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 / Lívia 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 aguasresiduales 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 Electrictista 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 Pontíficia 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 Pontíficia 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.

Lívia 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

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-NoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 odorant 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 convertire 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 afluente (por ejemplo: concentración de demanda química de oxígeno - DQO y temperatura), las cuales pueden estar asociadas a la estacionalidad 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.

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-No Comercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 (CH_4) (70 a 81%), nitrógeno (N_2) (10 a 25%) y dióxido de carbono (CO_2) (6 a 14%). En menor proporción, el biogás también presenta pequeñas cantidades de hidrógeno (0 a 3%), sulfuro de hidrógeno (H_2S) (233 a 2.470 ppm) y otros gases traza (BRASIL, 2017a).

Por su alto contenido de CH_4, el biogás posee un elevado poder calorífico, lo que posibilita su recuperación y aprovechamiento energético. El poder calorífico inferior (PCI) del CH_4 puro es de 35,9 $MJ.Nm^{-3}$, resultando en un PCI del biogás, con 70 a 81% de CH_4, que varía entre 25,1 y 29,1 $MJ.Nm^{-3}$, que corresponden, respectivamente, a 78,9 y 91,5% del PCI típico del gas natural (31,8 $MJ.Nm^{-3}$). Por otro lado, el 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 CO_2 (IPCC, 2014). Por este motivo, la recuperación energética y la destrucción del 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 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 N_2 atmosférico (NOYOLA *et al.*, 2006). A su vez, las bajas concentraciones de 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 (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

Aunque se encuentre en bajas concentraciones en el biogás, el H_2S 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 CH_4 en reactores UASB, tal y como se anticipó en la Parte 1 de esta Colección de NTs (CHERNICHARO *et al.*, 2018).

2.1 Emisiones fugitivas de gases de efecto invernadero (CH_4) y de gases odorantes (H_2S)

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 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 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 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 STFs 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-

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-NoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 emisones 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 STFs 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 STFs 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 STFs 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 STFs, en las tapas de inspección y en las tuberías de biogás.

Es común encontrar STFs 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 STFs 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)).

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-No Comercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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.

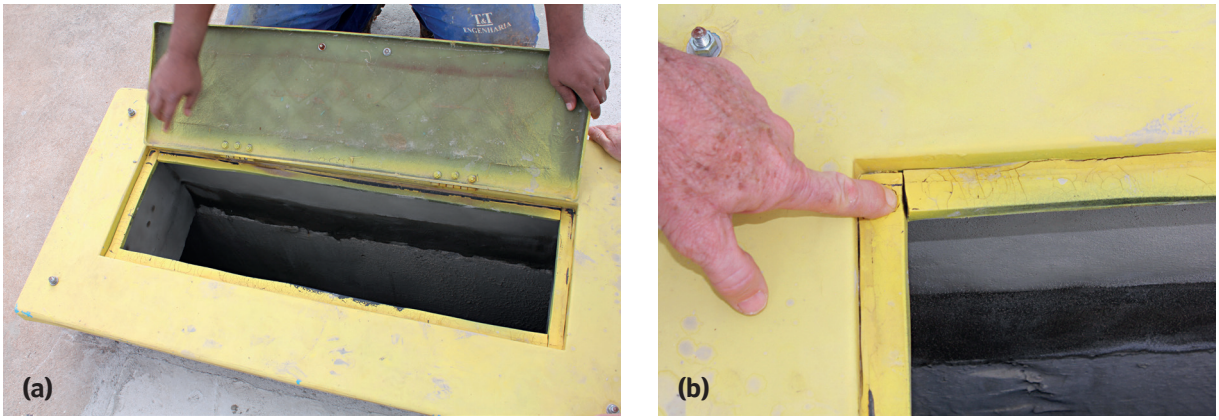

Figura 2 – a) Tapa de PRFV para inspección del separador trifásico; b) Detalle de falla en el elemento de sellado de la tapa de inspección.

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-

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-NoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

plo, 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 STFs 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 STFs (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.

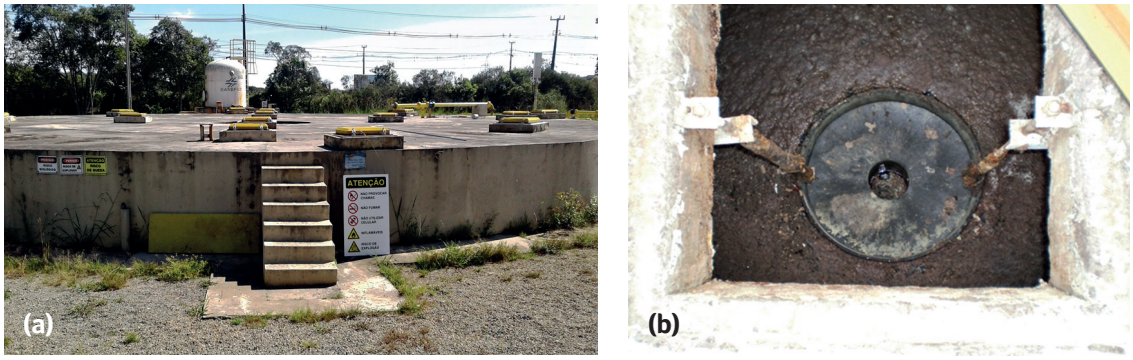

Figura 3 – Sistema inexistente y/o ineficiente de remoción de nata: a) reactor anaerobio sin dispositivo de descarte de nata; b) abertura de la tapa de inspección para descartar la nata.

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 impacto significativo en la reducción de producción de biogás. En caso de no ser desviado en rebalses o vertederos de excedentes, ese exceso de caudal afluente 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

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-No Comercial 4.0 Internacional Creative Commons.

directa entre el aumento del caudal de agua residual afluente 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_4 disuelta en el efluente*

La cuantificación del CH_4 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_4 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_4 disuelto en el efluente entre 17 y 22 $mg \cdot L^{-1}$, en reactores de diferentes escalas (piloto, demonstración 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 com diferentes TRH, indicaron que la fracción disuelta en el efluente, expresada como porcentaje de todo el CH_4 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).

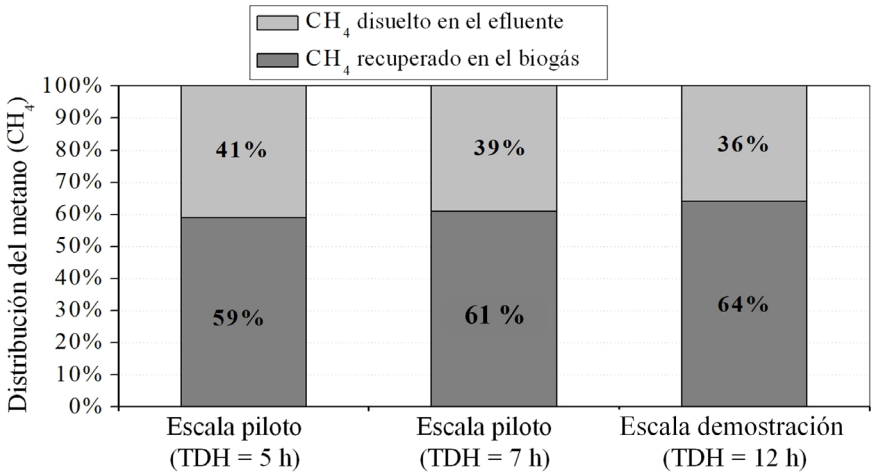

Figura 4 – Pérdidas de CH_4 disuelto en el efluente de reactores UASB y CH_4 en el biogás.
Fuente: SOUZA *et al.* (2011).

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 $18\%_{(v/v)}$ puede haber riesgo de asfixia e intoxicación (BRASIL, 2017a).

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-NoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 $4{,}4\%_{(v/v)}$ (límite inferior de explosividad) y $15\%_{(v/v)}$ (límite 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.

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-No Comercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 densidad (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 (CH_4) y odorantes (H_2S). 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

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-NoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 ilíticas 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.

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-No Comercial 4.0 Internacional Creative Commons.

3.4 Control de las emisiones fugitivas de CH_4 y H_2S

La recuperación del CH_4 y H_2S 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_2S como al de las emisiones fugitivas de CH_4. 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_4 disuelto. Este sistema de recuperación de CH_4 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 fases. 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_4 y H_2S 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_4 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_4 y de compuestos odorantes. La eficiencia de destrucción de com-

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-NoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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, considerado 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	• Buenos resultados en baja presión; • Sin partes móviles.	• Larga distancia de tramo recto necesaria; • Costo elevado.
Medidor vórtex	• Sin partes móviles; • Elevada precisión; • Resistente a la corrosión • Baja pérdida de carga.	•Larga distancia de tramo recto necesaria; • Necesitan mediciones complementarias de temperatura y presión.
Medición por medio de presión dinámica	• Elevada durabilidad; • Poca influencia de gases sucios; • Variaciones de presión no influyen negativamente en la precisión.	• Trabaja mejor a alta presión; • Difícil calibración; • Error de 1,5 a 5%; • Larga distancia de medición.
Fluidistor	• Sin partes móviles; • Elevada precisión; • Bajo costo; • Fácil de limpiar, manipular y cambiar.	• Cálculo de caudal complejo; • Error de 1,5%; • Sensible a vibraciones.
Medidor de turbina	• Bajo costo de inversión; • Tecnología de medición simple.	• Depósitos de sólidos causan problemas; • Mantenimiento costoso y rutinario; • Baja resolución.
Medidor másico por dispersión térmica	• Fácil instalación; • Bajo costo de inversión; • Baja pérdida de carga; • Recomendado para control de procesos; • Mediciones precisas incluso en condiciones de fluctuación de presión.	• Sensible a la humedad y a las partículas del gas; Larga distancia de tramo recto necesaria; • Calibración requiere gas patrón; • En caso de que el fluido varíe su composición a lo largo de la medición, su caudal debe ser corregido.

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_4, ya que éste define el potencial de recuperación energética. Adicionalmente, conocer la concentración de CH_4 puede servir para supervisar y controlar el proceso de degradación anaerobia que ocurre en el interior del reactor. Las concentraciones de CO_2, H_2S y O_2 también pueden ser monitoreadas para apoyar en el control operacional del proceso.

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-No Comercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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_4 y CO_2 y las células electroquímicas para la medición de las concentraciones de H_2S y O_2.

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_4 producido: 6,8 a 13,7 $NL \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1}$ y 42,2 a 81,3 $NL \cdot m^{-3}$agua.

• Volumen unitario de biogás producido: 9,8 a 17,1 $NL \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1}$ y 60,3 a 101,6 $NL \cdot m^{-3}$agua.

• Potencial energético unitario: 0,4 a 0,8 $kWh \cdot m^{-3}$agua y 7,0 a 8,0 $kWh \cdot Nm^{-3}$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_4 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 idenficación de espacios confinados

Los principales objetivos de la identificación de áreas con riesgo de generación de atmósferas explosivas están dirigidos a eliminar la probablidad 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,

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-NoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 señalizar los espacios confinados existentes en la PTAR, de forma a gestionar el riesgo de las actividades 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 utilizadas en estos ambientes son: i) cromatógrafo; ii) detector multigás; iii) oxímetro; iv) explosímetro; y v) oxiexplosímetro.

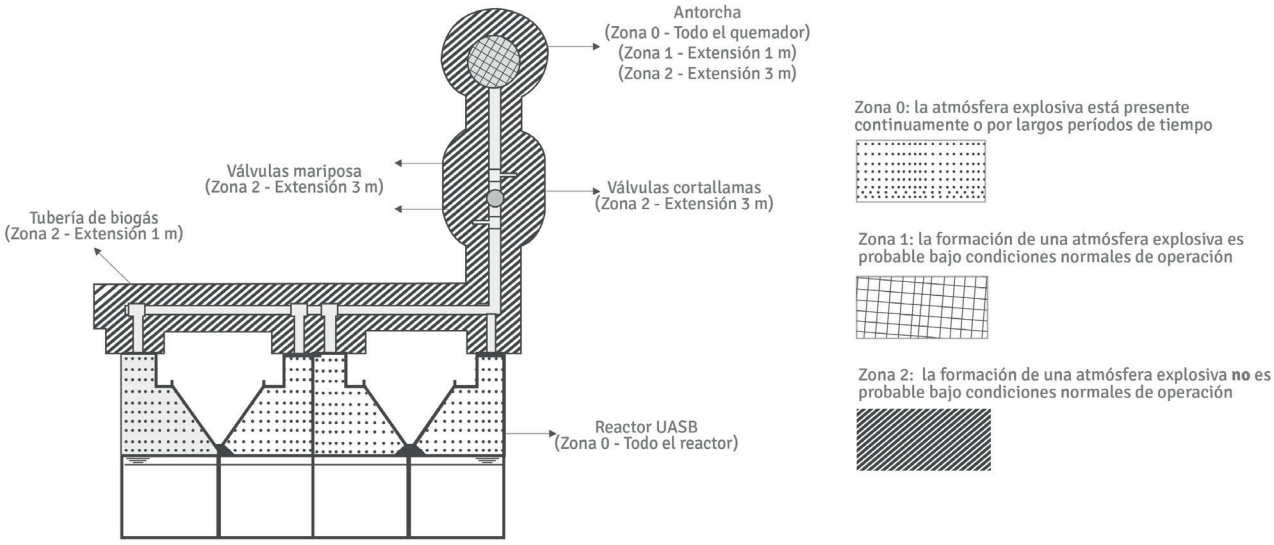

Figura 5 – Mapa esquemático de las zonas de riesgo de explosión en una PTAR con reactor anaerobio.
Fuente: RIETOW *et al.* (2017).

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

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-No Comercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 la 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 emisones 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 sanitairo, la remoción controlada de la nata, la recuperación de CH_4 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 Aperfeiçoa-*

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-NoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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 - Asociación Brasileña 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 corrossión 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 Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho nº 15. **Atividades e Operações insalubres**, 1978.

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

BRASIL. **Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs a partir do biogás**. 1 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**. 2 ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidad 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 Preventionin the Process Industries** v. 35, p. 135-144, 2015.

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

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-No Comercial 4.0 Internacional Creative Commons.

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

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

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

ROSENFELDT, S., CABRAL, C. B. G., PLATZER, C. J., HOFFMANN, H., ARAUJO, R.A. Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE. In: **28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil. Anais**... Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2015.

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

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil.** 2015. 182 p. 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.

La Revista DAE está licenciada bajo la Licencia Atribución-NoComercial 4.0 Internacional Creative Commons.