de esta estructura, que pueden ocasionar daños de desnivelación, torsión y, en algunos casos, ruptura, provocando una reducción de la recuperación de biogás (LOBATO *et al.*, 2018). Nótese que el escape de biogás hacia el compartimiento de sedimentación ocasiona también el arrastre de sólidos, perjudicando la calidad del efluente del reactor UASB, además de impactar directamente en la emisión de GEI y de emisiones de gases odorantes. Adicionalmente, debido a la presencia de  $H_2S$  en el biogás, los STF's y otros accesorios y equipos de la línea de biogás, cuando no son fabricados con materiales resistentes y protegidos con revestimientos anticorrosivos, están sujetos a la formación de fisuras propensas a generar fugas (Figura 1 (a-c)).



**Figura 1** - Ilustración de fugas de biogás: a) Fisura presente en el STF del reactor UASB; b) Conexión de la tubería de biogás dañada; c) Fuga de gas en pasantes en el concreto.

Dependiendo de los materiales utilizados y de los métodos constructivos adoptados, las tapas de inspección de los reactores, típicamente construidas en concreto o en plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV), pueden no asegurar la estanqueidad de la cámara de gas, generando emisiones fugitivas. Por ejemplo, las tapas de PRFV normalmente son envueltas en una membrana de etileno propileno dieno monómero (EPDM), junto con un sistema de enganche para asegurar su cierre rápido. Sin

embargo, en caso de que la membrana de EPDM se instale irregularmente, permitiendo la formación de ondulaciones en la superficie, el sellado no será eficiente. Esto también ocurre cuando las superficies de las tapas presentan curvaturas debido al desgaste. En la Figura 2 se muestra una tapa de PRFV con falla en el elemento de sellado. Nótese que el concreto en la cercanía de las tapas también puede sufrir corrosión, posibilitando el paso de gas en el contorno de las tapas de inspección.



**Figura 2** – a) Tapa de PRFV para inspección del separador trifásico; b) Detalle de falla en el elemento de sellado de la tapa de inspección.

Adicionalmente, las emisiones fugitivas de biogás pueden ocurrir en juntas de dilatación del concreto cuando éstas no son debidamente tratadas y rellenadas durante la etapa constructiva. En el área de

la cámara de gas esas juntas tienden a corroerse con el tiempo, permitiendo la fuga de gas. Tales fugas pueden ocurrir también en fisuras del concreto en el área de la cámara de gas debidas a, por ejem-

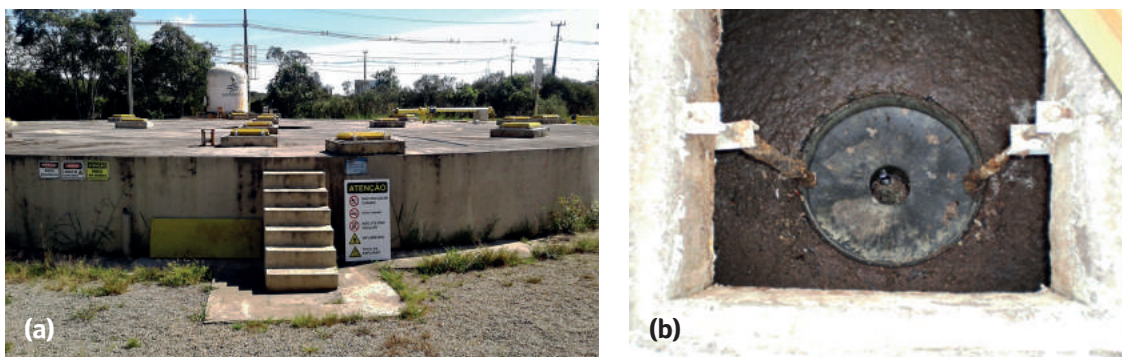
problemas de curado del concreto y a orificios causados por un mal acabado de los tirantes (*ties*) colocados en la formaleta (encofrado) durante el proceso de colado del concreto.

También, tuberías de conducción del biogás y otros componentes, tales como válvulas y registros, fabricados en materiales no resistentes a la corrosión (por ejemplo: acero al carbono) están más expuestos a presentar fugas.

### 2.2.2 Sistemas ineficientes y vulnerables para la remoción de nata que propician emisiones fugitivas de biogás

La inexistencia o ineficiencia (relacionada al diseño, materiales y/o ejecución e instalación inadecuados) de los dispositivos de remoción de nata en los STF's implica la necesidad de limpiezas periódicas en los reactores, las cuales

demandan una cantidad de trabajo considerable, además de propiciar emisiones fugitivas de biogás. Gran parte de los reactores anaerobios implantados en Brasil no poseen dispositivos de remoción de nata, lo que fuerza a interrumpir la operación de las unidades para realizar la limpieza de éstas. En algunos reactores, esta limpieza se realiza abriendo las tapas de inspección instaladas en la parte superior de las cámaras de gas de los STF's (Figuras 3a y 3b). Este procedimiento genera emisiones de gases odorantes y riesgos de seguridad ocupacional, ya que puede conducir a la formación de una atmósfera explosiva. Adicionalmente, la abertura de las tapas de inspección del STF para remover la nata puede ocasionar una pérdida significativa de biogás.



**Figura 3** – Sistema inexistente y/o ineficiente de remoción de nata: a) reactor anaerobio sin dispositivo de descarte de nata; b) abertura de la tapa de inspección para descartar la nata.

### 2.2.3 Entrada excesiva de agua de lluvia en el alcantarillado sanitario

Aunque las redes de alcantarillado sanitario están concebidas como sistemas separados de la red de agua pluvial, es común la presencia de conexiones ilícitas de agua pluvial. La contribución de agua de lluvia ocasiona la dilución del agua residual (incremento del caudal y reducción de la concentración de DQO) y, en consecuencia, tiene un im-

pacto significativo en la reducción de producción de biogás. En caso de no ser desviado en rebales o vertederos de excedentes, ese exceso de caudal afluyente puede provocar sobrecarga hidráulica en los reactores, con reducción del tiempo de retención hidráulica (TRH), aumento de la velocidad ascensional y eventual arrastre de sólidos junto con el efluente. Possetti *et al.* (2013), Waiss & Possetti (2015) y Cabral (2016) constataron una relación

directa entre el aumento del caudal de agua residual afluyente y la ocurrencia de eventos lluviosos, con la consiguiente disminución del TRH y de la producción de biogás.

### 2.2.4 Emisiones fugitivas de la parte de CH<sub>4</sub> disuelta en el efluente

La cuantificación del CH<sub>4</sub> en el biogás es de suma importancia para viabilizar su aprovechamiento energético. Al mismo tiempo, se ha verificado la existencia de grandes pérdidas de CH<sub>4</sub> disuelto en el efluente de reactores UASB tratando aguas residuales urbanas. En un estudio realizado por Souza *et al.* (2011), se registraron concentraciones de CH<sub>4</sub> disuelto en el efluente entre 17 y 22 mg·L<sup>-1</sup>, en reac-

tores de diferentes escalas (piloto, demostración y real).

En términos de balance de masa de DQO, mediciones efectuadas por Souza *et al.* (2011) en reactores UASB en escala piloto y demostración operando con diferentes TRH, indicaron que la fracción disuelta en el efluente, expresada como porcentaje de todo el CH<sub>4</sub> producido en el reactor, varió de 36 a 41% (Figura 4). Esta pérdida representa una reducción en el potencial de recuperación energética y, por lo tanto, requiere ser considerada en los balances de masa de DQO usados para estimar la producción de biogás, tal y como propone Lobato *et al.* (2012).

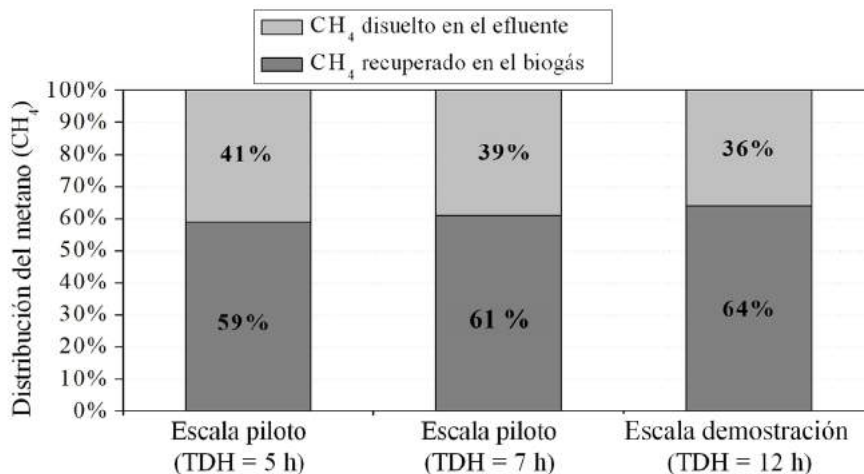


Figura 4 – Pérdidas de CH<sub>4</sub> disuelto en el efluente de reactores UASB y CH<sub>4</sub> en el biogás. Fuente: SOUZA *et al.* (2011).

### 2.3 Aspectos de seguridad vinculados a los espacios confinados y a la formación de atmósferas explosivas

Estudios realizados por Moreno *et al.* (2015) identificaron 169 accidentes documentados, ocurridos entre los años de 1995 a 2014, en plantas con producción de biogás en el mundo. Los resultados de este estudio señalan que 82% de esos accidentes se debieron a explosiones y a la inhalación de sustancias tóxicas y asfixiantes.

Debido a aspectos constructivos de los reactores anaerobios, en estas unidades es común contar con la existencia de espacios confinados (por ejemplo: compartimiento de sedimentación del STF), los cuales no cuentan con una ventilación suficiente para la remoción de los gases. En ambientes en los que la concentración de oxígeno sea menor a 18%<sub>(v/v)</sub> puede haber riesgo de asfixia e intoxicación (BRASIL, 2017a).

Además de los riesgos de carencia de oxígeno, algunas sustancias tóxicas presentes en el biogás, como el  $H_2S$ , pueden causar la muerte o la pérdida instantánea de las capacidades físicas y del razonamiento lógico en las personas que realizan actividades dentro de espacios confinados. El  $H_2S$ , cuando se encuentra en elevadas concentraciones en el ambiente, es extremadamente tóxico para los seres vivos, según se presentó en la Parte 4 de esta Colección de NTs (BRANDT *et al.*, 2018). En caso de ser expuestas al  $H_2S$  por un determinado período de tiempo, las personas pueden sufrir una pérdida de sensibilidad en el sentido del olfato y dejar de percibir el gas. En este caso, el olor desagradable dejaría de actuar como una señal de advertencia (BRASIL, 2017a).

Con respecto al  $CO_2$ , su elevada concentración en el ambiente puede interferir en los intercambios gaseosos del aire atmosférico a nivel de los alveolos pulmonares, pudiendo ser fatal incluso en condiciones normales de concentración de oxígeno molecular. De acuerdo con la Norma de Regulación de Seguridad y Salud en el Trabajo Norma Reglamentaria - NR 15, que trata sobre las actividades y operaciones insalubres, el límite de tolerancia para el  $CO_2$  es de 3.900 ppm (BRASIL, 1978).

Otro aspecto de seguridad relevante en PTARs con producción de biogás es la formación de atmósferas explosivas. Toda mezcla de gas posee una energía mínima de ignición que es necesario alcanzar o superar para producir una explosión. Una chispa de un circuito eléctrico o hasta el calentamiento de un equipo instalado en un ambiente explosivo pueden considerarse como fuentes de ignición y, consecuentemente, producir una explosión. Considerando los límites de explosión del  $CH_4$ , es posible establecer un rango de inflamabilidad o explosividad para las relaciones aire-combustible y también para los gases inertes presentes en el biogás. El límite de explosividad para la mezcla del metano con aire atmosférico se encuentra entre 4,4%<sub>(v/v)</sub> (límite inferior de explosividad) y 15%<sub>(v/v)</sub> (lími-

te superior de explosividad) de contenido de  $CH_4$  (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008). El aumento de la concentración de gases inertes, tales como el  $N_2$  y el  $CO_2$ , provoca que este rango se vaya reduciendo, hasta un punto en el que los límites inferior y superior de explosividad se igualan, cuando la mezcla posee 58% de  $N_2$  (o aproximadamente 11,6% de oxígeno) (BRASIL, 2017a).

### 3 POSIBLES MEJORAS RELACIONADAS A LA PRODUCCIÓN Y RECUPERACIÓN DEL BIOGÁS

En este apartado se presentan las posibles mejoras en términos de diseño, de construcción y de operación del sistema de colecta y transporte del biogás, que pueden contribuir para la viabilización de la recuperación y aprovechamiento energético de este subproducto.

#### 3.1 Diseño y construcción de los separadores trifásicos y de las líneas de gas

El diseño de un sistema de colecta de biogás en reactores UASB presenta particularidades debido a sus características especiales: bajo caudal y baja presión; presencia de humedad y material particulado; y potencial de corrosión. Esto causa que el diseño de las instalaciones de biogás sea diferente del de aplicaciones usuales de gases. Por este motivo, durante la fase de diseño se debe prestar atención a las demandas específicas del área de tratamiento de aguas residuales urbanas, al conceptualizar y hacer recomendaciones para el sistema de colecta de biogás. Es importante adoptar una postura rigurosa durante las fases de diseño y de construcción, tanto durante la redacción de las especificaciones técnicas como durante la ejecución e instalación de los dispositivos de colecta (por ejemplo: separador trifásico), elementos de transporte (por ejemplo: línea de gas) y unidades de tratamiento del biogás (por ejemplo: quemador). Debe darse una atención especial a los problemas de fugas en esos dispositivos, así como a la baja eficiencia de combustión en algunos tipos de quemadores de biogás.



Con respecto a los STFs, los cuales están más expuestos al proceso de corrosión, éstos deben ser confeccionados en materiales que presenten elevada resistencia (por ejemplo: fibra de vidrio) o ser revestidos contra la corrosión. De este modo se pretende minimizar la necesidad de paros del reactor UASB para mantenimiento, reduciendo los riesgos de accidentes y la pérdida de eficiencia en la captación del biogás. El concreto continúa siendo el material más utilizado, aunque las experiencias no siempre han sido satisfactorias, debido a problemas de fugas de gases y corrosión, además de constituir estructuras pesadas y voluminosas. Materiales no corrosivos, menos voluminosos y más livianos, como lona y fibra de vidrio, han sido utilizados como alternativas al concreto (CHERNICHARO, 2007). En el caso de los STFs confeccionados en lona plástica, la fijación final merece una atención especial, ya que no se debe permitir la concentración de esfuerzos de tensión en puntos aislados de la lona. De otro modo puede ocurrir la ruptura del material, perjudicando la sedimentación de partículas y la conducción del flujo de biogás hacia el interior del STF. Con respecto a los STFs en fibra de vidrio, el control del proceso productivo es esencial para garantizar su calidad. Además del cuidado en la especificación del material a utilizar, es imprescindible que los STF sean construidos respetando las directrices presentadas en la Parte 3 de esta Colección de NTs (LOBATO *et al.*, 2018).

En relación a las estructuras de concreto presentes en los reactores UASB, se aconseja que durante el proceso constructivo de los STFs, de los canales y de las canaletas del efluente, se seleccionen materiales que ofrezcan alta resistencia, baja porosidad y curado adecuado, minimizando la aparición de fisuras y de posibles fugas de biogás en la superficie de tales estructuras. Adicionalmente, se aconseja que la superficie de estas estructuras sea impermeabilizada con un material polimérico resistente a ácidos que presente coeficientes de dilatación iguales o superiores a los del concreto (BRASIL, 2017a).

En el caso de la línea de gas, las tuberías deben ser de acero inoxidable o de polietileno de alta densi-

dad (PEAD). Además, es esencial garantizar la adecuada estanqueidad de toda la línea con el fin de evitar emisiones fugitivas, así como caídas de presión en el sistema de colecta.

Antes del arranque del sistema, es esencial realizar pruebas de presión y estanqueidad en las líneas de colecta del biogás, STFs y tapas de inspección. Esto puede evitar futuros problemas como fugas, pérdidas significativas del potencial energético y emisiones difusas de gases de efecto invernadero ( $\text{CH}_4$ ) y odorantes ( $\text{H}_2\text{S}$ ). La realización de pruebas sencillas como la inyección de humo en el interior de los STFs; o pruebas más elaboradas como la presurización intencional de los reactores, pueden contribuir significativamente para la detección de fugas. Durante la operación de la PTAR, todo sistema de colecta y transporte del biogás debe ser constantemente inspeccionado para verificar su integridad y detectar posibles puntos de fuga. Adicionalmente, debe darse mantenimiento preventivo a todos los componentes presentes en la línea de biogás (por ejemplo: válvulas, filtros, medidores).

Cabe resaltar que durante la ejecución de las actividades de operación y mantenimiento de los reactores debe evitarse la entrada de aire a las cámaras y tuberías de gas, previniendo la formación de mezclas explosivas.

El control y el seguimiento del caudal de biogás producido deben ser realizados de manera continua, identificando variaciones bruscas que indiquen presencia de fugas en el separador trifásico o en las tuberías de colecta y transporte de biogás. Esta práctica también es útil para detectar irregularidades en el proceso de digestión anaerobia, los cuales, de forma inevitable, generan una pérdida de la capacidad de producción de biogás (BRASIL, 2017a).

En algunos tipos de reactores anaerobios, sobre todo en reactores de lecho fluidizado (RALFs), es posible encontrar dificultades para conducir el biogás de forma pasiva hasta los quemadores y/o gasómetros. En estos casos, la captación del biogás puede ser realizada con el apoyo de sopladores o compresores radiales, accionados por motores

eléctricos y siempre y cuando el proceso sea controlado y seguro. Para ello, los sopladores deben ser a prueba de explosión (poseer certificado para atmósferas explosivas – ATEX) y permitir una extracción controlada del biogás en función de su consumo y, principalmente, a partir de la lectura automática y simultánea de las concentraciones de oxígeno y de metano. Esto se debe a que la extracción del biogás debe realizarse de modo a evitar su contaminación con aire, evitando así la formación de mezclas explosivas en el interior de tuberías y de gasómetros.

### 3.2 Remoción controlada de nata en el interior del STF

El uso de separadores trifásicos equipados con mecanismo hidrostático para la remoción de nata son esenciales para la adecuada operación de los reactores UASB. La Parte 3 de esta Colección de NTs (LOBATO *et al.*, 2018) presenta una descripción detallada del proceso de remoción hidrostática de nata. Cabe resaltar que la definición de un protocolo para la remoción sistemática de este material es esencial para evitar su acumulación, espesamiento y solificación en el interior del STF, lo que imposibilitaría el funcionamiento adecuado del mecanismo de remoción hidrostática.

Algunos reactores UASB en operación poseen mecanismos para quebrar la nata, tales como una tubería sobre la cámara de gas del STF con orificios para lanzar chorros de agua. El uso de estos mecanismos busca corregir un problema asociado a la ineficiencia en establecer protocolos para el descarte del material flotante que tiende a solidificarse en el interior del STF, como se mencionó anteriormente. Las tuberías de agua, como en el caso de los mecanismos quebradores de nata, pueden convertirse en puntos de escape de biogás, especialmente cuando no están llenas con agua. La instalación de llaves de PVC (válvulas quebradoras de nata) en esas líneas puede ser una opción para minimizar las

emisiones fugitivas de biogás. Sin embargo, se insiste en la recomendación de establecer una frecuencia adecuada para la remoción del material flotante, lo que evitaría la necesidad de instalar mecanismos quebradores de nata.

### 3.3 Reducción de la entrada de agua pluvial en el alcantarillado sanitario

Reducir la entrada de agua pluvial en la red de alcantarillado sanitario es muy relevante para las PTARs, ya que ésta puede influir sobre el proceso de tratamiento anaerobio, como se mencionó anteriormente.

El uso de materiales, juntas y técnicas apropiadas durante la etapa constructiva de las redes colectoras, así como la inspección de puntos críticos en la red, pueden contribuir significativamente para la reducción de las conexiones ilícitas de agua de lluvia y la reducción de la tasa de infiltración.

Programas de conscientización de usuarios y usuarias junto con una fiscalización rigurosa en el momento de realizar conexiones a la red son estrategias cruciales para intentar evitar, o al menos reducir, el número de conexiones ilícitas. Lo anterior debido a que no es extraño que, con el fin de reducir los costos constructivos, los propietarios terminen unificando la red de agua pluvial con la red interna de aguas residuales, lo que inevitablemente trae un impacto a todo el sistema de tratamiento de aguas residuales y, más particularmente, la caída de la producción de biogás.

En PTARs alimentadas por extensas redes de alcantarillado sanitario, en las que haya incluso estaciones de bombeo de aguas residual distribuidas a lo largo de su extensión, se recomienda, en la medida de lo posible, dar seguimiento individual a cada tramo, así como verificar el caudal de contribución de cada una de esas estaciones de bombeo. Tales medidas facilitarían la identificación de tramos de la red de alcantarillado sanitario con mayor tasa de infiltración y/o contribución de agua pluvial.

### 3.4 Control de las emisiones fugitivas de CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S

La recuperación del CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S disueltos en efluentes de los reactores UASB es una práctica importante y una preocupación más reciente que viene ganando notoria atención en los medios técnico y científico. En la Parte 4 de esta Colección de NTs (BRANDT *et al.*, 2018) se abordaron importantes aspectos relacionados al origen y a los problemas de emisiones gaseosas, enfocándose en las cuestiones asociadas a olores y corrosión. Se proveyeron medidas para la gestión de las emisiones fugitivas y residuales, tanto preventivas como correctivas y todas ellas aplicables tanto al control del H<sub>2</sub>S como al de las emisiones fugitivas de CH<sub>4</sub>. Las soluciones propuestas consisten en el confinamiento de ambientes con el tratamiento de los gases extraídos de esos locales o, eventualmente, la utilización de técnicas más avanzadas para la recuperación del metano disuelto.

Una de las técnicas probadas más recientemente para la recuperación de metano disuelto consiste en un sistema operando a vacío, cuya evaluación fue recientemente realizada en el Estado de Paraná (Brasil). El principio de funcionamiento de este sistema se basa en la separación líquido-gas por medio de la reducción de la presión. Para ello se colecta y envía al sistema el efluente del reactor anaerobio en el interior del compartimiento de sedimentación, considerando que según Nelting *et al.* (2017), a mayor profundidad en el reactor anaerobio se tendrá mayor concentración de CH<sub>4</sub> disuelto. Este sistema de recuperación de CH<sub>4</sub> disuelto está constituido por una torre, una bomba a vacío, sensores de caudal, de presión y de compuestos gaseosos. El diseño de la torre debe considerar la determinación del diámetro, de la altura, del caudal de efluente a tratar y la pérdida de carga. Estructuralmente, la torre está compuesta por dos tubos concéntricos, de modo que una presión negativa es aplicada en la región anular. El proceso de recuperación del metano disuelto inicia con la introducción del efluente en la parte inferior del tubo interno. Éste vierte una fina lámina de agua en la parte superior, de modo a aumentar el área superficial de contacto entre las fa-

ses. El metano se separa de la fase líquida debido a la diferencia de presión parcial líquido-gas y es recuperado en la parte superior de la torre, donde hay sensores que miden el caudal y la composición de los gases de salida. Finalmente, el efluente líquido parcialmente desgasificado es direccionado hacia una caja de distribución de flujo conectada a las unidades de tratamiento posteriores. Los estudios realizados en escala de demostración arrojaron tasas de recuperación de CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S disueltos del orden de 75% y 50%, respectivamente, ratificando el potencial de aplicación de esta solución.

### 3.5 Instalación de quemadores de biogás

Según se discutió en la Parte 4 de esta Colección de NTs (BRANDT *et al.*, 2018), en lo que se refiere al confinamiento de la llama existen dos tipos de quemadores: abierto y cerrado.

Los quemadores abiertos son los más comunes debido a su bajo costo de inversión y facilidad de instalación. Sin embargo, por no poseer ningún tipo de protección, la quema es influenciada directamente por la intemperie, lo que afecta su eficiencia, la cual termina siendo típicamente inferior a 50%. Por esta razón se recomiendan únicamente para PTARs de pequeño porte, donde los criterios de destrucción del CH<sub>4</sub> y de compuestos odorantes no sean una prioridad. Alternativamente, estos quemadores pueden ser utilizados como elemento de reserva en plantas de tratamiento que relicen un aprovechamiento energético del biogás, operando únicamente para los momentos en los que se paren los equipos de transformación energética del biogás. Para el adecuado funcionamiento de los quemadores abiertos se recomienda que los siguientes accesorios se incorporen en sus estructuras: protección contra viento, lluvia y sistema de ignición automática.

Por otro lado, los quemadores cerrados se recomiendan para PTARs que requieran una elevada eficiencia de destrucción de CH<sub>4</sub> y de compuestos odorantes. La eficiencia de destrucción de com-

puestos gaseosos en los quemadores cerrados supera el 99% (KAMINSKI, 2018). Por otro lado, su costo de inversión inicial es entre 15 a 20 veces mayor al de los quemadores abiertos. Además, su instalación requiere de controles complementarios para garantizar su correcto funcionamiento, como control de caudal y de presión y, en algunos casos, hasta un sistema de almacenamiento del biogás. Debe señalarse que los quemadores cerrados también pueden ser utilizados como tratamiento complementario para los gases residuales, como una alternativa a los biofiltros.

Con el fin de minimizar las emisiones de GEI y de gases odorantes es importante, siempre que sea posible, realizar una evaluación técnico-económica de la posibilidad de substituir los quemadores de biogás abiertos por quemadores cerrados, con-

siderado la mayor eficiencia de quema de estos últimos.

### 3.6 Instalación de medidores de caudal y monitoreo de la composición del biogás

La cantidad de PTARs que dan seguimiento continuo a la producción del biogás en reactores anaerobios es limitada, pues una parte importante de los métodos tradicionales de medición consumen mucho tiempo y tienen un elevado costo de análisis. Sin embargo, con nuevas tecnologías surgiendo en el mercado, particularmente aquellas relacionadas a las áreas de electrónica y monitoreo remoto de procesos, la medición *in situ* y en tiempo real de la producción de biogás en reactores UASB es cada vez más factible.

Los medidores de biogás más importantes, junto con sus respectivas ventajas y desventajas, se presentan en el Cuadro 1.

**Cuadro 1** – Ventajas y desventajas de las principales tecnologías para medición de caudal de biogás

Tipo	Ventajas	Desventajas
Medidor ultrasónico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buenos resultados en baja presión;</li> <li>• Sin partes móviles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Larga distancia de tramo recto necesaria;</li> <li>• Costo elevado.</li> </ul>
Medidor vórtex	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin partes móviles;</li> <li>• Elevada precisión;</li> <li>• Resistente a la corrosión</li> <li>• Baja pérdida de carga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Larga distancia de tramo recto necesaria;</li> <li>• Necesitan mediciones complementarias de temperatura y presión.</li> </ul>
Medición por medio de presión dinámica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada durabilidad;</li> <li>• Poca influencia de gases sucios;</li> <li>• Variaciones de presión no influyen negativamente en la precisión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabaja mejor a alta presión;</li> <li>• Difícil calibración;</li> <li>• Error de 1,5 a 5%;</li> <li>• Larga distancia de medición.</li> </ul>
Fluidistor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin partes móviles;</li> <li>• Elevada precisión;</li> <li>• Bajo costo;</li> <li>• Fácil de limpiar, manipular y cambiar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cálculo de caudal complejo;</li> <li>• Error de 1,5%;</li> <li>• Sensible a vibraciones.</li> </ul>
Medidor de turbina	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo de inversión;</li> <li>• Tecnología de medición simple.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depósitos de sólidos causan problemas;</li> <li>• Mantenimiento costoso y rutinario;</li> <li>• Baja resolución.</li> </ul>
Medidor máscico por dispersión térmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil instalación;</li> <li>• Bajo costo de inversión;</li> <li>• Baja pérdida de carga;</li> <li>• Recomendado para control de procesos;</li> <li>• Mediciones precisas incluso en condiciones de fluctuación de presión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensible a la humedad y a las partículas del gas;</li> <li>• Larga distancia de tramo recto necesaria;</li> <li>• Calibración requiere gas patrón;</li> <li>• En caso de que el fluido varíe su composición a lo largo de la medición, su caudal debe ser corregido.</li> </ul>

Fuente: adaptado de BRASIL (2017a).

Además de la cuantificación de la producción de biogás en reactores anaerobios, se recomienda el monitoreo regular de la composición de este gas, particularmente del CH<sub>4</sub>, ya que éste define el potencial de recuperación energética. Adicionalmente, conocer la concen-

tración de CH<sub>4</sub> puede servir para supervisar y controlar el proceso de degradación anaerobia que ocurre en el interior del reactor. Las concentraciones de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y O<sub>2</sub> también pueden ser monitoreadas para apoyar en el control operacional del proceso.

Aunque la composición del biogás pueda ser evaluada con gran precisión en el laboratorio (con el utilización de cromatógrafos gaseosos, por ejemplo), en la actualidad también es posible determinarla en tiempo real con la ayuda de equipos portátiles y/o sensores de proceso. En este sentido, los sensores ópticos con doble rayo (*dual ray*) que operan en el rango infrarrojo han venido siendo utilizados para determinar las concentraciones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> y las células electroquímicas para la medición de las concentraciones de H<sub>2</sub>S y O<sub>2</sub>.

Aunque la toma de decisiones relacionadas al manejo y aprovechamiento energético del biogás en PTARs deba basarse en resultados de mediciones en campo, muchas veces éstas no son realizables. En estos casos, las decisiones deben tomarse a partir de estimaciones de modelos matemáticos. Entre los modelos disponibles, el propuesto por Lobato *et al.* (2012) ha sido utilizado por investigadores y administradores de PTARs para estimar la producción de biogás en estos sistemas. El modelo en cuestión considera condiciones probables para los fenómenos físicos, químicos y biológicos dentro del reactor, haciendo que los resultados de sus estimaciones presenten desviaciones estadísticas menores a los valores medidos en campo. Los rangos para algunas relaciones unitarias obtenidas a partir de el modelo propuesto por Lobato *et al.* (2012) son:

- Volumen unitario de CH<sub>4</sub> producido: 6,8 a 13,7 NL·hab<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> y 42,2 a 81,3 NL·m<sup>-3</sup>agua.
- Volumen unitario de biogás producido: 9,8 a 17,1 NL·hab<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> y 60,3 a 101,6 NL·m<sup>-3</sup>agua.
- Potencial energético unitario: 0,4 a 0,8 kWh·m<sup>-3</sup>agua y 7,0 a 8,0 kWh·Nm<sup>-3</sup>biogás.

Cabe destacar que las relaciones unitarias presentadas anteriormente son valores de referencia. Para una estimación más precisa de las tasas de producción de biogás y de CH<sub>4</sub> en reactores UASB alimentados con aguas residuales urbanas se sugiere la utilización del programa informático ProBio – Programa de Estimación de Producción de Biogás en Reactores UASB. La versión 1.0 del

ProBio considera el balance de masa propuesto por Lobato *et al.* (2012). El programa es gratuito y está disponible para descargar en la siguiente dirección electrónica (en portugués): <http://etes-sustentaveis.org>.

### 3.7 Clasificación de atmósferas explosivas e identificación de espacios confinados

Los principales objetivos de la identificación de áreas con riesgo de generación de atmósferas explosivas están dirigidos a eliminar la probabilidad de que se generen ambientes explosivos alrededor de una fuente de ignición. Para clasificar estas áreas es necesario contar con, al menos, una vista en planta del sitio a evaluar donde se muestren las tuberías, reactores, paneles de instrumentación, equipos, entre otros dispositivos. Con esta información se deben identificar todas las fuentes de riesgo de liberación de gas inflamable en la PTAR, así como la condición de ventilación de estas fuentes.

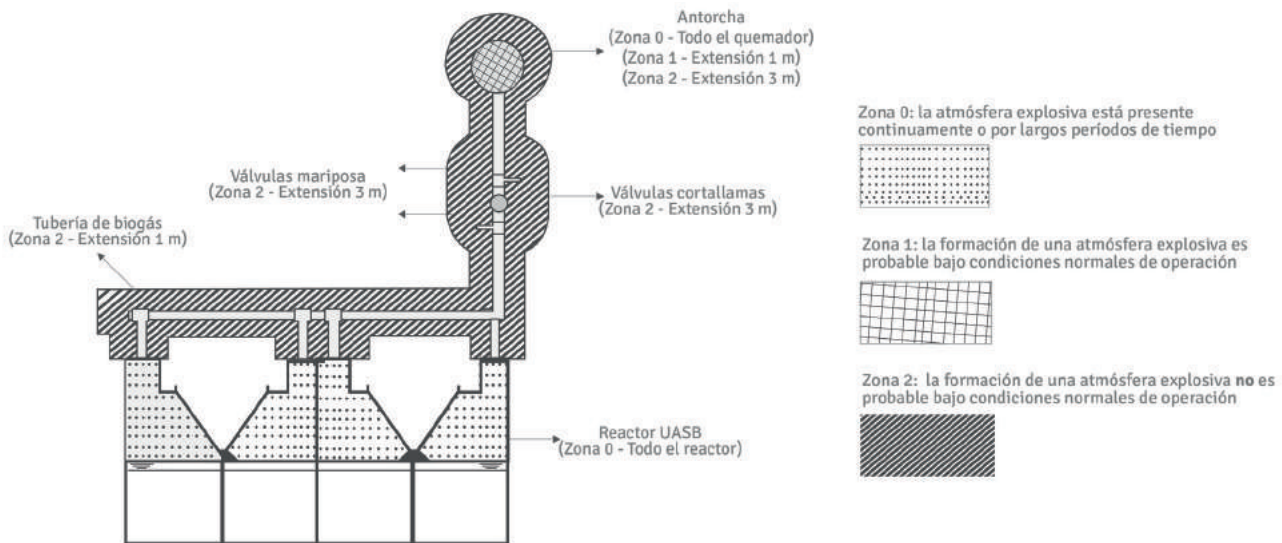
Las áreas clasificadas como atmósferas explosivas deben ser divididas en zonas de riesgo, basándose en la frecuencia de ocurrencia y duración de una atmósfera explosiva. De este modo, las zonas pueden ser divididas en (NBR IEC 60079-10-1) (ABNT, 2009): i) zona 0 – área en la cual una atmósfera explosiva de gas está presente de modo continuo o por largos períodos de tiempo; ii) zona 1- área en la cual una atmósfera explosiva de gas puede ocurrir de modo ocasional en condiciones normales de operación; y iii) zona 2 – área en la cual la formación de una atmósfera explosiva de gas no es probable en condiciones normales de operación, y si se diera, se mantendría por periodos cortos de tiempo.

En condiciones normales de operación, para PTARs con producción de biogás, el gasómetro, el reactor y el quemador puede ser clasificados como zona 0. Equipos instalados en la PTAR, tales como válvulas de alivio de presión,

válvulas corta-llama y sellos hidráulicos, con riesgo de liberación de gas inflamable durante su operación normal, pueden ser catalogados como zona 1. Flanges, conexiones y accesorios de tuberías pueden clasificarse como zona 2 (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008). En la Figura 5 se presenta un ejemplo de mapa esquemático de las zonas de riesgos identificadas en una PTAR con reactor anaerobio.

Además del mapeo de las áreas clasificadas, también es necesario identificar, aislar y señalar los espacios confinados existentes en la PTAR, de forma a gestionar el riesgo de las ac-

tividades que se desarrollen en esos sitios. De entre accidentes más propensos a ocurrir en espacios confinados destacan la asfixia e intoxicación ocasionados por la presencia de gases en el interior del ambiente de trabajo. Para reducir el riesgo asociado a estos accidentes se recomienda realizar mediciones de gases antes y durante el trabajo (BRASIL, 2006). Los principales instrumentos y equipos de medición de gases que deben ser utilizados en estos ambientes son: i) cromatógrafo; ii) detector multigás; iii) oxímetro; iv) explosímetro; y v) oxioxplosímetro.



**Figura 5** – Mapa esquemático de las zonas de riesgo de explosión en una PTAR con reactor anaerobio.

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

### 3.8 Análisis de viabilidad técnico-económica de la destrucción del metano con aprovechamiento energético

El uso del biogás para fines energéticos está ampliamente establecido en la literatura. La Guía Brasileña de Aprovechamiento Energético de Biogás en PTARs reúne los requisitos técnicos necesarios para implantar sistemas de recuperación energética de biogás (BRASIL, 2016). Los avances obtenidos en el país, en especial durante la ejecución del proyecto Brasil-

-Alemania de Fomento al Uso Energético de Biogás en Brasil (Probiogás), mostraron casos exitosos y con potencial de ser replicados (MOREIRA, 2017).

Por ejemplo, algunos estudios sostienen que PTARs diseñadas para servir a poblaciones entre 100.000 y 200.000 habitantes tendrían condiciones de usar el biogás para generación de calor y electricidad, con tasas internas de retorno entre 8 y 25%. Para PTARs con capacidad para servir a poblaciones entre 200.000 y 450.000 habitantes, esas tasas podrían

alcanzar hasta 80% (VALENTE, 2015). Para PTARs con baja capacidad de producción y recuperación de metano, en los que la viabilidad económica del uso de equipos para generación mixta de calor y electricidad es poco probable, la principal opción de aprovechamiento energético es la combustión directa con recuperación de energía térmica.

Los criterios para tomar decisiones en torno al uso del biogás deben ser evaluados individualmente y están asociados a aspectos como el potencial de generación de energía eléctrica (íntimamente relacionado con el tamaño de la PTAR), los requisitos de higienización/secado térmico del lodo, la demanda energética de la PTAR, la vocación regional, la tarifa de energía eléctrica, entre otros (BRASIL, 2017b; ROSENFELD *et al.*, 2015). Sin embargo, debe destacarse que existe un movimiento creciente en el país, aún incipiente, que apoya el uso de herramientas de soporte para la toma de decisiones que consideren variables económicas y no solamente financieras. Por ejemplo, algunos prestadores de servicios de saneamiento están planeando orientar sus futuras acciones de acuerdo a un plan de reducción de emisiones de GEI (CARVALHO & POSSETTI, 2017), con el objetivo de contribuir con metas estratégicas establecidas por el gobierno brasileño y pactadas internacionalmente.

Por este motivo, considerando que la recuperación energética del biogás en PTARs con reactores UASB es prometedora, la adopción de las buenas prácticas de ingeniería descritas en esta NT puede considerarse como un requisito indispensable para promover un mejor desempeño económico y financiero para las iniciativas de esta naturaleza.

#### 4 CONSIDERACIONES FINALES

Aun cuando la recuperación de biogás proveniente de reactores UASB es una tendencia importante en el sector de saneamiento brasileño, hay una serie de problemas originados en el diseño, la construcción y la operación de estos sistemas que requieren ser corregidos para impulsar la valorización

energética de este subproducto y la reducción de las emisiones de metano.

La adopción de las buenas prácticas de ingeniería descritas en esta NT, las cuales son respaldadas por la literatura y la experiencia de los autores, colaboran para incrementar las tasas de biogás con posibilidades de ser aprovechadas, maximizando el potencial de producción de energía limpia y renovable, mitigando las emisiones de gases de efecto invernadero y odorantes y protegiendo la infraestructura y la salud ocupacional de los operadores.

De entre los puntos de mejora mencionados sobresalen: el sellado y la estanqueidad de la cámara de gas y de las tuberías de biogás de los reactores UASB, la construcción de STFs apropiados, el control y la reducción del aporte de agua pluvial en el alcantarillado sanitario, la remoción controlada de la nata, la recuperación de CH<sub>4</sub> disuelto en el medio líquido, la instalación de quemadores de biogás eficientes, la medición y monitoreo de la producción de biogás y, finalmente, la clasificación de atmósferas explosivas.

Las experiencias de éxito conquistadas a partir de la adopción de todas estas mejoras todavía están en una etapa incipiente. Sin embargo, la implementación y la validación de cada una de las soluciones aquí descritas permite inferir que los futuros proyectos de recuperación energética de biogás que sigan estas directrices poseerán un mejor desempeño económico y financiero.

#### 5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Prof. Fabiana Lopes Passos Del Rei por su contribución para la estructuración inicial de esta Nota Técnica. Se agradece igualmente al apoyo recibido por parte 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 Aperfeiço-*

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

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

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

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

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

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

CABRAL, B. G. C. **Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário**. 2016, 139 p. Disertación (Maestría en Ingeniería Ambiental). Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

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

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Uni-

versidad Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).

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

CHERNICHARO, C.A.L, BRESSANI-RIBEIRO, T., PEGORINI, E., POSSETTI, G.R.C., MIKI, M. K., NONATO, S. 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.

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

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

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

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

LOBATO, L. C. S., BRESSANI-RIBEIRO, T., SILVA, B. S., FLÓREZ, C. A. D., NEVES, P. N. P., CHERNICHARO, C. A. L. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 3: Gestión del lodo y la nata. **Revista DAE** – edición especial, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

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

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

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



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

POSSETTI, G. R. C., JASINSKI, V. P., MESQUITA, N. C., KRIGUEL, K., CARNEIRO, C. Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico. In: **27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Goiânia, Brasil. Anais...** Goiânia, Brasil: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2013.

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

ROSENFELDT, S., CABRAL, C. B. G., PLATZER, C. J., HOFFMANN, H., ARAUJO, R.A. Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE. In: **28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Am-**

**biental, Rio de Janeiro, Brasil. Anais...** Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2015.

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

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil.** 2015. 182 p. Disertación (Maestría en Planificación Estratégica). Universidad Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

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

# Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 6: Calidad del efluente

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

- **Fecha de entrada:**  
01/08/2018
- **Fecha de aprobación:**  
17/09/2018

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

DOI: 10.4322/dae.2018.043es

### Resumen

La calidad del efluente de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs) que poseen reactores UASB como parte del tratamiento biológico de aguas residuales depende principalmente de aspectos del diseño, la construcción y la operación que permitan la adecuada gestión del lodo anaerobio, así como la adecuada operación de la etapa de post-tratamiento por procesos aerobios. La presente Nota Técnica expone un contenido complementario a la Parte 3 de esta Colección de Notas Técnicas, en el sentido de discutir el origen de los problemas y las posibles mejoras del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB seguidos de una etapa de postratamiento por filtros biológicos percoladores. Son discutidos: i) aspectos de diseño y operación que influyen en la pérdida de sólidos con el efluente anaerobio, incluyendo la influencia del envío de lodo aerobio a los reactores UASB; ii) aspectos asociados a los requisitos de vertido en cuerpos receptores; y iii) deficiencias en unidades de post-tratamiento por filtros biológicos percoladores. Se presta especial atención a: i) los aspectos de sistematización operacional para el control del lodo con el fin de evitar la pérdida de sólidos con el efluente; ii) la remoción de materia orgánica con el objetivo de cumplir con los límites de vertido; y iii) los factores que pueden influir en el desempeño de los filtros biológicos percoladores post-reactores UASB.

**Palabras clave:** Mejoría de la calidad del efluente, postratamiento, sistematización operacional.

### Abstract

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

**Paulo Gustavo Sertório de Almeida** – Ingeniero Civil de la Universidad Federal de Juiz de Fora (UFJF), Brasil. Máster y doctor en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la Universidad Federal de Minas Gerais (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).

**Thiago Bressani Ribeiro** – Ingeniera Ambiental y Sanitaria de la Universidad Fundação Mineira de Educação e 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 Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (*INCT ETEs Sustentáveis* por sus siglas en portugués).

**Bruno Sidnei da Silva** – Ingeniero Ambiental de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil. Master en Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad de São Paulo (USP), Brasil. Ingeniero de la Compañía de Saneamiento del Estado de São Paulo (Sabesp), Brasil.

**Lariza dos Santos Azevedo** – Ingeniera Ambiental y Sanitaria 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. 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).

**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 Tratamiento 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

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

**Keywords:** Effluent quality improvement; operational control; post-treatment.

## 1 INTRODUCCIÓN

Conforme a lo discutido en el conjunto de Notas Técnicas (NTs) que componen la presente colección, la calidad del efluente final de reactores UASB es influenciada por aspectos de diseño, construcción y operación, que pueden afectar también la etapa de postratamiento. En particular, el control de la **pérdida de sólidos con el efluente anaerobio** es un aspecto crucial para el desempeño global del sistema. En la presente NT, se da mayor énfasis a los filtros biológicos percoladores (FBP), por tratarse de la alternativa de postratamiento más utilizada en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (PTARs) brasileñas que utilizan reactores anaerobios como primera etapa de tratamiento (CHERNICHARO *et al.* 2018a). Sin embargo, los sistemas de lodo activado (LA) también son contextualizados en esta NT, debido a la importancia del envío de lodo aerobio proveniente de la etapa de postratamiento para espesado y digestión en los reactores UASB.

La sistematización operacional de los reactores UASB, en términos de control de pérdida de sólidos con el efluente, depende en gran medida de **decisiones del diseño**, por ejemplo: la previsión y detalle de adecuados sistemas de descarte de lodo y de nata. De igual forma, la consistencia entre la **producción efectiva de lodo** de la PTAR y el dimensionamiento de las **unidades de manejo de la fase sólida** es un importante factor en el éxito operacional de los sistemas con reactores UASB seguidos de una etapa de postratamiento. En consecuencia, la **elaboración e implementación efectiva de protocolos de descarte de lodo y de nata**

son las etapas de mayor relevancia para la operación exitosa de las unidades que componen la PTAR.

Con respecto a la influencia de la operación de la etapa de postratamiento en la calidad del efluente del reactor UASB y en las unidades de manejo de la fase sólida, a pesar de las ventajas asociadas al envío del lodo aerobio para espesamiento y digestión en los reactores UASB, esta estrategia ha sido señalada como una de las causas de pérdida de sólidos con el efluente.

La presencia excesiva de sólidos en el efluente anaerobio tiende a provocar una mayor resistencia a la transferencia de masa en sistemas con biopelícula, así como la reducción en el tiempo de residencia de la biomasa aerobia en sistemas de lodo activado. En casos extremos, se ha observado la colmatación de medios de soporte de piedra o grava en FBPs debido a una elevación en la carga de sólidos enviada con el efluente anaerobio. En el caso del postratamiento con lodo activado, una pérdida excesiva de sólidos con el efluente de los reactores UASB, asociada a una baja capacidad de descarte o purga de lodo aerobio excedente, se refleja en elevados requisitos de oxígeno en el tanque de aireación y en el consumo de energía.

Aunque el control de la pérdida de sólidos con el efluente anaerobio a partir de un manejo adecuado del lodo es un factor importante para la calidad del efluente de reactores UASB, otros aspectos también son relevantes para cumplir con los límites de vertido. Sobrecargas hidráulicas o picos de caudal debidos al aporte de aguas pluviales o fal-

las en la operación de estaciones de bombeo son ejemplos de factores que deben ser considerados.

Adicionalmente, la remoción de nitrógeno, fósforo y surfactantes no es esperada en reactores UASB. En este caso, la etapa de postratamiento puede ser necesaria no solamente para la mejora del efluente en términos de concentraciones de materia orgánica sino también para la remoción de esos compuestos. Sin embargo, deficiencias y fallas operacionales en relación a las unidades de postratamiento pueden comprometer el desempeño global del sistema.

Considerando los aspectos anteriormente reportados, la presente NT discute el origen de estos problemas y las posibles soluciones asociadas al diseño, la construcción y la operación de reactores UASB, incluyendo la etapa de postratamiento por FBPs. Considerando que varios aspectos para el perfeccionamiento del diseño y la operación de reactores UASB relacionados con la gestión de la fase sólida fueron abordados en la Parte 3 de esta Colección de NTs (LOBATO *et al.*, 2018), en este documento el enfoque sobre el control del lodo asume un carácter complementario en relación a: i) aspectos de diseño y operación que influyen en la pérdida de sólidos con el efluente anaerobio, considerando el envío de lodo aerobio hacia los reactores UASB; ii) aspectos asociados al incumplimiento de los límites de vertido en cuerpos receptores; y iii) deficiencias en unidades de postratamiento.

## 2 ORIGEN Y PROBLEMAS RELACIONADOS A LA PÉRDIDA DE SÓLIDOS EN EL EFLUENTE ANAEROBIO

### 2.1 Exceso de lodo en el interior de los reactores UASB

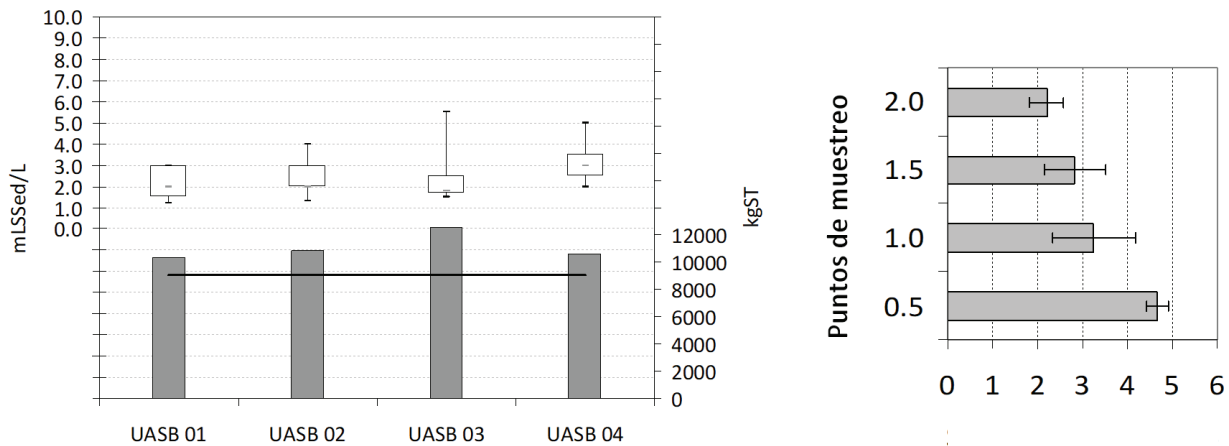
Conforme a lo abordado en la Parte 3 de esta colección de NTs (LOBATO *et al.*, 2018), con el fin de evitar la pérdida indeseable de sólidos con al efluente anaerobio, se debe limitar la masa de lodo en el interior del reactor UASB a un valor máximo, el cual depende de la capacidad de re-

tención de lodo en el reactor. Además de la masa máxima que debe ser almacenada en el reactor, también debe mantenerse una baja concentración de lodo (sólidos totales – ST) en el punto más elevado del compartimiento de digestión (concentración inferior a 0,5% ST).

A modo de ejemplo, en la Figura 1a se presentan las masas de lodo y las concentraciones de sólidos sedimentables en el efluente de cuatro reactores UASB de un mismo volumen y que integran una PTAR en escala plena. Al mismo tiempo, en la Figura 1b se presentan las concentraciones de lodo (ST - %) a lo largo de la altura del compartimiento de digestión de esas mismas cuatro unidades. Se observa que todos los reactores tienen una masa de lodo por encima de la máxima recomendada, definida específicamente para los cuatro reactores en el orden de 9.000 kgST (Figura 1a). Adicionalmente, también las concentraciones de lodo en el punto de muestreo más elevado (2,0 m del fondo de los reactores), están por encima de 0,5% ST (están en el orden de 2,5% ST - Figura 1b).

Como resultado, se verifica que los cuatro reactores UASB presentan elevadas concentraciones de sólidos sedimentables en el efluente (medias variando entre 2 e 3 mL.L<sup>-1</sup> - Figura 1a), lo que confirma que esos reactores tienen masas de lodo por encima de sus capacidades de almacenamiento. Cabe resaltar que los reactores UASB operados adecuadamente (sin exceso de lodo) pueden producir efluentes con concentraciones de sólidos sedimentables por debajo de 1 mL.L<sup>-1</sup>.

El origen del problema de exceso de lodo se encuentra usualmente relacionado a los siguientes aspectos: i) falta de capacidad de la unidad de deshidratación para recibir el lodo de descarte anaerobio; y/o ii) falta de protocolos sistematizados de descartes.



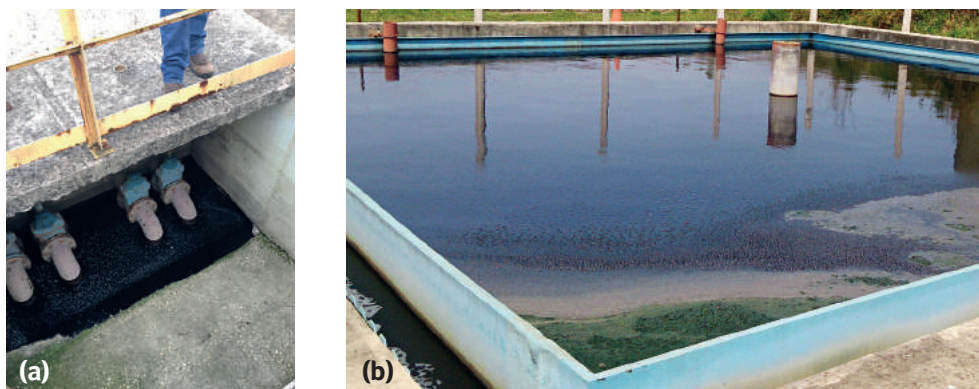
**Figura 1** – a) Relación entre la masa de lodo (kgST) en el compartimento de digestión y la concentración de sólidos sedimentables en el efluente de los reactores UASB ( $\text{mL.L}^{-1}$ ); b) perfil de sólidos a lo largo de la altura del compartimento de digestión de los reactores UASB.

## 2.2 Rutina inadecuada de envío de lodo aerobio a los reactores UASB

Conforme a lo presentado en la Parte 3 de esta Colección de NTs (LOBATO *et al.*, 2018), el envío de lodo aerobio excedente para espesamiento y digestión en reactores UASB ha sido señalado como una de las causas de pérdida de sólidos en el efluente de estos reactores. Existen varios informes de operadores de PTARs que relacionan esa pérdida de sólidos a las características del lodo aerobio, pues supuestamente tendría una composición diferente a la del lodo anaerobio y por lo tanto, tiende a flotar y a ser perdido con el efluente del reactor UASB. Por otro lado, estudios rigurosos en dos PTARs en escala plena indicaron buenas características de sedimentación del lodo aerobio enviado a los reactores UASB (CHERNICHARO *et al.*, 2013; FLORÍPEZ, 2015) y señalan que la causa de pérdida de sólidos con el efluente anaerobio estaría más bien relacionada a la ausencia de un protocolo adecuado para el manejo del lodo en la PTAR, considerando tanto el descarte de lodo de los reactores UASB como el envío de lodo aerobio de las unidades de pos-

tratamiento para espesamiento y digestión hacia los reactores anaerobios.

Esto se ratifica por el hecho de que diversas PTARs presentan serias dificultades en el manejo del lodo, siendo bastante común la presencia de significativos pasivos de lodo (exceso innecesario de lodo) tanto en los reactores UASB como en los sedimentadores secundarios de las unidades de postratamiento. En el caso particular de esas últimas unidades, es común encontrar concentraciones muy elevadas de ST en la etapa de sedimentación secundaria ( $\sim 4,0\%$ ), muy por encima de las concentraciones previstas en diseño ( $< 1,0\%$ ). Aunque tal condición parezca improbable, esa realidad ha sido observada recurrentemente, muy posiblemente por la contribución significativa de la fracción de lodo perdida con el efluente anaerobio que llega al sedimentador secundario, principalmente en el caso post-FBPs. Un indicio de que se trata de la acumulación de lodo anaerobio en los sedimentadores secundarios es la nítida producción de gases en la superficie de esas unidades. La Figura 2 ilustra el aspecto de la acumulación excesiva de lodo anaerobio en un sedimentador secundario post-FBP.



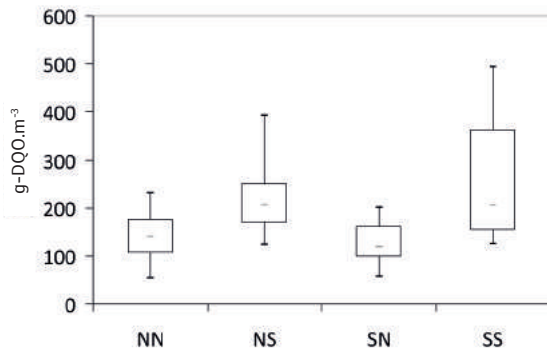
**Figura 2** – a) Lodo negro y concentrado descartado de sedimentador secundario de post-FBP; b) lodo flotando y burbujas de gas en la superficie del sedimentador secundario.

Entre las posibles razones para la excesiva acumulación de lodo anaerobio en los sedimentador secundario se pueden citar: i) falta de capacidad instalada en las unidades de deshidratación (mecanizadas o por lecho de secado); ii) largos períodos de mantenimiento de las unidades mecanizadas de deshidratación y/o limpieza de lechos de secado, lo que imposibilita el descarte de lodo excedente; y iii) dificultades logísticas asociadas al envío de lodo para la disposición final.

Frente a lo expuesto, con el fin de eliminar el pasivo de lodo acumulado en los sedimentadores secundarios, los caudales de lodo enviados a los reactores UASB acostumbra ser significativamente mayores (cerca de cuatro veces más elevada) en comparación a los caudales que serían enviados si el lodo en los sedimentadores secundarios tuviera la concentración prevista de diseño, o sea inferior a 1,0% ST. Adicionalmente, estos caudales de envío de lodo muchas veces son recirculados en lotes (*batches*) típicamente cortos (de pocas horas), usualmente coincidentes con momentos de caudales afluentes de agua residual elevados, lo que tiende a ocasionar: i) incremento de las velocidades ascensionales en los reactores UASB, lo que a su vez puede provocar mayor pérdida de sólidos con el efluente; y ii) reducción significativa en la capacidad de almacenamiento de lodo en los reactores UASB en función de sobrecarga de

sólidos recibida. Por lo tanto, en el caso de que no haya remoción de los pasivos de lodo en los sedimentadores secundarios y en los reactores UASB, este lodo acabará por retornar, de forma cíclica a los FBPs, a los sedimentadores secundarios, y nuevamente a los reactores UASB.

Un ejemplo práctico que demuestra el impacto del envío de lodo aerobio proveniente de sistemas de lodo activado para reactores UASB, como consecuencia del inadecuado manejo de lodo en los reactores anaerobios, se presenta a continuación: a partir de concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) efluentes de un reactor UASB obtenidas para diferentes escenarios operacionales (Figura 3), se observa que cuando el lodo del fondo del reactor UASB no fue removido del compartimiento de digestión (condiciones NN y SN), el envío de lodo aerobio para el reactor UASB prácticamente no ejerce influencia en la calidad del efluente anaerobio. Cuando la remoción de lodo del fondo del reactor UASB fue efectuada, hubo incremento de las concentraciones efluentes de DQO, aún sin el envío de lodo aerobio (condición NS). Después del envío de lodo aerobio, una mayor variabilidad de las concentraciones de DQO (condición SS) fue observada. Se resalta que las mismas tendencias para concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) fueron observadas.



**Figura 3** – Influencia del envío de lodo aerobio y descarte de lodo anaerobio del fondo, en las concentraciones efluentes de DQO y SST del reactor UASB. Las siglas N (no); S (sí) se refieren al envío de lodo aerobio para el reactor UASB y remoción de lodo del fondo del UASB, respectivamente.

Fuente: Adaptado de Silva (2018).

En última instancia, el estudio de casos con sistemas UASB seguidos por un sistema de lodo activado muestra que el éxito operacional del envío de lodo aerobio depende de dos aspectos: i) compatibilidad entre criterios operacionales para el control de la edad de lodo en el tanque de aireación y para el envío de lodo aerobio; y ii) sistematización operacional para el descarte de lodo de exceso de reactores UASB con el fin de mantener lodo de mayor sedimentación en el fondo de la unidad.

### 2.3 Estrategia de control de la edad de lodo aerobio en sistemas de lodo activado

La remoción de lodo aerobio excedente para controlar la edad de lodo en los sistemas de lodo activado puede ser realizada por medio de dos alternativas: i) por la remoción de la fracción de lodo activado directamente del tanque de aireación (opción conocida como “descarte hidráulico”); o ii) por la remoción de la fracción de lodo sedimentado en los sedimentadores secundarios. Las dos alternativas presentan ventajas y desventajas en relación al control de edad del lodo en el tanque de aireación y para el envío del lodo aerobio excedente a los reactores UASB para el espesamiento y digestión:

- *Envío del lodo aerobio excedente directamente del tanque de aireación.* Con el uso de esta alternativa, la concentración del lodo descartado es igual a la concentración de sólidos en el tanque de aireación. En este caso, el control de la edad del lodo es más simple, siendo una razón entre el volumen del reactor (tanque de aireación) y el volumen del lodo removido diariamente. Tomando en cuenta que el lodo aerobio excedente es enviado hacia el reactor UASB a partir del tanque de aireación, el volumen de lodo enviado tiende a ser mayor (cerca del doble), en comparación con la estrategia del envío de lodo aerobio de exceso de los sedimentadores secundarios.

- *Envío de la fracción de lodo sedimentado en el fondo de los sedimentadores secundarios.* En este caso, el control de la edad del lodo es realizado a partir de la concentración de sólidos en suspensión volátiles en el tanque de aireación y del lodo sedimentado en los sedimentadores secundarios (lodo de recirculación). A pesar de la mayor complejidad para la determinación de la edad de lodo, el lodo excedente es enviado a los reactores UASB a partir de la línea de recirculación de los sedimentadores secundarios y, por lo tanto, en menor volumen debido a la mayor concentración en términos de sólidos.

Por lo tanto, el criterio adoptado para el control de la edad del lodo en el tanque de aireación altera el volumen de lodo enviado a los reactores UASB para su espesamiento y digestión. El envío de mayores volúmenes de lodo a los reactores UASB puede influir en la calidad del efluente anaerobio, principalmente durante los picos de caudal afluente a la PTAR.

Sin embargo, se resalta que para cualquier alternativa adoptada, si el lodo excedente aerobio enviado a los reactores UASB es arrastrado para la superficie y perdido con el efluente del reactor, esto causará un descontrol de la edad del lodo activado porque parte del lodo considerado como retirado del proceso acaba regresando al tanque de aireación.

## 2.4 Fuga de gases del interior del Separador Trifásico (STF) hacia el compartimiento de sedimentación

Tal como se abordó en la Parte 3 de esta colección de NTs (LOBATO *et al.*, 2018), la ausencia de una remoción sistemática de la capa de nata que se acumula en el interior del separador trifásico puede llevar al espesamiento y solidificación del material acumulado. Esto produce el bloqueo parcial o integral de la interfase de liberación de gases formados durante la digestión anaerobia. De esta forma, el flujo gaseoso que ingresaría a la cámara de gas del separador trifásico tiende a escapar hacia el compartimiento de sedimentación de los reactores UASB, ocasionando el arrastre de sólidos que retornarían al compartimiento de digestión, comprometiendo la calidad del efluente anaerobio en términos de concentración de SST. En sistemas que utilizan unidades de postratamiento, la frecuente sobrecarga de sólidos puede resultar en problemas de obstrucción y colmatación, especialmente en reactores de biomasa adherida (por ejemplo: filtros biológicos percoladores y wetlands). El uso de separadores trifásicos equipados con dispositivos de remoción de nata (por ejemplo: el mecanismo hidrostático propuesto por Lobato *et al* (2018)) es crucial para la mitigación de la fuga de gases del interior del STF hacia el compartimiento de sedimentación de los reactores UASB.

## 2.5 Desnivel de vertedores y acumulación de nata en la superficie de sedimentadores

El desnivel de los vertedores instalados en las canaletas de salida del efluente anaerobio es un factor importante para la acumulación de nata en la superficie del compartimiento de sedimentación de los reactores UASB. En principio, el desnivel tiende a crear un camino preferencial para el efluente tratado y la acumulación progresiva de nata en zonas hidráulicas muertas (sitios donde son observados menores flujos en los vertedores). En estas zonas muertas, el flujo del líquido parece no garantizar la salida permanente de fracciones particuladas con el efluente, habiendo por lo tanto, acumulación de material flotante (Figura 4).

La acumulación de nata en la superficie de los compartimientos de sedimentación se puede reflejar en el deterioro de la calidad del efluente anaerobio debido a la elevación de las concentraciones de sólidos.



**Figura 4** - Acumulación de nata como consecuencia de vertedores desnivelados.

## 2.6 Sobrecargas hidráulicas y picos excesivos de caudal

Sobrecargas hidráulicas y picos excesivos de caudal pueden provocar la expansión excesiva del manto de lodo en la cámara de digestión de los reactores UASB, con la consecuente sobrecarga de los compartimientos de sedimentación y pérdida excesiva de sólidos con el efluente anaerobio. Eventos de sobrecargas hidráulicas y de picos de caudal (gran amplitud de variación entre caudales máximos y mínimos) pueden estar relacionados a cuatro situaciones principales: i) ingreso excesivo de aguas pluviales; ii) caudales de bombeo no consistentes con los caudales promedios y máximos utilizados en el diseño de los reactores anaerobios, conforme lo abordado en la Parte 2 de esta Colección de NTs (BRESSANI-RIBEIRO *et al.*, 2018); iii) contribuciones provenientes de comunidades muy pequeñas (por ejemplo: ciudades con poblaciones inferiores a 2.000 habitantes), que tienden a presentar hidrogramas con picos de caudal con grandes desvíos en relación a su caudal promedio de diseño; y iv) condiciones inadecuadas de envío de lodo aerobio de sedimentadores secundarios



de la unidad de postratamiento para el espesado y digestión en los reactores UASB, conforme lo discutido anteriormente.

### 3 POSIBLES SOLUCIONES RELACIONADAS A LA PÉRDIDA DE SÓLIDOS EN EL EFLUENTE ANAERÓBIO

#### 3.1 Existencia de puntos de muestreo de lodo en los reactores UASB

Conforme a lo detallado en la Parte 3 de esta Colección de NTs (LOBATO *et al.*, 2018), la presencia de puntos de muestreo de lodo adecuadamente posicionados a lo largo de la altura del compartimiento de digestión de reactores UASB es esencial para que el operador tenga mejores condiciones de evaluar si el reactor se encuentra con exceso de lodo (pasivo) en su interior. Entiéndase que la masa de lodo excedente es la diferencia entre la masa de lodo actual en el reactor UASB (determinada a partir de la implementación del perfil de sólidos en el compartimiento de digestión) y la masa de lodo a ser mantenida en el sistema (masa de lodo entre la masa mínima y máxima, conforme lo discutido en Lobato *et al.*, (2018)).

Es de particular interés un muestreo sistemático de lodo en el punto más elevado del compartimiento de digestión, localizado inmediatamente antes del deflector de gases. Según lo destacado por Lobato *et al.* (2018) en el ítem “Definición de cantidades de lodo a ser mantenidas y a ser descartadas del reactor”, la concentración de lodo en ese punto más elevado de muestreo debe estar siempre por debajo de 0,5% ST.

#### 3.2 Sistematización de procedimientos y rutinas operacionales para la gestión del lodo

Además de las recomendaciones para la gestión de lodo producido en los reactores UASB, descritas en la Parte 3 de esta Colección de NTs (LOBATO *et al.*, 2018), los procedimientos y rutinas operacionales para el adecuado manejo de lodo produ-

cido en las unidades aerobias de postratamiento (FBPs y lodo activado) deben ser detalladas en los manuales o directrices de operación. Para ello, es imprescindible que se considere en el contrato de diseño la necesidad de elaborar tales documentos, sistematizando la gestión de lodo en la PTAR.

#### *(i) Gestión del lodo y control simultáneo de la calidad del efluente de reactores UASB*

Conforme a lo mencionado anteriormente, la calidad del efluente de los reactores UASB en términos de concentración de sólidos suspendidos está estrictamente asociada a la masa de lodo anaerobio presente en el compartimiento de digestión de tales unidades. Los datos producidos en términos de concentraciones de parámetros físico-químicos deben ser organizadas en hojas de cálculo (por ejemplo: en el programa Microsoft Excel), no solamente para fines de mantenimiento de la base de datos, sino para efectivamente dar sustento al control operacional del sistema de tratamiento de aguas residuales de forma continua. Sin embargo, en muchos casos los datos de perfil de lodo (en términos de sólidos totales y volátiles) no son sistemáticamente utilizados, y su correlación simultánea con datos de calidad del efluente tiende a ser todavía menos recurrente.

*Masa de lodo y concentración efluente de sólidos sedimentables.* La determinación de la masa de lodo en el compartimiento de digestión es de fundamental importancia para la previsión de una rutina de descarte de lodo de exceso. La frecuente determinación de la concentración de sólidos sedimentables debe ser igualmente considerada con el fin de dar seguimiento a la calidad del efluente del reactor UASB en función del control de la masa de lodo mantenida en el reactor.

*Frecuencias recomendadas para la caracterización de la masa de lodo en los reactores UASB y concentraciones efluentes de sólidos sedimentables.* El plan de descarte de lodo de los reactores UASB es basado en perfiles de ST implementados a partir del muestreo de lodo a lo largo del compartimiento de di-

gestión. En principio, el muestreo y la posterior elaboración de perfiles de lodo deberían ser realizadas con base en el crecimiento efectivo (u operacional) del lodo en el interior de los reactores UASB. En este caso, los perfiles de lodo y cuantificación de lodo de exceso (lodo a ser descartado) serían ejecutados en el momento en que la masa estimada de lodo en el compartimiento de digestión exceda ligeramente la masa de lodo recomendada para el período operacional en función de la carga de materia orgánica que ingresa al sistema con el agua residual cruda. Como última instancia, adoptando tal estrategia se garantizará la compatibilidad entre el dimensionamiento de las unidades de deshidratación y la producción de lodo estimada en diseño ( $Y_{\text{lodo}}$ ). La estimación de volúmenes de lodo de deshidratación es presentada en la Parte 3 de esta Colección de NTs (LOBATO *et al.* 2018).

Se recomienda que el área del laboratorio y el personal de operación de la PTAR sean definidos de modo a proveer las condiciones de implementación de perfiles de ST para cada reactor UASB con la siguiente frecuencia: i) cada 15 días, en el caso de reactores UASB sin recepción de lodo aerobio de la unidad de postratamiento; y ii) un perfil por semana por reactor, en el caso de PTAR con reactores UASB recibiendo lodo aerobio proveniente de los sedimentadores secundarios. Preferiblemente, los muestreos de lodo para la determinación de los perfiles de ST deben ser realizados a lo largo de la altura del compartimiento de digestión y fuera de los horarios de picos de caudal afluente a los reactores (por ejemplo: media mañana o media tarde).

Evidentemente, tanto las unidades de deshidratación de lodo, así como el personal de operación, deben ser definidas con el fin de garantizar la ejecución de las demandas basadas en los resultados de laboratorio para la gestión de la fase sólida. Para el seguimiento de la calidad del efluente se recomienda que los sólidos sedimentables sean medidos por lo menos dos veces por semana, por reactor, considerando preferiblemente muestreos compuestos. Los datos usados para la verificación de la calidad del efluente deben ser los determina-

dos más recientemente, en relación al último perfil de concentraciones de ST.

*(ii) Control operacional del lodo retenido en sedimentadores secundarios de FBPs y LA y criterios para el envío de lodo a los reactores UASB*

La remoción del lodo excedente de los reactores UASB en cantidad inferior a la producción efectiva es una causa potencial que contribuye para la retención de lodo de baja sedimentabilidad en los reactores UASB. Adicionalmente, criterios inadecuados para el envío de lodo de sedimentadores secundarios hacia los reactores UASB pueden contribuir con la elevación de carga de sólidos enviada a esos reactores y el deterioro de la calidad del efluente anaerobio. En este sentido, además de la consistencia entre la estimación de producción efectiva de lodo con el dimensionamiento de la etapa de deshidratación de lodo, se presentan las siguientes recomendaciones para mejorar la calidad del efluente en sistemas que adoptan el envío de lodo aerobio hacia los reactores UASB:

**1. Preservación de lodo de mejor calidad en el fondo de los reactores UASB.** Conforme lo discutido en detalle en la Parte 3 de esta colección de NTs (LOBATO *et al.* 2018), el protocolo de descarte de lodo de los reactores UASB debe propiciar la preservación de una fracción significativa de lodo en el fondo (más concentrado), de modo que este pueda actuar como un “filtro” que auxilie en la retención e hidrólisis de sólidos suspendidos presentes en el lodo aerobio enviado a partir de los sedimentadores secundarios de la unidad de postratamiento.

**2. Mantenimiento de bajas concentraciones de lodo en la parte superior del compartimiento de digestión de los reactores UASB.** Conforme lo discutido anteriormente y también en la Parte 3 de esta Colección de NTs (LOBATO *et al.* 2018), se debe garantizar que el reactor no esté con exceso de lodo (pasivo) en su interior. La forma más simple de asegurar que no existe exceso de lodo en el

reactor es por medio de una verificación sistemática del contenido de ST en el punto más elevado del compartimiento de digestión (inmediatamente antes del deflector de gases). La concentración de lodo en estos puntos debe mantenerse siempre por debajo de 0,5% ST.

**3. Mantenimiento de bajas concentraciones de lodo en los sedimentadores secundarios.** La consistencia entre el crecimiento efectivo de lodo en los reactores UASB y el dimensionamiento del sistema de deshidratación tiende a reducir la carga sobre la etapa de sedimentación secundaria, debido a las menores concentraciones de SST en el efluente anaerobio y postratamiento por FBP o LA. Como consecuencia, la carga de lodo aerobio enviada a los reactores UASB tiende a ser menor, así como las concentraciones de lodo en los sedimentadores secundarios tienden a ser más bajas. Se recomienda que la concentración de lodo en la etapa de sedimentación secundaria no sobrepase 1,0% ST.

Dos posibles alternativas para solucionar el problema de lodo pasivo en los SS de la PTAR serían: i) incrementar el descarte de lodo de los reactores UASB de modo a no sobrepasar la masa máxima ni la concentración recomendada de lodo en la parte superior del compartimiento de digestión; y ii) remover el lodo pasivo de los SS sin considerar el envío hacia los reactores UASB (por ejemplo: por medio de camiones cisterna).

**4. Establecer el período y caudal de envío de lodo aerobio para los reactores UASB.** Se recomienda que el envío del lodo proveniente de sedimentadores secundarios sea realizado en el período del día en que se observa el menor caudal de aguas residuales urbanas crudas afluente a la PTAR (como regla general, el período de menor caudal afluente ocurre durante la madrugada). En este caso, las bombas de lodo deben ser operadas para el envío de lodo aerobio a lo largo de todo el período de menor caudal. Esta estrategia operacional busca mantener el lodo de menor sedi-

mentabilidad en regiones del compartimiento de digestión donde se observa mayor concentración de ST.

### 3.3 Verificación del nivel de los vertedores y de la existencia de fugas de gases del STF

La necesidad de nivelación de vertedores puede ser definida a partir de la observación de caudales irregulares a lo largo de la línea de descarga del efluente anaerobio en las canaletas del efluente. Además de la nivelación de las canaletas, la verificación de velocidades ascensionales y el tiempo de retención del líquido en el compartimiento de digestión y sedimentación, respectivamente, pueden ser importantes aspectos a ser verificados, con el fin de evitar la acumulación de nata. La justificación para tal verificación reside en el hecho de que la mala distribución del líquido entre los reactores UASB también puede ser una causa para la acumulación de nata en la superficie del compartimiento de digestión, según lo mencionado anteriormente.

### 3.4 Reducción de picos de caudal efluentes a los reactores

Conforme a lo señalado en la Parte 1 de esta Colección de NTs (CHERNICHARO *et al.*, 2018b), las posibles mejoras que buscan reducir los impactos generados por los elevados picos de caudal de agua residual afluente a los reactores UASB están relacionadas a: i) utilización de bombas con variadores de velocidad (variadores de frecuencia) o un mínimo de tres bombas, siendo una para relevo y reserva; y ii) implantación de rebalses que efectivamente protejan las unidades subsecuentes del tratamiento en cuanto a sobrecargas hidráulicas. Un mayor detalle de las acciones que pueden ser realizadas es discutido en la Parte 2 de esta Colección de NTs (BRESSANI-RIBEIRO *et al.*, 2018).

## 4 ORIGEN Y PROBLEMAS RELACIONADOS AL CUMPLIMIENTO DE LÍMITES DE VERTIDO

Las legislaciones brasileñas que se ocupan de los límites de vertido del agua residual tratada

en cuerpos de agua han definido principalmente límites para las concentraciones de materia orgánica. Los límites de vertido referentes a las concentraciones nitrógeno total, fósforo y surfactantes tienden a ser observados en casos específicos, como para el vertido de efluentes en ambientes lénticos, o en el contexto de legislaciones más restrictivas. Como regla general, tales parámetros son considerados para el efluente de una PTAR cuando se tienen cuerpos receptores con estándares de calidad considerablemente restrictivos. El tratamiento anaerobio, a pesar de ejercer un importante papel en la reducción de las cargas orgánicas provenientes del agua residual urbana, usualmente presenta limitaciones para el cumplimiento de los requisitos de vertido en cuerpos receptores. A continuación, se presentan algunos aspectos que dificultan el cumplimiento de los límites de vertido cuando se considera únicamente la etapa anaerobia para la reducción de materia orgánica y remoción de nutrientes y surfactantes.

#### 4.1 Remoción de materia orgánica

Los reactores UASB son eficientes en la reducción de la carga orgánica biodegradable del agua residual cruda, razón por la cual los límites de vertido para el cuerpo de agua son potencialmente cumplidos en condiciones en las que se tienen elevadas tasas de dilución del agua residual con el cuerpo receptor. Sin embargo, en el caso de fallas en el diseño, la construcción y la operación de las PTARs, la elevada pérdida de sólidos con el efluente anaerobio es un factor que tiende a perjudicar el cumplimiento de los límites de vertido y el desempeño de la etapa de postratamiento. Cabe resaltar que la baja concentración de oxígeno disuelto en efluentes de reactores UASB también puede ser una limitación, en términos del impacto del vertido del efluente en un cuerpo receptor.

#### 4.2 Remoción de compuestos nitrogenados

El cumplimiento de límites de vertido para concentraciones de compuestos nitrogenados únicamente con reactores UASB tiende a ser una opción limitada. Considerando las condiciones operacionales impuestas para la operación de la etapa anaerobia, la asimilación y la amonificación son los procesos metabólicos de mayor relevancia asociados al ciclo del nitrógeno. En este caso, las transformaciones de compuestos nitrogenados prácticamente no resultan en remoción de N-amoniaco o nitrógeno, siendo este un aspecto inherente al proceso de digestión anaerobia, y no propiamente un problema originado en condiciones de diseño, construcción y operación.

#### 4.3 Remoción de surfactantes

La composición de diversos productos de limpieza e higiene personal incluyen sustancias tensoactivas o surfactantes, con la finalidad de reducir la tensión superficial del agua. Tales compuestos son precursores de espuma en PTARs o en cursos de agua en los cuales ocurre el vertido de efluentes. La formación de espuma puede ocurrir a partir de la unión de estos compuestos con la superficie de burbujas de aire, debido a eventuales turbulencias presentes a lo largo del proceso de tratamiento o del gradiente hidráulico existente entre el punto de vertido del efluente y el curso de agua. El sulfonato de alquilbenzeno lineal (SAL) es el surfactante más utilizado a nivel mundial, y aunque sea biodegradable, su degradación bajo condiciones anaerobias es limitada, del orden de 35% (DUARTE *et al.*, 2008).

#### 4.4 Remoción de fósforo

La remoción de fósforo (P) en reactores anaerobios es bastante limitada, siendo también esta una limitación inherente al proceso de digestión anaerobia y no propiamente un problema originado en definiciones del diseño, la construcción y la operación. Solamente en condiciones de elevadas tasas de dilución con el cuerpo receptor es

que los parámetros de calidad de este pueden ser cumplidos. Aunque la etapa de postratamiento sea una opción para el cumplimiento de los estándares de calidad en relación a concentraciones de fósforo (por ejemplo: en sistemas de lodo activado luego del reactor UASB), la remoción biológica de este componente en etapa de postratamiento encuentra dos desafíos: i) relación P/DQO superior a los valores deseados para desempeños elevados; y ii) liberación de fósforo bajo condiciones anaerobias, en el caso de envío de lodo para el espesado y digestión del reactor UASB. Mayores detalles sobre la remoción biológica de fósforo son presentados en Chernicharo *et al.* (2001) y von Sperling (2017). Cabe resaltar que hay pocos procesos de postratamiento que conducen a elevadas remociones de fósforo.

#### 4.5 Recepción de efluentes no domésticos

La recepción de efluentes no domésticos (ENDs) en PTARs que tratan aguas residuales urbanas ha sido una realidad vigente en el contexto brasileño, particularmente en las regiones donde la expansión industrial ocurre de forma más inminente. La contribución de efluentes generados en rellenos sanitarios (lixiviados) también debe ser destacada, ya que dependiendo de la tasa de dilución con el agua residual urbana, pueden ocurrir problemas de toxicidad que impactarían la digestión anaerobia. Adicionalmente, la recepción de lodo de tanques sépticos puede inducir al incremento del coeficiente de producción de lodo en los reactores UASB, lo que tiende a potencializar la pérdida de sólidos en el efluente anaerobio si el proyecto no contempló la recepción de este tipo de contribución. Una discusión más profunda sobre el origen y problemas asociados a la recepción de lixiviado de relleno sanitario de ENDs y de lodo de tanques sépticos en reactores UASB es presentada en la Parte 3 de esta colección de NTs (LOBATO *et al.*, 2018).

## 5 POSIBLES MEJORAS RELACIONADAS AL CUMPLIMIENTO DE LÍMITES DE VERTIDO

La mejora de la calidad del efluente anaerobio por medio de postratamiento es un tema vasto. Hay una serie de sistemas naturales y mecanizados que deben ser considerados, dependiendo de los objetivos del tratamiento, así como de los requisitos necesarios para la implantación y operación (demanda de área, costos, logística de gestión de subproducto, entre otros). Tal como se anticipó en la introducción de esta NT, el presente ítem aborda exclusivamente la utilización de FBPs, por tratarse de la alternativa de postratamiento más utilizada en las PTARs brasileñas que utilizan reactores anaerobios como primera etapa del tratamiento (CHERNICHARO *et al.* 2018b).

### 5.1 Remoción de materia orgánica

Las experiencias asociadas a la remoción complementaria de materia orgánica en FBPs luego de los reactores UASB se encuentran bien consolidadas. La adopción de FBPs de alta carga con relleno de piedra (cargas orgánicas volumétricas aplicadas en torno de 0,50-1,00 kgDBO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>) permiten obtener eficiencias globales (UASB + FBP) de remoción de materia orgánica usualmente encima de 85%.

### 5.2 Remoción de compuestos nitrogenados

Para los casos en los que la remoción de nitrógeno total es necesaria, los filtros biológicos percoladores rellenos piedra o grava post-reactores UASB son poco eficientes, considerando las condiciones y estrategias operacionales usualmente establecidas. De la misma forma, FBPs de alta carga post-reactores UASB proporcionan una remoción de N-amoniaco poco satisfactoria, en torno de 20%. Para un aumento de la actividad nitrificante en los FBPs (remoción de N-amoniaco arriba de 50%) cargas orgánicas volumétricas aplicadas por debajo de 0,24 kgDBO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> deben ser utilizadas para el diseño de las unidades. En estos casos, la etapa

de sedimentación secundaria puede no ser necesaria, considerando los límites de vertido menos restrictivos que son aplicados en algunos países. A partir de la experiencia de períodos importantes en escala plena, el uso de material de relleno de espuma de poliuretano parece ser una alternativa potencial para la remoción de N-amoniaco y N-total en FBPs, post-reactores UASB (ONODERA *et al.*, 2016), sin embargo las experiencias nacionales todavía se limitan a sistemas en escala de demostración (BREISSANI-RIBEIRO *et al.*, 2017).

En contraposición a la lógica de remoción de nutrientes de la fase líquida, se resalta que la utilización de sistemas de postratamiento asociados a la aplicación en el suelo (por ejemplo: fertirrigación y/o recarga de acuíferos) y el reuso del efluente para fines menos nobles (por ejemplo: supresión de polvo en áreas con acceso público restringido) puede reducir la necesidad de remoción de nutrientes. La discusión detallada de tales posibilidades técnicas escapa al alcance de esta NT.

### 5.3 Remoción de surfactantes

Conforme a lo abordado anteriormente, la degradación de surfactantes bajo condiciones anaerobias es limitada. Una alternativa para alcanzar una elevada degradación biológica de surfactantes presentes en efluentes de reactores UASB es la adopción de una tecnología de postratamiento aerobia, una vez que para procesos aerobios se reportan eficiencias de degradación de SAL superiores a 99% (BRUNNER *et al.*, 1988). Como complemento, una alternativa para minimizar la formación de espuma en cursos de agua está asociada al vertido sumergido del efluente, con el objetivo de reducir condiciones turbulentas precursoras de la formación de espuma.

### 5.4 Remoción de fósforo

Dentro de los procesos que actualmente tienen posibilidad de ser aplicados al postratamiento de

efluentes de reactores UASB con el fin de eliminar el fósforo, se destacan los físico-químicos. Aunque la eliminación de fósforo en PTARs puede ocurrir por vía biológica, en los reactores UASB prácticamente toda la materia orgánica fácilmente biodegradable es consumida. Esa elevada remoción de materia orgánica no propicia el establecimiento de condiciones adecuadas para el desarrollo de microorganismos acumuladores de fósforo en la etapa de postratamiento por lodo activado (von SPERLING, 2017).

En lo que se refiere a la remoción físico-química de fósforo, los productos comúnmente utilizados son las sales de aluminio, hierro y calcio. Adicionalmente, polímeros también han sido utilizados con el fin de auxiliar en la floculación. La remoción de fósforo ocurre a partir de la formación de los fosfatos de metales y de calcio, los cuales pueden ser posteriormente removidos por sedimentación, flotación y eventualmente filtración, dependiendo de la concentración efluente deseada.

Cabe resaltar que la dosificación de productos químicos usualmente implica un aumento significativo en la producción de lodo en el sistema, lo que debe ser rigurosamente considerado en el momento de la concepción de la tecnología de tratamiento de agua residual a ser utilizada cuando se tiene el objetivo de remover fósforo. Sin embargo, los procesos físico-químicos son indispensables si la remoción de fósforo es deseada post-reactores UASB. En este caso, tal etapa podría ocurrir entre el reactor biológico (por ejemplo: FBP o lodo activado) y el sedimentador secundario.

## 6 ORIGEN Y PROBLEMAS RELACIONADOS AL POSTRATAMIENTO POR FBP

**Distribución del efluente.** En caso de que el efluente no sea uniformemente distribuido sobre el medio de soporte, el área húmeda efectiva y el aprovechamiento de área superficial tienden a ser reducidos. Consecuentemente,

parte del FBP será alimentado con mayores cargas hidráulicas, pudiendo inclusive ser la causa de frecuentes empozamientos por la elevación de carga de sólidos afluente. Dependiendo de lo significativo de la mala distribución del efluente, es posible que el desempeño del sistema sea menor a lo esperado, principalmente debido a la reducción del área superficial utilizada para

la colonización microbiana y formación del biofilme. La Figura 5 (a-b) presenta un ejemplo de mala distribución del efluente en la parte superior de un FBP relleno con lecho de piedras y con presencia de empozamientos por la colmatación en la superficie del lecho. Esta colmatación puede ser acelerada debido al relleno de FBPs con grava de granulometría inadecuada, tal como será discutido más adelante.



**Figura 5** – a) Mala distribución del efluente en la parte superior del filtro biológico percolador post-reactores UASB; b) colmatación de lecho de piedras por elevación de la carga de sólidos.

Cabe resaltar que la obstrucción de orificios/y o atascamiento de los brazos distribuidores pueden también ser una eventual causa de la mala distribución del efluente en la parte superior del FBP (Figura 6). El origen de la obstrucción de orificios es frecuentemente asociado a la elevada pérdida de sólidos en el reactor UASB, debido a fallas en el manejo del lodo. El ingreso de sólidos (basura) en exceso a los reactores UASB por deficiencias en las unidades de tratamiento preliminar también puede ser una causa potencial para tales obstrucciones. El atascamiento de los brazos distribuidores se asocia usualmente a la calidad del equipo y a deficiencias de mantenimiento. Adicionalmente, en momentos de bajo caudal afluente puede comprometerse el número de pasadas o vueltas del brazo previstas en diseño, especialmente para sistemas que no utilizan motores periféricos de accionamiento (situación usual en Brasil).



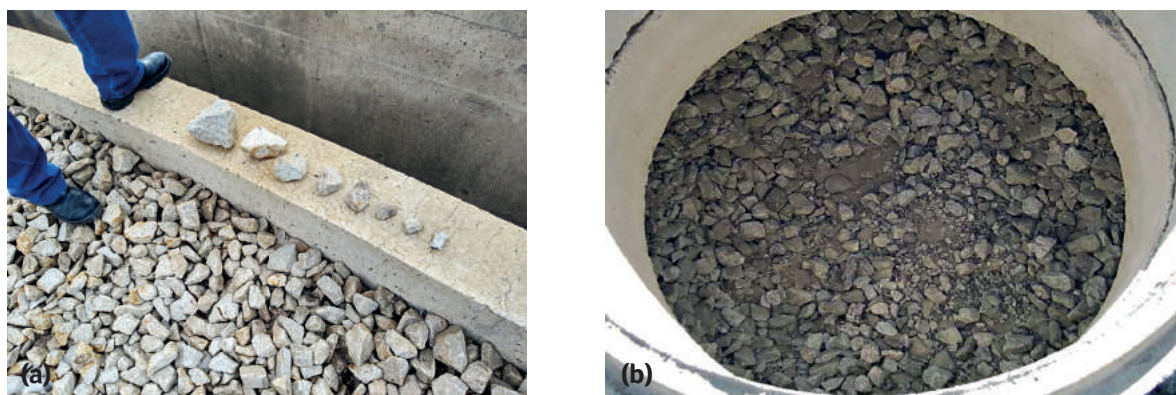
**Figura 6** - Distribución desigual de agua residual en FBP como consecuencia de la obstrucción de orificios y/o atascamiento de brazos rotatorios.

**Granulometría de lechos de piedra.** En el contexto brasileño, los lechos de piedra son frecuentemente utilizados como medio de soporte. En este caso, la colmatación debido a la pérdida excesiva de sólidos con el efluente de reactores UASB se vuelve

más probable, debido al bajo índice de vacíos del medio de soporte. Las posibilidades de que esto ocurra aumentan cuando la granulometría recomendada (grava con granulometría entre 50-100 mm de diámetro) no es respetada. En algunos casos, experiencias prácticas señalan la recepción de volúmenes de grava en considerable desacuerdo con las recomendaciones del diseño, incluyendo la presencia de materiales finos como muestra la Figura 7 (a-b).

Esta constatación reside en el hecho de que la grava con granulometría entre 50-100 mm de diámetro no son frecuentemente utilizadas en la construc-

ción civil. Así, el control de la producción de calidad de dicho material tiende a ser menos consistente. Para el suministro de grandes volúmenes de material, como es el caso observado para el relleno de filtros biológicos percoladores en escala plena, las limitaciones en términos de suministro parecen ser todavía más relevantes. *Por lo tanto, las dificultades para el control de la calidad en relación a los lechos de piedra como material de relleno y el menor rigor operacional para el control de lodo en reactores UASB son elementos potenciales para el mal funcionamiento de FBPs como etapa de postratamiento.*



**Figura 7** - (a-b) Suministro de grava en desacuerdo con especificaciones del diseño, incluyendo la presencia de materiales finos en la composición del material de relleno.

La colmatación del medio de soporte provoca la creación de caminos preferenciales para el paso del aire y del líquido, imponiendo dificultades en relación al cumplimiento de los requisitos de oxígeno para las reacciones aerobias en la etapa de postratamiento (TCHOBANOUGLOUS *et al.*, 2003). Adicionalmente, la reducción de la actividad nitrificante ha sido observada con el aumento de concentraciones de materiales particulados en el líquido, tanto en estudios de laboratorio (FIGUEROA & SILVERSTEIN, 1992) como a partir de datos operacionales referentes a sistemas en escala de demostración (ALMEIDA, 2011). En estos casos, la mayor presencia de materia orgánica, la menor disponibilidad de oxígeno y la mayor resistencia a

la transferencia de masa explicarían la reducción de la actividad nitrificante en sistemas con biofilme.

**Selección del medio de soporte.** El desempeño de un FBP post-reactor UASB tiende a estar asociado al medio de soporte utilizado para el relleno del volumen del reactor. En principio, se espera que el uso de medios de soporte con mayor área superficial específica (por ejemplo: medios plásticos) permitan un mejor desempeño del FBP en términos de remoción de materia orgánica y N-amoniaco. Sin embargo, un descuido durante el diseño en relación a la determinación del área húmeda efectiva del medio de soporte, así como



en relación a las cargas orgánicas aplicadas, pueden causar un menor desempeño de FBP's rellenos con medios de soporte de mayor área superficial específica.

Considerando una condición específica de cargas orgánicas aplicadas ( $0,25-0,45 \text{ kgDBO}\cdot\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ) y tasas de aplicación superficial ( $10-20 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), en un ensayo experimental realizado con el objetivo de seleccionar el medio de soporte para el relleno de FBP's, Almeida (2007) observó que el uso de medios plásticos (área superficial específica entre  $80 \text{ e } 200 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}$ ) no representa ningún beneficio significativo en la mejora de la calidad del efluente, en comparación con el lecho de piedras para remoción de materia orgánica y N-amoniaco. Las bajas cargas orgánicas aplicadas ciertamente ejercieron una influencia en el desempeño de los FBP's rellenos con medios de soporte de mayor área superficial específica. Adicionalmente, la recirculación continua del efluente no fue considerada, siendo este un aspecto relevante para el aumento de la eficiencia del área húmeda de los medios de soporte, dependiendo de las condiciones operacionales impuestas.

## 7 POSIBLES MEJORAS RELACIONADAS AL POSTRATAMIENTO POR FBP

### 7.1 Distribución del afluente en FBP's

En los casos en que la distribución del efluente sea realizada de forma irregular sobre la superficie de FBP es importante que se realice una revisión del equipo utilizado, con el fin de ajustar la posición y/o revisar el diámetro de los orificios. El objetivo de tales ajustes es proveer una distribución uniforme del efluente en la parte superior de los FBP's y, como consecuencia, promover mejoras en términos del área húmeda efectiva del medio de soporte (Figura 8 (a-b)). Para sistemas rotativos de distribución, se recomienda que tales ajustes consideren el número de pasadas por minuto sobre el medio de soporte, conforme lo definido en diseño. El uso de sistemas motorizados (moto-reductor fijado a uno de los brazos distribuidores y apoyado en la pared externa del FBP) con el fin de mantener la rotación de los brazos, puede ser una alternativa efectiva en los casos en los que el número de pasadas definido en diseño sea incompatible con la energía hidráulica proveniente del efluente anaerobio.



**Figura 8** - (a-b) Revisión de la posición de los orificios en los brazos de un distribuidor rotativo.

## 7.2 Medio de soporte para FBPs

Si las especificaciones del diseño indican el uso de lecho de piedras para el relleno de los FBPs post-reactores UASB, se debe prestar atención al adecuado cumplimiento de las especificaciones y la fiscalización durante la adquisición del material y el relleno de los filtros. Las recomendaciones a seguir deben ser consideradas:

**Especificación de diseño.** Debe constar en el diseño que el lecho de piedras de granito, gneis o basalto deberá estar compuesto de por lo menos 95% de material retenido en tamiz con diámetro entre 50-100 mm, sin la posibilidad de admitir material con la presencia de materiales finos en fracciones visualmente excesivas. Esta verificación deberá ser realizada antes del envío del material al sitio de la obra, junto con el proveedor. Piedras “chatas” pero alargadas y de poco espesor deben ser evitadas en cantidad significativas.

**Recepción del material en el sitio de las obras.** Rigor de la inspección en la recepción del material. Se recomienda que una verificación granulométrica en campo sea realizada por medio de muestreos, con el fin de evitar la necesidad de eventuales substituciones en el medio de relleno, una práctica potencialmente inviable. Los muestreos deberán ser realizados para cada descarga de material en los FBPs. Adicionalmente, en el terreno de la obra deberán disponer de una zona apropiada para el almacenamiento del material, de preferencia un área limpia y pavimentada, de modo a evitar que el material se mezcle con materiales presentes en el sitio (por ejemplo: tierra). Debe evitarse la contaminación del material, principalmente cuando se utilizan cargadores (“backhoe”) para transportar el material al interior del FBPs.

**Colocación y distribución del material en el interior del FBP.** Debe definirse la técnica más apropiada para la colocación y distribución (esparcimiento) del material en el interior del FBP,

tomando en cuenta que la forma usual, por medio de la pala de cargadores ha ocasionado varios problemas (por ejemplo: quiebra de piedras y transporte de suelo junto con las piedras). También, la forma de distribuir el material debe ser definida con rigor, con el fin de evitar el uso de máquinas pesadas que puedan causar la quiebra de las piedras y la generación de finos.

**Selección del medio de soporte.** Como mencionado anteriormente, los FBPs post-reactores UASB en operación en Brasil son usualmente rellenos con lechos de piedras, cuando son diseñados para la remoción de materia orgánica. Sin embargo, i) las dificultades de cumplir las especificaciones granulométricas para sistemas de escala mayor, ii) la necesidad de cumplir los límites de vertido en términos de N-amoniaco, así como iii) el mayor gasto de recursos en estructuras de concreto armado, pueden ser factores limitantes en relación a la aplicabilidad de lecho de piedras como material de relleno. En estos casos, los volúmenes de los reactores tienden a ser bastante elevados, y la reducción de tamaño y robustez de los FBPs pasan a ser aspectos de mayor relevancia para la selección del medio de soporte, a pesar de los menores costos de adquisición de la grava. Esto porque el peso específico de los medios plásticos ( $30\text{-}60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) es significativamente menor al de los lechos de piedra ( $1.350\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

En última instancia, el uso de un medio de soporte con mayor área superficial específica puede ser una alternativa potencial para los casos en que:

- **la remoción de la materia orgánica no sea el único objetivo de la etapa de postratamiento.** En estos casos, el costo de adquisición de un medio de soporte de mayor área superficial y el menor precio unitario puede ser compensando por la reducción del volumen de los reactores;

- el mayor control de calidad del material de relleno suministrado sea un aspecto de interés.

El control en la producción de medios plásticos tiende a ser mejor que el observado para la producción de grava con granulometría entre 50-100mm.

## 8 CONSIDERACIONES FINALES

Una vez verificadas las recomendaciones para el diseño, la construcción y la operación de reactores UASB, la calidad del efluente anaerobio requiere el manejo adecuado del lodo en la PTAR, un aspecto que merece todavía más atención en caso de enviar el lodo aerobio proveniente de la etapa de postratamiento a los reactores UASB para su espesamiento y digestión. Cabe resaltar que, independientemente de la tecnología de postratamiento utilizada, en el caso de usar sedimentadores secundarios, la sistematización de la estrategia operacional asociada al envío de lodo hacia los reactores UASB tiende a seguir las mismas recomendaciones observadas en esta NT para el uso de FBPs post-reactores UASB. Adicionalmente, debe prestarse especial atención a los aspectos que producen un efecto perjudicial en la calidad del efluente anaerobio, tal como la acumulación de nata en los compartimentos de sedimentación y separadores trifásicos, así como las sobrecargas hidráulicas que eventualmente puedan elevar las concentraciones de lodo en el compartimento de sedimentación de los reactores UASB.

Considerando tecnologías simplificadas para el postratamiento de efluentes de reactores UASB, el uso de FBPs rellenos con medios plásticos o basados en espuma de poliuretano tiende a ser una alternativa potencial para mejorar la calidad del efluente final y asegurar el cumplimiento de los límites de vertido en cuerpos receptores. En este caso, la aplicación de tales medios de soporte puede ser una posibilidad en vista de los problemas observados a partir del relleno de volúmenes de reactores con grava.

## 9 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen 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).

## 10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEM SOBRINHO P., JORDÃO E.P. Pós-tratamiento de efluentes de reatores anaeróbios – uma análise crítica. Cap. 9. In: Chernicharo C.A.L (coordinador). **Pós-tratamiento de efluentes de reatores anaeróbios**. FINEP/PROSAB, Rio de Janeiro, Brasil, 544 p, 2001.

ALMEIDA, P.G.S. **Remoção de matéria orgânica e nitrogênio em filtros biológicos percoladores aplicados ao pós-tratamiento de efluentes de reatores UASB**. 2011.196p. Tesis (Doctorado en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos). – Escuela de Ingeniería, Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

BRESSANI-RIBEIRO, T.; BRANDT, E.M.F.; ALMEIDA, P.G.S.; FLÓREZ, C.A.D. CHERNICHARO, C.A.L. Technological improvements in compact UASB/SBTF systems for decentralized sewage treatment in developing countries. **Desalination and Water Treatment**. p.01-09, 2017.

BRESSANI-RIBEIRO, T; LOBATO, L.C.S; MELO, V.R.; PEGORINI, E.; NONATO, S.; CHERNICHARO, C.A.L. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 2: Tratamiento Preliminar. **Revista DAE** – edición especial, v. 66, n. 214, p. 17-29, 2018.

BRUNNER P.H, CAPRI S., MARCOMINI A., GIGER W. Occurrence and behaviour of linear alkylbenzene sulphonates, nonylphenol, nonylphenol mono-and nonylphenol diethoxylates in sewage and

sewage sludge treatment. **Water Research**, v. 22, n. 12, p. 1465–1472, 1988.

CHERNICHARO, C.A.L. (coordinador). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. FINEP/PROSAB, Rio de Janeiro, Brasil, 544 p, 2001.

CHERNICHARO, C.A.L.; VON SPERLING, M.; MONTEIRO, T.A.S. Evaluation of post-treatment alternatives for effluents from the UASB reactors of Onça Sewage Treatment Plant (Belo Horizonte-Brazil). In: **VIII Taller y Simposio LATino Americano sobre Digestion Anaerobia**, Punta del Este, Uruguay: IWA, 2005.

CHERNICHARO, C.A.L.; LOBATO, L. C. S., PAVIA JÚNIOR, C. A., BARBOSA, C. A., ALMEIDA, P. G. S., GONÇALVES, T. C. F., VAZ, E., SOUZA, J. R., SILVA, L. R., JUDICE, M. A. M., MORAES, O. J. Secondary sludge return for thickening and digestion in UASB reactors: case study of Onça STP - Brazil. In: **XI Taller y Simposio LATino Americano sobre Digestion Anaerobia**, La Havana, Cuba: IWA, 2013.

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

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, 2018b.

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

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

GONÇALVES, T.C.F. **Avaliação da prática de retorno de lodo secundário sobre o desempenho de reatores UASB em escala plena: estudo de caso da ETE Laboreaux, Itabira/MG**. Disertación (Maestría en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos).

Escuela de Ingeniería, Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

LOBATO, L.C.S.; BRESSANI-RIBEIRO, T.B.; SILVA, B.S.; DIAS-FLÓREZ C.A.; NEVES, P.N.P.; CHERNICHARO, C.A.L. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 3: Gestión del lodo y la nata. **Revista DAE** – edición especial, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

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

POSSETTI, G. R. C., RIETOW, J.C.; COSTA, F.J.O.G.; WAGNER, L.G.; LOBATO, L. C. S., BRESSANI-RIBEIRO, MELO, D. F, REIS, J.A, CHERNICHARO, C. A. L. 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.

SILVA, B.S. **Desempenho de Reator UASB em escala plena no tratamento de esgoto sanitário e lodo ativado em excesso do pós-tratamento**. Disertación (Maestría en Ingeniería Hidráulica) – Escuela Politécnica da USP, Universidad de São Paulo, São Paulo, 2018.

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

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

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

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

# Óleo e água não se misturam

A solução é reciclar

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

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

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

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

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

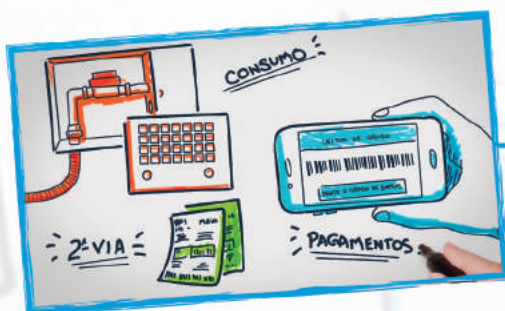
Conheça o PROL - Programa de Reciclagem de Óleo de Fritura no site [www.sabesp.com.br](http://www.sabesp.com.br)

Mes	Días	Evento	Local
Junio	4 a 7	Collection Systems Conference 2019	Local: Indianópolis, Indiana, USA Más informaciones: <a href="https://www.wef.org/events/conferences/upcoming-conferences/collectionsystems/">https://www.wef.org/events/conferences/upcoming-conferences/collectionsystems/</a>
	10 a 14	LET 2019 - The 16th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies	Local: Edimburgo, Reino Unido Más informaciones: <a href="http://iwa-let.org">iwa-let.org</a>
	16 a 19	30º CBESA Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental ABES	Local: Natal, RN, Brasil Más informaciones: <a href="http://abes-dn.org.br/abeseventos/30cbesa-natal/">http://abes-dn.org.br/abeseventos/30cbesa-natal/</a>
	17 a 19	Ideas 2019 - Interdisciplinary ideas leading to innovation	Local: Manaus, Amazonas Más informaciones: <a href="http://eventos.ufabc.edu.br/ideas/">http://eventos.ufabc.edu.br/ideas/</a>
	16 a 20	12th IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse "Overcoming Water Stress by Water Reclamation and Reuse"	Local: Berlim, Alemanha Más informaciones: <a href="http://iwareuse2019.org/">http://iwareuse2019.org/</a>
	16 a 20	16th IWA - World Congress on Anaerobic Digestion	Local: Delft, Holanda Más informaciones: <a href="https://www.ad16conference.com/">https://www.ad16conference.com/</a>
	19 a 21	10th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries	Local: Rhodes, Grécia Más informaciones: <a href="http://agro2019.itu.edu.tr">agro2019.itu.edu.tr</a>
Julio	09 a 13	9th IWA Specialized Conference on Sustainable Viticulture, Winery Wastes and Agri-industrial Wastewater Management	Local: Mons, Bélgica Más informaciones: <a href="http://www.winery2019.com">www.winery2019.com</a>
	22 a 24	Air Pollution Conference Brazil CMAS South America	Local: Escola de engenharia da UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil Más informaciones: <a href="https://cmasconference.com.br/">https://cmasconference.com.br/</a>
	23 a 26	Smart Future 2019	Local: São Paulo EXPO, SP, Brasil Más informaciones: <a href="https://www.automacaoindustrial.info/fiee-smart-future-2019-e-anunciada-pela-reed-exhibitions-alcantara-machado/">https://www.automacaoindustrial.info/fiee-smart-future-2019-e-anunciada-pela-reed-exhibitions-alcantara-machado/</a>
31 a 02	4º Simpósio Brasileiro sobre Wetlands Construídos	Local: Escola de engenharia da UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil Más informaciones: <a href="https://4simposiowetlands.wixsite.com/ufmg">https://4simposiowetlands.wixsite.com/ufmg</a>	
Agosto	27 a 30	9th International Conference on Sewer Processes and Networks	Local: Aalborg, Dinamarca Más informaciones: <a href="http://www.spn9.dk">www.spn9.dk</a>
Septiembre	08 a 12	3rd IWA Resource Recovery Conference	Local: Veneza, Itália Más informaciones: <a href="https://www.iwarr2019.org">https://www.iwarr2019.org</a>
	08 a 11	34th Annual Wate Reuse Symposium	Local: Marriott Marquis San Diego Marina 333 W Harbor Dr/ San Diego, CA /USA Más informaciones: <a href="https://wateruse.org/event/34th-annual-waterreuse-symposium/">https://wateruse.org/event/34th-annual-waterreuse-symposium/</a>
	16 a 20	14º SILUSBA	Local: Biblioteca Nacional, Cidade da Praia, Cabo Verde Más informaciones: <a href="http://www.aprh.pt/14silusba/">http://www.aprh.pt/14silusba/</a>
Noviembre	4 e 5	2º Seminário Nacional ETES Sustentáveis: Recuperação de Recursos em ETES e Produção de Água para Reúso	Local: Fortaleza, Ceará, Brasil Más informaciones: <a href="http://seminarioetessustentaveis.ufc.br/">http://seminarioetessustentaveis.ufc.br/</a>
	8 e 9	2º Fórum Técnico ETES Sustentáveis: Contribuição para o Aprimoramento de Projeto, Construção e Operação de Reatores UASB aplicados ao Tratamento de Esgoto	Local: Fortaleza, Ceará, Brasil Más informaciones: <a href="http://forumtecnicoinct.ufc.br/">http://forumtecnicoinct.ufc.br/</a>
Agosto 2020	13 a 17	17th Specialised Conference on Small Water and Wastewater Systems	Local: Escola de engenharia da UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil Más informaciones: <a href="http://etes-sustentaveis.org/">http://etes-sustentaveis.org/</a>

# QUER GANHAR TEMPO E COMODIDADE?

## CONHEÇA O APLICATIVO SABESP MOBILE

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



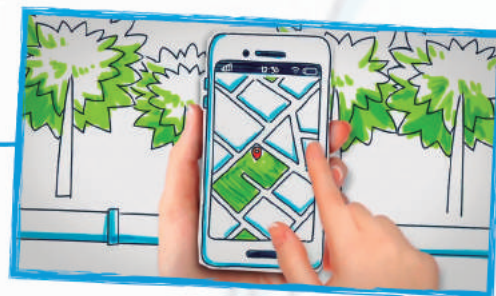
SEGUNDA VIA  
DE CONTAS



HISTÓRICO  
DE CONSUMO



AVISO DE  
VAZAMENTOS



INFORMAR  
FALTA DE ÁGUA



# O site da Revista DAE está repleto de novidades

Assine gratuitamente o boletim  
eletrônico, é só se cadastrar!



No site você  
pode baixar  
o conteúdo  
completo da  
Revista.