ISSN 2764-5576

cadernos técnicos engenharia sanitária e ambiental

Órgão Oficial de Informação Técnica da ABES - Rio de Janeiro

Coletânea de Notas Técnicas 1: Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto

Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativas de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios

Vol. 01 | nº 1 | 2021 | JUL/SET

ABES ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
Capítulo Nacional da AIDIS

inct ETEs Sustentáveis

ISSN 2764-5576

ESA

A Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, em conjunto com Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Esgotamento Sanitário (INCT ETEs Sustentáveis), deu vida aos Cadernos de Nota Técnica ESA apresentado, onde tem por objetivo a publicação de contribuições técnicas e científicas nas áreas de saneamento, e suas interfaces. As contribuições são publicadas após aprovação do conselho editorial formado exclusivamente para este fim. Os artigos publicados não refletem necessariamente a opinião da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES).

Diretor Responsável
Alceu Guérios Bittencourt

Editor Geral
Rodrigo Moruzzi

Editor Geral Adjunto
André Bezerra dos Santos

Coordenação
Allan Rodrigues

INCT ETEs Sustentáveis
Coordenação Geral
Carlos Augusto de Lemos Chernicharo
Cesar Rossas Mota Filho
Juliana Calabria Araújo

Coordenadores Institucionais
Carlos Augusto de Lemos Chernicharo.
André Bezerra dos Santos.
Isaac Volschan Jr.
Gustavo Rafael Collere Possetti.
Lourdinha Florêncio.
Paula Loureiro Paulo.
Roque Passos Pivelli.

Cadernos Técnicos ESA
Colaboração
Câmara Técnica de Tratamento de Esgoto (CTTE) da ABES

Conselho Editorial Geral
Carlos Augusto de Lemos Chernicharo
Rodrigo Moruzzi

Editores Associados
Carlos Augusto de Lemos Chernicharo
Emanuel Manfred Freire Brandt
Juliana Mattos Bohrer Santos

Editores Executivos
Lariza dos Santos Azevedo
Lívia Cristina da Silva Lobato

Revisão Técnica Final
Lucas Tadeu Fuess
Luciano Matos Queiroz
Mário Takayuki Kato
Maurício Alves da Motta Sobrinho
Paulo Igor Milen Firmino
Rodrigo Moruzzi
Roque Passos Pivelli
Sávia Gavazza dos Santos Pessoa

Revisão, validação e editoração
Lariza dos Santos Azevedo
Lívia Cristina da Silva Lobato
Tiago Borges Ferreira

Correspondência
Avenida Beira Mar, 216, 13º andar
CEP: 20021-060 – Rio de Janeiro (RJ), Brasil
Tel.: (21) 2277-3900 – E-mail: esa@abes-dn.org.br

PRODUÇÃO EDITORIAL

ZEPPELINI PUBLISHERS

Estatuto em Vigor: Alteração de Estatuto referendado pela Assembleia Geral Extraordinária realizada no Rio de Janeiro (RJ) em 08 de julho de 2011. Essa nova versão do Estatuto recebeu protocolo número 201108081358447 e foi averbada na matrícula número 1244 do Registro Civil de Pessoas Jurídicas do Rio de Janeiro em 25 de agosto de 2011.

cadernos técnicos engenharia sanitária e ambiental

Cadernos Técnico Eng Sanit Ambient | v.1 n.1 | 2021 | jul/set

Créditos da imagem da capa: Companhia de Saneamento de Minas Gerais

CORPO EDITORIAL PERMANENTE
Editor Geral: Rodrigo Moruzzi, Universidade Estadual Paulista, Brasil
Editor Geral Adjunto: André Bezerra dos Santos, Universidade Federal do Ceará, Brasil
Editor Coordenador: Allan Rodrigues, Abes, Brasil

EDITORES ASSOCIADOS:
André Luiz de Oliveira, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
Davi Gasparini Fernandes Cunha, Universidade de São Paulo, Brasil
Eraldo Henriques de Carvalho, Universidade Federal de Goiás, Brasil
João Paulo Bassin, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil
Jorge M.G.P. Isidoro, Universidade do Algarve, Portugal
Lisete Celina Lange, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
Lucas Meili, Universidade Federal de Alagoas, Brasil
Luciana Paulo Gomes, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil
Luciano Matos Queiroz, Universidade Federal da Bahia, Brasil
Luewton Lemos F. Agostinho, NHL Stenden University of Applied Sciences, Holanda
Luiza Girard Teixeira, Universidade Federal do Pará, Brasil
Maurício Alves da Motta Sobrinho, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
Marcelo Motta Veiga, Escola Nacional de Saúde Pública, Brasil
Maurício Alves da Motta Sobrinho, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
Pablo Heleno Sezerino, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil
Paulo Sérgio Scalize, Universidade Federal de Goiás, Brasil

Revista Engenharia Sanitária e Ambiental Fundada com o título Engenharia Sanitária em 1962 (vol.1, n.1, jun de 1962) com formato 18,0 x 26,0 cm, até o vol.12, n.3, quando foi adotado o formato A4. A partir do vol.28, abr./jun. de 1989, passou a chamar-se BIO, com o formato 21,0 x 28,0 cm, sendo a Engenharia Sanitária transformada em encarte técnico da BIO. A partir de 1996, retorna a Engenharia Sanitária, desta feita incorporando a palavra Ambiental (Ano I, n.1, jan./mar. 1996).

ABES ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
Capítulo Nacional da AIDIS

DIRETORIA NACIONAL

Presidente: Alceu Guérios Bittencourt; **Vice-Presidente:** Mario Cezar Guerino; **Secretário Geral:** Marcel Costa Sanches ; **Secretário Adjunto:** Rafael Carvalho de O. Santos; **Tesoureiro Geral:** Maria Lúcia B. Coelho Silva; **Tesoureiro Adjunto:** Álvaro José Menezes da Costa; **Diretor Sul:** Edgard Faust Filho; **Diretora Sudeste**: Célia Regina Alves Rennó; **Diretor Centro-Oeste:** Marcos Elano F. Montenegro; **Diretora Nordeste:** Vanessa Britto Silveira Cardoso; **Diretor Norte:** Haroldo Costa Bezerra; **Coordenador de Relações Internacionais:** Carlos Alberto Rosito; **Coordenador do Programa Jovens Profissionais do Saneamento:** Witan Silva.

CONSELHO FISCAL

Efetivos: Carlos Alberto Rosito (RJ); Edson Melo Filizzola (GO); Miguel Mansur Aisse (PR).
Suplentes: Carlos Roberto Soares Mingione (SP); Hélio Nazareno Padula Filho (SP); Reynaldo Eduardo Young Ribeiro (SP)

CONSELHO DIRETOR

Membros Natos: Antônio César da Costa e Silva (SP), Antônio Marsiglia Netto (SP), Carlos Alberto Rosito (RJ), Cassilda Teixeira de Carvalho (MG), Clovis Francisco do Nascimento Filho (RJ), Dante Ragazzi Pauli (SP), Hugo de Mattos Santos (RJ), João Alberto Viol (SP), José Aurélio Boranga (SP), José Carlos Vieira (RJ), Lineu Rodrigues Alonso (SP), Luiz
Otávio Mota Pereira (PA), Nelson Rodrigues Nucci (SP), Paulo Cezar Pinto (RJ), Roberval Tavares de Souza (SP) e Walter Pinto Costa (RJ).

Membros Eleitos 2020/2022
Mario Cezar Guerino
Marcel Costa Sanches
Rafael Carvalho de O Santos
Maria Lúcia B. Coelho Silva
Álvaro José Menezes da Costa
Edgard Faust Filho
Célia Regina Alves Rennó
Marcos Heleno F. Montenegro
Vanessa Britto Silveira Cardoso
Haroldo Costa Bezerra
Carlos Alberto Rosito
Witan Silva

Presidentes das Seções Estaduais 2019/2021
Ana Catarina Pires de Azevedo Lopes (AL)
Rainier Pedraça de Azevedo (AM)
Arnor de Oliveira Fernandes Junior (BA)
Francisco Humberto de Carvalho Junior (CE)
Sergio Antonio Gonçalves (DF)
Edumar Ramos Cabral Coelho (ES)
Marisa Pignataro de Sant'anna (GO)
Nelson José Bello Cavalcante (MA)
Rogerio Pena Siqueira (MG)
Aroldo Ferreira Galvão (MS)
Rosidelma Francisca Guimarães Santos (MT)
Vanessa Souza Alvares de Mello (PA)
Jaqueline Pequeno da Silva (PB)
Sergio Xavier dos Santos (PE)
Carlos Ernando da Silva (PI)
Luiz Henrique Bucco (PR)
Miguel Alvarenga Fernández Y Fernández (RJ)
Maria Geny Formiga de Farias (RN)
Jussara Kalil Pires (RS)
Andreia May (SC)
Marcio Gonçalves de Oliveira (SP)

Representantes das Seções Estaduais 2019/2021
Ana Catarina Pires de Azevedo Lopes (AL)
Silvio Roberto Magalhães Orrico (BA)
Sergio Antonio Gonçalves (DF)
Divino Lazaro de Souza Aguiar (GO)
Fabio Julian de Sousa (GO)
Maria do Carmo Varella Bastos (MG)
Ronaldo Vasconcellos Novais (MG)
Antonio Carlos Gerardi (PR)
Antonio Roberto Sartor (PR)
Miguel Alvarenga Fernández Y Fernández (RJ)
Eduardo Pacheco Jordão (RJ)
Geraldo Antonio Reichert (RS)
Jairo Tardelli Filho (SP)
Monica Ferreira do Amaral Porto (SP)
Osvaldo Ioshio Niida (SP)
Antonio Carlos da Costa Lino (SP)
Vasti Ribeiro Facincani (SP)
Ricardo Toledo Silva (SP)
Sadalla Domingos (SP)
Alvaro Diogo Sobral Teixeira (SP)
João Cesar Queiroz Prado (SP-SUB)
Fábio Severo (SP-SUB)
Antonio Rodrigues da Grela Filho (SP-SUB)
Tsunao Matsumoto (SP-SUB)
Jorge Luiz Monteiro (SP-SUB)

Sumário

Cadernos Técnico Eng Sanit Ambient • v.1 n.1 • 2021 • p. 1-86

COLETÂNEA DE NOTAS TÉCNICAS 1: VALORAÇÃO E GERENCIAMENTO DE SUBPRODUTOS GASOSOS DO TRATAMENTO DO ESGOTO
COLLECTION OF TECHNICAL NOTES 1: VALORATION AND MANAGEMENT OF GASEOUS BY-PRODUCTS OF SEWAGE TREATMENT

Parte A: Avanço nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios
Part A: Advances in tools and techniques for estimating biogas production and treatment in anaerobic-based STPs

1 **Editorial - ESA**
Rodrigo Moruzzi e Andre Bezerra dos Santos

3 **Editorial - INCT ETEs Sustentáveis**
Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

5 **Nota Técnica 1 - Tópicos de interesse**
Technical Note 1 – Topics of interest
Juliana Mattos Bohrer Santos, Cláudio Leite de Souza, Emanuel Manfred Freire Brandt, Gustavo Rafael Collere Possetti, Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

21 **Nota Técnica 2 – Programa computacional de estimativa de produção de biogás em reatores UASB - ProBio 2.0**
Technical Note 2 – Software for estimation of biogas production in UASB reactors - ProBio 2.0
Gustavo Rafael Collere Possetti, Julio Cezar Rietow, Lívia Cristina Silva Lobato, Miguel Mansur Aisse, Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

35 **Nota Técnica 3 – Dessulfuração de biogás por microaeração em reatores UASB**
Technical Note 3 – Biogas desulfurization by microaeration in UASB reactors
André Bezerra dos Santos, Marcos Erick Rodrigues da Silva, Paulo Igor Milen Firmino, Carolina Bayer Gomes Cabral, Cláudio Leite de Souza, Juliana Mattos Bohrer Santos

47 **Nota Técnica 4 – Dessulfuração de biogás por adsorção em adsorventes de baixo custo**
Technical Note 4 – Biogas desulfurization by adsorption on low-cost adsorbents
Juliana Mattos Bohrer Santos, Emanuel Manfred Freire Brandt, Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

59 **Nota Técnica 5 – Combustão direta de biogás em queimadores**
Technical Note 5 - Direct combustion of biogas in burners
Giovana Kaminski, Gustavo Rafael Collere Possetti, Michael Mannich, Felipe Owczarzak de Mello e Silva, Julio Cezar Rietow, Miguel Mansur Aisse, José Fabrício Pujatti

75 **Nota Técnica 6 – Levantamento de riscos e classificação de atmosferas explosivas em ETEs com produção de biogás**
Technical Note 6 – Surveying risks associated with explosions and classification of explosive atmospheres in STPs with biogas production
Julio Cezar Rietow, Gustavo Rafael Collere Possetti, Charles Carneiro, Miguel Mansur Aisse

https://doi.org/10.5327/276455760101001

Editorial

ESA

Desde sua fundação em 1962, a Revista Engenharia Sanitária e Ambiental (ESA) tem como missão a disseminação do conhecimento produzido na academia, empresas de pesquisa, concessionárias e empresas de saneamento, órgãos governamentais, profissionais técnicos, entre outros, por meio da publicação de artigos técnicos, revisões críticas e notas técnicas.

Os desafios na área da engenharia sanitária e ambiental são enormes e dinâmicos. Ao longo de sua história a ESA tem se adaptado às novas demandas e desafios, visando manter sua missão de publicar materiais técnicos e científicos de elevada qualidade e relevância nacional. Inicialmente, os artigos voltavam-se majoritariamente para soluções técnicas da Engenharia, aplicadas à área de Saneamento Básico. O crescente interesse pela área de meio ambiente ampliou o universo de atuação da Engenharia e trouxe novas dimensões para as pesquisas, abrindo portas para diferentes abordagens, com aumento significativo de contribuições à ESA. Mais recentemente, a ampliação da pós-graduação no Brasil e as exigências associadas aos seus programas e as agências de fomento à pesquisa aumentaram ainda mais o fluxo de artigos, exigindo grande esforço de todo corpo editorial e revisores voluntários.

Estruturalmente a ESA também se modernizou. A adoção de nova plataforma de gerenciamento, a definição de regras claras e rígidas de revisão por pares, a padronização das decisões do corpo editorial e a redução significativa do tempo de avaliação permitiram enfrentar os novos desafios e reforçar a qualidade dos manuscritos publicados. Entretanto, para além da sua história, tradição e reconhecimento dos pares, a reputação de um periódico é também aferida por meio de métricas internacionais, tal como o fator de impacto.

O fator de impacto tem grande importância na escolha do periódico pelos cientistas, pois afere sobre a visibilidade e a qualidade dos manuscritos publicados. Entretanto, são enormes os desafios de ampliar o fator de impacto de um periódico de circulação restrita nacional, dada a abrangência e o acesso limitados. Assim sendo, entendemos que a internacionalização da ESA é premente.

Todavia, a tarefa de internacionalizar uma revista com a importância da ESA no cenário nacional é árdua e encontra resistências legítimas, que não podem ser desconsideradas. Internacionalizar é muito mais que publicar manuscritos na língua inglesa; envolve abrir as fronteiras da ESA para divulgação científica aberta ao público internacional, incluindo seu corpo/conselho editorial e quadro de revisores. A maior resistência à internacionalização da ESA advém da sua maior virtude, ou seja, sua importância e reconhecimento no contexto brasileiro.

Dessa forma, os Cadernos Técnicos ESA foram uma saída construída pelo conjunto da ABES, diretoria e corpo editorial da ESA, que oportuniza a divulgação a disseminação de conhecimento voltados aos problemas técnicos nacionais, sem conflitar com o movimento de internacionalização científica da ESA. Afortunadamente, o lançamento dos cadernos técnicos foi abrilhantado pela parceria com o INCT ETEs Sustentáveis, por meio da divulgação de contribuição técnico-científica de alto nível e de extrema relevância ao contexto brasileiro. Nos orgulha fazer parte desse novo marco para a ESA!

Rodrigo Moruzzi
Editor Geral – ESA

André Bezerra dos Santos
Editor Geral Adjunto – ESA

https://doi.org/10.5327/276455760101002

Editorial

INCT ETEs Sustentáveis

Prezados leitores,

O INCT ETES Sustentáveis foi criado em 2017 com o intuito de se tornar um centro de referência para questões relacionadas ao tratamento de esgoto sanitário, de forma a contribuir para a promoção de mudanças estruturais e estruturantes por meio da capacitação profissional, do desenvolvimento de soluções tecnológicas apropriadas às diversas realidades nacionais, da construção e transmissão de conhecimento para a sociedade, órgãos governamentais e empresariais.

As estações convencionais de tratamento de esgoto, de maneira geral, apresentam fluxogramas de tratamento que consideram o lançamento do efluente tratado em algum corpo d´água receptor e, portanto, são concebidas levando-se em consideração apenas a legislação de proteção das coleções hídricas. Se adequadamente projetadas, construídas e operadas, podem alcançar elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica, nutrientes e patógenos, cumprindo o seu papel principal de controle da poluição da água. No entanto, essa não é a situação usual no Brasil, onde a maioria das estações apresenta algum tipo de problema operacional, que resulta na elevação dos custos do tratamento, na perda de eficiência e no não cumprimento da legislação ambiental. Ademais, os subprodutos sólidos (lodo e escuma) e gasosos (notadamente biogás) gerados durante o tratamento apresentam rotas de destinação final que usualmente são os aterros sanitários e a queima para a atmosfera. Embora sejam rotas de destinação de subprodutos aceitas no Brasil, sabidamente não são as mais adequadas, face aos impactos ambientais que podem ser causados na atmosfera, no solo e nas águas subterrâneas. Ainda, é de conhecimento amplo que os subprodutos do tratamento apresentam elevado potencial de aproveitamento, mas os esforços nesse sentido são incipientes e, quando realizados, ocorrem de forma desarticulada, normalmente abordando poucas das possibilidades existentes.

Em 4 anos de atuação, o INCT ETEs Sustentáveis desenvolveu pesquisas básicas e aplicadas visando propiciar o desenvolvimento de sistemas integrados e sustentáveis de tratamento de esgoto, com recuperação e valoração dos subprodutos do tratamento. Os resultados das pesquisas desenvolvidas no âmbito do Instituto, em adição à consolidação do conteúdo já existente, possibilitaram a elaboração de cerca de 50 notas técnicas, com tópicos relacionados ao aproveitamento e utilização dos subprodutos gerados a partir do tratamento de esgoto, além de maior eficiência e melhoria dos processos. A partir da parceria firmada entre a ESA e o INCT ETEs Sustentáveis, de forma a ampliar o alcance dos conteúdos e estabelecer melhor integração da academia com profissionais e empresas do setor de saneamento ambiental, essas notas técnicas foram agrupadas em 8 cadernos técnicos de acordo com a temática, a fim de apresentar de forma consolidada e integrada o conteúdo produzido.

Esperamos que a publicação via cadernos técnicos, com ilustrações didáticas e linguagem menos acadêmica, possibilite a efetiva transmissão e apropriação do conhecimento pelos profissionais que atuam no setor. Fica nossa forte expectativa de que o conhecimento disponibilizado possa induzir as transformações necessárias na nossa área, com reflexos na melhoria da gestão, dos projetos, da construção e da operação e manutenção dos sistemas de esgotamento sanitário. Enfim, que o grande esforço empreendido por mais de 100 colegas (autores, coautores, revisores e validadores das diversas notas técnicas), aos quais agradeço imensamente, possa contribuir para a melhoria da sustentabilidade do saneamento, notadamente na área de esgotamento sanitário. Valeu a pena, pessoal!

Boa leitura!

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo
Coordenador Geral – INCT ETEs Sustentáveis

https://doi.org/10.5327/276455760101003

Parte A: Avanço nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios Nota Técnica 1 – Tópicos de interesse

Part A: Advances in tools and techniques for estimating biogas production and treatment in anaerobic-based STPs Technical Note 1 - Topics of interest

Juliana Mattos Bohrer Santos[1], Cláudio Leite de Souza[2], Emanuel Manfred Freire Brandt[3], Gustavo Rafael Collere Possetti[4], Carlos Augusto de Lemos Chernicharo[5]*

RESUMO

O gerenciamento do biogás em estações de tratamento de esgoto (ETEs) com reatores anaeróbios ainda é um desafio no Brasil. Problemas de odores, corrosão, riscos ocupacionais, perdas energéticas, e até mesmo relacionados a efeito estufa, ainda são uma realidade. Os problemas relacionados ao aproveitamento energético do biogás de reatores UASB estão associados, principalmente, à presença de sulfeto de hidrogênio (H_2S) e umidade, assim como às emissões fugitivas de biogás, que dificultam uma estimativa precisa de produção. Nesse contexto, esta Nota Técnica (NT) tem como objetivo abordar os aspectos mais importantes relacionados à estimativa de produção e ao tratamento do biogás em ETEs com reatores UASB. Essa proposta advém do conhecimento consolidado por especialistas do setor acadêmico e prestadores de serviços de saneamento, bem como da literatura especializada. Os tópicos de interesse são resumidos na presente NT, a primeira da coletânea "Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanço das ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios", sendo individualmente detalhados nas demais NTs que integram a coletânea .

Palavras-chave: corrosão; energia renovável; metano; reator UASB; sulfeto; produção de biogás.

ABSTRACT

The management of biogas in sewage treatment plants (STPs) with anaerobic reactors is still a challenge in Brazil. Problems related to odor, corrosion, occupational risks, energy losses, and even to greenhouse effect, are still a reality. The problems related to the energetic use of biogas from UASB reactors are mainly associated with the presence of hydrogen sulfide (H_2S) and humidity, as well as fugitive biogas emissions, which make it difficult to accurately estimate biogas production. In this sense, this Technical Note (TN) aims at addressing the main aspects related to biogas production estimate and biogas treatment in STPs with UASB reactors. This contribution derives from the experience of experts and professionals of the academic and water utility sectors, as well as from the specialized literature. The topics of interest are summarized in this TN, the first of this collection, "Valoration and management of gaseous by-products of sewage treatment. Part A: Advances in tools and techniques for estimating biogas production and treatment in anaerobic-based STPs", being individually detailed in the following Technical Notes that integrate the collection.

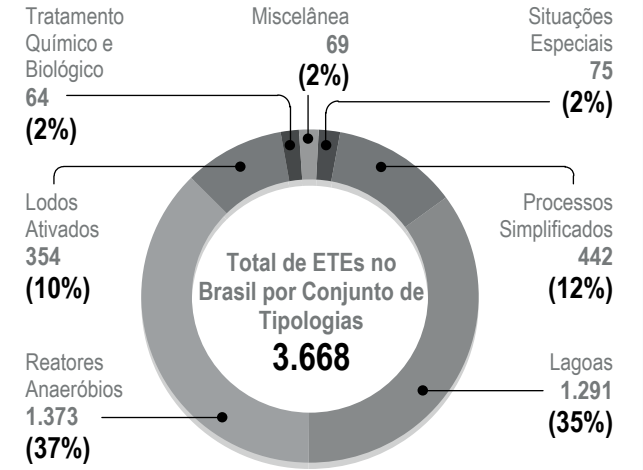
Keywords: corrosion; renewable energy; methane; UASB reactor; sulfide; biogas production.

[1]Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre e aluna de doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[2]Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Professor associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[3]Químico Industrial pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Docente Permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora (PEC-UFJF). Diretor Técnico da Brandt Meio Ambiente Ltda. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[4]Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Engenheiro Eletricista pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre e Doutor em Ciências pela UTFPR. Gerente da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do ISAE. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[5]Engenheiro Civil pela UFMG. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle upon Tyne – UK. Professor titular aposentado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Coordenador do INCT ETEs Sustentáveis.
***Endereço para correspondência:** Avenida Antônio Carlos 6.627 – Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Bloco 1. Belo Horizonte, MG. CEP: 31270-901. e-mail: calemos@desa.ufmg.br

1. INTRODUÇÃO

É grande a aceitação e disseminação das tecnologias anaeróbias para o tratamento de esgoto sanitário no Brasil. Conforme apresentado na **Figura 1**, essa é a tipologia de tratamento mais utilizada no país (ANA, 2020). A difusão da tecnologia anaeróbia, notadamente dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB, do inglês u*pflow anaerobic sludge blanket*), tem elevado o número de estudos relacionados aos desafios da utilização dessa tecnologia, tanto no sentido de solucionar problemas quanto de potencializar suas vantagens. Considerando que o principal subproduto da digestão anaeróbia da matéria orgânica é o biogás, cujo constituinte mais importante é o metano (CH_4 – gás que possui elevado poder calorífico), o seu aproveitamento energético tem sido uma das vantagens mais exploradas mundialmente (Chernicharo *et al.*, 2018).

O uso do biogás está amplamente fundamentado na literatura e consiste na transformação de sua energia química em energia térmica, elétrica ou mecânica. Por exemplo, o biogás pode ser utilizado para: produção de calor - cozimento, aquecimento de água, caldeira, higienização e secagem do lodo e da escuma; no acionamento de bombas e equipamentos elétricos; e/ou como combustível veicular, industrial ou residencial (Brasil, 2017). Porém, o potencial de produção de biogás e de geração de energia limpa a partir do enorme parque de reatores anaeróbios existentes no Brasil é ainda subaproveitado (Rosenfeldt *et al.*, 2015; Valente, 2015; Brasil, 2016).



Fonte: Adaptado de ANA (2020).

Figura 1 – Tipologias de tratamento de esgoto empregadas nas ETEs brasileiras.

O aproveitamento energético do biogás depende, dentre outros fatores, da quantificação da produção de biogás. Os elevados custos de aquisição de equipamentos de medição da produção de biogás em reatores anaeróbios, muitas vezes, impede o seu monitoramento. Nesse sentido, o dimensionamento dos sistemas de aproveitamento energético geralmente é baseado em estimativas da produção de biogás. Para tanto, a quantificação da produção deve ser pautada em modelos matemáticos que consideram todas as perdas (emissões fugitivas) e rotas de conversões possíveis da matéria orgânica dentro de um reator anaeróbio (Silva *et al.*, 2014; Rietow *et al.*, 2021), a fim de evitar que a produção de biogás seja superestimada.

Além da necessidade de se realizar uma estimativa confiável da produção de biogás, o seu aproveitamento energético também está usualmente condicionado a uma etapa prévia de tratamento, a depender do uso pretendido e da tecnologia de aproveitamento utilizada. Tecnologias de tratamento caras e com complexidade operacional podem impor limitações ao aproveitamento energético do biogás nas estações de tratamento de esgoto (ETEs). Dessa forma, o conhecimento e a consolidação de tecnologias nacionais simplificadas e/ou de baixo custo para o tratamento do biogás se tornam essenciais para incentivar o aproveitamento desse subproduto, além de reduzir a fragilidade dos projetos com relação ao câmbio.

Adicionalmente, o tratamento do biogás por combustão direta em queimadores também deve ser considerado para a queima do excedente do sistema de aproveitamento energético, semelhantemente ao que é feito quando o aproveitamento energético do biogás não é uma opção técnica e economicamente atrativa. Nesse caso, a queima tem como objetivo destruir o CH_4 (um gás de efeito estufa - GEE) e outros gases responsáveis pelos maus odores para posterior lançamento na atmosfera (Brasil, 2017).

Nesse sentido, esta coletânea de Notas Técnicas (NTs) tem como objetivos: (i) apresentar um programa computacional para a estimativa da produção de biogás em reatores

anaeróbios tratando esgoto doméstico; e (ii) apresentar as principais tecnologias para destruição ou tratamento do biogás para aproveitamento energético (energia térmica e/ou elétrica), com destaque para as técnicas de remoção de H_2S que apresentam simplicidade operacional e/ou baixos custos de implantação e manutenção. Para tanto, esta coletânea de NTs considera a produção e o tratamento do biogás de reatores anaeróbios do tipo UASB em ETEs, não analisando o biogás gerado a partir do tratamento da fase sólida por digestores de lodo. Os tópicos de interesse são apresentados de forma sintética na presente NT e, individualmente, detalhadas nas demais NTs que integram a coletânea "Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto - Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios" **(Tabela 1)**.

Tabela 1 – Notas técnicas desta coletânea e os tópicos/técnicas de interesse para a estimativa de produção e o tratamento do biogás gerado em reatores anaeróbios do tipo UASB.

Tópico/técnica de interesse	Nota Técnica correspondente
Produção de biogás em reatores anaeróbios	NT 2: Programa computacional de estimativa de produção de biogás em reatores UASB – ProBio 2.0 (Possetti *et al.*, 2021)
Remoção de H_2S do biogás de reatores anaeróbios visando seu aproveitamento energético.	NT 3: Dessulfuração de biogás por microaeração em reatores UASB (Dos Santos *et al.*, 2021)
	NT 4: Dessulfuração de biogás por adsorção em adsorventes de baixo custo (Santos *et al.*, 2021)
Queima do biogás de reatores anaeróbios visando à destruição do H_2S e do CH_4	NT 5: Combustão direta de biogás em queimadores (Kaminski *et al.*, 2021)
Atmosferas explosivas em ETEs com reatores anaeróbios	NT 6: Levantamento de riscos e classificação de atmosferas explosivas em ETEs com produção de biogás (Rietow *et al.*, 2021)

2. ORIGEM E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

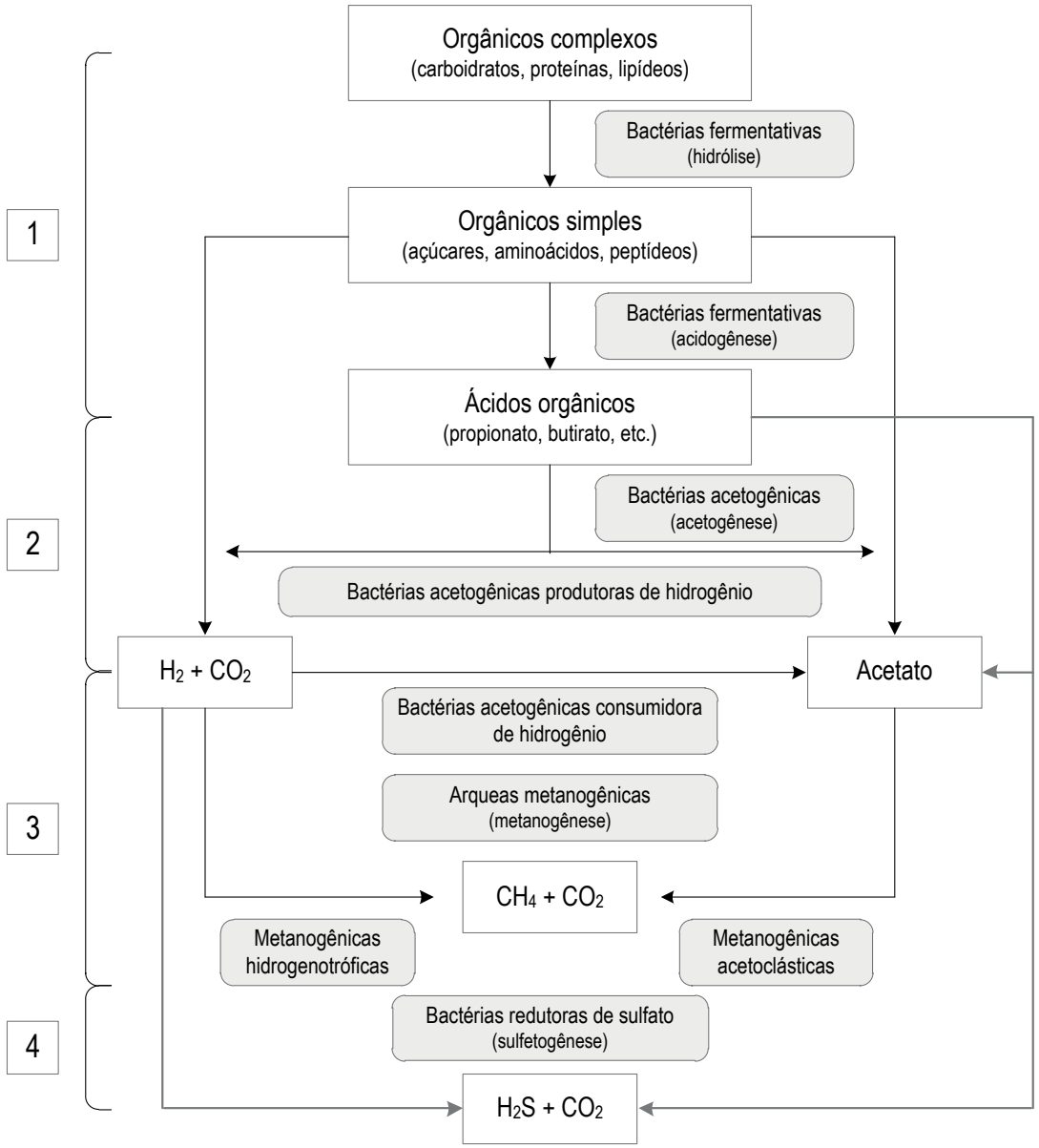
Na digestão anaeróbia, o processo de degradação biológica da matéria orgânica, em condições de ausência de oxigênio, gera subprodutos como o biogás. A digestão anaeróbia pode ser considerada como um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), água, sulfeto de hidrogênio (H_2S) e amônia (NH_3), além de novas células bacterianas. Para a ocorrência dos processos metabólicos da digestão anaeróbia é necessária a atividade conjunta de ao menos três grupos de microrganismos distintos: as bactérias fermentativas ou acidogênicas, as bactérias sintróficas acetogênicas e os microrganismos metanogênicos. As etapas da digestão anaeróbia podem ser visualizadas na **Figura 2**, e são descritas a seguir:

1. **Acidogênese:** em decorrência da atividade das bactérias fermentativas acidogênicas, o material orgânico particulado presente no esgoto doméstico é hidrolisado, e os produtos solúveis dessa primeira etapa (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos) são fermentados em ácidos orgânicos (principalmente acético, butírico e propiônico), alcoóis e compostos minerais (CO_2, H_2, NH_3, H_2S).
2. **Acetogênese:** os microrganismos acetogênicos convertem compostos orgânicos intermediários, como propionato e butirato, em substratos apropriados para os microrganismos metanogênicos, como acetato, hidrogênio e dióxido de carbono.
3. **Metanogênese:** o acetato e o hidrogênio produzidos nas etapas anteriores são convertidos em metano e dióxido de carbono, pelas arqueas metanogênicas.
4. **Sulfetogênese:** com a presença de sulfato em uma água residuária, pode, ainda, ocorrer a redução de sulfato e formação de sulfeto. Devido a presença de sulfato em uma água residuária, muitos dos compostos intermediários formados durante o processo de digestão anaeróbia, passam a ser utilizados pelas bactérias redutoras de sulfato (BRS), provocando uma alteração das rotas metabólicas e uma competição dessas bactérias com as bactérias fermentativas, acetogênicas e metanogênicas, pelos substratos disponíveis. Devido a essa competição, dois produtos finais passam a ser formados: metano (a partir da metanogênese) e sulfeto (a partir da sulfetogênese), sendo a concentração de sulfato que define qual o processo será predominante.

Entre as tecnologias anaeróbias que se destacam pelo potencial de geração de biogás em ETEs, estão os reatores anaeróbios (p. ex.: UASB), para o tratamento da fase líquida

(esgoto sanitário), e os digestores anaeróbios, para o tratamento da fase sólida (lodo). Tendo em vista que a composição do biogás varia com a concentração e as características da matéria orgânica a ser degradada (Noyola *et al.*, 2006), o biogás gerado em reatores UASB e em digestores de lodo apresenta composições típicas distintas (**Tabela 2**). Nesta coletânea de NTs é abordado apenas a produção e o tratamento do biogás gerado em reatores UASB.

O biogás é composto majoritariamente por CH_4, produzido por microrganismos anaeróbios a partir da conversão de diversos tipos de substratos intermediários (dióxido de carbono – CO_2, hidrogênio – H_2, álcoois e ácidos orgânicos). Devido ao elevado teor de CH_4 presente no biogás, fator que define seu poder calorífico, sua recuperação e aproveitamento energético são consideravelmente vantajosos.



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007)

Figura 2 – Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.

Tabela 2 – Concentração dos principais constituintes do biogás gerado em ETEs.

Constituinte	Reator UASB	Digestor de lodo
Metano (CH_4)	60 a 85%	60 a 70%
Dióxido de carbono (CO_2)	5 a 15%	20 a 40%
Nitrogênio (N_2)	2 a 25%	0 a 2%
Sulfeto de Hidrogênio (H_2S)	1.000 a 5.000 ppm_v	500 a 1.500 ppm_v
Umidade relativa	-	90 a 100%
Siloxanos	-	< 40 $mg{\cdot}Nm^{-3}$

Fonte: Brasil (2017).

O poder calorífico inferior (PCI) do CH_4 puro é igual a 35,9 $MJ{\cdot}Nm^{-3}$, sendo que o PCI do biogás, com 70% de CH_4 é de 25,1 $MJ{\cdot}Nm^{-3}$, correspondendo a até 91,5% do PCI típico do gás natural (31,8 $MJ{\cdot}Nm^{-3}$) (Wellinger e Lindberg, 2000). No entanto, o CH_4 é considerado um dos gases de efeito estufa (GEE) mais relevantes, possuindo um potencial de aquecimento global 28 vezes maior quando comparado ao CO_2 em um horizonte de 100 anos (IPCC, 2014). Consequentemente, a recuperação energética e a destruição do CH_4 presente no biogás têm sido estimuladas, não somente como uma medida econômica, mas como elemento para a redução das emissões de GEE.

Além do CH_4, o biogás é composto por CO_2 e N_2. A elevada concentração de N_2 presente no biogás de reatores UASB, se comparado ao de digestores de lodo, pode estar relacionada à solubilização do ar atmosférico no esgoto afluente, sendo liberado para a fase gasosa no interior do reator anaeróbio devido ao decréscimo da pressão parcial de N_2 na fase gasosa (Noyola *et al.*, 2006). No entanto, as baixas concentrações de CO_2 no biogás se devem à elevada solubilidade desse composto no líquido, associada às elevadas cargas hidráulicas normalmente aplicadas aos reatores UASB tratando esgoto sanitário (Chernicharo *et al.*, 2015).

Concentrações menores de outros compostos também estão presentes no biogás (**Tabela 2**). Dentre os compostos de menor teor, o H_2S se destaca por suas características tóxicas, corrosivas e odorantes. O H_2S é formado durante o processo de respiração anaeróbia de diferentes grupos de bactérias redutoras de sulfato (BRS), os quais utilizam diferentes substratos como o sulfato (SO_4^{2-}) ou o tiossulfato ($S_2O_3^{2-}$). É um gás incolor, mais denso do que o ar, possui odor ofensivo e é extremamente tóxico, podendo causar a morte de seres humanos quando expostos a concentrações superiores a 1.000 ppm_v (partes por milhão), a depender do tempo de exposição (WEF, 2004; Metcalf e Eddy, 2016). Ademais, o H_2S é um gás altamente corrosivo, pois reage com a maioria dos metais e sua reatividade aumenta com o aumento de sua concentração, da pressão do sistema, da presença de água e da temperatura (Persson *et al.*, 2006).

A depender da temperatura do biogás, determinada quantidade de água e vapor d'água é absorvida, sendo que, geralmente, o biogás se encontra totalmente saturado (umidade relativa de 100%) (Brasil, 2017). O vapor d'água propicia a formação de ácidos quando combinado ao CO_2 e H_2S, provocando problemas de corrosão (CCE, 2000; FNR, 2010; Deublein e Steinhauser, 2011).

Em alguns casos, o biogás pode conter siloxanos, compostos presentes em materiais utilizados como matéria prima de produtos de higiene, lubrificantes e aditivos de alimentos (Brasil, 2017). Os siloxanos são compostos orgânicos voláteis formados por ligações de átomos de Si e O (Si-O-Si), que durante a combustão do biogás são oxidados a dióxido de silício (SiO_2), resíduo que apresenta propriedades químicas e físicas semelhantes ao vidro, tendo, portanto, elevado potencial abrasivo (de Arespacochaga *et al.*, 2015).

3. CONDIÇÕES PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

3.1. Estimativa de produção

O aproveitamento energético do biogás de reatores anaeróbios está condicionado à adequada gestão das emissões fugitivas, que reduzem a produção e o potencial de recuperação do biogás, podendo inviabilizar os investimentos para o seu aproveitamento (Brasil, 2016; Possetti *et al.*, 2018). As emissões fugitivas de biogás em reatores UASB estão associadas aos seguintes aspectos principais: (i) vazamentos nos separadores trifásicos (STFs) e/ou na linha de

biogás; (ii) sistemas ineficientes e vulneráveis de remoção de escuma que propiciam emissões fugitivas de biogás; (iii) entrada excessiva de água pluvial na rede coletora de esgoto; e (iv) emissões fugitivas da parcela de CH_4 que se encontra dissolvida no efluente (Possetti *et al.*, 2018).

Considerando que todos os problemas citados, de forma geral, fazem parte da realidade da grande maioria das ETEs brasileiras, a estimativa de produção de biogás em reatores UASB, para fins de dimensionamento do sistema de aproveitamento energético, não pode se basear apenas nas rotas de conversão da matéria orgânica. Isso porque as perdas de biogás inerentes às emissões fugitivas podem ser bastante expressivas (superiores a 50%) e impactar consideravelmente o volume de gás disponível, conduzindo a incertezas que podem prejudicar sobremaneira o projeto e, consequentemente, a eficiência dos sistemas de aproveitamento energético do biogás.

Nesse contexto, o Programa de Estimativa de Produção de Biogás em Reatores UASB (ProBio 2.0), pautado no modelo matemático proposto por Lobato *et al.* (2012), foi desenvolvido com o objetivo de diminuir as incertezas técnicas associadas às estimativas de produção de biogás em reatores UASB e possibilitar a criação de parâmetros de projetos aplicáveis no que tange à recuperação energética desse gás, visto que considera todas as perdas decorrentes das emissões fugitivas de biogás e as rotas de conversões da matéria orgânica em um reator UASB. Mais detalhes sobre o programa e suas aplicações são apresentados na **NT 2** desta coletânea (Possetti *et al.*, 2021).

3.2. Requisitos de qualidade do biogás em função dos diferentes usos

Além da necessidade de se realizar uma estimativa confiável da produção de biogás, a viabilidade de seu uso energético está diretamente associada à eficiência dos processos de condicionamento e tratamento deste gás, de forma a reduzir e/ou eliminar compostos indesejáveis, garantindo a qualidade do biogás de acordo com a utilização pretendida e tecnologia requerida. Os compostos cujos teores devem ser reduzidos e seus efeitos adversos ao aproveitamento energético do biogás são apresentados na **Tabela 3**.

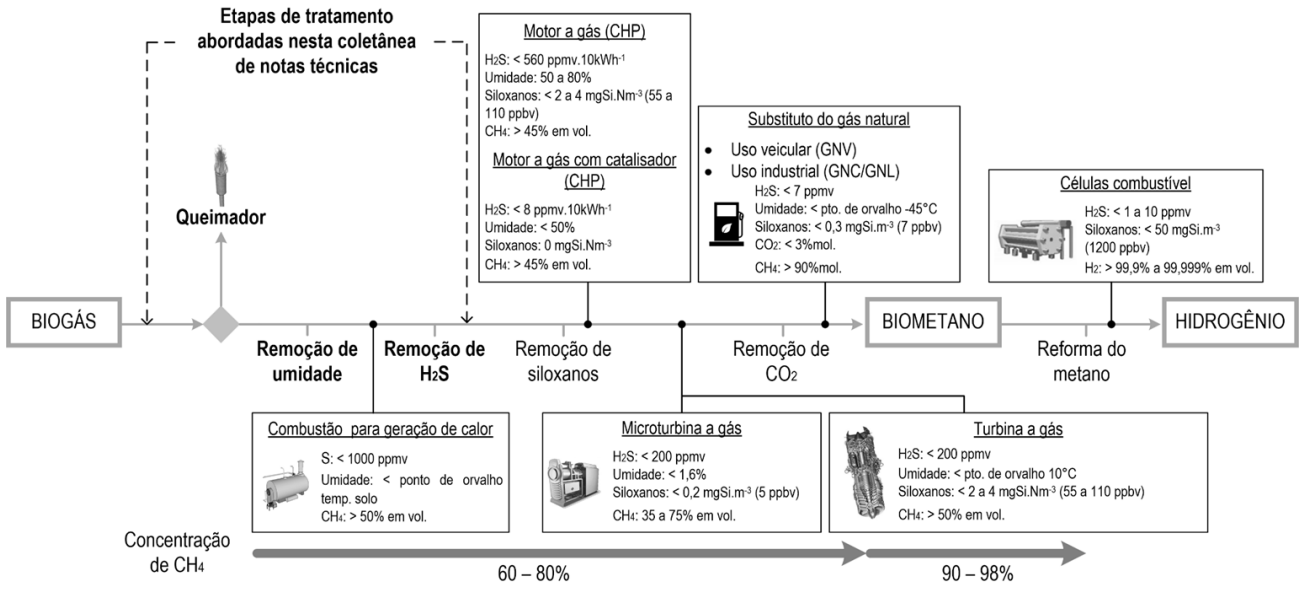
Dentre os compostos indesejáveis presentes no biogás, o H_2S é, possivelmente, o mais importante, pois embora encontrado em baixas concentrações (**Tabela 2**), seu elevado potencial corrosivo exige um sistema de tratamento com elevadas eficiências de remoção na maioria das aplicações (Brasil, 2017). Outro composto presente no biogás, que deve ser removido para atender às exigências da maioria dos usos, é o vapor d'água. O vapor d'água propicia a formação de ácidos quando combinado ao CO_2 e H_2S (FNR, 2010), provocando a corrosão das tubulações e equipamentos utilizados no aproveitamento energético do biogás, e, consequentemente, reduzindo a vida útil do sistema de tratamento (CCE, 2000; Deublein e Steinhauser, 2011). Outros compostos de interesse são os siloxanos, CO_2 e N_2. A presença de siloxanos pode levar à formação de sílica e silicatos durante a combustão do biogás e, em decorrência, ao desgaste abrasivo de motores e turbinas. Já a presença de CO_2 e de N_2 contribui para reduzir o poder calorífico do biogás e, consequentemente, o seu potencial de aproveitamento energético.

Tabela 3 – Compostos típicos e impurezas presentes no biogás.

Componentes	Efeitos
H_2S	• Efeito corrosivo em equipamentos e tubulações. • Emissão de SO_2 após queimado e emissão de H_2S na combustão incompleta.
Vapor d'água	• Causa corrosão de equipamentos e tubulações quando associado a outros compostos, como o H_2S e CO_2.
Siloxanos	• Durante a queima do biogás contendo siloxanos, há formação de sílica (SiO_2) e silicatos (SixOy), que têm efeito abrasivo e danificam equipamentos.
CO_2	• Reduz o poder calorífico do biogás por reduzir a concentração volumétrica de CH_4. • Causa corrosão (baixas concentrações de ácido carbônico) se o gás estiver úmido.
N_2	• Reduz o poder calorífico do biogás por reduzir a concentração volumétrica de CH_4.

Fonte: Deublein e Steinhauser (2011).

Na **Figura 3** são apresentadas as etapas de tratamento associadas aos requisitos de qualidade do biogás de acordo com a utilização desejada e tecnologia requerida para seu aproveitamento energético. O biogás, depois da remoção das principais impurezas como umidade, siloxanos e, principalmente, H_2S, pode ser utilizado para a produção de energia elétrica e térmica.



Notas: Os requisitos de qualidade do biogás são variáveis de acordo com os limites estabelecidos pelos fabricantes das tecnologias de conversão energética. Valores da figura são somente indicativos. Fator de conversão de siloxanos: 1 mgSi·m^{-3} (1 atm e 0 °C) = 2,7 mg·m^{-3} = 30 ppb$_v$.
Elaborado a partir: DWA-M 361 (2011); Brasil (2017); ANP (2017).

Figura 3 – Fluxograma das etapas de tratamento do biogás de acordo com a utilização desejada e tecnologia requerida.

Dentre as aplicações mais relevantes estão: (i) combustão direta para produção de calor - cozimento, aquecimento de água, caldeira (vapor), higienização e/ou secagem de lodos; (ii) produção direta de eletricidade; e (iii) geração combinada de calor e eletricidade. A melhor alternativa deve ser escolhida considerando os aspectos econômicos, sociais e ambientais, bem como as características regionais (Chernicharo *et al.*, 2018). Adicionalmente, o beneficiamento do biogás a biometano está associado à remoção complementar do CO_2, objetivando atingir concentrações de CH_4 maiores que 90% (ANP, 2017). Cabe destacar a recente autorização no Brasil da injeção de biometano oriundo de ETEs na rede de gás natural (vide Resolução da Agência Nacional de Petróleo nº 685/2017 – ANP, 2017).

3.3. Considerações em relação à presença de N_2 e siloxanos no biogás

As elevadas concentrações de N_2 no biogás de reatores UASB (**Tabela 2**) inviabilizam a obtenção de um gás com concentração de CH_4 acima de 90% (biometano), visto que o processo para remoção de N_2 é substancialmente complexo (Brasil, 2017), podendo ser considerado impraticável na realidade atual das ETEs brasileiras. Dessa forma, apenas o biogás gerado em digestores de lodo apresenta características favoráveis à produção de biometano e, eventualmente, de hidrogênio.

Quanto aos siloxanos, em vista da baixa biodegradabilidade e da alta afinidade desse composto ao material particulado, é provável que estes sejam transferidos preferencialmente da fase líquida (esgoto) para o lodo, sendo esperadas baixas concentrações no biogás de reatores UASB (Wang *et al.*, 2013). Portanto, em princípio, o sistema de tratamento do biogás gerado em reatores UASB não deveria priorizar a remoção de siloxanos. Todavia, mais estudos de caracterização do biogás de reatores UASB para a presença de siloxanos devem ser realizados.

Comparativamente aos reatores UASB, o biogás de digestores de lodo deve apresentar concentrações mais elevadas de siloxanos, devido à maior concentração do lodo nos digestores. Adicionalmente, os digestores de lodo são usualmente operados a temperaturas mais elevadas que os reatores UASB, o que pode favorecer o processo de volatilização dos siloxanos (Dewil *et al.*, 2006).

A remoção de siloxanos do biogás é uma exigência relativamente nova e poucos estudos foram realizados neste campo até o momento no Brasil. A maioria dos estudos reporta resultados de caracterização de biogás gerado em digestores de lodo, sendo raros os trabalhos sobre a detecção de siloxanos em biogás de reatores UASB (Eller, 2013).

Nesse contexto, para fins dessa coletânea de NTs, apenas as principais tecnologias de tratamento associadas à remoção de umidade e de H_2S são apresentadas (**Figura 3**). Especificamente, técnicas de remoção de umidade e de H_2S são consideradas quando o aproveitamento de energia elétrica e térmica for o objetivo do tratamento, e a combustão direta em queimadores quando o aproveitamento energético não for praticável ou houver sua paralisação.

3.4. Segurança, riscos associados com explosões e definição de áreas classificadas

O aproveitamento do biogás traz consigo a importância do levantamento dos aspectos de segurança em uma ETE. Essa temática, muitas vezes negligenciada, é de fundamental importância para o correto gerenciamento do biogás. Detalhes sobre os perigos relacionados à operação de unidades produtoras de biogás, bem como as medidas que devem ser tomadas para reduzir os riscos de ocorrência de acidentes estão reportados em Brasil (2017). Dentre os principais tópicos de segurança a serem levantados dentro de uma ETE com produção de biogás, destacam-se os riscos associados com a formação de atmosferas explosivas. Essa condição existe quando o ambiente apresenta uma mistura ar-combustível e uma fonte de ignição com energia o suficiente para iniciar um processo de explosão. Portanto, dentro de uma ETE, a formação de uma atmosfera explosiva só ocorrerá caso o CH_4 e o ar atmosférico se combinem em uma restrita faixa de concentrações - 4% (limite inferior de explosão) e 15% (limite superior de explosão) de concentração de CH_4 (DWA, 2010; Deublein e Steinhauser, 2011).

Para diminuir esses riscos, tem-se empregado a Norma Brasileira (NBR) 60079-10-1/2016, adaptada da Comissão Eletrotécnica Internacional, que estabelece os procedimentos de classificação de áreas sujeitas a atmosferas explosivas (ABNT, 2016). Os principais objetivos da classificação dessas áreas estão voltados para a eliminação da probabilidade de ocorrência do ambiente explosivo ao redor de uma fonte de ignição, bem como, na eliminação de potencial fonte de ignição. Em situações normais de operação, inclusive em processos de manutenção, é quase impossível assegurar que a formação de uma atmosfera explosiva nunca irá ocorrer, ou, que os equipamentos instalados nunca se constituirão em fontes de ignição. Sendo assim, em casos em que se constate uma elevada probabilidade de formação de uma atmosfera explosiva, devem então ser utilizados equipamentos que possuam um baixo potencial de se tornarem fontes de ignição (ABNT, 2016).

Nesse contexto, a **NT 6** desta coletânea evidencia os principais pontos que devem ser observados durante o processo de classificação de atmosferas explosivas em ETEs com produção de biogás (Rietow *et al.*, 2021). Além dos requisitos para a identificação das principais fontes de explosão, são reportados também os mecanismos de avaliação da disponibilidade de ventilação, sendo esses fundamentais para a classificação de uma área explosiva. A partir desse levantamento, as zonas de riscos e suas respectivas extensões podem ser estabelecidas subsidiando a adoção de procedimentos de segurança.

4. PRINCIPAIS TÉCNICAS DE TRATAMENTO DO BIOGÁS DE REATORES ANAERÓBIOS

4.1. Remoção de Umidade

Como já comentado, a umidade deve ser removida do biogás para evitar danos aos componentes do sistema de aproveitamento energético (corrosão devido à formação de ácidos pela presença de CO_2 e H_2S em um ambiente úmido), bem como para atender às exigências das etapas de tratamento subsequentes. A remoção de umidade do biogás pode ocorrer através dos seguintes processos principais de secagem: (i) por condensação; (ii) por absorção (desidratação por glicol); e (iii) por adsorção (sílica gel, alumina, zeólitos), ilustrados na **Figura 4** e descritos resumidamente a seguir (FNR, 2012). Mais informações sobre as técnicas de remoção de umidade do biogás podem ser encontradas em FNR (2006); FNR (2010); FNR (2012); FNR (2016); Brasil (2017).

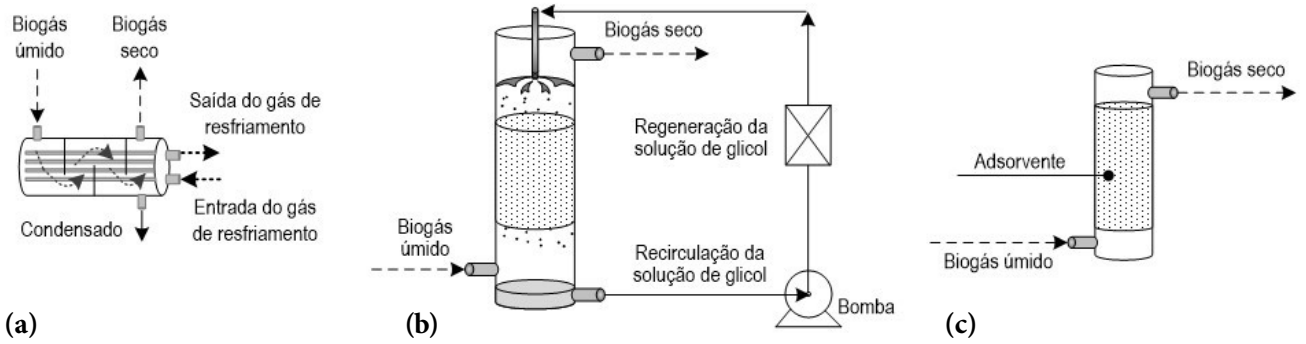


Figura 4 - Técnicas para remoção de umidade do biogás: (a) condensação; (b) absorção; (c) adsorção.

4.1.1. Secagem por Condensação

Este processo de tratamento é indicado para qualquer vazão de biogás e ocorre, em geral, pelo resfriamento do biogás abaixo da temperatura do ponto de orvalho, frequentemente em tubulação inclinada, e posterior separação do condensado em purgador(es) de vapor localizado(s) no(s) ponto(s) mais baixo(s) da tubulação. O resfriamento ocorre pela passagem do gás através de um trocador de calor carregado com um fluido de arrefecimento em contrafluxo, absorvendo o calor e reduzindo a temperatura do gás até aproximadamente 5 °C (**Figura 4a**). A redução da temperatura a um nível inferior ao ponto de orvalho provoca a condensação do vapor d'água presente no gás, permitindo sua remoção. Após o processo de resfriamento, a temperatura do gás é novamente elevada até retornar à temperatura operacional. Contudo, devido à baixa umidade do gás, em função da eliminação do condensado, seu ponto de orvalho é reduzido, e a condensação não volta a ocorrer (Brasil, 2017).

4.1.2. Secagem por Absorção

A desidratação por absorção é um processo físico no qual o biogás flui através de uma coluna absorvedora em contracorrente a uma solução de glicol ou trietilenoglicol (**Figura 4b**). A regeneração da solução de lavagem ocorre pelo seu aquecimento a 200 °C, provocando a vaporização da água. Em termos econômicos, essa técnica é indicada para vazões maiores que 500 $m^3 \cdot h^{-1}$, devido ao seu elevado custo de implantação e operação (FNR, 2006). Na prática, estabeleceu-se principalmente na secagem de gás natural, dessa forma, dos três métodos mencionados, a secagem por absorção é o menos utilizado para remoção de umidade do biogás (FNR, 2016).

4.1.3. Secagem por Adsorção

Os processos de secagem por adsorção utilizam como material adsorvente as peneiras moleculares (zeólitos), sílica gel ou óxido de alumínio (alumina), e atingem altas eficiências de remoção de umidade, podendo ser aplicados para qualquer tipo de uso do biogás. Os adsorventes são dispostos em colunas de leito fixo operadas alternadamente a uma pressão de 6 a 10 bar e com vazões de 100 a 100.000 $m^3 \cdot h^{-1}$ (**Figura 4c**) (FNR, 2006). Notar que para ETEs com reatores anaeróbios de grande porte (equivalente populacional > 100.000 habitantes), as vazões são da ordem de 50 $m^3 \cdot h^{-1}$ (Lobato *et al.*, 2012). Um exemplo de aplicação dessa técnica é no ajuste do teor de umidade do biometano, após secagem por condensação, visando garantir qualidade equivalente à do gás natural para posterior injeção nos gasodutos (Brasil, 2017). No entanto, devido aos resultados promissores alcançados, esse método pode ser aplicado a qualquer tipo de uso do biogás (FNR, 2010).

4.1.4. Comparação das técnicas para a remoção da umidade do biogás de reatores UASB

Na **Tabela 4** é apresentada a comparação das diferentes tecnologias para a remoção da umidade do biogás de reatores anaeróbios. Por se tratar de técnicas amplamente consolidadas, não são apreesentadas em detalhes em NTs específicas.

Tabela 4 – Tecnologias para remoção de umidade do biogás em ETEs com reatores anaeróbios.

Tecnologia	Implantação	Operação / manutenção	Requisitos de energia
Condensação	++	++	+
Absorção	+	+	++
Adsorção	+++	++	+++

Nota: +++ muito vantajoso, ++ vantajoso, + pouco vantajoso.
Fonte: Adaptado de FNR (2006); FNR (2010); FNR (2016); Brasil (2017).

4.2. Métodos de Dessulfuração

Conforme discutido no item 3 desta NT, além de seu elevado potencial corrosivo, o H_2S merece atenção por apresentar odor desagradável e elevada toxicidade (mesmo em baixas concentrações), causando desconfortos odoríferos e eventuais problemas ocupacionais (Wef, 2004; Fnr, 2010).

Nesse contexto, diversos métodos para a remoção do H_2S do biogás são utilizados, os quais podem ser divididos, de acordo com o tipo de processo empregado, em: físicos, químicos ou biológicos (**Figura 5**). Quando o tratamento é realizado com a finalidade de utilizar o biogás para geração de energia, a avaliação das principais características, vantagens e desvantagens de cada método deve-se basear nos seguintes aspectos: (i) econômicos; (ii) eficiência de remoção de compostos de enxofre; (iii) aplicabilidade para a remoção de H_2S em elevadas concentrações; e (iv) possibilidade de remoção seletiva de H_2S.

Dessa forma, embora tecnicamente todas as tecnologias apresentadas possam ser aplicadas na remoção do H_2S do biogás, poucas oferecem vantagens relevantes quando considerados os pontos mencionados. Os aspectos econômicos (custos de implantação e operação) são amplamente favoráveis às tecnologias biológicas, no entanto, quando é necessária a aplicação de altas cargas de H_2S e a obtenção de elevada eficiência e seletividade de remoção, as técnicas físico-químicas se destacam. Portanto, o uso das técnicas de microaeração e adsorção são consideradas mais adequadas quando se objetiva o tratamento do biogás para aproveitamento energético em ETEs, pois reúnem vantagens relacionadas a simplicidade operacional e baixos custos de implantação e manutenção, caso sejam empregados adsorventes de baixo custo como alternativa ao carvão ativado (**Figura 6**). Essas técnicas são suscintamente descritas a seguir e detalhadas nas **NTs 3 e 4** que integram esta coletânea (**Tabela 1**) (Dos Santos *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2021). Mais detalhes a respeito dos demais processos de tratamento podem ser obtidos em WEF (2004); Noyola *et al.* (2006); FNR (2010).

4.2.1. Adsorção

A adsorção refere-se ao processo de adesão física ou química de determinados compostos na superfície de um sólido. Os componentes que se concentram na superfície do sólido são geralmente denominados de adsorvato, e a superfície sólida na qual o adsorvato se acumula, de adsorvente. Dessa forma, quanto maior for essa superfície, maior será a qualidade do material adsorvente (Suzuki, 1990). Diversos adsorventes são utilizados na remoção do H_2S de biogás, tais como peneiras moleculares (zeólitas), materiais carbonáceos e óxidos

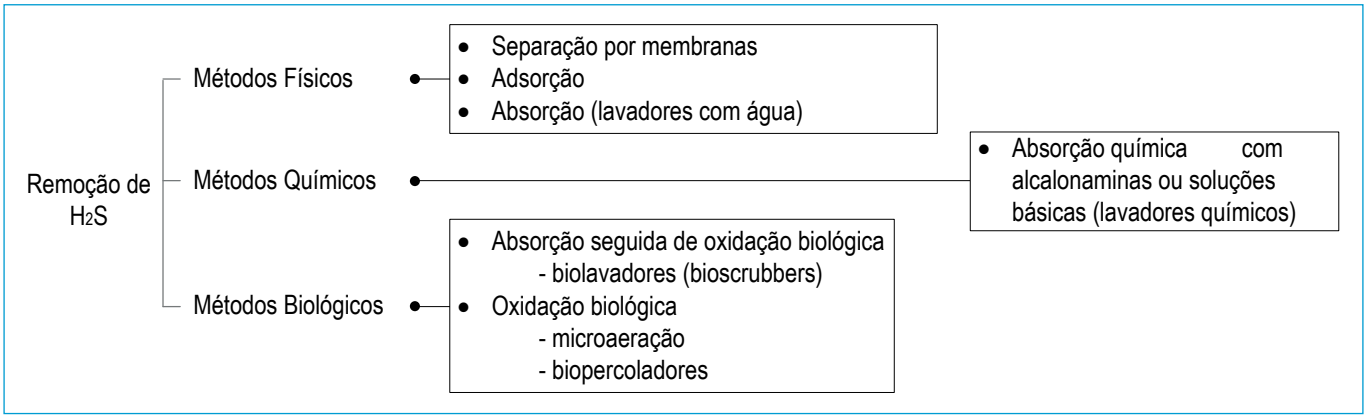
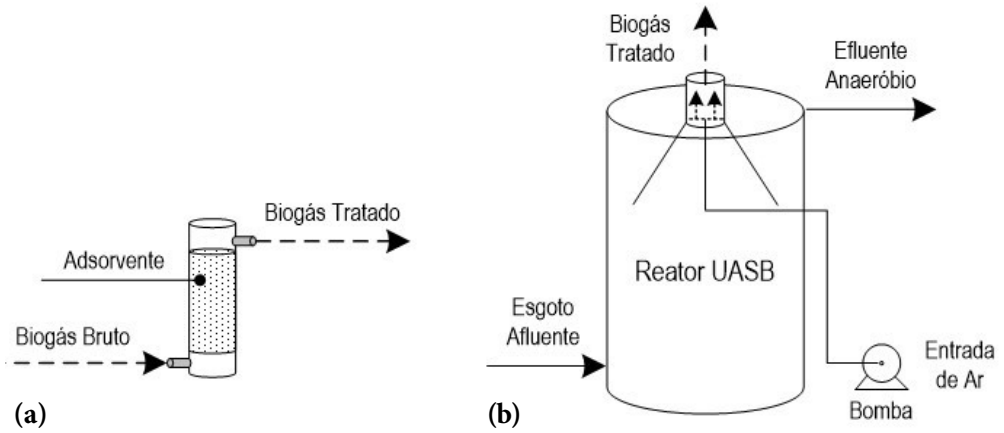


Figura 5 – Principais métodos de remoção de H_2S do biogás em ETEs com reatores anaeróbios.



Nota: A introdução da microaeração pode ocorrer: i) no compartimento de digestão; ii) na fase líquida do separador trifásico; ou iii) na fase gasosa do separador trifásico.

Figura 6 – Técnicas para o tratamento do biogás gerado em ETEs com reatores anaeróbios para aproveitamento energético: (a) adsorção; (b) microaeração.

metálicos (Ozekmekci *et al.*, 2015). No entanto, o adsorvente mais comumente aplicado é o carvão ativado (especialmente impregnado), material carbonáceo com elevado custo de aquisição, sendo uma das principais desvantagens do método de adsorção (Barelli *et al.*, 2017). Portanto, existe grande necessidade da aplicação de materiais alternativos.

A eficiência de tratamento do biogás por adsorção depende de diversos fatores, tais como o tipo e características do adsorvente utilizado, o tempo de detenção, a velocidade do gás, e a concentração do H_2S (Brasil, 2017). A remoção do H_2S por adsorção em adsorvente a base de óxido de ferro, por exemplo, permite o tratamento de um biogás com concentrações de H_2S de até 6.000 ppm_v (muito acima das concentrações observadas em biogás de reatores UASB – **Tabela 2**), podendo atingir baixas concentrações de saída (gás tratado), menores que 20 ppm_v (Brasil, 2017).

No entanto, o tratamento por adsorção em carvão ativado pode ser aplicado em escala comercial até uma concentração máxima de H_2S de aproximadamente 500 ppm_v, podendo atingir concentrações inferiores a 1 ppm_v no gás tratado (Brasil, 2017). Dessa forma, esse processo é preferencialmente instalado a jusante de outros sistemas de dessulfuração, visando à limpeza fina (Brasil, 2017). O elevado custo de aquisição e/ou regeneração do carvão ativado parece ser a principal limitação da sua utilização para o tratamento do biogás bruto com altas concentrações de H_2S, já que quanto maior a carga de H_2S aplicada, maior será a frequência de substituição/regeneração do adsorvente. A **NT 4** desta coletânea aborda o uso de adsorventes de baixo custo como alternativa ao carvão ativado, os quais podem tornar a técnica de adsorção economicamente atrativa para o tratamento do biogás em ETEs com reatores anaeróbios (Dos Santos *et al.*, 2021).

4.2.2. Microaeração

A microaeração é uma técnica, relativamente recente, aplicada em reatores anaeróbios ou em reservatórios de gás (gasômetros) para remoção do H_2S, principalmente em biogás, mas também dissolvido no efluente líquido, no caso dos reatores. Na microaeração, o oxigênio atua na oxidação parcial bioquímica (principalmente) dos sulfetos formados na digestão anaeróbia, tendo o enxofre elementar como principal produto da reação. Muito embora seja muito baixo o risco da formação de atmosferas potencialmente explosivas, uma vez que as taxas de microaeração utilizadas são bastante reduzidas, deve haver controle da quantidade de ar injetado no sistema. Vários fatores influenciam o processo de microaeração, como a definição do gás a ser introduzido (ar ou oxigênio concentrado) e a definição do ponto de introdução da microaeração (Souza *et al.*, 2019).

Considerando os custos de instalação e operação, o ar é mais facilmente aplicável. No entanto, o efeito indesejado

de sua aplicação é a introdução de grandes quantidades de nitrogênio no reator anaeróbio (N_2 - concentração de cerca de 78% no ar), o que causa considerável diluição da concentração de CH_4 no biogás, aumentando artificialmente o volume total de biogás produzido (Castro, 2017). As possibilidades do ponto de introdução da microaeração são: (i) na zona de digestão; (ii) na fase líquida da zona separadora trifásica; e (iii) na fase gasosa (*headspace*) da zona separadora trifásica. No caso dos reservatórios de biogás, apenas a opção de injetar o ar no *headspace* é válida.

Eficiências de 90% de remoção de H_2S no biogás podem ser alcançadas com a microaeração no compartimento de digestão (Castro, 2017) e de até 83% com microaeração em gasômetros com biogás de reatores UASB. Nesse contexto, essa técnica, em geral, é adequada para quando se deseja utilizar o biogás em motores estacionários a gás, desde que não ocorram grandes oscilações nas concentrações de enxofre (FNR, 2012). Cabe ressaltar que existe a possibilidade de realizar a microaeração diretamente no reservatório de biogás. Essa abordagem também é detalhada na **NT 3** desta coletânea (Santos *et al.*, 2021).

4.2.3. Comparação das técnicas de interesse para dessulfuração do biogás de reatores anaeróbios

Na **Tabela 5** é apresentada a comparação de técnicas de interesse para a remoção do H_2S de biogás de reatores UASB, as quais são tratadas com mais detalhes nas **NTs 3 e 4** que compõem esta coletânea.

4.3. Combustão direta em queimadores

Nas situações em que o aproveitamento energético do biogás não é uma opção técnica e economicamente atrativa, este deve ser encaminhado para tratamento por combustão direta em queimadores. A queima do biogás é importante no gerenciamento de emissões de GEE, uma vez que minimiza as emissões de CH_4 para a atmosfera. Complementarmente, também reduz a emissão de gases odorantes e corrosivos, notadamente o H_2S, salvaguardando as infraestruturas da ETE e a saúde ocupacional de operadores, já que esses gases são também irritantes e tóxicos aos seres humanos. Um raciocínio análogo pode ser aplicado para ETEs que apresentam unidades de aproveitamento energético do biogás, visto que nessas situações os queimadores devem ser instalados para o caso de excesso de produção de biogás ou de paralisações do funcionamento da unidade de beneficiamento do biogás, visando evitar o lançamento de GEE e de gases odorantes na atmosfera (Brasil, 2017).

Os queimadores podem ser classificados em dois tipos principais de acordo com o enclausuramento da chama: aberto ou fechado (enclausurado) (Brasil, 2017). No Brasil, o queimador aberto é a configuração mais comumente observada em ETEs, principalmente devido às baixas demandas de investimento e facilidade de instalação, se comparado aos queimadores enclausurados (Possetti *et al.*, 2021). Nos queimadores abertos, a chama está sujeita às condições atmosféricas, o que resulta em grande instabilidade e, consequentemente, reduz a eficiência de combustão, que se encontra entre 10 e 50%, aproximadamente, para o CH_4 e o H_2S (Leahey *et al.*, 2001; Brasil, 2017). Por outro lado, em queimadores enclausurados, a chama é confinada em uma câmara de combustão com isolamento térmico, que permite temperaturas internas da ordem de 1.000 °C e temperatura externa menor que 80 °C (Brasil, 2017), sendo capaz de atingir eficiências de combustão maiores do que 98% para o CH_4 e o H_2S (Kaminski, 2018).

Tabela 5 – Comparação das técnicas de remoção de H_2S do biogás em ETEs anaeróbias.

Tecnologia	Economia			Eficiência remoção de H2S	Remoção seletiva de H2S	Aplicabilidade para elevadas concentrações de H2S	Simplicidade operacional
	Implantação	Operação / manutenção	Energia				
Adsorção	++	+[(a)]	+++	+++	+++	+[(b)]	+++
Microaeração	+++	+++	++	++	++	++	+

Notas: +++ muito vantajoso, ++ vantajoso, + pouco vantajoso. [(a)]elevados custos de operação e manutenção se o carvão ativado for utilizado como adsorvente. [(b)] Se o carvão ativado for utilizado como adsorvente, devido à elevada frequência de substituição associada aos elevados custos de aquisição desse adsorvente.
Fonte: Adaptado de Castro (2017); Barelli *et al.* (2017); Souza *et al.* (2019).

Tanto para os queimadores abertos quanto para os fechados, a ignição pode ser realizada por chama piloto ou fagulhamento com energia elétrica. No que se refere ao fornecimento de ar de combustão, em queimadores abertos este ocorre geralmente de forma passiva, por autossucção através de aberturas existentes abaixo da câmara de ignição. Em queimadores fechados, o fornecimento de ar de combustão se dá no início da câmara de combustão, podendo ocorrer tanto de forma passiva quanto de forma ativa, por ar forçado, através de um soprador de ar (FNR, 2010). Informações mais detalhadas sobre a técnica de tratamento do biogás por combustão direta em queimadores são apresentadas na **NT 5** que integra esta coletânea (Possetti *et al.*, 2021).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com esta coletânea de notas técnicas, espera-se contribuir para o melhor entendimento dos principais aspectos relacionados ao aproveitamento energético do biogás gerado em reatores UASB, notadamente aqueles relacionados à estimativa de produção e ao seu tratamento. Estimativas mais seguras de produção de biogás podem ser realizadas com a utilização do ProBio 2.0, apresentado nesta NT e tratado em detalhes na **NT 2** desta coletânea. Técnicas adequadas para o tratamento do biogás gerado em reatores UASB são apresentadas nesta NT e descritas em detalhes nas **NTs 3, 4 e 5** desta coletânea, trazendo parâmetros de projeto, construção e operação de tais sistemas. A maioria expressiva das técnicas aqui apresentadas é simples e efetiva, sem impactos significativos sobre os custos dos projetos de aproveitamento energético, sendo aplicáveis principalmente a ETEs de pequeno e médio porte. Adicionalmente, na **NT6** são apresentados os riscos associados à formação de áreas sujeitas a atmosferas explosivas e os aspectos referentes à classificação dessas áreas, de forma a subsidiar a adoção de procedimentos de segurança.

Nesse sentido, gestores, consultores, projetistas, construtores e operadores de sistemas de tratamento de esgoto baseados em reatores anaeróbios são incentivados a se atualizarem e a aprofundarem seus conhecimentos acerca dos tópicos de interesse discutidos nesta coletânea de notas técnicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional de Águas. *Atlas esgotos: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil*. Brasília, Brasil: ANA, 2020. 44 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR IEC 60079-0: Equipamentos – requisitos gerais. 2ª ed. Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

ANP. Agência Nacional de Petróleo. Resolução ANP nº 685, de 29 de junho de 2017. Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Brasília, DF, 2017.

BARELLI, L.; BIDINI, G.; ARESPACOCHAGA, N.; PÉREZ, L.; SISANI, E. Biogas use in high temperature fuel cells: enhancement of KOH-KI activated carbono performance toward H_2S removal. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, p. 10341-10353, 2017.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades/Probiogás. *Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto*. 2 ed. Brasília, Brasil: Ministério das Cidades, 2017. 183 p.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades/Probiogás. *Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás*. Brasília, Brasil: Ministério das Cidades, 2016. 145 p.

CASTRO, I. M. P. *Avaliação da microaeração em reator UASB piloto para remoção do sulfeto de hidrogênio produzido no tratamento de esgoto doméstico*. 2017. 110 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Recursos Hídricos e Meio Ambiente). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

CCE. Centro para conservação de energia. *Guia Técnico de Biogás*. Amadora, Portugal: AGEEN, 2000. 117 p.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios*. 2 ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).

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

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

DE ARESPACOCHAGA, N.; VALDERRAMA, C.; RAICH-MONTIU, J.; CREST, M.; MEHTA, S.; CORTINA, J.L. Understanding the effects of the origin, occurrence, monitoring, control, fate and removal of siloxanes on the energetic valorization of sewage biogas - a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 52, p. 366-381, 2015.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources*, 2nd ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co KGaA, 2011.

DEWIL, R.; APPELS, L.; BAEYENS, J. Energy use of biogas hampered by the presence of siloxanes. *Energy Conversion and Management*, v. 44, p. 1711-1722, 2006.

DOS SANTOS, A. B.; SILVA, M. E. R.; FIRMINO, P. I. M.; CABRAL, C. B. G.; SOUZA, C. L.; SANTOS, J. M. B. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanço nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 3 - Dessulfuração de biogás por microaeração em reatores UASB. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 1, n.1, p 35-46, 2021.

DWA-M 363. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Origem, Tratamento e Utilização do Biogás (Origin, treatment and use of biogas). German Association for Water and Waste, Hennef, Germany, 2010.

DWA-M 361PT. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Tratamento de Biogás - DWA-M 361PT (Biogas treatment - DWA-M 361PT). German Association for Water and Waste, Hennef, Germany, 2011, 40 p.

ELLER C. M. *Caracterização dos compostos traços influentes no aproveitamento energético do biogás gerado em reator UASB no tratamento de esgoto doméstico*. 2013. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo.

FNR. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz, (Alimentação de biogás na rede de gás natural). Leipzig, Germany, 2006.

FNR. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. *Guia Prático do Biogás – Geração e Utilização*. Fachagentur für nachwachsende. 2010. 236 p.

FNR. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe Leitfaden e. V. Guide to biogas: From production to use (Guia Prático do Biogás – Geração e Utilização), Leipzig, Germany, 2012.

FNR. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung. Fachagentur fürnachwachsende Rohstoffe (Guia para o biogás - da extração ao uso. Agência de matérias-primas renováveis), Leipzig, Germany, 2016.

IPCC. Climate change 2014: synthesis report. In: Pachauri, R. K. and Meyer, L. A. (Ed.). *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team*. 5th ed. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. 151 p.

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.

KAMINSKI, G.; POSSETTI, G. R. C.; MANNICH, M.; DE MELLO E SILVA, F. O.; RIETOW, J. C.; AISSE, M. M.; PUJATTI, J. F. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 5 - Combustão direta de

biogás em queimadores. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental,* v. 1, n.1, p 59-73, 2021.

LEAHEY, D. M.; PRESTON, K.; STROSHER, M. Theoretical and Observational Assessments of Flare Efficiencies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 51, n. 12, p. 1610-1616, 2001.

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.

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

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.

OZEKMEKCI, M.; SALKIC, G.; FELLAH, M. F. Use of zeolites for the removal of H_2S: A minireview. *Fuel Processing Technology,* v. 139, p. 40-60, 2015.

PERSSON, M.; JÖNSSON O.; WELLINGER, A. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. *IEA Bioenergy*. 2006. 34 p.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; COSTA, F. J. O. G.; WAGNER, L. G.; LOBATO, L.C.S.; BRESSANI-RIBEIRO, T., MELO, D. F.; REIS, J. A; CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 5: Biogás e emissões fugitivas de metano. *Revista DAE*, v. 66, p. 73-89. 2018.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; LOBATO L. C. S.; AISSE, M. M.; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 2 - Programa computacional de estimativa de produção de biogás em reatores UASB – ProBio 2.0. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 1, n.1, p 21-34, 2021.

RIETOW, J. C.; POSSETTI, G. R. C.; CARNEIRO, C.; AISSE, M. M. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 6 - Levantamento de riscos e classificação de atmosferas explosivas em ETEs com produção de biogás. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental,* v. 1, n.1, p 75-86, 2021.

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,* 2015, Rio de Janeiro, Brasil. *Anais*. Rio de Janeiro, Brasil: ABES, 2015.

SANTOS, J. M. B.; BRANDT, E. M. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanço nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 4 - Dessulfuração de biogás por adsorção em adsorventes de baixo custo. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 1, n.1, p 47-58, 2021.

SILVA, T. C. F.; POSSETTI, G. R. C.; COELHO, S. T. Avaliação do potencial de produção de energia a partir do biogás gerado no tratamento de esgotos domésticos. In: *9° Congresso brasileiro de planejamento energético*, 2014. Florianópolis, Brasil. *Anais*. Florianópolis, Brasil: SBPE, 2014.

SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. A. L.; BRANDT, E. M. F.; POSSETTI, G. R. C. Subprodutos gasosos do tratamento de esgotos. In: Santos, A. B. dos (org.). *Caracterização, tratamento e gerenciamento de subprodutos de correntes de esgotos segregadas e não segregadas em empreendimentos habitacionais*. Fortaleza: Imprece, 2019. p. 573-663.

SUZUKI, M. *Adsorption engineering*. Tokyo, Japan: Kodansha, 1990. 295 p.

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. 198 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

WANG, DE-GAO.; NORWOOD, W.; ALAEE, M.; BYER, J. D.; BRIMBLE, S. Review of recent advances in research on the toxicity, detection, occurrence and fate of cyclic volatile methyl siloxanes in the environment. *Chemosphere*, v. 93, p. 711-725, 2013.

WEF. Control of odors and emissions from wastewater treatment plants – Manual of Practice 25. Alexandria: Water Environment Federation, 2004. 538 p.

WELLINGER, A.; LINDBERG, A. Kick-Off for a Future Deployment of Biogas Technology. In: Biogas Event, 2000, Eskilstuna, Sweden. *Proceedings*. Eskilstuna, Sweden, 2000.

© 2021 Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos de licença Creative Commons.

https://doi.org/10.5327/276455760101004

Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios
Nota Técnica 2 – Programa computacional de estimativa de produção de biogás em reatores UASB - ProBio 2.0

Part A: Advances in tools and techniques for estimating biogas production and treatment in anaerobic-based STPs
Technical Note 2 - Software for estimation of biogas production in UASB reactors - ProBio 2.0

Gustavo Rafael Collere Possetti[1]*, Julio Cezar Rietow[2], Lívia Cristina Silva Lobato[3], Miguel Mansur Aisse[4], Carlos Augusto de Lemos Chernicharo[5]

RESUMO

O aproveitamento energético do biogás tem se destacado como uma promissora alternativa para redução dos custos de operação das estações de tratamento de esgotos (ETEs). Contudo, para validar tal prática, faz-se necessário conhecer, minimamente, a quantidade de biogás disponível para uso e, na sequência, compará-la com a quantidade requerida para determinado sistema de aproveitamento energético. Nesse sentido, as análises de medições são de extrema relevância para o processo de tomada de decisão do aproveitamento energético do biogás em ETEs. Entretanto, muitas vezes, essas análises não são exequíveis devido aos elevados custos dos equipamentos de medições. Nesses casos, as decisões precisam ser pautadas em modelos matemáticos de estimativas. Dessa forma, a presente nota técnica tem por objetivo apresentar o programa computacional de estimativa de produção de biogás em reatores UASB – ProBio 2.0. Para tanto, os seguintes tópicos de interesse foram destacados: (i) modelo matemático utilizado como base para a estimativa; (ii) dados de entrada a serem considerados no programa computacional; (iii) balanço de massa de DQO; (iv) relações unitárias de produção de metano (CH_4), biogás e energia; (v) cenários de aproveitamento energético do biogás; e (vi) exemplo de aplicação do ProBio 2.0.

Palavras-chave: produção de biogás; reator UASB; estimativas; programa computacional

ABSTRACT

The use of biogas energy has highlighted as a promising alternative for reducing the operating costs of sewage treatment plants (STPs). However, in order to validate this practice, it is necessary to know, at a minimum, the amount of biogas available for use and, subsequently, compare it with the amount required for a given energy recovery system. In a sense, the analysis of measurements is extremely relevant to the decision making process of the energy use of biogas in STPs. However, these analyzes are often not feasible due to the high cost of measurement equipment. In these cases, decisions need to be based on mathematical models of estimates. Thus, this technical note aims to present a software for estimating biogas production in UASB reactors - ProBio 2.0. Therefore, the following topics of interest were highlighted: (i) mathematical model used as a basis for the estimate; (ii) input data to be considered in the software; (iii) COD mass balance; (iv) unit relationships for the production of methane, biogas and energy; (v) scenarios of biogas energy use and (vi) example of ProBio 2.0 application.

Keywords: biogas production; UASB reactor; estimates; software

[1]Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Engenheiro Eletricista pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre e Doutor em Ciências pela UTFPR. Gerente da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do ISAE. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[2]Engenheiro Ambiental e de Segurança do Trabalho pela Pontifícia Universade Católica do Paraná (PUCPR). Mestre e doutorando em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[3]Engenheira Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[4]Engenheiro Civil pela UFPR. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (USP). Doutor em Engenharia Hidráulica pela Universidade de São Paulo. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da UFPR.
[5]Engenheiro Civil pela UFMG. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle upon Tyne – UK. Professor titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Coordenador do INCT ETEs Sustentáveis
(*) Endereço para correspondência: Avenida Visconde de Guarapuava, 2943 – Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE) – Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade. Curitiba, PR. CEP: 80010-100. e-mail: gustavo_possetti@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

Durante vários anos as estações de tratamento de esgoto (ETEs) foram implantadas considerando o esgoto doméstico apenas como um resíduo líquido, a partir do qual precisam ser removidos sólidos e matéria orgânica antes de seu lançamento em corpos d'água. Essa abordagem tradicional leva em consideração sucessivos processos unitários de tratamento que degradam o esgoto até que suas propriedades físico-químicas e biológicas possam atingir padrões aceitáveis de lançamento. Entretanto, não se pode desprezar que durante o processo de tratamento do esgoto há formação de subprodutos líquidos, sólidos e gasosos, sendo que esses precisam ser devidamente gerenciados, proporcionando, dessa forma, a redução de possíveis impactos sobre o meio ambiente. Não obstante, deve-se também levar em consideração a potencialidade desses subprodutos serem empregados como fonte alternativa de água, energia e nutrientes (Possetti *et al.*, 2019).

Um dos subprodutos gerados no tratamento de esgotos em reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB, do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) é o biogás, o qual pode ser empregado para fins energéticos, devido ao elevado poder calorífico inferior (PCI) do seu principal constituinte - metano (CH_4) (Noyola *et al.*, 2012; Chernicharo *et al.*, 2018; Possetti *et al.*, 2019). O seu aproveitamento para geração de energia elétrica para consumo na própria estação ou interligação na rede pública, e/ou térmica para secagem e higienização do lodo, aquecimento de água para banho ou cocção, entre outros usos, pode contribuir com a diversificação da matriz energética brasileira, ainda que em pequena escala, podendo agregar benefícios financeiros, ambientais e sociais importantes para os setores produtivos do país, respaldando a construção de uma economia circular. Isto posto, a partir do aproveitamento do biogás gerado, as ETEs podem então ser caracterizadas como plantas de recuperação de recursos, assumindo uma postura inovadora e aptas a oferecer um serviço de tratamento de esgoto com baixa pegada de carbono[1] (Bressani *et al.*, 2019).

Apesar das inúmeras vantagens inerentes ao aproveitamento energético do biogás, destaca-se que ainda existem incertezas no que diz respeito a sua real produção em reatores UASB. Embora as tomadas de decisão intrínsecas ao gerenciamento e aproveitamento energético do biogás em ETEs devam ser pautadas em resultados de medições, muitas vezes, essas não são exequíveis (Possetti *et al.*, 2018). Isto se deve, principalmente, porque boa parte dos equipamentos de medições disponíveis no mercado possuem um alto custo de aquisição (Duarte *et al.*, 2018), não sendo instalados em grande parte das ETEs. Nesse sentido, para uma tomada inicial de decisão, a quantificação da produção de biogás deve ser pautada em modelos matemáticos de estimativas. Entretanto, estudos realizados por Silva *et al.* (2014) constataram que os modelos de estimativa de biogás, que não levam em consideração todas as rotas de conversão da demanda química de oxigênio (DQO) e possíveis perdas do CH_4 dentro de um reator UASB, superestimam a produção de biogás e a energia química nele acumulada. De acordo com os autores, modelos como o do Painel Intergovernamental para Mudança Climática (IPCC, 2006) e da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC, 2013), por não contemplarem a parcela de DQO utilizada na redução do sulfato (SO_4^{2-}) e a parcela de CH_4 dissolvida no efluente tratado, podem superestimar até 11 vezes a produção de biogás nos reatores UASB, acarretando em incertezas nos estudos de viabilidade técnica e econômico-financeira dos projetos de aproveitamento energético desse gás em uma ETE e no incorreto dimensionamento dos equipamentos de aproveitamento energético.

Nesse contexto, com intuito de diminuir as incertezas técnicas no que tange às estimativas de produção de biogás em reatores UASB, a presente nota técnica (NT) apresenta o Programa Computacional de Estimativa de Produção de Biogás em Reatores UASB – ProBio 2.0, em complemento ao conteúdo reportado na **NT 1** desta coletânea (Santos *et al.*, 2021). Essa segunda versão, atualizada e ampliada[2], possui as seguintes funcionalidades:

1. Realização de estimativas da produção de biogás, considerando todas as rotas de conversão da matéria orgânica e as possíveis perdas envolvidas no processo.
2. Realização da estimativa do potencial de geração de energia a partir do aproveitamento do biogás.

1 Ver NT 7 - Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte B: Avanços nas técnicas de controle de emissões gasosas em ETEs com reatores anaeróbios.
2 O Probio 1.0 foi divulgado em 2015, permitindo apenas a realização de estimativas da produção de biogás.

3. Realização da estimativa da produção de lodo no reator UASB, permitindo a verificação e a definição dos critérios de desaguamento, secagem térmica e aproveitamento térmico do lodo seco.
4. Incorporação a variável de recuperação do metano dissolvido em meio líquido, podendo ser realizada a estimativa de recuperação desse gás e de seu potencial incremento energético ao biogás.

A versão atualizada do programa faz parte dos produtos lançados pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto da linha ÉTSUS *software*. O ProBio 2.0 foi desenvolvido com o apoio da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), do Instituto Superior de Administração e Economia (ISAE) e da Universidade Federal do Paraná (UFPR). O uso do programa é livre e está disponível para *download* em https://etes-sustentaveis.org/.

2. MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO NO PROBIO 2.0

O ProBio 2.0, assim como sua primeira versão, foi pautado no modelo matemático proposto por Lobato *et al.* (2012) para estimativa da produção de biogás em reatores UASB. As parcelas de conversão da DQO e as perdas consideradas no modelo em questão podem ser visualizadas na **Figura 1**. O balanço de massa considerando todas as perdas e rotas de conversão é de suma importância para o entendimento dos processos metabólicos envolvendo a degradação da matéria orgânica em reatores UASB, bem como, para uma estimativa mais acurada e verossímil da produção de biogás e do potencial energético a ser aproveitado.

Na **Tabela 1** são apresentadas as equações detalhadas de cada parcela utilizada no balanço de massa de DQO do modelo de Lobato *et al.* (2012), e empregadas no ProBio 2.0.

2.1. Dados de entrada utilizados no ProBio 2.0

Os dados de entrada necessários ao ProBio 2.0 para a realização da estimativa de produção de biogás são apresentados na **Tabela 2**. Como é necessário uma quantidade significativa de dados de entrada, nem sempre disponíveis, o ProBio 2.0 estabeleceu uma série de valores pré-determinados (*default*) para facilitar o processo de estimativa. Esses valores foram retirados de literatura especializada e são apresentados de acordo com os três cenários de estimativas considerados - os mesmos adotados por Lobato *et al.* (2012), que acarretam em diferentes potenciais de aproveitamento energético, a saber:

1. **Pior cenário:** esgoto mais diluído, com maior concentração de sulfato (SO_4^{2-}), menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de CH_4, acarretando em um menor potencial energético.
2. **Melhor cenário:** esgoto mais concentrado, com menor concentração de SO_4^{2-}, elevada eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de CH_4, acarretando em um maior potencial energético do biogás.
3. **Cenário tipíco:** estimativa é realizada considerando valores intermediários entre o pior e melhor cenário.

Para um melhor entendimento dos valores pré-determinados utilizados no ProBio 2.0, sugere-se a leitura do documento "Fundamentação Teórica", o qual se encontra na pasta de *download* do programa.

Cabe destacar que o emprego do maior número de dados de entrada reais obtidos por meio de resultados de monitoramento da ETE sob estudo proporciona uma estimativa de produção de biogás com menores desvios estatísticos em relação aos valores observados em campo.

O Probio 2.0 permite que as estimativas sejam realizadas de duas formas:

1. **Análise rápida:** nessa forma de estimativa, o usuário insere apenas a população ou vazão afluente de esgoto e escolhe o cenário a ser avaliado. Para os demais dados de entrada, o programa utiliza os valores *default*. A partir dos dados de entrada, são apresentados os resultados de: (i) produção normalizada de biogás e CH_4; (ii) taxa de emissão de CH_4 em CO_2 equivalente; (iii) energia química disponível; e (iv) potencial de geração de energia elétrica e térmica.
2. **Análise detalhada:** nessa forma de estimativa, o usuário tem a possibilidade de inserir dados reais de medições de entrada ou utilizar os valores de*fau*lt para cada um dos dados de entrada. A partir dos dados de entrada, o

programa fornece os seguintes resultados: (i) balanço de cargas orgânicas, produção de CH_4 e biogás; (ii) perdas normalizadas de CH_4 e energia; (iii) potencial de geração de energia; (iv) relações volumétricas e energéticas unitárias; (v) desaguamento e secagem térmica do lodo produzido; (vi) recuperação do CH_4 dissolvido; e (vii) cenários de aproveitamento energético do biogás e lodo seco.

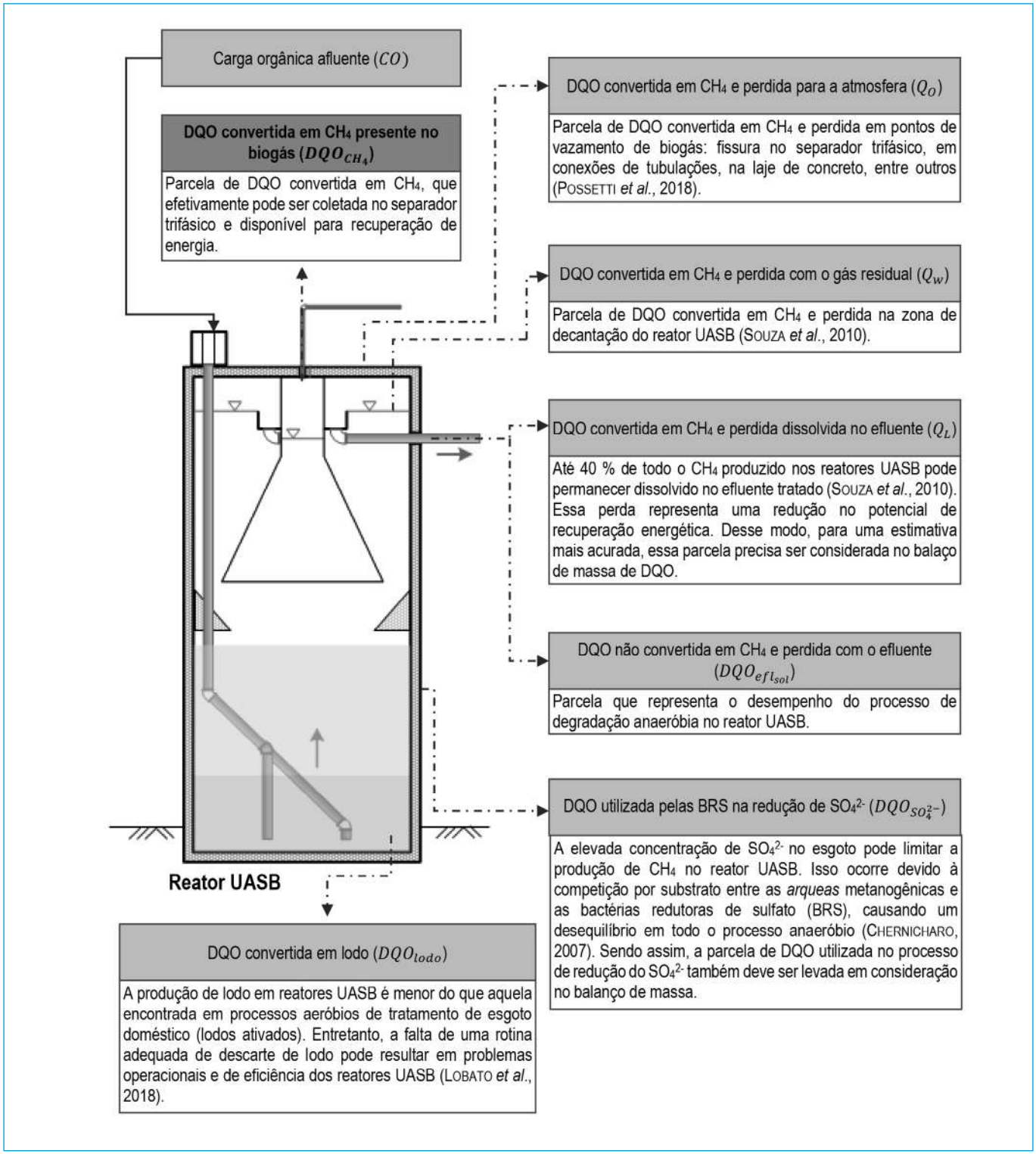


Figura 1 – Rotas de conversão de DQO e fluxos de CH_4 em reatores UASB.

2.2. Balanço de carga orgânica

O modelo proposto por Lobato *et al.* (2012) foi atualizado, a fim de subsidiar a estruturação e desenvolvimento do Probio 2.0. Assim, foram realizadas novas 250 simulações para cada cenário de estimativa de produção de biogás. Em cada simulação realizada foram utilizados um conjunto aleatório de valores de dados de entrada de *Pop* (variando 1.000 a 1.000.000 de habitantes), *QPC* (variando de 120 a 220 L·hab^{-1}·d^{-1}), $DQO_{afluente}$ (variando de 180 a 1.000 mg·L^{-1}) e *T* (variando de 20 a 30 °C).

Tabela 1 – Equações para cálculo das parcelas envolvidas no balanço de massa da DQO e do potencial de recuperação de energia empregadas no programa computacional ProBio 2.0.

Parcelas	Equações	Observações
Estimativa da carga orgânica aplicada no reator	$CO = Q_{méd} \times DQO_{afluente}$ ou $CO = Pop \times QPC \times DQO_{afluente}$	*CO*: carga orgânica afluente (kg·d^{-1}) $Q_{méd}$: vazão média de esgoto (m^3·d^{-1}) $DQO_{afluente}$: concentração de DQO total afluente (kgDQO·m^{-3}) *Pop*: população contribuinte (hab) *QPC*: contribuição *per capita* de esgoto (m^3·hab^{-1}·d^{-1})
Estimativa da massa diária de DQO removida no reator	$DQO_{rem} = CO \times E_{DQO}$	DQO_{rem}: massa diária de DQO removida no sistema (kgDQO·d^{-1}) E_{DQO}: eficiência de remoção de DQO (%)
Estimativa da massa diária de DQO utilizada pela biomassa	$DQO_{lodo} = DQO_{rem} \times Y \times K_{STV-Lodo}$	DQO_{lodo}: massa diária de DQO convertida em lodo (kgDQO$_{lodo}$·d^{-1}) *Y*: coeficiente de produção de sólidos no sistema (kgSTV·kgDQOrem^{-1}) $K_{STV-LODO}$: coeficiente de produção de lodo (kgDQO$_{lodo}$·kgSTV^{-1})
Estimativa da carga de sulfato convertida em sulfeto	$CO_{SO_4^{2-}} = Q_{méd} \times C_{SO_4^{2-}} \times E_{SO_4^{2-}}$	$CO_{SO_4^{2-}}$: carga de SO_4^{2-} convertida em sulfeto (kgSO_4^{2-}·d^{-1}) $C_{SO_4^{2-}}$: concentração média de SO_4^{2-} no afluente (kgSO_4^{2-}·m^{-3}) $E_{SO_4^{2-}}$: eficiência de redução de SO_4^{2-} (%)
Estimativa da massa diária de DQO utilizada na redução de sulfato	$DQO_{SO_4^{2-}} = CO_{SO_4^{2-}} \times K_{DQO-SO_4^{2-}}$	$DQO_{SO_4^{2-}}$: DQO utilizada na redução do SO_4^{2-} (kgSO_4^{2-}·d^{-1}) $K_{DQO-SO_4^{2-}}$: DQO consumida na redução do SO_4^{2-} (0,667 kgDQO·kgDQO$_{SO4}^{2-}$)
Estimativa da massa diária de DQO convertida em metano	$DQO_{CH_4} = DQO_{rem} - DQO_{lodo} - DQO_{SO_4^{2-}}$ $Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4} \times R \times (273 + T)}{P \times K_{CH_4} \times 1.000}$	DQO_{CH_4}: massa diária de DQO convertida em CH_4 (kgDQO$_{CH4}$·d^{-1}) Q_{CH_4}: produção volumétrica teórica de CH_4 (m^3·d^{-1}) P: pressão atmosférica (atm) K_{CH_4}: DQO correspondente a um mol de CH_4 (0,064 kgDQO·mol^{-1}) T: temperatura operacional do reator UASB (°C) R: constante dos gases (0,08206 atm·L·mol^{-1}·K^{-1})
Estimativa das perdas de metano	$Q_W = Q_{CH_4} \times pw$ $Q_O = Q_{CH_4} \times po$ $Q_L = Q_{CH_4} \times pL$	Q_w: perda de CH_4 na fase gasosa, com o gás residual (m^3·d^{-1}) *pw*: percentual de perda de CH_4 na fase gasosa, com o gás residual (%) Q_o: outras perdas de CH_4 na fase gasosa (m^3·d^{-1}) po: percentual de outras perdas de CH_4 na fase gasosa (%) *pL*: pecentual de perda de CH_4 na fase líquida, dissolvido no efluente (%) Q_L: perda de CH_4 na fase líquida, dissolvido no efluente (m^3·d^{-1})
Estimativa da produção real e normalizada de metano	$Q_{REAL-CH_4} = Q_{CH_4} - Q_W - Q_O - Q_L$ $Q_{N-REAL-CH_4} = \frac{Q_{REAL-CH_4} \times 273}{273 + T}$	$Q_{REAL-CH_4}$: produção real normalizada de CH_4 (Nm^3·d^{-1}) $Q_{N-REAL-CH_4}$: produção real normalizada (a 1 atm e 0 °C) de CH_4 (Nm^3·d^{-1})
Estimativa da produção de biogás	$Q_{biogás} = \frac{Q_{N-REAL-CH_4} \times 100}{C_{CH_4}}$	$Q_{biogás}$: produção de biogás (Nm^3·d^{-1}) C_{CH_4}: teor de CH_4 presente no biogás (%)
Estimativa do potencial químico disponível	$PE - REAL - CH_4 = Q_{N-REAL-CH_4} \times E_{CH_4}$	$E_{REAL-CH_4}$: potencial químico disponível (kWh·d^{-1} ou MJ·Nm^{-3}) $_{CH_4}$: energia calorífica decorrente da combustão do CH_4 (9,9 kWh·Nm^{-3} ou 35,9 MJ·Nm^{-3})
Estimativa de geração de energia elétrica e térmica	$PE - Elétrica = PE_{REAL-CH_4} \times \eta$ $PE - Térmica = PE_{REAL-CH_4} \times \eta$	PE – Elétrica: potencial de geração de energia elétrica (kWh·d^{-1} ou MJ·Nm^{-3}) PE – Térmica: potencial de geração de energia térmica (kWh·d^{-1} ou MJ·Nm^{-3}) η: eficiência de conversão do potencial químico disponível em energia elétrica ou térmica (%)

Fonte: Adaptado de Lobato *et al.* (2012).

As faixas de valores empregadas para cada parâmetro tiveram por objetivo representar cenários de ETEs de pequeno, médio e grande porte, bem como uma carga de matéria orgânica da mais diluída até a mais concentrada. Para os outros dados de entrada foram empregados os valores de referência de cada cenário de estimativa.

A partir das simulações realizadas foram obtidos os percentuais médios de cada parcela do balanço de carga orgânica para cada um dos cenário considerados. Conforme apresentado na **Figura 2**, de toda a DQO aplicada ao reator UASB, 15 a 21% foi convertida em lodo, 2 a 5% foi utilizada pelas BRS no processo de redução do SO_4^{2-}, 30 a 40% não foi transformada em CH_4 e saiu solubilizada junto ao efluente tratado (dados de entrada pré-determinados), 3 a 5% foi transformada em CH_4 e perdida na fase gasosa (para a atmosfera e com o gás residual), 11 a 14% foi transformada em CH_4 e perdida dissolvida no efluente tratado e, por fim, 15 a 39% foi transformada em CH_4 e recuperada junto ao biogás.

Na **Figura 3** estão apresentados os resultados do balanço de massa em relação a DQO removida no reator UASB. Desse modo, 21 a 36% da DQO removida foi convertida em biomassa, 3 a 9% foi utilizada pelas BRS no processo de redução do SO_4^{2-}, 4 a 8% foi transformada em CH_4 e perdida junto a fase gasosa, 15 a 22% foi transformada em CH_4 e perdida dissolvida no efluente tratado e 25 a 57% foi transformada em CH_4 e recuperada junto ao biogás.

Tabela 2 – Dados de entrada e valores *default* considerados no programa computacional ProBio 2.0

Parâmetro	Unidade	Cenários			Referências
		Pior	Típico	Melhor	
População contribuinte (*Pop*)	hab	Dado a ser fornecido			-
Contribuição per capita de esgoto (*QPC*)	$m^3 \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1}$	180			von Sperling e Chernicharo (2005)
Vazão média de esgoto ($Q_{méd}$)	$m^3 \cdot d^{-1}$	Dado a ser fornecido			-
Concentração de DQO afluente ($DQO_{afluente}$)	$kgDQO \cdot m^{-3}$	500			-
Eficiência esperada de remoção de DQO (E_{DQO})	%	60	65	70	Aisse (2002); von Sperling e Chernicharo (2005)
Concentração de SO_4^{2-} no afluente (C_{SO4}^{2-}) para valores de DQO elevadas (> 500mg·L^{-1})	$kgSO_4^{2-} \cdot m^{-3}$	0,08	0,06	0,04	Singh e Viraghavan (1996); Glória *et al.* (2008); Metcalf & Eddy (2016)
Concentração de SO_4^{2-} no afluente (C_{SO4}^{2-}) para valores de DQO mais baixas (≥ 180 e ≤ 500mg·L^{-1})[3]	$kgSO_4^{2-} \cdot m^{-3}$	0,02	0,015	0,01	
Eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}^{2-})	%	80	75	70	Souza (2010)
Coeficiente de produção de sólidos (*Y*)	$kgSTV \cdot kgDQO_{rem}^{-1}$	0,25	0,20	0,15	Andreoli *et al.* (2001); Lobato *et al.* (2018)
Coeficiente de produção de lodo ($K_{STV-DQO}$)	$kgDQO_{lodo} \cdot kgSTV^{-1}$	1,42			Hoover e Porges (1952)
Temperatura operacional do reator (*T*)	°C	20 a 30			von Sperling e Chernicharo (2005)
Perda de CH_4 dissolvido no efluente tratado (p_L)	%	40	30	20	Singh *et al.* (1996); Souza e Chernicharo (2011); Paula (2019)
Perda de CH_4 na fase gasosa com o gás residual (p_w)	%	7,5	5,0	2,5	Souza e Chernicharo (2011)
Outras perdas de CH_4 na fase gasosa (p_o)	%	7,5	5,0	2,5	Souza e Chernicharo (2011)
Teor de CH_4 no biogás (C_{CH4})	%	75	80	85	von Sperling e Chernicharo (2005); Cabral *et al.* (2017); Duarte (2019); Paula (2019)

[3]Ressalta-se que o modelo em questão é recomendado para ser utilizado com valores de DQO superiores a 180 mg.L^{-1} (ou 0,18 kgDQO.m^{-3}).

Como comentado anteriormente, no Probio 2.0 foram utilizadas as mesmas equações do modelo proposto por Lobato *et al.* (2012). No entanto, o usuário estima a produção de biogás considerando apenas uma determinada população e ou vazão.

2.3. Relações unitárias de produção de CH_4, biogás e energia

Com base nas simulações realizadas, foram obtidas as relações unitárias de produção de CH_4, biogás e energia apresentadas na **Tabela 3**.

Observa-se que, a partir das relações unitárias encontradas, os reatores UASB apresentam uma produção volumétrica de biogás, para o cenário típico de estimativa, em média, igual a 11 $NL \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1}$. Medições de biogás realizadas por Cabral *et al.* (2017), no âmbito do Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (PROBIOGÁS), em dez reatores UASB com diferentes vazões de tratamento de esgoto doméstico, obtiveram uma faixa de produção desse gás que variou de 8 a 18 $NL \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1}$. Desse modo, os valores médios encontrados nos cenários de estimativa estão coerentes com a faixa de produção de biogás reportada por Cabral *et al.* (2017).

Estudos realizados por Noyola *et al.* (1988), em reatores UASB tratando esgoto doméstico, encontraram uma faixa de produção de CH_4 de 80 a 180 $NL \cdot kgDQO_{rem}^{-1}$. Já os resultados das medições de Cabral *et al.* (2017), encontraram uma faixa de produção de CH_4 que variou de 73 a 138 $NL \cdot kgDQO_{rem}^{-1}$. De acordo com as simulações realizadas, a faixa de relação unitária de produção de CH_4, por carga de DQO removida, foi em média de 89 a 199 $NL \cdot kgDQO_{rem}^{-1}$, valores esses bem próximos daqueles encontrados pelos autores anteriormente citados.

No que diz respeito as relações unitárias do potencial energético do biogás, as faixas obtidas apresentaram valores variando de 19 a 52 $kWh \cdot hab^{-1} \cdot ano^{-1}$.

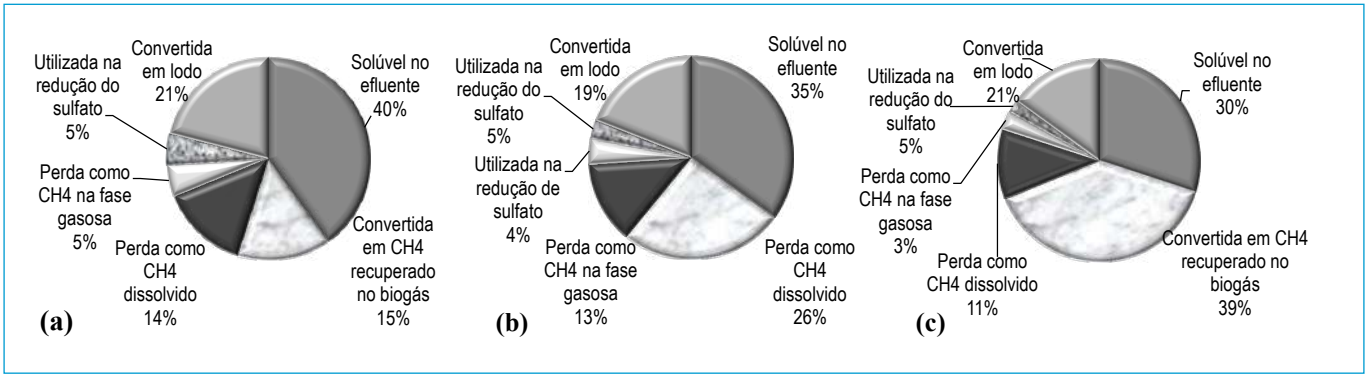


Figura 2 – Resultados das simulações de balanço de DQO em reatores UASB tratando esgoto doméstico realizadas no ProBio 2.0 em relação à DQO aplicada: (a) pior cenário; (b) cenário típico e (c) melhor cenário.

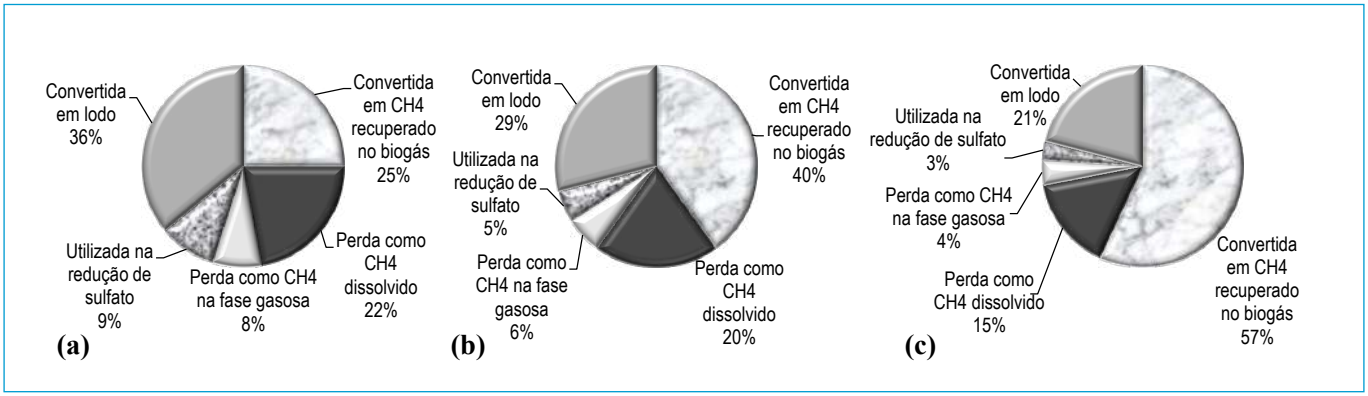


Figura 3 – Resultados das simulações de balanço de DQO em reatores UASB tratando esgoto doméstico realizadas no ProBio 2.0 em relação à DQO removida: (a) pior cenário; (b) cenário típico e (c) melhor cenário.

Esses resultados também estão inseridos dentro da faixa de potencial energético de biogás obtida por Cabral *et al.* (2017) de 23 a 54 kWh·hab^{-1}·ano^{-1}. Apenas para fins de comparação, destaca-se que as relações unitárias de produção de biogás e CH_4 em reatores UASB são tipicamente inferiores daquelas encontradas em digestores anaeróbios de lodo. De acordo com Andreoli *et al.* (2001), a produção de biogás em um digestor de lodo pode apresentar um valor de 25 NL·hab^{-1}·d^{-1}, sendo esse aproximadamente 2,5 vezes superior ao valor médio do cenário típico estimado em reatores UASB. Adicionalmente, Metcalf e Eddy (2016) reportaram uma produção de CH_4 de 400 NL·kgDQO$_{remov}^{-1}$ em digestores anaeróbios de lodo. Esse dado é minimamente 2 vezes superior ao valor médio do melhor cenário de estimativa encontrado nas simulações realizadas.

As relações unitárias podem ser utilizadas para subsidiar a avaliação do potencial energético quando não se obtem dados reais da ETE em estudo. No entanto, como as faixas de variação das relações unitárias são amplas (considerando a faixa entre o pior e melhor cenário), para se obter estimativas mais acuradas, sugere-se o emprego de dados de entrada reais obtidos em campo, diminuindo, dessa forma, as incertezas do processo de estimativa.

2.4. Outras funcionalidades disponíveis no ProBio 2.0

O ProBio 2.0 apresenta outras funcionalidades, a saber:

1. Avaliação de diferentes cenários de aproveitamento energético do biogás, sendo elas (**Figura 4**): (i) motogerador para cogeração de energia (elétrica e térmica); e (ii) geração de energia térmica para secagem e higienização do lodo.
2. Cálculos de produção de lodo no reator UASB, demanda energética no processo de secagem térmica do lodo e estimativa do potencial energético devido ao aproveitamento dos gases quentes oriundos da combustão do lodo seco.
3. Estimativa do incremento no potencial energético do biogás, caso o CH_4 dissolvido em meio líquido seja recuperado.

Para um melhor entendimento das ferramentas adicionais disponíveis no ProBio 2.0, recomenda-se a leitura do documento "Fundamentação Teórica", o qual está inserido na pasta de *download* do programa.

Tabela 3 – Relações unitárias de produção de CH_4, biogás e energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico obtidas por meio do programa computacional ProBio 2.0.

Relação unitária	Unidade	Pior cenário			Cenário típico			Melhor cenário		
		Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd
Volume unitário de CH_4 produzido	NL·hab^{-1}·d^{-1}	11,5	1,4	5,1	18,8	2,2	8,7	29,9	3,7	14,2
	NL·m^{-3}esgoto	53,9	9,3	31,8	91,4	16,5	53,4	139,6	25,8	83,2
	NL·kgDQO$_{aplicada}^{-1}$	57,6	47,5	53,2	94,6	85,2	90,4	142,2	134,9	139,0
	NL·kgDQO$_{rem}^{-1}$	96,0	79,2	88,7	145,5	131,1	139,1	203,1	192,7	198,5
Volume unitário de biogás produzido	NL·hab^{-1}·d^{-1}	15,3	1,8	6,8	23,5	2,7	11,0	35,2	4,4	16,7
	NL·m^{-3} esgoto	71,8	12,4	42,5	114,3	20,6	66,8	164,2	30,4	97,8
	NL·kgDQO$_{aplicada}^{-1}$	76,8	63,4	70,9	118,2	106,6	113,0	167,3	158,7	163,5
	NL·kgDQO$_{rem}^{-1}$	128,0	105,6	118,2	181,9	163,9	173,7	239,0	226,7	233,5
Potencial energético unitário	kWh·m^{-3} esgoto	0,5	0,1	0,3	0,9	0,2	0,5	1,4	0,3	0,8
	kWh·kgDQO$_{aplicada}^{-1}$	0,6	0,5	0,5	0,9	0,9	0,9	1,4	1,4	1,4
	kWh·kgDQO$_{rem}^{-1}$	1,0	0,8	0,9	1,5	1,3	1,4	2,0	1,9	2,0
	kWh·Nm^{-3} biogás	7,5	7,5	7,5	8,0	8,0	8,0	8,5	8,5	8,5
	kWh·hab^{-1}·ano1	42,0	5,0	18,7	68,6	7,8	31,6	109,1	13,6	51,9
	MJ·m^{-3} esgoto	1,9	0,4	1,1	3,3	0,6	1,9	5,0	0,9	3,0
	MJ·kgDQO$_{aplicada}^{-1}$	2,1	1,7	1,9	3,4	3,1	3,3	5,1	4,8	5,0
	MJ·kgDQO$_{rem}^{-1}$	3,5	2,9	3,2	5,2	4,7	5,0	7,3	6,9	7,1
	MJ·Nm^{-3} biogás	26,9	26,9	26,9	28,7	28,7	28,7	30,5	30,5	30,5
	MJ·hab^{-1}·ano^{-1}	150,7	17,8	67,0	246,2	28,1	113,4	391,5	48,9	186,5

3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROBIO 2.0

Para exemplificar a aplicação do ProBio 2.0, dados de monitoramento de um período de um ano da fase líquida e gasosa de uma ETE foram consolidados de forma a subsidiar os dados de entrada do programa computacional, bem como para comparar a estimativa de produção de biogás realizada com a medida *in-loco*. A ETE avaliada possui capacidade para atender a uma população de aproximadamente 240 mil habitantes. O fluxograma de tratamento é composto por etapas de tratamento preliminar (grades grossas e finas, um desarenador de limpeza mecanizada e um medidor de vazão do tipo calha *Parshall*) e de tratamento biológico (6 reatores do tipo UASB e pós-tratamento com lagoa aerada seguida de lagoa de sedimentação).

No que diz respeito a fase líquida, a ETE foi responsável por tratar uma vazão, em média, igual a 31.054 $m^3 \cdot d^{-1}$ de esgoto. As concentrações de DQO no esgoto afluente e efluente aos reatores UASB foram, em média, iguais a 540 $mg \cdot L^{-1}$ e 172 $mg \cdot L^{-1}$, respectivamente. A partir desses resultados, a eficiência de remoção de DQO no processo de tratamento foi, em média, igual a 64%. A concentração média de SO_4^{2-} no esgoto afluente (C_{SO4}^{2-}) aos reatores UASB foi igual a 51 $mg \cdot L^{-1}$. Por fim, a temperatura média do esgoto para o período de análise foi de 21 °C. A partir do tratamento estatístico dos dados mensurados em campo para a fase gasosa, verificou-se que a vazão de biogás gerada nos reatores UASB da ETE foi, em média, igual a 931 $Nm^3 \cdot d^{-1}$. Adicionalmente, a composição média do biogás, em porcentagens de volume (%v/v), apresentou 80,2% de CH_4, 6,0% de dióxido de carbono (CO_2), 3.214 ppm de sulfeto de hidrogênio (H_2S) e 0,1% de oxigênio (O_2).

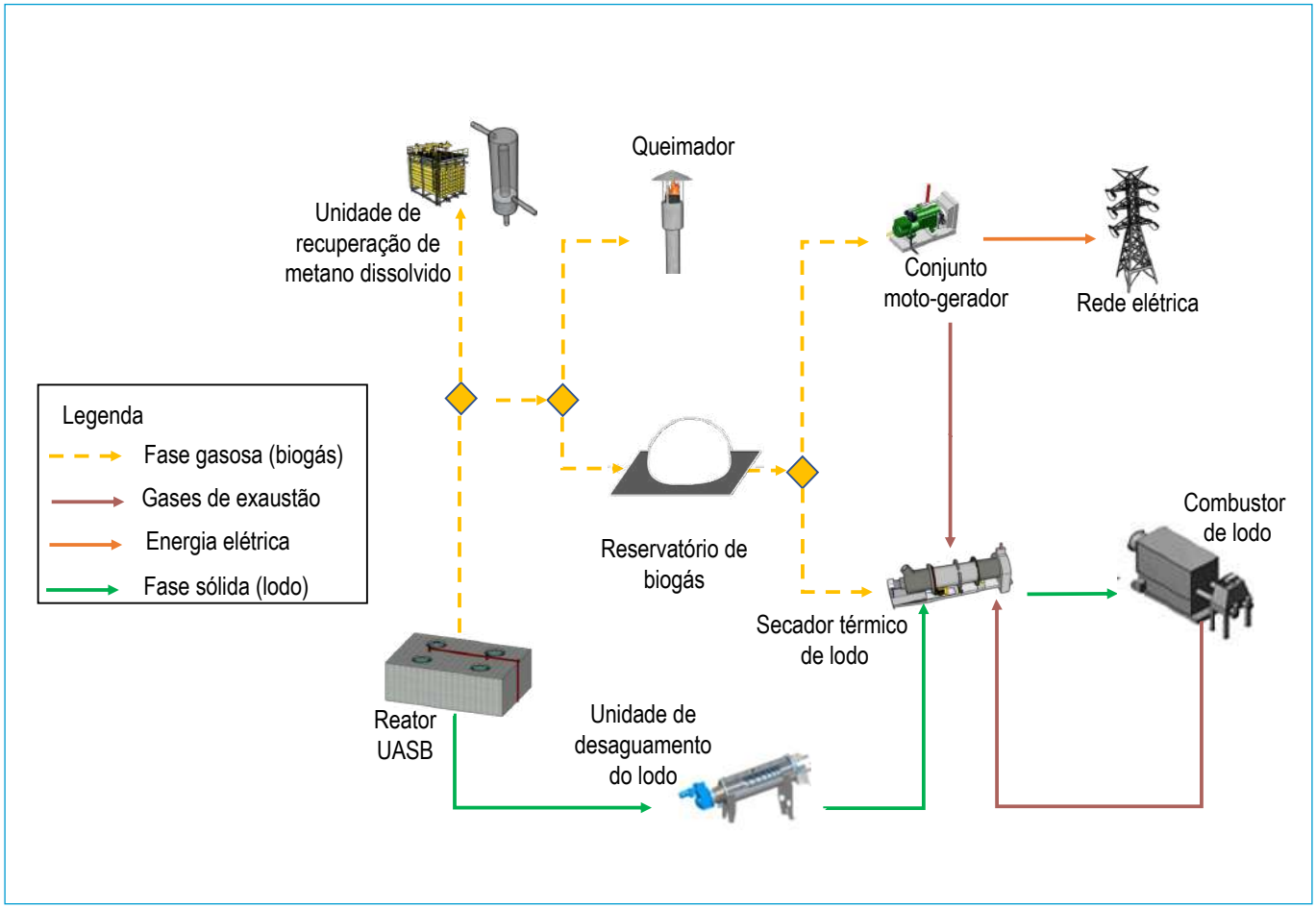


Figura 4 – Alternativas de aproveitamento energético do biogás e do lodo seco consideradas no ProBio 2.0.

Os resultados reportados da fase líquida e gasosa foram utilizados como dados de entrada no ProBio 2.0, conforme apresentado na **Figura 5**. Para os parâmetros não obtidos durante o período de investigação, foram utilizados os valores apresentados na **Tabela 2** para os diferentes cenários – pior, típico e melhor. Desse modo, foram realizadas três estimativas distintas de produção de biogás nos reatores UASB da ETE em estudo.

No que se refere a produção de biogás, os resultados das estimativas realizadas evidenciaram uma vazão de 1.194 $Nm^3 \cdot d^{-1}$ para o pior cenário (**Figura 6**), 1.805 $Nm^3 \cdot d^{-1}$ para o cenário típico e 2.523 $Nm^3 \cdot d^{-1}$ para o melhor cenário de estimativa.

A partir desses resultados, pode-se constatar que o pior cenário de estimativa apresentou o resultado mais próximo daquele mensurado em campo (931 $Nm^3 \cdot d^{-1}$), sendo aproximadamente 1,3 vezes superior ao valor real de produção de biogás na ETE. Por sua vez, o resultado da estimativa do cenário típico foi 1,9 vezes superior ao valor real encontrado. Por fim, o melhor cenário superestimou em aproximadamente 2,7 vezes o valor medido de biogás nos reatores UASB. Esses resultados denotam os problemas de operação de descarte de lodo e das emissões fugitivas evidenciadas na ETE em estudo. Desse modo, para fins de dimensionamento de dispositivos e equipamentos de gerenciamento de biogás, sugere-se que a situação operacional e de possíveis emissões fugitivas sejam levantadas em campo, permitindo ao usuário do ProBio 2.0 a tomada de decisão por qual cenário de estimativa deva ser empregado. Em situações onde tais problemas sejam observados, sugere-se o emprego do pior cenário de estimativa, garantindo, desse modo, um maior nível de segurança para com o projeto a ser realizado.

Na **Figura 7**, por sua vez, é apresentado o balanço de massa realizado pelo ProBio 2.0 em relação a DQO aplicada no reator UASB, considerando o pior cenário de estimativa.

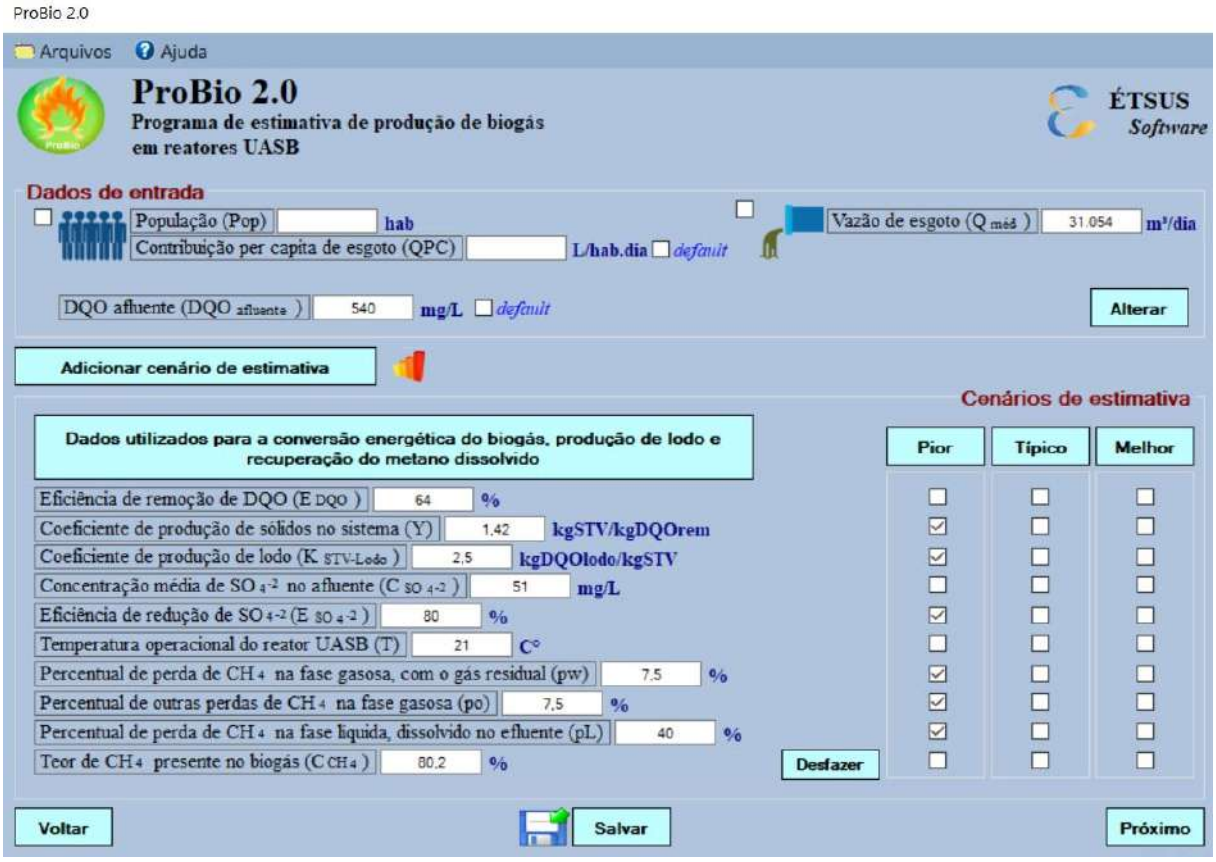


Figura 5 – Tela de dados de entrada do ProBio 2.0. Exemplo de estimativa para o pior cenário.

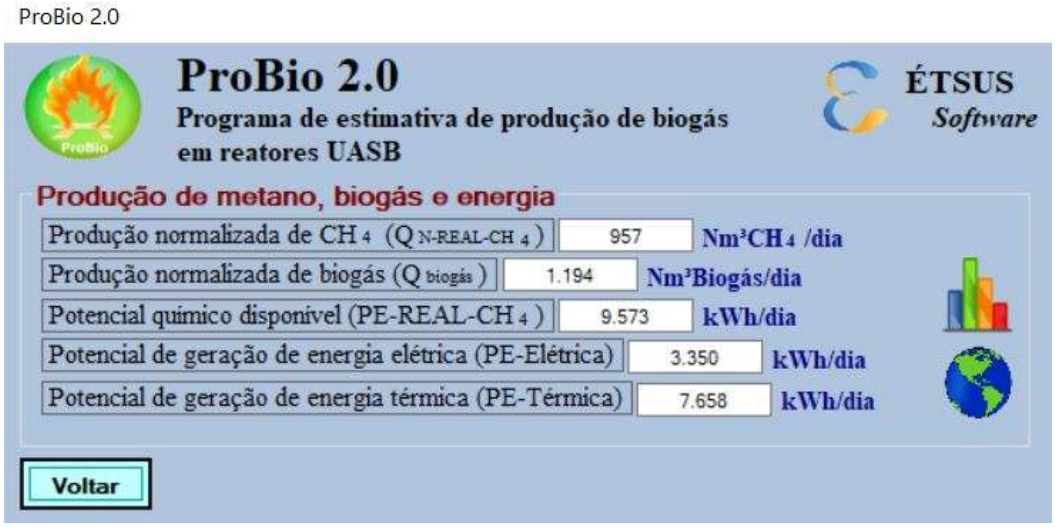


Figura 6 – Tela dos resultados de produção de CH_4, biogás e energia do ProBio 2.0. Exemplo de estimativa para o pior cenário.

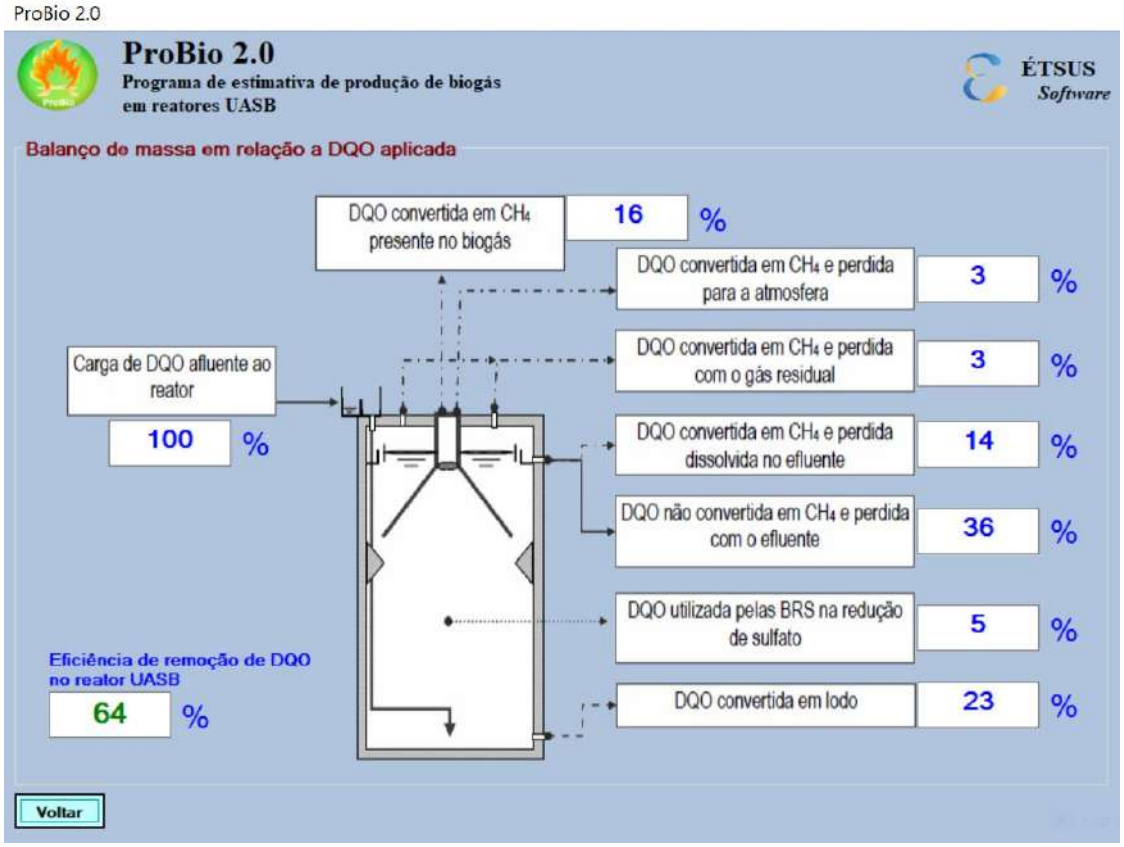


Figura 7 – Tela dos resultados do balanço de massa em relação a DQO aplicada no reator UASB. Exemplo de estimativa para o pior cenário.

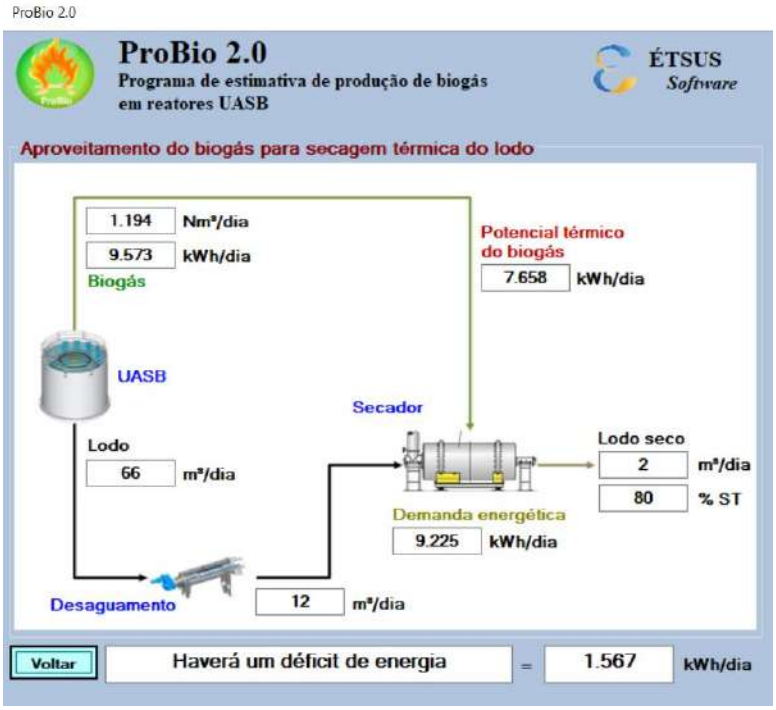


Figura 8 – Exemplo de tela disponibilizada pelo programa computacional ProBio 2.0 referente ao aproveitamento do biogás para secagem térmica do lodo produzido no reator UASB. Exemplo de estimativa para o pior cenário.

Apenas para fins de ilustração, na **Figura 8** é apresentado o cenário de aproveitamento do biogás para secagem térmica do lodo, considerando o pior cenário de estimativa.

Adicionalmente as telas apresentadas, como comentado anteriormente, o programa fornece, em telas individuais, os resultados referentes: (i) às perdas normalizadas de CH_4 e energia; (ii) às relações volumétricas e energéticas unitárias; (iii) ao gerenciamento do lodo produzido; e (iv) à recuperação do CH_4 dissolvido.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aproveitamento energético do biogás produzido em reatores UASB deverá ser melhor explorado nos próximos anos no Brasil. Isto se deve, principalmente, pelo país possuir o maior parque de reatores anaeróbios do mundo, bem como pelo entendimento do uso do biogás ser capaz de reduzir os custos operacionais das ETEs. Entretanto, para que isso ocorra, projetos de aproveitamento desse gás devem ser bem planejados, começando, obviamente, pela mensuração do biogás disponível para uso. Tais dados são fundamentais e influenciam de forma significativa no dimensionamento de sistemas de coleta, transporte, armazenamento e uso desse gás, impactando, consequentemente, na viabilidade financeira e econômica de projetos de cunho energético. Nesse contexto, o ProBio 2.0 foi concebido como uma ferramenta capaz de estimar a produção de biogás em reatores UASB. Denota-se, porém, a necessidade de um levantamento preliminar das condições operacionais e de possíveis emissões fugitivas de gases nos reatores a serem avaliados. A realização desse levantamento propicará ao usuário do programa computacional a escolha de qual cenário de estimativa deve ser empregado. Por fim, conforme já destacado, recomenda-se que as tomadas de decisão inerentes ao aproveitamento do biogás em ETEs sejam pautadas em resultados de medições *in loco*. Caso tal prática não seja possível, o ProBio 2.0 se apresenta com uma alternativa para se estimar a produção de biogás, todavia levando-se em consideração as incertezas do modelo matemático, bem como as limitações e riscos intrínsecos ao projeto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis, da Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar, e da Universidade Federal do Paraná – UFPR.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

AISSE, M. M. Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. 2002. Tese (Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ANDREOLI C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org). *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final.* Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

BRESSANI, T. R.; MOTA FILHO, T.; ROSSAS, C.; MELO, V. R.; BIANCHETTI, F. J.; CHERNICHARO, C. A. L. Planning for achieving low carbon and integrated resources recovery from sewage treatment plants in Minas Gerais, Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 242, p. 465-473, 2019.

CABRAL, C. B. G.; CHERNICHARO, C. A. L.; PLATZER, C. J.; BARJENBRUCH, M.; FILHO, P. B. Evaluation of Biogas Production and Energy Recovery Potential in 5 Full-Scale WWTPs with UASB Reactors. *Chemical Engineering & Process Techniques*, v. 3, n. 3, p. 1043, 2017.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios.* 2 ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).

CHERNICHARO, C. A. L.; RIBEIRO, T. B.; PEGORINI, E. S.; POSSETTI, G. R. C.; MIKI, M. K.; SOUZA, S. N. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 1: Tópicos de Interesse. *Revista DAE*, v. 66, p. 5-16, 2018.

DUARTE, O. A. H. Avaliação de sistemas de medição para controle de processo em tempo real em uma estação de tratamento de esgoto sanitário que utiliza reatores UASB. 2019, 186 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

DUARTE, O. A. H.; SÁNCHEZ, L.; CÁRDENAS, M.; CANTÃO, M.; POSSETTI, G. R. C.; AISSE, M. Ventajas y desventajas del uso de la espectrofometría monitoreando la calidad del agua residual en un reactor anaeróbico. *Revista Científica UNET*. v. 30, p. 302 - 312, 2018.

GLÓRIA, R. M.; NETO G. P. P.; SOUZA C. L.; SILVA S. Q.; AQUINO S. F.; CHERNICHARO, C.A.L. Remoção de sulfeto de hidrogênio de efluente de reator UASB: contribuição da camada de escuma e da tubulação de descarte. In: *IX Taller y Simposio Digestión Anaerobia, Anais*... Ilha de Páscoa, 2008.

HOOVER; S.R.; PORGES; N.; Assimilation of dairy waste by activated sludge- II: the equations of synthesis and rate of oxygen utilization; *Sewage and Industrial Wastes Journal*, v. 24, p. 306; 1952.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (eds.). v. 5, Chapter 6: Wastewater Treatment and Discharge, IGES, Japan, 2006.

LOBATO, L. C. S.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; SILVA, B. S.; FLÓREZ, C. A. D.; NEVES, P. N. P.; CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 3: Gerenciamento de lodo e escuma. *Revista DAE* – edição especial, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

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.

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

NOYOLA, A. R.; CAPDEVILLE, B.; ROQUES, H. Anaerobic treatment of domestic sewage with a rotating stationary fixed-film reactor. *Water Research*, v. 22, n. 12, p. 1585-1592, 1988.

NOYOLA, A.; PADILLA, A. R.; MORGAN, J. M. S.; GUERECA, L. P.; HERNANDEZ, F. P. Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. Clean – *Soil, Air, Water*, v. 40, n. 9, p. 926-932, 2012.

PAULA, A. C. *Avaliação integrada do desempenho de reatores anaeróbios do tipo UASB tratando esgoto doméstico em escala real*, 2019, 221 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; COSTA, F. J. O. G.; WAGNER, L. G.; LOBATO, L.C.S.; BRESSANI-RIBEIRO, T., MELO, D. F.; REIS, J. A; CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 5: Biogás e emissões fugitivas de metano. *Revista DAE*, v. 66, p. 73-89. 2018.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; CABRAL, C. B. G.; MOREIRA, H. C.; PLATZER, C.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; CHERNICHARO, C.A.L. Energy recovery from biogas in UASB reactors treating sewage. Chapter 8. In Chernicharo, C.A.L.; Bressani-Ribeiro, T. (Eds.) *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation*, London, UK: IWA Publishing, 2019. p. 194-236.

SANTOS, J. M. B; SOUZA, C. L.; BRANDT, E. M. F.; POSSETTI, G. R. C.; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanço nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 1 - Tópicos de interesse. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambienta*l, v. 1, n.1, p 5-19, 2021.

SILVA, T. C. F.; POSSETTI, G. R. C.; COELHO, S. T. Avaliação do potencial de produção de energia a partir do biogás gerado no tratamento de esgotos domésticos. In: *9° Congresso brasileiro de planejamento energético*, 2014. Anais...Florianópolis – Santa Catarina, 2014.

SINGH, K. S.; HARADA, H.; VIRARAGHAVAN, T. Low-strength wastewater treatment by a UASB reactor. *Bioresource Technology*, v. 55, p. 187-194, 1996.

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. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

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

SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. A. L.; MELO, G. C. M. Methane and hydrogen sulfide emissions in UASB reactors treating domestic wastewater. In: *12th World Congress on Anaerobic Digestion*, 2010. Guadalajara, Jalisco – México. Proceedings... México: IWA, 2010.

UNFCCC. Approved Methodologies for Small Scale CDM Project Activities. Type III. AMS-III-H. Methane recovery in wastewater treatment (Version 16.0), in Clean Development Mechanism - CDM Methodology – Booklet, 2013.

von SPERLING, M.; CHERNICHARO, C.A.L. *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. IWA Publishing, London, 1452 p., 2005.

© 2021 Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos de licença Creative Commons.

https://doi.org/10.5327/276455760101005

Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs de esgoto com reatores anaeróbios Nota Técnica 3 – Dessulfuração de biogás por microaeração em reatores UASB

Part A: Advances in tools and techniques for estimating biogas production and treatment in anaerobic-based STPs Technical Note 3 - Biogas desulfurization by microaeration in UASB reactors

André Bezerra dos Santos[1]*, Marcos Erick Rodrigues da Silva[2], Paulo Igor Milen Firmino[3], Carolina Bayer Gomes Cabral[4], Cláudio Leite de Souza[5], Juliana Mattos Bohrer Santos[6]

RESUMO

A geração de sulfeto de hidrogênio (H_2S) é um problema típico de sistemas de tratamento anaeróbio de esgotos, como reatores UASB. Elevadas concentrações de H_2S no biogás são indesejadas, pois reduzem sua qualidade, acarretam a corrosão das estruturas em concreto armado e aço, comprometem as unidades de aproveitamento energético, geram emissões odorantes que são perceptíveis em baixas concentrações (0,47 ppb_v e 100 ppb_v), podem ser tóxicas para os seres humanos e geram emissões de dióxido de enxofre durante a combustão. Logo, é necessária a proposição e consolidação de tecnologias, especialmente aquelas simplificadas e de baixo custo, que permitam o aproveitamento energético do biogás, evitando ou diminuindo a formação e/ou emissão do sulfeto, como, por exemplo, a microaeração. Diante das lacunas na literatura sobre a aplicação da microaeração em reatores UASB e em reservatórios de biogás, esta Nota Técnica abordou os seguintes pontos de interesse: (i) aplicabilidade e limitações da técnica; (ii) fundamentos do processo; (iii) critérios de dimensionamento; e (iv) operação e manutenção.

Palavras-chave: microaeração, tratamento de esgoto, biogás, UASB.

ABSTRACT

The generation of hydrogen sulfide (H_2S) is a typical problem in anaerobic sewage treatment systems, such as UASB reactors. High concentrations of H_2S in biogas are undesirable, as they reduce its quality, cause corrosion of reinforced concrete and steel structures, compromise the energy recovery units, generate odour emissions that are noticeable at low concentrations (0.47 ppb_v e 100 ppb_v), can be toxic to humans and generate sulfur dioxide emissions during combustion. Therefore, it is necessary to propose and consolidate technologies, especially those simplified and of low-cost, that allow the use of biogas energy, avoiding or reducing the formation and/or emission of sulfide, such as microaeration. In view of the gaps in the literature on the application of microaeration to UASB reactors and biogas holders, this technical note addressed the following points of interest: (i) applicability and limitations of the technique; (ii) fundamentals of the process; (iii) design criteria; and (iv) operation and maintenance.

Keywords: microaeration, sewage treatment, biogas, UASB.

[1]Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutor em Ciências Ambientais pela Universidade de Wageningen (Holanda). Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[2]Engenheiro Civil pela UFC. Doutor em Engenharia Civil pela UFC. Professor do Departamento de Construção Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[3]Engenheiro Civil pela UFC. Doutor em Engenharia Civil pela UFC. Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[4]Engenheira Sanitarista e Ambiental e mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Engenheira da Rotária do Brasil. Doutoranda em Engenharia Sanitária pela Universidade Técnica de Berlim (TU Berlin).
[5]Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professor associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[6]Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre e aluna de doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
***Endereço para correspondência:** Exemplo: Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici, bloco 713. Pici. Fortaleza-CE. CEP: 60455-970. e-mail: andre23@ufc.br

1. INTRODUÇÃO

A geração de sulfeto de hidrogênio (H_2S) no tratamento anaeróbio de esgoto em reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB, do inglês *upflow anaerobic sludge blanket*) está diretamente relacionada a problemas de maus odores, riscos ocupacionais e de corrosão de estruturas de concreto ou metálicas, assim como de equipamentos do sistema de geração de energia a partir do biogás (Brandt *et al.*, 2021). Dessa forma, a busca por uma estação de tratamento de esgoto (ETE) mais sustentável deve ser pautada na proposição e consolidação de técnicas que permitam o aproveitamento energético do biogás, evitando ou diminuindo a formação e/ou emissão do H_2S.

Conforme discutido na primeira Nota Técnica (**NT 1**) desta coletânea (Santos *et al.*, 2021), existem várias técnicas para a redução ou remoção de H_2S do biogás. Dentre as técnicas de dessulfuração disponíveis, a oxidação biológica a partir da microaeração apresenta grande potencial de aplicação, principalmente, por ser uma técnica com baixo custo de operação e não necessitar do emprego de produtos químicos, além de permitir a operação do sistema em temperatura e pressão ambientes (Syed *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2009).

A microaeração ou micro-oxigenação consiste na injeção de pequenas quantidades de oxigênio (O_2) em reatores anaeróbios, usualmente a partir do ar atmosférico. A microaeração tem sido aplicada e desenvolvida em especial para digestores anaeróbios de lodo e, eventualmente, para reatores anaeróbios aplicados ao tratamento de efluentes industriais – fluxos líquidos contendo compostos de difícil degradação anaeróbia, muito concentrados em sólidos e matéria orgânica (Krayzelova *et al.*, 2015). No que diz respeito à aplicação da técnica em reatores anaeróbios (tipo UASB) aplicados ao tratamento de esgoto sanitário e em reservatórios de biogás, muito pouco foi reportado, até o presente, na literatura nacional e internacional.

Diante das lacunas na literatura sobre a aplicação da microaeração em reatores UASB e em reservatórios de biogás, e da necessidade de incentivo e consolidação de tecnologias simplificadas e de baixo custo em ETEs que fazem ou pretendem fazer o uso energético do biogás, a presente NT busca contribuir para o conhecimento acerca do processo de remoção de H_2S por microaeração, abarcando pontos de interesse como: (i) aplicabilidade, limitações e eficiência; (ii) fundamentos do processo; (iii) critérios de dimensionamento; e (iv) operação e manutenção.

2. APLICABILIDADE, LIMITAÇÕES E EFICIÊNCIAS

O uso da técnica de microaeração para a dessulfuração do biogás gerado pelo tratamento de esgoto em reatores anaeróbios pode se constituir em uma alternativa atrativa quando houver:

1. Intenção de realizar o aproveitamento energético do biogás para produção de energia elétrica e/ou térmica em equipamentos que não possuam restritivos requisitos de qualidade do biogás, desde que não ocorram grandes oscilações nas concentrações de H_2S (Santos *et al.*, 2021).
2. Limitação de espaço físico na ETE e demanda por sistemas compactos e mecanicamente simples para o tratamento do biogás.
3. Demanda por sistema de baixo custo de instalação, operação e manutenção.
4. Uma estrutura de gestão, operação e manutenção na ETE que garanta o adequado monitoramento da vazão de microaeração e da concentração de H_2S no biogás.

Pode-se afirmar que essas condições são mais comuns para ETEs de médio e grande porte, mas uma avaliação preliminar deve ser realizada para cada situação específica.

A técnica de microaeração apresenta limitações relacionadas, principalmente, à necessidade de: (i) haver controle da quantidade de ar injetado no sistema para não diluir demasiadamente o biogás, nem causar problemas na digestão anaeróbia, já que as arqueias metanogênicas são anaeróbias estritas; (ii) evitar concentrações potencialmente explosivas, devido ao poder combustível do metano (CH_4) e comburente do O_2, muito embora várias pesquisas sugerem o baixíssimo risco pelas baixas taxas de microaeração utilizadas; (iii) evitar a oxidação completa do sulfeto para espécies como o tiossulfato ou sulfato; e (iv) haver disponibilidade de nutrientes quando a

dessulfuração for realizada em um reservatório de biogás separado do reator.

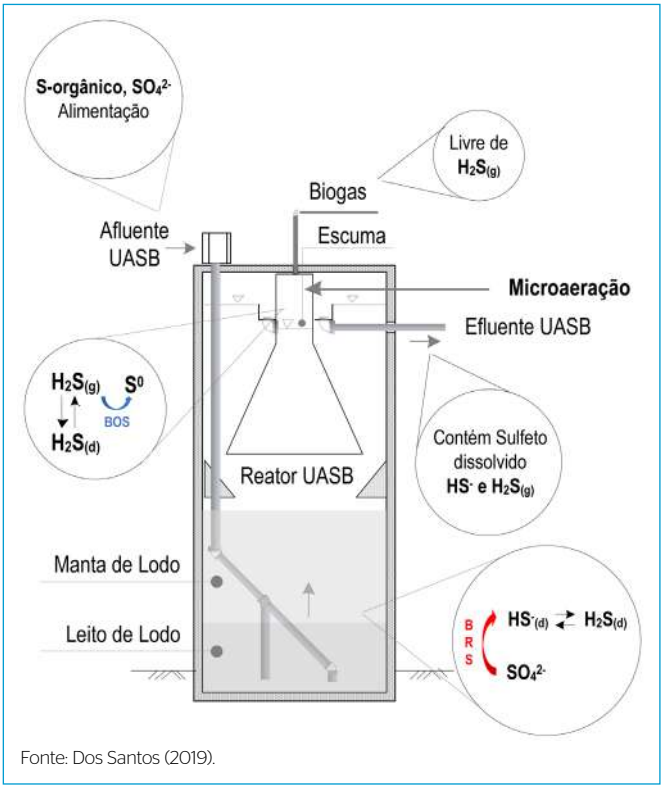
Com a injeção de ar atmosférico, como fonte de oxigênio (O_2 – concentração de cerca de 21% no ar), para a dessulfuração por microaeração, tem-se como efeito indesejado a injeção no reator anaeróbio de grande quantidade de nitrogênio (N_2 – concentração aproximada de 78% no ar), o que acarreta diluição da concentração de CH_4 no fluxo gasoso, aumentando artificialmente o volume total do biogás produzido.

Os resultados reportados na literatura indicam reduções de até 20% da concentração de CH_4 no biogás e eficiências entre 90 e 100% para a dessulfuração por microaeração em reatores anaeróbios (Castro, 2017; Brito, 2020), assim como eficiências de 83% para a dessulfuração por microaeração em reservatórios de biogás (Hernández *et al.*, 2019).

3. FUNDAMENTOS DO PROCESSO

O H_2S é formado durante o processo de respiração anaeróbia por diferentes grupos de bactérias redutoras de sulfato (BRS), os quais utilizam diferentes aceptores de elétrons como o sulfato (SO_4^{2-}) ou o tiossulfato ($S_2O_3^{2-}$). A técnica de microaeração se baseia no fornecimento de oxigênio em concentrações que favoreçam a oxidação bioquímica parcial e/ou total de H_2S a enxofre elementar (S^0) e/ou sulfato (SO_4^{2-}), realizada por bactérias oxidadoras de sulfeto (BOS), a depender da temperatura e do potencial hidrogeniônico (pH) do meio (**Figura 1**). Grande parte dos microrganismos que oxidam compostos reduzidos de enxofre (H_2S, S^0 etc.) usa o dióxido de carbono (CO_2) como fonte de carbono. Tais microrganismos crescem na superfície do líquido ou nas paredes do reator e não precisam de inoculação ou adição de nutrientes (Krayzelova *et al.*, 2015). No caso da microaeração realizada em um reservatório de biogás separado do reator, é necessária a instalação de estruturas para fixação dos microrganismos (crescimento aderido), assim como o fornecimento de nutrientes (Hernández *et al.*, 2019).

O processo de microaeração requer a dosagem adequada de ar, mesmo que o fluxo de gás bruto seja variável. A classificação dos sistemas de aeração em função



Fonte: Dos Santos (2019).

Figura 1 – Esquema de reator UASB e reações com compostos de enxofre, bactérias redutoras de sulfato (BRS) e bactérias oxidadoras de sulfeto (BOS) a partir da microaeração na atmosfera (*headspace*) do separador trifásico.

da dosagem de O_2 em relação à vazão de esgoto afluente (relação $L_{O2}/L_{alimentação}$) é apresentada na **Tabela 1**.

Para melhor entendimento da dosagem de oxigênio requerida, é necessário compreender a oxidação biológica do sulfeto sob condições aeróbias. As principais rotas de bioconversões envolvidas na remoção do sulfeto em sistemas aeróbios são apresentadas nas **Equações 1** e **2** (Janssen *et al.*, 1995; Krayzelova *et al.*, 2015):

$$2HS^- + O_2 \rightarrow 2S^0 + 2OH^- \quad (1)$$

$$2HS^- + 4O_2 \rightarrow 2SO_4^{2-} + 2H^+ \quad (2)$$

Assim, sob condições limitantes de O_2 (microaeração), com concentrações de oxigênio dissolvido abaixo de 0,1 mg·L^{-1}, o principal produto da oxidação biológica é o enxofre elementar (S^0 - **Equação 1**) (oxidação parcial). O sulfato (SO_4^{2-}) é formado em circunstâncias limitadas de sulfeto (HS^- - **Equação 2**) (oxidação completa).

Tabela 1 – Classificação dos sistemas de aeração em função da dosagem de oxigênio normalizado pela vazão de alimentação.

Condição	$L_{O2}/L_{alimentação}$
Aeração	102 a 218
Aeração limitada	2,6 a 6,4
Microaeração	0,03 a 1,27

Fonte: adaptado de Krayzelova *et al.* (2015).

Na **Figura 1** são apresentadas as reações com compostos de enxofre que ocorrem no reator UASB a partir da microaeração no *headspace* do separador trifásico.

Deve-se preferir a formação de enxofre elementar, já que este não é solúvel e pode ser removido do efluente. Além disso, após purificação, o enxofre elementar recuperado pode ser utilizado para produção de ácido sulfúrico (H_2SO_4), assim como para aplicação agrícola. Adicionalmente, a necessidade de oxigênio para formação de sulfato é quatro vezes maior e, consequentemente, exige um consumo maior de energia para aeração (Janssen *et al.,* 1995; Janssen *et al.,* 1999).

Diante do exposto, pode-se afirmar que os principais fatores que influenciam a eficiência do processo de microaeração para fins de tratamento do biogás visando seu aproveitamento são: (i) a dosagem de oxigênio fornecida em relação à vazão de esgoto afluente; (ii) utilização de oxigênio ou ar atmosférico; (iii) o local de injeção de oxigênio (ou ar atmosférico); (iv) a existência de superfície de fixação para bactérias; (v) o tempo de contato com o biogás e a turbulência na zona de dessulfuração; e (vi) a disponibilidade de nutrientes (na superfície de contato com o substrato) (Hernández *et al.*, 2019).

4. CRITÉRIOS E PARÂMETROS DE PROJETO

4.1. Diagrama unifilar do processo de dessulfuração do biogás por microaeração

Os principais pontos de observação para que haja uma microaeração eficiente e controlada são apresentados a seguir. Ressalta-se que, em todos os casos, devem ser feitos ajustes em função do tipo de reator anaeróbio ou do reservatório de biogás empregado, das concentrações residuais do H_2S no biogás, dos níveis de O_2, CH_4 e N_2 no biogás, entre outras. Na **Figura 2** é apresentada uma proposta para o fluxograma do processo de dessulfuração do biogás por microaeração.

Como pode ser observado na **Figura 2**, os principais elementos para o adequado funcionamento do sistema de microaeração são: (i) analisador de gases para o controle da concentração de H_2S e O_2 no biogás; (ii) medidor de fluxo gasoso para monitoramento da vazão de biogás a ser tratada; (iii) linha de alimentação de ar atmosférico, normalmente composto por um compressor de ar e um sistema de medição e controle da injeção de ar/O_2; e (iv) elementos básicos de segurança. Dependendo da escala do reator, vários pontos de injeção de ar/O_2 podem ser requeridos. Como o processo de microaeração requer a dosagem exata de ar, sugere-se que o controle do fornecimento de ar no sistema seja automatizado para que não sejam alcançadas condições que ofereçam risco de explosão ou diluições que comprometam os possíveis usos do biogás (Hernández *et al.*, 2019).

A definição do ponto de injeção de ar/O_2 é um fator relevante. As possibilidades para o reator UASB são: (i) na zona de digestão; (ii) na zona do separador trifásico- fase líquida; e (iii) na zona do separador trifásico - fase gasosa (*headspace*), sendo esta última considerada de maior simplicidade operacional. Contudo, nessa situação, é mais difícil a remoção efetiva do sulfeto dissolvido no efluente líquido do reator, motivo pelo qual sugere-se a aplicação de outras técnicas para essa fração, como desnitrificação autotrófica via nitrito ou nitrato (Brito, 2020), câmara de dessorção (**NT 2** da coletânea "Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte B: Avanços nas técnicas de controle de emissões gasosas em ETES com reatores anaeróbios", Souza *et al.*, 2021), entre outras.

No caso da microaeração em reservatório de biogás separado do reator, inexiste uma zona de contato líquido-gás, o que reduz o crescimento microbiano. Todavia, são necessárias algumas modificações estruturais, como, por exemplo, a instalação de telas/malhas internas para propiciar o crescimento das bactérias oxidadoras de sulfeto (BOS), além da inoculação com líquido capaz de fornecer os nutrientes (p. ex.: esgoto). Essas telas/malhas também podem ser utilizadas no *headspace* dos reatores anaeróbios, caso seja necessário aumentar a superfície disponível para crescimento microbiano (Hernández *et al.*, 2019).

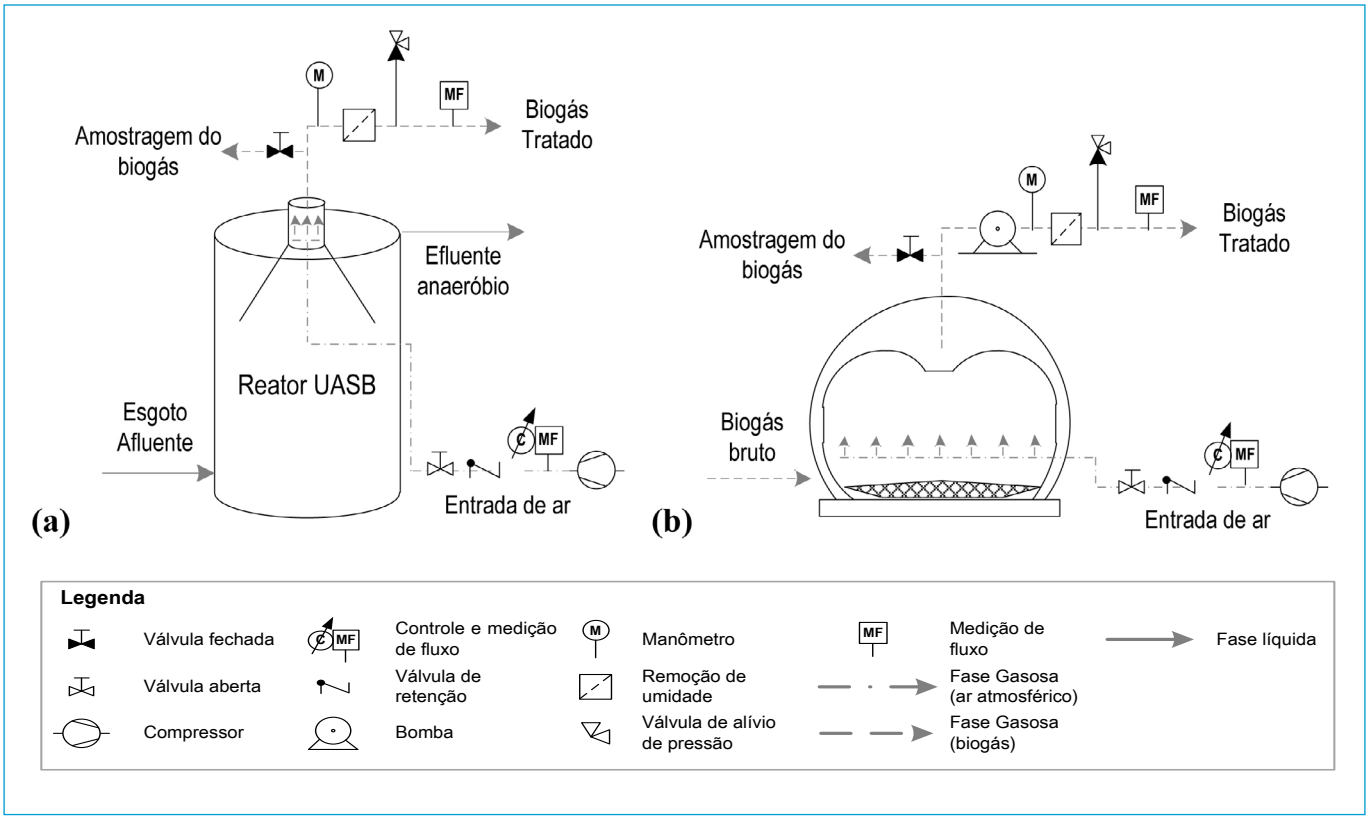


Figura 2 – Diagrama unifilar do processo de dessulfuração do biogás por microaeração: (a) no reator anaeróbio e (b) no reservatório de biogás.

No que tange à quantidade de ar/O_2 necessária, como a reação entre o oxigênio e o H_2S do biogás acontece diretamente (de maneira similar à que ocorre no *headspace* de reatores anaeróbios), a quantidade de ar/O_2 por uma dada quantidade de H_2S é minimizada. Dessa forma, o tempo de detenção do biogás torna-se fator chave na oxidação do sulfeto.

4.2. Exemplo de dimensionamento de sistema de microaeração em reator anaeróbio

As vazões de ar/oxigênio necessárias para a oxidação de sulfeto a enxofre elementar são determinadas a partir da estequiometria da reação apresentada na **Equação 1** e, obviamente, dependem das frações de sulfeto a serem oxidadas, isto é, apenas a gasosa, presente no biogás, ou juntamente com a fração dissolvida no líquido. É válido ressaltar que, como mencionado no item anterior, o ponto de injeção também está diretamente relacionado às frações a serem removidas. O seguinte exemplo se refere ao cálculo para a definição da vazão de ar/oxigênio necessária para a oxidação parcial de sulfeto gasoso a enxofre elementar em um reator UASB tratando esgoto doméstico ou um reservatório de biogás.

Exemplo: Dimensionar sistema de microaeração em reator anaeróbio e reservatório de biogás

Dados de entrada:
- População de projeto (P): 25.000 habitantes
- Contribuição *per capita* de esgoto (QPC): 150 $L \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1}$
- Taxa de contribuição por infiltração (T_{inf}): 0,1 $L.s^{-1} \cdot km^{-1}$
- Extensão de rede por habitante (Lrede·hab^{-1}): 2,0 $m \cdot hab^{-1}$
- Produção unitária de biogás* ($P_{biogás}$): 85,6 $NL_{biogás} \cdot m^{-3}_{esgoto}$
- Concentração média de H_2S no biogás (C_{H2S}): 1500 ppm_v (0,15%v/v)
- Massa molar do H_2S (MM_{H2S}): 34 $g \cdot mol^{-1}$
- Massa molar do O_2 (MM_{O2}): 32 $g \cdot mol^{-1}$
- Concentração média de O_2 no ar (C_{O2}): 21%
- Condições de pressão e temperatura: 1 atm e 25 °C

Nota: * valor médio para um cenário típico de produção de biogás (Lobato *et al.*, 2012).

Solução:

a) Cálculo da vazão média de esgoto bruto (Q_{med}):

$$Q_{med} = P \times QPC \times \frac{1d}{86.400s} + P \times \text{Lrede. hab}^{-1} \times Tinf$$

$$Q_{med} = 25.000\ hab \times 150\ L \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1} \times \frac{1d}{86.400s} + 25.000\ hab \times 2{,}0\ m \cdot hab^{-1} \times \frac{1km}{1000m} \times 0{,}1\ L \cdot s^{-1} \cdot km^{-1}$$

$$Q_{med} = 48{,}4\ L.s^{-1}$$

b) Estimativa da produção de biogás ($Q_{biogás}$):

$$Q_{biogás} = Q_{med} \times P_{biogás} = \frac{4.182\ m^3 \cdot d^{-1} \times 85{,}6\ NL_{biogás} \cdot m^{-3}{}_{esgoto}}{1000} = 358\ Nm^3 \cdot d^{-1}$$

c) Cálculo da produção de H_2S (Q_{H2S}):

$$Q_{H2S} = Q_{biogás} \times C_{H2S} = 358\ Nm^3 \cdot d^{-1} \times 0{,}0015 = 0{,}54\ m^3 \cdot d^{-1} = 540\ L \cdot d^{-1}$$

d) Cálculo da carga de H_2S no biogás pela equação geral dos gases (m_{H2S}):

$$n_{H2S} = \frac{(P \times Q_{H2S})}{(R \times T)} = \frac{(1\ atm \times 540\ L \cdot d^{-1})}{(0{,}082\ L \cdot atm \cdot mol^{-1}.K^{-1} \times 298{,}15\ K)} = 22{,}1\ mol \cdot d^{-1}$$

$$m_{H2S} = n_{H2S} \times MM_{H2S} = 22{,}1\ mol \cdot d^{-1} \times 34\ g \cdot mol^{-1} = 751{,}1\ g \cdot d^{-1}$$

e) Cálculo da demanda de O_2 para a oxidação parcial de H_2S a SO pela Equação 1 (m_{O2}):

$$n_{O2} = 0{,}5 \times n_{H2S} = 0{,}5 \times 22{,}1\ mol \cdot d^{-1} = 11{,}0\ mol \cdot d^{-1}$$

$$m_{O2} = n_{O2} \times MM_{O2} = 11{,}0\ mol \cdot d^{-1} \times 32\ \text{g} \cdot mol^{-1} = 353{,}3\ g \cdot d^{-1}$$

f) Cálculo da vazão de O_2 e ar pela equação geral dos gases (Q_{O2} e Q_{ar}):

$$Q_{O2} = \frac{(n_{O2} \times R \times T)}{P} = \frac{(11{,}0\ mol \cdot d^{-1} \times 0{,}082\ L \cdot atm \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1} \times 298{,}15\ K)}{1} = 269{,}9\ L \cdot d^{-1}$$

$$Q_{ar} = \frac{Q_{O2}}{C_{O2}} = \frac{269{,}9\ L \cdot d^{-1}}{0{,}21} = 1.285{,}3\ L \cdot d^{-1}$$

g) Cálculo das relações Q_{O2}/Q_{med} e Q_{ar}/Q_{med}:

$$\frac{Q_{O2}}{Q_{med}} = \frac{269{,}9\ L \cdot d^{-1}}{4.182.000\ L \cdot d^{-1}} = 6{,}5 \times 10^{-5}\ L_{O2} \cdot L^{-1}{}_{alimentação}$$

$$\frac{Q_{ar}}{Q_{med}} = \frac{1.285{,}3\ L \cdot d^{-1}}{4.182.000\ L \cdot d^{-1}} = 3{,}1 \times 10^{-4}\ L_{ar} \cdot L^{-1}{}_{alimentação}$$

Observações finais:

- Pelas facilidades operacionais e custos, o ar é mais prontamente aplicável. Portanto, é necessária uma vazão de 1.285,3 L·d^{-1} de ar a ser injetada diretamente no *headspace* para a completa remoção de H_2S do biogás. Caso haja diluição excessiva do biogás com o nitrogênio presente no ar, prejudicando seus usos energéticos, pode-se microaerar o reator com oxigênio puro, cuja vazão necessária é de apenas 269,9 L·d^{-1}. Todavia, há que se ater para os elevados custos do oxigênio puro.
- Mesmo com uma vazão de ar 100 vezes maior do que a estequiométrica, nesse caso se aproximando das doses reportadas na literatura (Brito, 2020; Castro, 2017), a diluição do metano no biogás tende a ser pequena/moderada. Considerando o exemplo anterior ($Q_{biogás}$ = 358 m^3·d^{-1} e Q_{ar} = 100 x 1,2853 m^3·d^{-1}), o teor de metano diminuiria de 75% (valor típico) para aproximadamente (358 × 75% + 128,53 × 0%) / (358 + 128,53) = 55,2%. Como parte do oxigênio presente no ar será consumido na reação, o volume diluidor (ar adicionado) será, na prática, um pouco menor, diluindo menos o biogás.
- Devido a possíveis limitações de transferência de massa gás-líquido, nem sempre a demanda estequiométrica garantirá total eficiência do processo de oxidação de sulfeto. Portanto, ajustes (aumento da vazão de microaeração) durante a operação do reator podem ser necessários.
- Para o caso de injeção na zona de digestão, esse aumento poderá ser mais significativo, pois, além da demanda necessária para a oxidação do sulfeto dissolvido, outras rotas bioquímicas de biotransformação de matéria orgânica também tendem a competir pelo oxigênio adicionado.
- Para o caso da microaeração em reservatório de biogás deve-se calcular a área para fixação dos microrganismos e o tempo de residência do gás. Mais informações podem ser obtidas em Hernández *et al.* (2019).

5. ASPECTOS ADICIONAIS DE PROJETO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

É também particularmente importante projetar, construir e operar adequadamente os sistemas de condução e injeção do ar, assim como realizar o monitoramento operacional e de eficiências da microaeração. Nesse sentido, na **Tabela 2** são apresentados alguns aspectos que requerem atenção.

6. ESTUDO DE CASOS

A seguir são apresentados, em linhas gerais, os principais aparatos experimentais explorados no âmbito do INCT ETEs Sustentáveis, notadamente na Universidade Federal do Ceará (UFC) e na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), e da empresa Rotária do Brasil Ltda., que vêm contribuindo para o desenvolvimento da técnica de microaeração em reatores anaeróbios e reservatórios de biogás.

6.1. Microaeração em reatores anaeróbios: escala de bancada e piloto

Face à grande aplicabilidade dos reatores UASB no tratamento de esgoto sanitário no Brasil, a Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizados (RENTED) e o INCT ETEs Sustentáveis desenvolveram pesquisas em escalas de bancada e piloto, respectivamente na UFC e na UFMG, visando a remoção de H_2S, sobretudo no biogás. As pesquisas realizadas exploraram duas possibilidades principais de aplicação da microaeração: (i) no *headspace* do separador trifásico; e (ii) no interior do compartimento de digestão (manta de lodo) (**Figura 3**). As condições testadas e eficiências de remoção de H_2S do biogás obtidas nos dois estudos são mostradas na **Tabela 3**.

Em função dos resultados obtidos nesses estudos, pode-se afirmar que a microaeração é uma tecnologia promissora para a remoção de H_2S do biogás, principalmente quando aplicada diretamente no *headspace* do reator, possibilitando a completa eliminação do sulfeto para a vazão de microaeração (relação entre vazão de ar e de esgoto - $Q_{ar}/Q_{afluente}$) próxima de 30 $L_{ar} \cdot m^{-3}_{afluente}$. No entanto, cabe destacar que a eficiência de remoção de H_2S específica de cada sistema deve ser determinada por medidas locais, conforme as características da ETE anaeróbia de tratamento de esgoto, como solubilidade específica de esgoto e variação de entrada.

Por sua vez, elevadas eficiências de remoção de H_2S do biogás foram também obtidas com a microaeração aplicada na manta de lodo do reator UASB, atingindo até 98% (Castro, 2017). Todavia, há que se atentar que as eficiências variaram dentro de uma ampla faixa e menores remoções (50%) foram obtidas (Brito, 2020).

Tabela 2 – Aspectos adicionais de projeto, operação e manutenção da microearação.

Aspectos	Princípios / Diretrizes
Limpeza das paredes e tubulações	• A deposição de enxofre nas paredes e tubulações do reator pode causar graves problemas, resultando em sobre pressão e vazamento de biogás. O enxofre forma uma camada amarelada no *headspace* do reator ou nas redes que constituem o meio de suporte nos reservatórios de biogás. Por outro lado, adicionar ar em excesso pode levar a formação de ácido sulfúrico, provocando problemas de corrosão. • Recomenda-se a limpeza pelo menos a cada 12 meses, de forma a minimizar despesas inerentes aos problemas de aeração mencionados (Hernández *et al.*, 2019; Ramos *et al.*, 2012).
Monitoramento da concentração de OD e do ORP	• A concentração de oxigênio dissolvido (OD) é um parâmetro de controle crucial no processo de microaeração, sendo que o incremento nas concentrações de OD muitas vezes é inferior a 0,1 $mg \cdot L^{-1}$, o qual é o menor limite de detecção da maioria dos eletrodos comerciais de OD. • O potencial de oxirredução (*oxidation-reduction potential*, ORP) reportado em sistemas microaeróbios varia de -150 a -460 mV (Krayzelova *et al.*, 2015). A literatura cita que o ORP é mais indicado como parâmetro de controle do que a concentração de OD, tipicamente avaliada em sistemas aeróbios tradicionais, visto que o ORP pode variar linearmente com o logaritmo da concentração de oxigênio (Khanal e Huang, 2003). E assim, a injeção de oxigênio, mesmo em concentrações limitadas, pode ser facilmente detectada pela medição do ORP.
Monitoramento da composição do biogás	• Uma constante avaliação da composição do biogás é extremamente importante para a avaliação da eficiência da microaeração na remoção do H_2S, assim como evitar grande diluição dos níveis de CH_4, que pode comprometer os seus usos. Um excesso de oxigênio pode causar um aumento do consumo energético desnecessário, diminuindo assim a sustentabilidade da referida técnica em relação a outras tecnologias de dessulfuração. • Ressalta-se a importância da utilização de um analisador de biogás confiável, com limite de detecção compatível com os níveis dos gases em questão, e devidamente calibrado. • No uso de técnicas cromatográficas, ressalta-se a importância da correta amostragem, assim como do uso de equipamentos adequados, com curvas de calibração sempre recentes, e a realização da normalização dos valores de concentração obtidos.

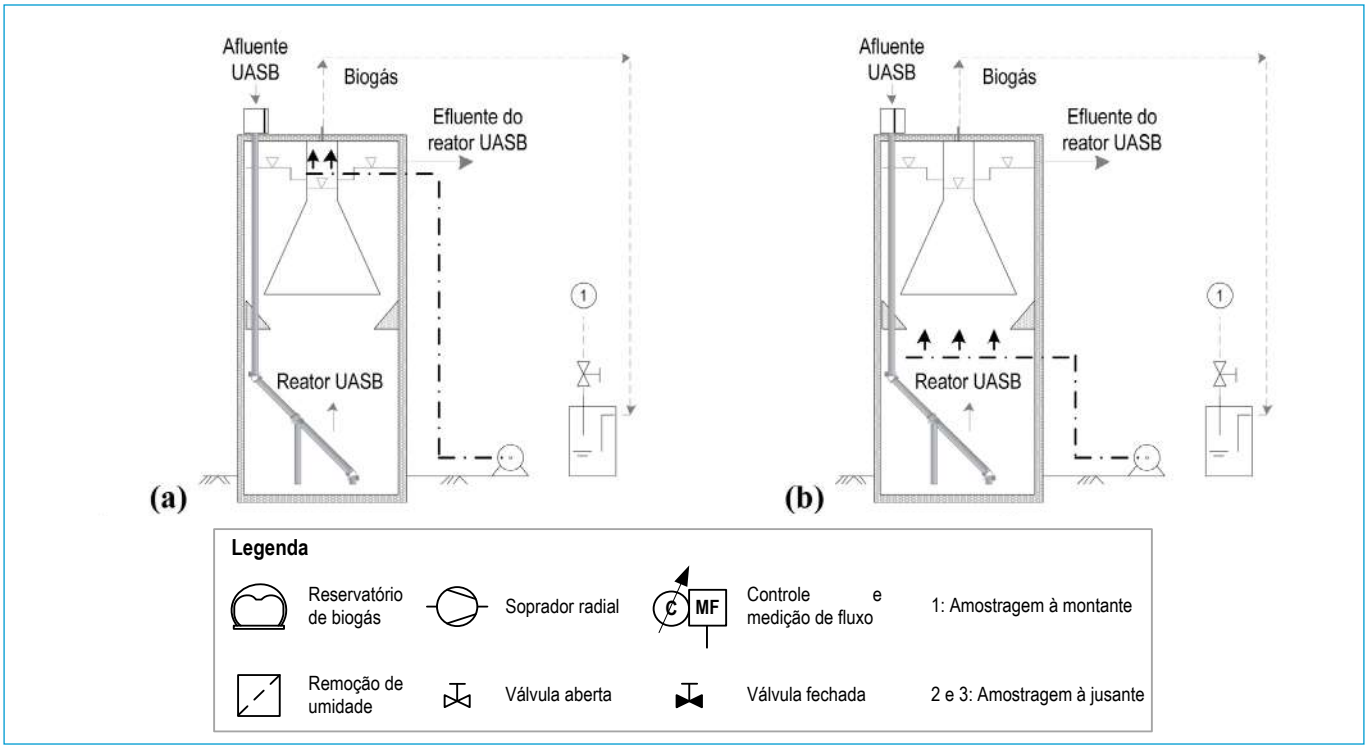


Figura 3 – Diagrama esquemático representando as possibilidades principais de aplicação da microaeração nos reatores UASB exploradas nas pesquisas realizadas: (a) aplicação da microaeração no *headspace* do separador trifásico; (b) no interior do compartimento de digestão.

Ressalta-se, portanto, a necessidade de adequação e ajustes de vazões de microaeração, especialmente em aplicação na manta de lodo do reator UASB.

Cabe destacar que a grande maioria dos estudos sobre microaeração reportados na literatura se referem a digestores de lodo, sendo raros os que tenham avaliado a aplicação da microaeração em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Nesse sentido, a comparação das vazões de microaeração aplicadas em reatores UASB (**Tabela 3**) com os valores reportados na literatura (**Tabela 2**) não deve ser realizada de forma direta.

Para a parcela de sulfeto dissolvido, a remoção esperada é baixa, em geral, até mesmo inferior a 10%. Nesse sentido, pesquisas adicionais foram desenvolvidas em escala de bancada, com os resultados reportados a seguir.

Pesquisas adicionais com microaeração e processos complementares

Com a microaeração no *headspace* é possível atingir elevadas eficiências de remoções do sulfeto dissolvido na fase líquida (~80%) aumentando a vazão de microaeração (Q_{ar}/$Q_{afluente}$ igual a 60 $L_{ar}{\cdot}m^{-3}{}_{afluente}$), e realizando a recirculação do biogás contendo o residual do oxigênio para fase líquida (**Tabela 4**). Atenta-se para o fato de que a recirculação para a remoção da fração dissolvida do sulfeto só é viável quando

Tabela 3 – Condições operacionais de microaeração e eficiências de remoção de H_2S do biogás em reatores UASB.

Ponto de aplicação da microaeração	Vazão de microaeração $Q_{ar}/Q_{afluente}$ ($L_{ar}{\cdot}m^{-3}{}_{afluente}$)	Vazão de microaeração $Q_{O2}/Q_{afluente}$ ($L_{O2}{\cdot}L^{-3}{}_{afluente}$)	Remoção de H_2S do biogás (%)
Headspace	30	0,006	100
Manta de lodo	24 a 60	0,005 a 0,013	50 a 98

Fonte: Brito (2020) e Castro (2017)

Tabela 4 – Condições operacionais de microaeração e remoções esperadas do sulfeto gasoso e dissolvido.

Vazão de microaeração $Q_{ar}/Q_{afluente}$ ($L_{ar}{\cdot}m^{-3}{}_{afluente}$)	Ponto de aplicação da microaeração	Remoção esperada do sulfeto no biogás (%)	Remoção esperada do sulfeto dissolvido (%)
30 + REC (27 $L{\cdot}d^{-1}$)	*Headspace*	50	50
60 + REC (27 $L{\cdot}d^{-1}$)	*Headspace*	100	80
30 + Nitrato (50 $mg{\cdot}L^{-1}$)	*Headspace*	100	100
Nitrato (50 $mg{\cdot}L^{-1}$)	-	< 10	100

Fonte: Brito (2020)

houver residual de oxigênio no biogás ou, ainda, quando se elevar a dosagem de microaeração. Caso contrário, a recirculação do biogás compromete a remoção do sulfeto gasoso.

Além disso, o aumento da vazão de microaeração, na tentativa de disponibilizar mais oxigênio para a remoção completa de sulfeto dissolvido e gasoso, pode prejudicar a própria remoção de sulfato devido à oxidação completa de parte do sulfeto gerado, novamente, a sulfato (ciclo fútil) e, também, diluição excessiva do biogás. Logo, tanto a recirculação de biogás quanto a microaeração na manta de lodo, aparentemente, não se mostram estratégias viáveis para completa remoção de sulfeto do reator.

Assim, em virtude dos resultados da desnitrificação autotrófica e da microaeração no *headspace* terem se mostrado promissores para a remoção de sulfeto dissolvido e gasoso, respectivamente, a associação desses dois processos também foi avaliada por Brito (2020).

Dependendo da disponibilidade de nitrato (NO_3^-), o sulfeto (HS^-) é oxidado parcialmente a enxofre elementar (S^0) ou totalmente a sulfato (SO_4^{2-}), conforme **Equações 3** e **4**.

$$HS^- + 0{,}4NO_3^- + 1{,}4H^+ \rightarrow S^0 + 0{,}2N_2 + 1{,}2H_2O \quad (3)$$

$$HS^- + 1{,}6NO_3^- + 0{,}6H^+ \rightarrow SO_4^{2-} + 0{,}8N_2 + 0{,}8H_2O \quad (4)$$

A partir dos estudos já realizados, estima-se que, para a remoção total do sulfeto dissolvido, são necessários cerca de duas vezes a demanda estequiométrica do nitrato para oxidação parcial do sulfeto a enxofre elementar. Segundo a **Equação 3**, para oxidar 1 mol de HS^- (33 g), é necessário 0,4 mol de NO_3^- (24,8 g), ou seja, aproximadamente 0,75 g NO_3^-·(g HS^-)$^{-1}$. Logo, duas vezes a demanda estequiométrica equivale a 0,8 mol de NO_3^- (49,6 g), ou seja, 1,5 g NO_3^-·(g HS^-)$^{-1}$. Portanto, para a concentração de 20 mg·L^{-1} de HS^-, serão necessários 20 × 1,5, o que equivale a 30 mg de nitrato para a remoção completa do sulfeto dissolvido.

Finalmente, a associação dessas duas técnicas é muito promissora para a remoção de sulfeto dissolvido e gasoso de sistemas anaeróbios de tratamento de esgoto sanitário (água residuária que contém baixas concentrações de sulfato), sem comprometer a digestão anaeróbia, particularmente a produção de CH_4, o qual mantem teor acima de 70% no biogás. Isso ocorre, principalmente, em reatores anaeróbios seguidos de sistemas aeróbios nitrificantes, cujo efluente nitrificado pode ser recirculado para os sistemas anaeróbios e utilizado como fonte de nitrato ou nitrito no processo de desnitrificação autotrófica. É importante mencionar que nos estudos realizados com as condições apresentadas na **Tabela 4**, a injeção do oxigênio não afetou negativamente a atividade metanogênica do lodo, demonstrando uma tolerância dos microrganismos anaeróbios em condições limitadas de oxigênio. Tanto a microaeração quanto a desnitrificação autotrófica provocam diluição no biogás produzido durante a operação de reator UASB, reduzindo o valor energético no biogás. No entanto, essa diluição não compromete, pelo menos teoricamente, sua utilização como recurso energético, pois a aplicação em cogeração energética (elétrica e térmica) requer teor de CH_4 no biogás não abaixo de 40 a 45%.

6.2. Microaeração em reservatório de biogás: escala plena

As informações aqui apresentadas são fruto da pesquisa realizada em um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA), em uma ETE de escala plena, no estado da Bahia. Em operação desde 2013, a ETE Jacuípe II, da Empresa Baiana de Águas e Saneamento (EMBASA), localizada no município de Feira de Santana, possui um sistema de tratamento com reatores UASB, com capacidade para tratar os esgotos municipais de aproximadamente 100 mil contribuintes. Esta ETE conta com aproveitamento energético do biogás em moto-gerador, precedido de sistema de tratamento do biogás composto por dessulfuração por microaeração, que é realizada em reservatório de biogás de membrana dupla (**Figura 4**), além de um pós-tratamento com carvão ativado. Visando a remoção preliminar do H_2S dentro do reservatório de biogás, foi realizada a inoculação com esgoto, instalando fitas e uma rede como meio suporte. Foi instalado também um compressor de diafragma para dosagem controlada de ar. A adição de ar no reservatório de biogás promove a atividade microbiológica e a produção de enxofre elementar, que se acumula no meio suporte.

A montagem do reservatório de biogás começou com a colocação de uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD). Em seguida, foram feitas as soldas e instalado o sistema de fixação da rede de *nylon*, que tem a finalidade de ser o meio suporte para os microrganismos que promovem a dessulfuração dentro do reservatório de biogás. A rede de *nylon* é sustentada por cintas.

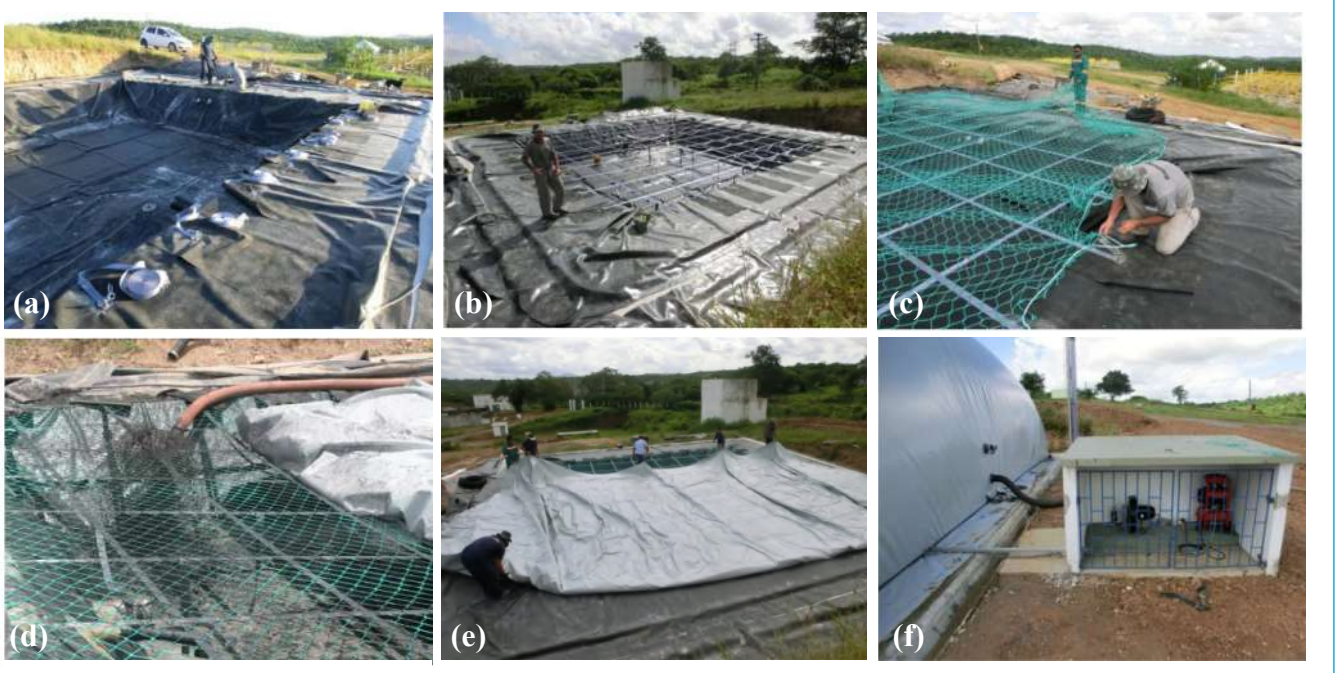
Fonte: Rotária do Brasil (2016)

Figura 4 – Reservatório de biogás instalado na ETE Jacuípe 2

As etapas de montagem do reservatório de biogás e do sistema interno de fitas e rede que constituem o meio suporte para crescimento das bactérias oxidadoras de sulfeto podem ser observadas em detalhes na **Figura 5**.

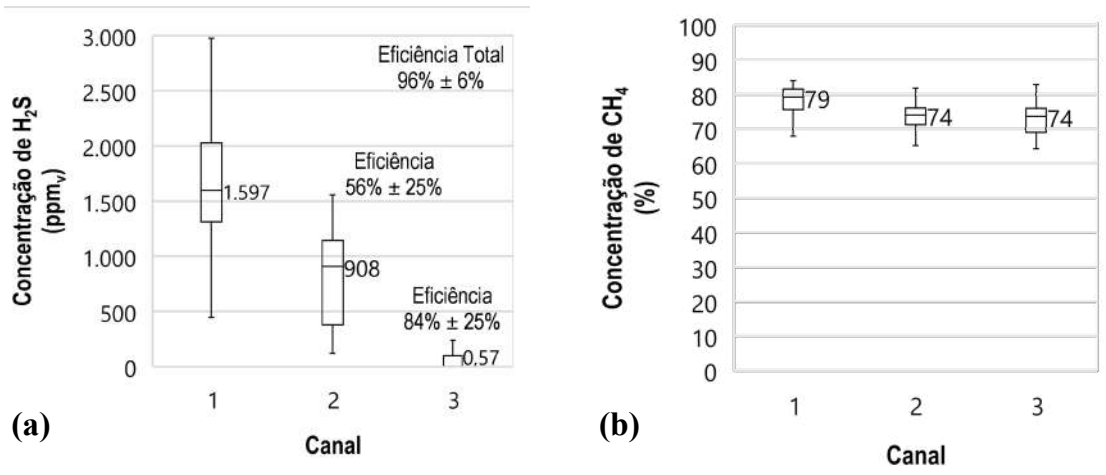
O sistema de biodessulfuração desta ETE contempla ainda um compressor de diafragma, um indicador de fluxo e uma válvula de retenção. O indicador de fluxo permite avaliar a vazão atingida pelo compressor de diafragma. O referido fluxo pode variar de acordo com a contrapressão correspondente ao fluxo operacional medido.

Para caracterização do biogás, foi utilizado um analisador de gás fixo (modelo Inca 4001 da *Union Instruments*) que é capaz de medir os seguintes componentes do biogás: CH_4, CO_2, O_2 e H_2S. A eficiência da biodessulfuração depende da medição do fluxo de biogás e da quantidade de oxigênio fornecida. Este processo possui um modo de operação manual e outro automático; a escolha pode ser feita por meio da interface *web* de um controlador lógico programável.



Fonte: Rotária do Brasil (2016).

Figura 5 – Etapas de montagem do reservatório de biogás e meio suporte interno para crescimento de microrganismos na ETE Jacuípe II – BA: a) Instalação da geomembrana e sistema de fixação; b) Instalação de cintas de sustentação da rede em nylon; c) Instalação da rede em *nylon*; d) Inoculação da rede (meio suporte) com esgoto; e) Instalação da membrana externa; f) Abrigo do compressor antes do reservatório de biogás.



Fonte: Rotária do Brasil (2016)

Figura 6 – Gráficos *boxplot* das concentrações de H_2S (a) e CH_4 (b) do biogás bruto (canal 1 – n: 152), após tratamento por desulfuração no gasômetro (canal 2 – n: 30), após tratamento por carvão ativado (canal 3 – n: 28).

No modo automático, dependendo da vazão de biogás, o ar é injetado no reservatório de biogás adotando uma concentração fixa de 3.000 ppm_v (partes por milhão)de H_2S.

Por segurança operacional, quando a concentração de oxigênio excede o valor de 2% no ponto de amostragem após o reservatório de biogás, o compressor de diafragma desliga e não é ligado novamente no modo automático até que a concentração reduza.

Durante o período de monitoramento do projeto, a mediana da eficiência de remoção de H_2S foi de 48%, com média de 56% ± 25% (**Figura 6a**). Contudo, é importante ressaltar que a primeira inoculação teve pouco contato com o meio suporte, resultando em uma eficiência média de 38% ± 12%. Após a detecção deste problema, foi realizada uma segunda inoculação, obtendo-se a partir deste momento, uma eficiência média de remoção de H_2S de 80% ± 15%. Ressalta-se também que a concentração de CH_4 diminuiu 5%, um resultado comum em biodessulfuradores (**Figura 6b**).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A microaeração se configura como uma estratégia eficiente de dessulfuração de biogás de reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário, principalmente quando aplicada diretamente no *headspace* do reator, possibilitando, especialmente, a remoção do sulfeto gasoso, sem comprometer o processo de digestão anaeróbia ou diluir o biogás para valores que comprometam seu subsequente aproveitamento energético. Ademais, a associação da microaeração com a desnitrificação autotrófica via nitrito ou nitrato se mostra adequada para se promover a remoção tanto do sulfeto gasoso quanto dissolvido, respectivamente.

Alternativamente à remoção de sulfeto gasoso no interior do reator anaeróbio, também a aplicação da microaeração no interior de reservatórios de biogás se mostra como uma importante alternativa para remoção de sulfeto e beneficiamento do biogás com vistas ao seu aproveitamento energético.

Assim, as tecnologias de dessulfuração reportadas na presente NT se mostram eficientes e de baixo custo, compatíveis com a realidade nacional, e que podem ser prontamente disponibilizadas aos prestadores de serviços de saneamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

BRANDT, E. M. F.; SOUZA, C. L.; CENTENO-MORA, E.; BIANCHETTI, F. J.; SANTOS, J. M. B.; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte B: Avanços nas técnicas de controle de emissões gasosas em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 1 - Tópicos de interesse. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 1, n. 2, p. 5-21, 2021.

BRITO, J. F. L. *Remoção de sulfeto em sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos por desnitrificação autotrófica associada a microaeração*. 2020. 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Centro de tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

CASTRO, I. M. P. *Avaliação da Microaeração em reator UASB piloto para remoção do sulfeto de hidrogênio produzido no tratamento de esgoto doméstico*. 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

DOS SANTOS, A. B. *Caracterização, Tratamento e Gerenciamento de Subprodutos de Correntes de Esgotos Segregadas e Não Segregadas em Empreendimentos Habitacionais*. ed. Fortaleza, Brasil: Imprece, 2019. 812 p.

HERNÁNDEZ, J. E. L.; CABRAL, C. B. G.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; SILVA, B. E. DOS S.; PLATZER, C.; LINNENBERG, C.; HIGAREDA, B. L. R. *Guía práctica de desulfuración biológica de biogás: criterios de diseño, arranque y operación para sistemas con microaireación y con biofiltro percolador*. Ciudad de México, México: GÍZ-México, 2019. 124 p.

JANSSEN, A. J.; SLEYSTER, R.; van der KAA, C.; JOCHEMSEN, A.; BONTSEMA, J.; LETTINGA, G. Biological sulphide oxidation in a fed-batch reactor. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 47, n. 3, p. 327-333, 1995.

JANSSEN, A. J. H.; LETTINGA, G.; DE KEIZER, A. Removal of hydrogen sulphide from wastewater and waste gases by biological conversion to elemental sulphur. Colloidal and interfacial aspects of biologically produced sulphur particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 151, n. 1-2, p. 389-397, 1999.

KHANAL, S. K.; HUANG, J. C. ORP-based oxygenation for sulfide control in anaerobic treatment of high-sulfate wastewater. *Water Research*, v. 37, n. 9, p. 2053-2062, 2003.

KRAYZELOVA, L.; BARTACEK, J.; DÍAZ, I., JEISON, D.; VOLCKE, E. I. P.; JENICEK, P. Microaeration for hydrogen sulfide removal during anaerobic treatment: a review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 14, n. 4, p. 703–725, 2015.

RAMOS, I.; DÍAZ, I.; FDZ-POLANCO, M. The role of the headspace in hydrogen sulfide removal during microaerobic digestion of sludge. *Water Science and Technology*, v. 66, n. 10, p. 2258–2264, 2012.

Rotária do Brasil, 2016. Banco de dados de medições do biogás proveniente de reatores anaeróbios da ETE Jacuípe 2 (EMBASA – BA), para fins de aproveitamento energético.

SANTOS, J. M. B; SOUZA, C. L.; BRANDT, E. M. F.; POSSETTI, G. R. C..; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanço nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 1 - Tópicos de interesse. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental,* v. 1, n. 1, p. 5-19, 2021.

SYED, M.; SOREANU, G.; FALLETTA, P.; BÉLAND, M. Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes - A review. *Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada*, v. 48, p. 2.1-2.14, 2006.

SOUZA, C. L.; SANTO, B. C. E.; BRANDT, E. M. F. B.; SANTOS, J. M. B. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte B: Avanços nas técnicas de controle de emissões gasosas em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 2 - Câmaras de dessorção para remoção de sulfeto de hidrogênio e metano dissolvidos em efluentes de reatores anaeróbios. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental,* v. 1, n. 2, p. 23-33, 2021.

TANG, KIMBERLEY; BASKARAN, VIKRAMA; NEMATI, MEHDI. Bacteria of the sulphur cycle: An overview of microbiology, biokinetics and their role in petroleum and mining industries. *Biochemical Engineering Journal*, v. 44, n. 1, p. 73-94, 2009.

© 2021 Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos de licença Creative Commons.

https://doi.org/10.5327/276455760101006

Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios Nota Técnica 4 – Dessulfuração de biogás por adsorção em adsorventes de baixo custo

Part A: Advances in tools and techniques for estimating biogas production and treatment in anaerobic-based STPs Technical Note 4 - Biogas desulfurization by adsorption on low-cost adsorbents

Juliana Mattos Bohrer Santos[1], Emanuel Manfred Freire Brandt[2], Carlos Augusto de Lemos Chernicharo[3]*

RESUMO

Dentre as técnicas de tratamento de biogás existentes, a adsorção em carvão ativado (CA), disposto em colunas filtrantes, tem sido a mais empregada. No entanto, quando inserida na realidade das ETEs brasileiras, o custo do CA se torna um fator limitante. Nesse sentido, estudos recentes que avaliaram adsorventes alternativos de baixo custo destacaram o grande potencial de utilização como alternativa ao CA ou em unidade de pré-tratamento, com o objetivo de prolongar a vida útil dos filtros de CA. Dessa forma, a presente nota técnica busca contribuir para o conhecimento do processo de remoção de H_2S por adsorção, abarcando os seguintes pontos de interesse principais: (i) aplicabilidade e limitações; (ii) fundamentos do processo; (iii) critérios e parâmetros de projeto; e (iv) aspectos referentes a operação e manutenção.

Palavras-chave: sulfeto de hidrogênio; biogás; resíduos da mineração; óxido de ferro; aproveitamento energético do biogás.

ABSTRACT

Among the existing biogas treatment techniques, adsorption onto activated carbon (AC), in filter columns, has been the mostly used. However, when the reality of the Brazilian STPs is considered, the cost of AC becomes a limiting factor. In this sense, recent studies that evaluated low-cost alternative adsorbents have highlighted the great potential for its use as an alternative to AC or in a pre-treatment unit, with the goal of extending the lifetime of the AC filters. Therefore, this technical note seeks to contribute to the knowledge of the H_2S removal process by adsorption, covering the following main points of interest: (i) applicability and limitations; (ii) fundamentals of the process; (iii) project criteria and parameters; and (iv) aspects related to operation and maintenance.

Keywords: hydrogen sulfide; biogas, mining waste; iron oxide; biogas energy recovery.

[1]Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre e aluna de doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[2]Químico Industrial pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Docente Permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFJF. Diretor Técnico da Brandt Meio Ambiente Ltda. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[3]Engenheiro Civil pela UFMG. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle upon Tyne – UK. Professor titular aposentado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Coordenador do INCT ETEs Sustentáveis.
***Endereço para correspondência:** Avenida Antônio Carlos 6.627 – Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Bloco 1. Belo Horizonte, MG. CEP: 31270-901. e-mail: calemos@desa.ufmg.br

1. INTRODUÇÃO

Dentro da perspectiva de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) mais sustentável, em que se busca o aproveitamento dos subprodutos do tratamento, observa-se a necessidade de proposição e consolidação de técnicas para o tratamento do biogás. A necessidade da adoção de um sistema de purificação surge, principalmente, no sentido da remoção ou redução da concentração de H_2S presente no biogás, a fim de viabilizar o aproveitamento energético desse importante subproduto do tratamento anaeróbio, conforme abordado na Nota Técnica 1 (**NT 1**) desta coletânea (Santos *et al.*, 2021).

Dentre as técnicas de dessulfuração disponíveis, a adsorção apresenta grande potencial de aplicação em sistemas de conversão de energia, principalmente, por ser uma técnica simplificada e possibilitar a remoção seletiva do H_2S com elevadas eficiências. Ademais, assegura as baixas concentrações exigidas pelos equipamentos que compõem o sistema de aproveitamento energético (Ahn *et al.*, 2020).

Apesar da técnica de adsorção ser amplamente consolidada, quando inserida na realidade das ETEs brasileiras, o custo do carvão ativado (adsorvente mais comumente utilizado) se torna um fator limitante. Considerando que o custo operacional muitas vezes inviabiliza a realização do tratamento do biogás e, consequentemente, a sua utilização para geração de energia, existe a necessidade de estudos para a avaliação da utilização de materiais alternativos para a adsorção.

Nessa vertente, estudo recente destacou o grande potencial de utilização de adsorventes de baixo custo como alternativa ao carvão ativado ou, ainda, em unidade de pré-tratamento, com o objetivo de reduzir a carga aplicada às colunas de adsorção com carvão ativado, de modo a prolongar a vida útil desse adsorvente e tornar o processo de tratamento mais econômico (Santos, 2018).

Diante da necessidade de incentivo e consolidação de técnicas simplificadas e de baixo custo em ETEs que fazem ou pretendem fazer o uso energético do biogás, a presente nota técnica busca contribuir para o conhecimento do processo de remoção de H_2S por adsorção, abarcando pontos de interesse como: (i) aplicabilidade e limitações; (ii) fundamentos do processo; (iii) critérios de dimensionamento; e (iv) operação e manutenção.

2. APLICABILIDADE, LIMITAÇÕES E EFICIÊNCIAS

O uso da técnica de adsorção para a dessulfuração do biogás produzido em reatores anaeróbios pode se constituir em uma alternativa atrativa quando houver:

1. Necessidade de sistema de tratamento estável e de alto desempenho, capaz de garantir as baixas concentrações de H_2S exigidas pelos equipamentos que compõem o sistema de aproveitamento energético.
2. Limitação de espaço físico na ETE e demanda por sistemas compactos e mecanicamente simples para o tratamento do biogás.
3. Uma estrutura de gestão, operação e manutenção na ETE que garanta o adequado monitoramento das colunas de adsorção, considerando sua regeneração e troca do material adsorvente com a frequência necessária.

Várias dessas condições são mais comuns para ETEs de médio e grande porte, mas uma avaliação preliminar deve ser realizada para cada situação específica.

Para a dessulfuração do biogás, a técnica de adsorção pode proporcionar um grau de pureza do gás tratado inferior a 0,1 ppm_v (partes por milhão), a depender do tipo de adsorvente utilizado. Para carvões ativados não impregnados, a concentração de H_2S no biogás tratado pode variar entre 10 e 100 ppm_v. Já para carvões ativados impregnados, a concentração de H_2S no biogás tratado, em geral, apresenta-se menor do que 0,1 ppm_v. Adsorventes comerciais à base de óxido de ferro (SulfaTreat) podem proporcionar concentrações de H_2S inferiores a 1 ppm_v após o tratamento (Wasajja *et al.*, 2020).

Embora o carvão ativado comercial seja o adsorvente mais comumente utilizado para remoção de H_2S do biogás, os custos geralmente associados à sua renovação e/ou regeneração (com vapor a uma temperatura superior a 450 °C - Brasil, 2017) limitam a ampla disseminação desse adsorvente em unidades de aproveitamento energético do biogás implantadas em ETEs anaeróbias. O custo do tratamento do biogás com carvão ativado pode variar entre 10 e 140 EUR·kg $H_2S^{-1}_{adsorvido}$, dependendo se for modificado ou não. No caso do SulfaTreat, o custo pode variar entre 1,87 e 4,31 EUR·kg $H_2S^{-1}_{adsorvido}$ (Wasajja *et al.*, 2020).

Adicionalmente, a técnica de adsorção por carvão ativado geralmente se limita ao tratamento de correntes gasosas com concentrações de H_2S inferiores a 500 ppm_v no gás bruto, visando prolongar a vida útil do adsorvente. Nesse sentido, para o tratamento do biogás com concentrações elevadas de H_2S (1.000 a 5.000 ppm_v), a instalação de outros sistemas de dessulfuração a montante das colunas de adsorção é frequentemente necessária, o que resulta no aumento da complexidade do sistema de tratamento do biogás (Brasil, 2017).

Nesse contexto, o estudo de adsorventes alternativos e de baixo custo tem se destacado. Adsorventes produzidos a partir de resíduos da mineração de ferro e da siderurgia têm sido avaliados para remoção de H_2S do biogás, podendo ser obtidas concentrações finais menores que 1 ppm_v. Os resultados das análises preliminares de custos indicam que o preço desses adsorventes por kg H_2S adsorvido (5,82 EUR·kg $H_2S^{-1}_{adsorvido}$) pode ser até 13 vezes inferior ao do carvão ativado comercial (78,68 EUR·kg $H_2S^{-1}_{adsorvido}$) (Santos, 2018). O uso desses adsorventes apresenta grande potencial de aplicação, principalmente na redução das concentrações de H_2S em unidade anterior à coluna de adsorção com carvão ativado, no sentido de prolongar a vida útil desse adsorvente e reduzir os custos associados à sua renovação.

3. FUNDAMENTOS DO PROCESSO

3.1. Preliminares

A adsorção refere-se ao processo de transferência de massa entre substâncias (adsorvato) existentes em fluidos líquidos ou gasosos e superfícies sólidas (adsorvente). As moléculas entram em contato com a superfície de um adsorvente e se ligam via forças moleculares. Dessa forma, quanto maior a superfície por unidade de massa sólida, maior será o potencial de adsorção do material. A superfície de um adsorvente inclui todas as áreas acessíveis e pode, portanto, ser extensiva a sólidos que incorporam uma rede interna de poros (Ruthven, 1984; Kohl e Neilsen, 1997; Nascimento *et al.*, 2014).

A remoção de impurezas por adsorção está relacionada às diferenças no peso molecular, na forma ou na polaridade das moléculas, que são responsáveis pelo fato de algumas delas serem adsorvidas mais fortemente na superfície do adsorvente do que outras. Adicionalmente, o tamanho dos poros do adsorvente seleciona as moléculas a serem adsorvidas, já que não admite moléculas com diâmetro cinético maior que o diâmetro do próprio poro (Mccabe *et al.*, 2005).

De acordo com a intensidade das forças envolvidas no processo, pode-se ter a adsorção física ou a adsorção química. Na adsorção física, a força de interação entre o adsorvato e a superfície do adsorvente é relativamente fraca. É um tipo de adsorção não específica, que ocorre em toda a superfície do adsorvente, sendo, portanto, considerada não localizada. Ademais, ocorre em multicamadas e a natureza química do adsorvato não é alterada. Já no caso da adsorção química, a força de interação é bem mais forte. É um tipo de adsorção específica, localizada, que ocorre em monocamadas e em que há alteração na natureza química do adsorvato (Nascimento *et al.*, 2014).

Na **Figura 1** é ilustrado o processo de adsorção em coluna de leito fixo, a qual é composto por: (1) entrada do biogás com H_2S; (2) saída do biogás tratado (sem H_2S); (3) adsorvente granular; e (4) mecanismos de adsorção. Dependendo das características do adsorvente utilizado, é recomendado o condicionamento prévio do biogás para a remoção de umidade.

3.2. Princípio de funcionamento das colunas de adsorção

Durante o processo de dessulfuração em coluna de leito fixo, as concentrações de H_2S na fase gasosa (biogás) e na fase sólida (adsorvente) variam com o tempo e com a posição no leito.

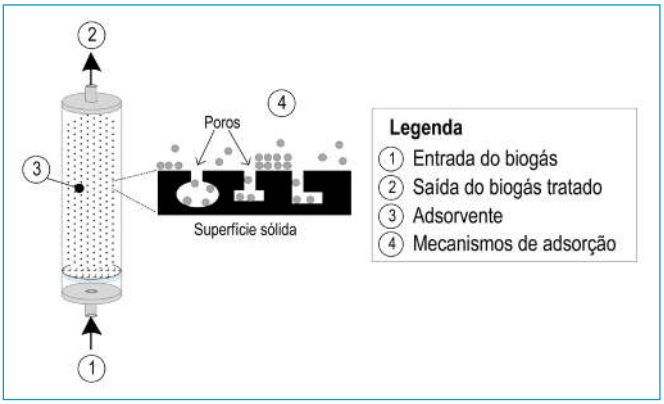


Figura 1 – Coluna de adsorção para a dessulfuração do biogás gerado em reatores anaeróbios.

Inicialmente, a transferência de massa ocorre preferencialmente próximo da entrada da coluna, onde se dá o primeiro contato do biogás com o adsorvente. Nesse momento, a concentração do adsorvato (H_2S) no biogás cai exponencialmente a zero antes do final do leito ser atingido (Mccabe *et al.*, 2005).

Decorrido alguns minutos, a fração do adsorvente que se encontra próximo à entrada da coluna está praticamente saturada. Dessa forma, a maior parte da transferência de massa ocorre mais distante da entrada. A zona de transferência de massa é caracterizada pela maior variação das concentrações do H_2S, ocorrida quando os valores do gradiente de concentração (relação C/Co) variam entre 0,05 e 0,95. A relação C/Co é a razão entre a concentração final (C), após a coluna de adsorção, e a concentração inicial do H_2S no biogás (Co), conforme apresentado na **Figura 2** (Mccabe *et al.*, 2005).

A curva apresentada na **Figura 2** é denominada curva de ruptura ou curva de *breakthrough*. Esta permite o cálculo da capacidade de adsorção do adsorvente (razão entre a massa de H_2S removida por massa de adsorvente), a partir da integração da curva de ruptura até o tempo t4, conforme **Equação 1** (Mccabe *et al.*, 2005).

$$q = \frac{MC_0Q}{10^{-3}m_s}\int_0^t \left(1 - \frac{C}{C_0}\right)dt \qquad (1)$$

Na qual: m_s - massa de adsorvente utilizada (g); Q - vazão aplicada ($L \cdot h^{-1}$); Co - concentração inicial de H_2S ($mol \cdot L^{-1}$); M - massa molar do H_2S (34,08 $g \cdot mol^{-1}$); C - concentração no tempo t.

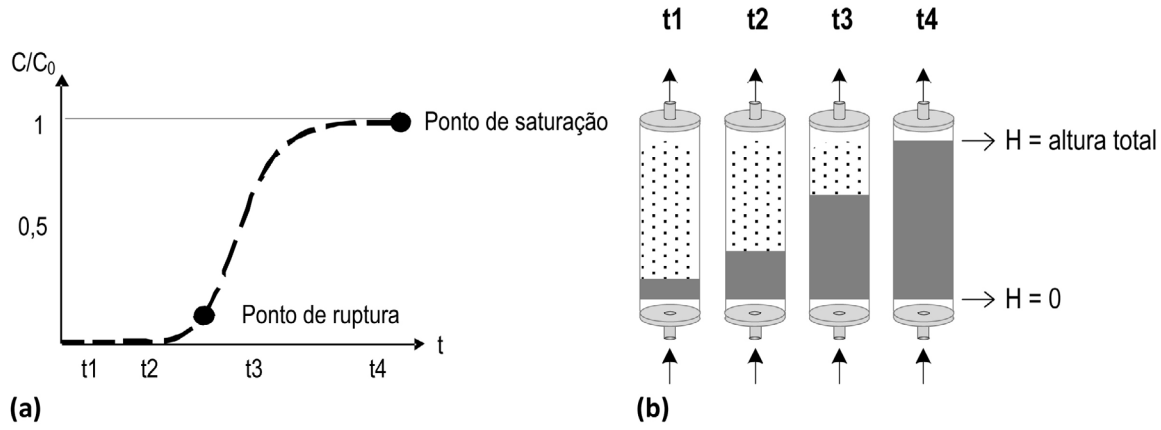
Nos tempos t_1 e t_2, a concentração final na saída do leito é praticamente zero (**Figura 2**). No momento em que a concentração do poluente no fluido atinge o ponto de ruptura, o fluxo é redirecionado para uma nova coluna de adsorção. O ponto de ruptura (t_3) corresponde ao limite de capacidade de adsorção com maior remoção de H_2S, e normalmente é representado pela concentração relativa (C/Co) de 0,05 ou 0,10 (Mccabe *et al.*, 2005). Dessa forma, até que se atinja o ponto de saturação (t_4), o gradiente de concentração (relação C/Co) assume a forma de S.

Dessa forma, é prática comum em projetos fornecer um fator de segurança a partir da substituição do adsorvente antes de se atingir o ponto de ruptura (Kohl e Neilsen, 1997). Destaca-se que no caso da adsorção de H_2S presente no biogás, o ponto de ruptura será determinado pelo requisito de qualidade exigido pela tecnologia utilizada para o seu aproveitamento energético.

3.3. Fatores intervenientes

A capacidade de adsorção do adsorvente é influenciada por diversos fatores, conforme apresentado a seguir (Ruthven, 1984; Kohl e Neilsen, 1997):

1. Área superficial: considerando que a adsorção é um fenômeno de superfície, quanto maior a área superficial do adsorvente, maior será a quantidade de adsorvato adsorvida.



Fonte: Adaptado de Hines e Maddox (1985).

Figura 2 – (a) curva de ruptura; (b) processo de saturação do adsorvente ao longo do tempo.

2. Concentração inicial do adsorvato: a taxa de adsorção é proporcional à concentração inicial do adsorvato.
3. Tamanho das partículas do adsorvente: quanto menor o tamanho das partículas, maior é a área superficial disponível para adsorção e, consequentemente, maior é a taxa de adsorção. Para partículas maiores, a resistência à difusão é maior e grande parte da superfície interna da partícula não é disponibilizada para adsorção. Por outro lado, para partículas muito pequenas, a perda de carga no sistema é maior.
4. Temperatura: afeta principalmente a constante de velocidade de adsorção.
5. Velocidade espacial do gás (tempo de contato adsorvato/adsorvente): o aumento da velocidade espacial reduz o tempo de contato adsorvato/adsorvente, reduzindo a taxa de adsorção, além de aumentar a perda de carga do sistema. A velocidade espacial (h^{-1}) é dada pela relação entre a vazão do gás ($L{\cdot}h^{-1}$) e o volume do leito adsorvente (L) (Monteleone *et al.*, 2011).

O entendimento dos mecanismos de adsorção se dá a partir da isoterma de adsorção. Esta consiste na relação de equilíbrio entre a concentração na fase fluida e a concentração nas partículas do adsorvente, a uma dada temperatura. Portanto, a isoterma de adsorção permite calcular a quantidade de adsorvato que o adsorvente pode reter, ou seja, a capacidade de adsorção do material adsorvente no equilíbrio, sendo essa uma de suas principais características (Mccabe *et al.*, 2005). Dentre os modelos de isoterma que são frequentemente utilizados para ajuste dos dados experimentais, tem-se a isoterma de Langmuir e a isoterma de Freundlich (Mccabe *et al.*, 2004). Mais informações sobre os mecanismos de adsorção podem ser encontradas em Ruthven (1984), Suzuki (1990), Kohl e Neilsen (1997), Mccabe *et al.* (2005) e Nascimento *et al.* (2014).

3.4. Adsorventes de interesse comumente utilizados para adsorção de H_2S

Diversos adsorventes são utilizados na remoção de H_2S do biogás, tais como peneiras moleculares (zeólitas), materiais carbonáceos e óxidos metálicos (Ozekmekci *et al.*, 2015). No entanto, o carvão ativado, como comentado anteriormente, é o adsorvente mais comumente utilizado, devido às seguintes características principais: (i) elevada área superficial; (ii) presença de micro poros; (iii) estabilidade térmica; e (iv) elevada capacidade de adsorção (Barelli *et al.*, 2017; Zulkefli *et al.*, 2019).

Para aumentar a seletividade e eficiência do carvão ativado na remoção de H_2S, modificações químicas baseadas principalmente na impregnação podem ser empregadas. Os agentes químicos mais comumente utilizados para produção de CA impregnados são: carbonato de sódio (Na_2CO_3), hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), iodeto de potássio (KI), carbonato de potássio (K_2CO_3) e permanganato de potássio ($KMnO_4$) (Surra *et al.*, 2019; Zulkefli *et al.*, 2019). Cabe ressaltar que a impregnação eleva os custos de produção do adsorvente, razão pela qual deve-se avaliar a relação custo/eficiência para tomada de decisão quanto ao melhor adsorvente.

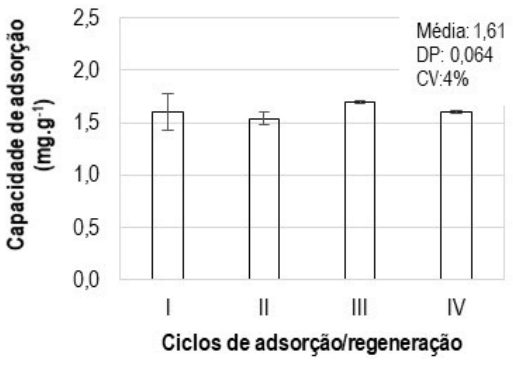
Dentre os óxidos metálicos utilizados para remoção de H_2S do biogás, o óxido de ferro tem sido amplamente utilizado (Wasajja *et al.*, 2020). A esponja de ferro (cavacos de madeira impregnados com óxido de ferro) é o adsorvente de óxido de ferro mais conhecido, podendo ser utilizado em sistemas com operação em batelada (regeneração separada), ou com um pequeno fluxo de ar na corrente de gás para regeneração contínua. Tendo em vista que a reação de regeneração é exotérmica (libera calor), é de extrema importância monitorar a geração de calor durante a regeneração, a fim de evitar a combustão. Destaca-se que, devido à acumulação de enxofre elementar (S^0), a eficiência da esponja de ferro é reduzida em cerca de 1/3 a cada ciclo de regeneração (Abatzoglou e Boivin, 2009).

A dessulfuração com óxido de ferro se dá através da ligação do enxofre com o ferro formando o sulfeto de ferro ($Fe_2O_3 + 3H_2S \rightarrow Fe_2S_3 + 3H_2O$). A possibilidade da regeneração desses adsorventes pela inserção de ar atmosférico ($Fe_2S_3 + {}^3/_2O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 3S$) torna a sua utilização ainda mais atrativa (Muche e Zimmnerman, 1985; CCE, 2000), visto que o carvão ativado é usualmente descartado sem reaproveitamento, devido às exigências energéticas para a reação de regeneração (Lindberg e Wellinger, 2006).

Dessa forma, esforços têm sido realizados no sentido de desenvolver adsorventes de baixo custo produzidos a partir de materiais que contém óxido de ferro, como os resíduos da mineração de ferro e da siderurgia. Pesquisas recentes com adsorventes produzidos a partir desses resíduos reportam capacidades de adsorção variando entre 1,4 e 2,4 $mgH_2S \cdot g^{-1}_{adsorvente}$, e de 4,1 $mgH_2S \cdot g^{-1}_{adsorvente}$ para o carvão ativado comercial testado sob as mesmas condições operacionais. Capacidades de adsorção até 11 $mgH_2S \cdot g^{-1}_{adsorvente}$ foram obtidas quando a umidificação do adsorvente desenvolvido foi considerada, podendo ser alcançadas concentrações de H_2S menores que 1 ppm_v no biogás tratado (Santos, 2018).

A regeneração com ar atmosférico se mostrou eficiente, já que os valores da capacidade de adsorção após quatro ciclos de adsorção/regeneração foram equivalentes à capacidade de adsorção do adsorvente virgem, **Figura 3**. Ademais, ensaios utilizando biogás gerado em uma plataforma de metanização de resíduos orgânicos alimentares permitiram verificar que os adsorventes são seletivos para o H_2S, já que as concentrações dos demais constituintes do biogás (CH_4 e CO_2) não sofreram alteração (Santos, 2018).

Resultados preliminares indicam que os custos de produção dos adsorventes à base de resíduos da mineração de ferro e da siderurgia, por m³ de biogás tratado, pode ser até 13 vezes inferior ao do carvão ativado comercial, quando considerada a possibilidade de regeneração com ar atmosférico. Nesse sentido, infere-se que apesar de os adsorventes à base de óxido de ferro apresentarem menores capacidades de adsorção de H_2S que o carvão ativado, ainda podem apresentar uma melhor relação eficiência/custo sob o ponto de vista do aproveitamento energético do biogás (Santos, 2018).



Nota: Ciclo I: adsorvente virgem; Ciclo II: adsorvente regenerado 1 vez; Ciclo III: adsorvente regenerado 2 vezes; Ciclo IV: adsovente regenerado 3 vezes.
Fonte: Santos, 2018.

Figura 3 – Resultados das capacidades de adsorção para os ciclos de adsorção/regeneração do adsorvente produzido a partir de resíduo da mineração de ferro.

Como já abordado no item 3.3 desta NT, o resultado da capacidade de adsorção depende de diversos fatores. Dessa forma, a ampla gama de valores reportados na literatura (**Tabela 1**) é resultado, principalmente, das diferenças entre os materiais e os protocolos experimentais para os testes de adsorção (Kuhn *et al.*, 2017). Portanto, recomenda-se a consulta aos fornecedores sobre os parâmetros de projeto e a realização de testes experimentais que simulem as condições de operação a serem aplicadas em escala real, visando garantir o adequado dimensionamento do sistema de adsorção.

Tabela 1 – Características de alguns adsorventes utilizados na remoção de H_2S do biogás.

Adsorvente	Capacidade de adsorção ($mgH_2S \cdot g^{-1}_{adsorvente}$)	Concentração no biogás tratado	Referências
CAI[(a)]	10 a 280	< 0,1 ppm_v	[1];[2];[4];[5]
CANI[(b)]	3 a 200	10 a 100 ppm_v	[1];[2];[3];[4]
SulfaTreat[(c)]	65 a 150	< 1 ppm_v	[1]
RMFS[(d)]	1,4 a 11	< 1 ppm_v	[6]

Notas: [(a)] CAI: carvão ativado impregnado; [(b)] CANI: carvão ativado não impregnado; [(c)] SulfaTreat: adsorvente comercial a base de óxido de ferro; [(d)] RMFS: adsorvente produzido a partir de resíduo da mineração de ferro e da siderurgia.
Fonte: [1]Wasajja *et al.* (2020); [2]Ortiz *et al.* (2014); [3]Abatzoglou; Boivin (2009); [4]Xiao *et al.* (2008); [5]Castrillon *et al.* (2016); [6]Santos (2018).

4. CRITÉRIOS E PARÂMETROS DE PROJETO

4.1. Diagrama unifilar do processo de remoção de H_2S do biogás por adsorção

Na **Figura 4** é apresentada uma proposta para o fluxograma do processo de dessulfuração do biogás de reatores anaeróbios por meio da técnica de adsorção.

O sistema de adsorção deve ser composto por pelo menos duas colunas de leito fixo, preenchidas com adsorvente granular. Dependendo da escala da aplicação, vários sistemas em paralelo podem ser requeridos. As colunas de adsorção devem ser instaladas em paralelo para garantir a operação contínua do sistema de tratamento do biogás, uma vez que durante o processo de regeneração ou renovação do

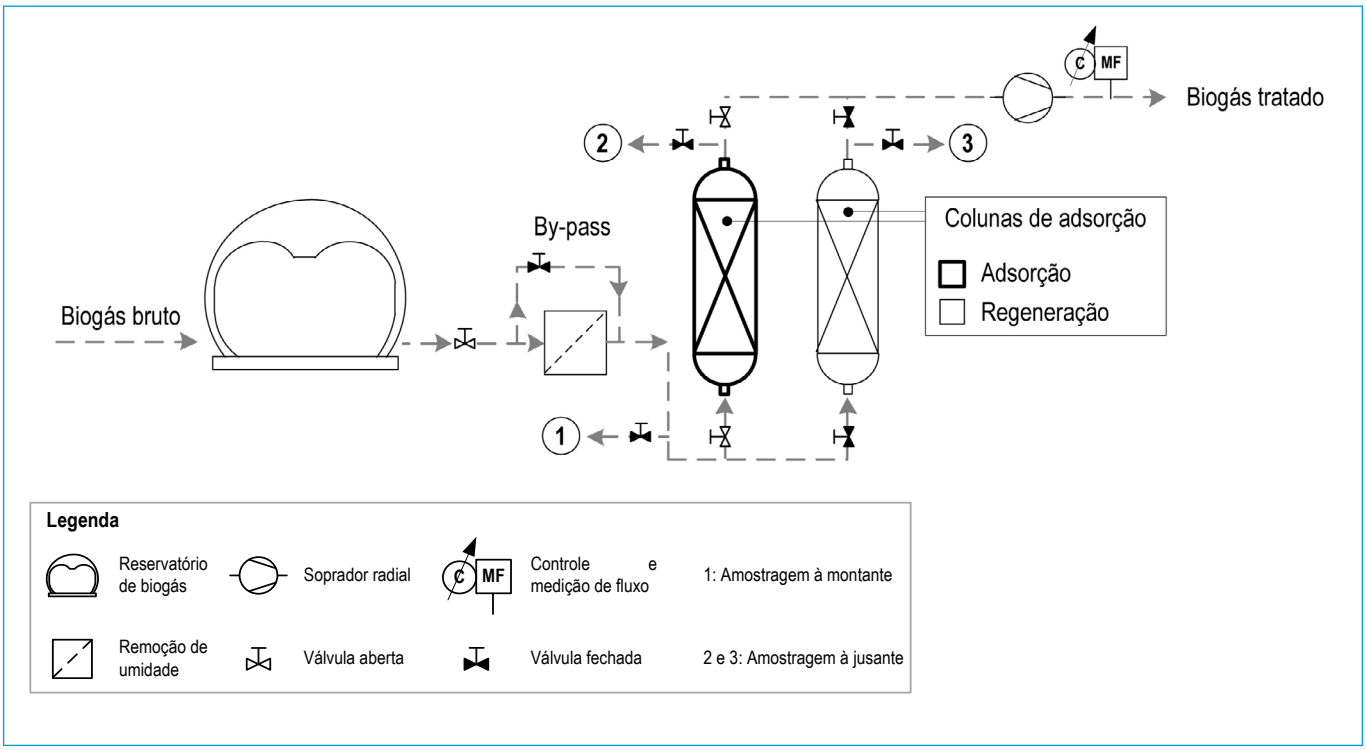


Figura 4 – Diagrama unifilar do processo de dessulfuração do biogás por meio da técnica de adsorção.

adsorvente de uma das colunas, a outra estará disponível para o uso (**Figura 4**). O adsorvente deve ser apoiado em uma tela ou placa perfurada de forma que exista um espaço entre a entrada de biogás e o início do leito de adsorção, para que o fluxo gasoso possa ser distribuído de maneira uniforme, evitando a presença de zonas mortas.

Para garantir as eficiências de dessulfuração do sistema de tratamento, a vazão de dimensionamento deve ser respeitada, considerando, também, as perdas de carga reais do sistema de tubulações, conexões e do próprio sistema de tratamento do biogás. Para tanto, um reservatório de gás deve ser instalado no início da linha de tratamento para amortecer as variações de vazão diárias, seguido por um compressor de gás acoplado à um equipamento de medição e controle de vazão (**Figura 3**). Além disso, é importante a instalação de registros e válvulas adequadas para verificações e manobras operacionais necessárias, assim como de pontos para amostragem, a montante (ponto 1) e a jusante (pontos 2 e 3) das colunas de adsorção, para o monitoramento das eficiências do sistema. Pode ser bastante adequada a previsão de pontos de purga/remoção de condensados, assim como a avaliação da instalação de dispositivos contra sobre pressão e vácuo.

Cabe ressaltar que, dependendo das características do adsorvente utilizado, o sistema de adsorção deve ser precedido de uma unidade de condicionamento do biogás para remoção de umidade (**Figura 3**). Essa necessidade deve ser indicada pelo fornecedor do adsorvente. Destaca-se que todos os elementos do sistema de dessulfuração que tenham contato direto com o biogás bruto (tubulações, válvulas, colunas de adsorção, equipamentos etc.) devem ser selecionados considerando os aspectos de resistência dos materiais às condições adversas, de forma a evitar problemas de corrosão, sendo o aço AISI 316Ti o material mais indicado (Brandt *et al.*, 2018), muito embora materiais em polietileno de alta densidade (PEAD) também possam ser utilizados.

4.2. Exemplo de pré-dimensionamento de colunas de adsorção para remoção de H_2S do biogás de reator anaeróbio

O seguinte exemplo ilustra os cálculos de pré-dimensionamento de colunas de adsorção para remoção de H_2S do biogás produzido em reator UASB tratando esgoto sanitário.

Exemplo: Dimensionar um sistema de colunas de adsorção para remoção de H_2S do biogás.

Dados de entrada:

- População contribuinte (P): 250.000 habitantes
- Contribuição per capita de esgoto (QPC): 165 $L{\cdot}hab^{-1}{\cdot}d^{-1}$
- Taxa de contribuição por infiltração (T_{inf}) = 0,1 $L{\cdot}s^{-1}{\cdot}km^{-1}$
- Extensão de rede por habitante (Lrede·hab^{-1}): 1,5 $m{\cdot}hab.^{-1}$
- Produção unitária de biogás* ($P_{biogás}$): 85,6 $NL_{biogás}{\cdot}m^{-3}{}_{esgoto}$
- Capacidade de adsorção do adsorvente** ($q_{adsorvente}$): 0,011 $kgH_2S{\cdot}kg^{-1}{}_{adsorvente}$
- Densidade aparente do adsorvente (ρ): 590 $kg{\cdot}m^{-3}$
- Velocidade superficial do gás*** (v_g): 3,1 $cm{\cdot}s^{-1}$ (2.678,4 $m{\cdot}d^{-1}$)
- Concentração média de H_2S no biogás (C_{H2S}): 1.500 ppm_v (2,09 $g{\cdot}m^{-3}$)
- Tempo para substituição do adsorvente: 40 dias
- Condições de pressão e temperatura: 1 atm e 25 °C

Notas:

*Valor médio para um cenário típico de produção de biogás (Lobato et al., 2012).

**Adsorvente produzido a partir de resíduo da siderurgia (Santos, 2018).

***Faixa de valores típicos de velocidade superficial do gás: carvão ativado: 5 a 50 $cm{\cdot}s^{-1}$ (US, 2001); esponja de ferro: 1 a 5 $cm{\cdot}s^{-1}$ (Anerousis; Whitman, 1985; Zicari, 2003).

Solução:

a) Cálculo da vazão média de esgoto bruto:

$$Q_{med} = P \times QPC \times \frac{1d}{86.400s} + P \times \text{Lrede} \cdot \text{hab}^{-1} \times Tinf$$

$$Q_{med} = 250.000\ hab \times 165\ L \cdot hab^{-1}.d^{-1} \cdot \frac{1d}{86.400s} + 250.000\ hab \times 1{,}5\ m \cdot hab^{-1} \times \frac{1km}{1000m} \times 0{,}1\ L \cdot s^{-1} \cdot km^{-1}$$

$$Q_{med} = 515\ L \cdot s^{-1}$$

b) Estimativa da produção de biogás ($Q_{biogás}$):

$$Q_{biogás} = Q_{med} \times P_{biogás} = \frac{44.496\ m^3 \cdot d^{-1} \times 85{,}6\ NL_{biogás} \cdot m^{-3}{}_{esgoto}}{1000} = 3.808{,}9\ Nm^3 \cdot d^{-1}$$

c) Determinação da carga de H2S a ser tratada (L_{H_2S}):

$$L_{H_2S} = \frac{C_{H_2S} \times Q_{biogás}}{1.000} = \frac{2{,}09\ g \cdot m^{-3} \times 3.808{,}9\ m^3 \cdot d^{-1}}{1.000} = 7{,}96\ kg \cdot d^{-1}$$

d) Determinação da massa de adsorvente necessária para a remoção da carga de H_2S afluente ($M_{adsorvente}$):

A massa de adsorvente necessária é determinada com base na capacidade de adsorção do material, definida pelo fabricante ou através de ensaios experimentais. O tempo para a troca ou regeneração do adsorvente também deve ser considerado no cálculo. Considerou-se um total de 3 regenerações (Santos, 2018), sendo o tempo (t) entre regenerações de 10 dias. Dessa forma a massa de adsorvente poderá ser usada por 4 vezes, totalizando 40 dias para troca do material.

$$M_{adsorvente} = \frac{L_{H_2S}}{q_{adsorvente}} \times t = \frac{7{,}96\ kg \cdot d^{-1}}{0{,}011\ kg \cdot kg^{-1}} \times 10\ d = 7.235\ kg$$

e) Determinação do volume do leito de adsorvente ($V_{adsorvente}$):

$$V_{adsorvente} = \frac{M_{adsorvente}}{\rho} = \frac{7.235\ kg}{590\ kg \cdot m^{-3}} = 12{,}26\ m^3$$

f) Determinação da área superficial da coluna de adsorção (A_s):

$$A_s = \frac{Q_{biogás}}{v_g} = \frac{3.808{,}9\ m^3 \cdot d^{-1}}{2.678{,}4\ m \cdot d^{-1}} = 1{,}42\ m^2$$

g) Determinação do diâmetro da coluna de adsorção (D):

$$D = \sqrt{\frac{4 \times A_s}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 1{,}42\ m^2}{\pi}} = 1{,}35\ m$$

h) Determinação da altura da coluna de adsorção (H):
Sabendo-se o volume de adsorvente necessário, a altura da coluna de adsorção pode ser determinada.

$$H = \frac{V_{adsorvente}}{A_s} = \frac{12{,}26\ m^3}{1{,}42\ m^2} = 8{,}63\ m$$

Deverão, no total, ser instaladas 5 colunas de adsorção em série, dimensionadas com: 1,35 m de diâmetro e 1,75 m de altura útil.

Observações finais:

- Pesquisas em andamento indicam a possibilidade de se incrementar a capacidade de adsorção dos adsorventes produzidos a partir dos resíduos da mineração de ferro e da siderurgia.
- Existe, portanto, a expectativa de que se possa reduzir a massa de adsorvente necessária para remoção de uma mesma carga de H_2S, o que possibilitará o aumento da vida útil destes adsorventes.

5. ILUSTRAÇÃO DE COLUNAS DE ADSORÇÃO E ASPECTOS ADICIONAIS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

Neste item são apresentados exemplos de dois sistemas de tratamento de biogás por adsorção para cogeração de energia: o primeiro, instalado no Quarteirão 10 (Q10) do polo de pesquisa e desenvolvimento localizado no Campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG); e o segundo, instalado na Estação de Tratamento de Esgoto Arrudas (Belo Horizonte - Minas Gerais). Ambas as unidades de tratamento de biogás são constituídas por colunas de adsorção em paralelo, para permitir a regeneração ou troca do adsorvente sem a necessidade de interrupção da operação do sistema. Os adsorventes utilizados para remoção de H_2S do biogás são a zeólita e o carvão ativado, respectivamente para o primeiro e o segundo sistema. Outra diferença entre os sistemas de adsorção se refere ao material de fabricação de seus componentes (tubulações, válvulas, colunas de adsorção etc.), o primeiro é mais simples, construído de tubos e peças de policloreto de vinila (PVC), e o segundo é mais robusto, fabricado em aço inox (**Figura 5**). Conforme destacado no item 4, considerando os aspectos de resistência dos materiais às condições adversas, o sistema em PVC possui uma vida útil sensivelmente inferior.

Na ETE Arrudas, o tratamento de esgoto é realizado pelo processo de lodos ativados convencional. O biogás utilizado para cogeração de energia é produzido durante a digestão anaeróbia do lodo e armazenado em dois reservatórios com capacidade total de 6.400 m³ (**Figura 6**). Após o tratamento, o biogás é direcionado para três conjuntos de quatro microturbinas com capacidade unitária de geração de 200 kW·h^{-1}, somando 2,4 MW de potência instalada. A energia elétrica gerada é utilizada para suprir cerca de 90% da necessidade da estação.

Figura 5 – Sistemas de remoção de H_2S do biogás por adsorção: (a) Quarteirão 10; (b) ETE Arrudas.

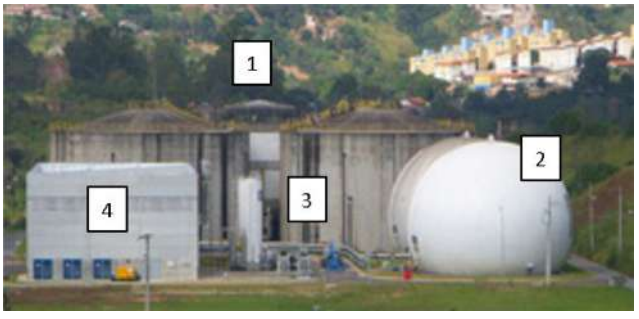
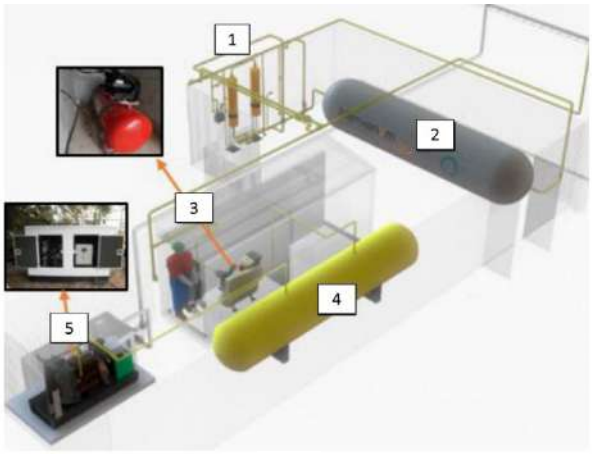


Figura 6 – Visão geral do sistema de produção (1), armazenamento (2), tratamento (3) e aproveitamento energético (4) do biogás - ETE Arrudas.



(a)

(b)

Fonte: Ferreira, 2015.

Figura 7 – (a) Desenho esquemático do sistema de tratamento, armazenamento e aproveitamento energético de biogás instalado no Q10 do Campus Pampulha UFMG: 1. sistema de dessulfuração; 2. reservatório não pressurizado; 3. compressor; 4. reservatório pressurizado; 5. sistema de cogeração de energia. (b) Vista geral da plataforma de aproveitamento energético de biogás do Q10.

O calor dos gases de exaustão das microturbinas é conduzido para trocadores de calor, de forma a promover o aquecimento do lodo dos quatro digestores (COPASA, 2021).

No Quarteirão 10, o biogás é gerado a partir da metanização de resíduos orgânicos alimentares do restaurante universitário localizado no campus Pampulha da UFMG. A produção de biogás varia de 30 a 50 $m^3 \cdot d^{-1}$, com teores de CH_4 e H_2S da ordem de 60% e 1.500 ppm_v, respectivamente, de acordo com dados de projeto. Após o tratamento, o biogás é armazenado em um reservatório não pressurizado com capacidade de 15 m^3, utilizado para armazenamento temporário do biogás tratado antes de ser direcionado ao reservatório pressurizado que alimenta a unidade de cogeração de eletricidade e calor (**Figura 7**). O potencial de geração de energia é de cerca de 1,7 $kWh \cdot mês^{-1}$, suficiente para atender a toda a demanda energética da planta e ainda gerar excedentes para suprir parte da demanda elétrica do entorno (p. ex.: edifícios, iluminação pública). A energia térmica, se aproveitada, poderia ser utilizada na secagem do lodo desaguado a fim de gerar biossólido para o uso agrícola (Ferreira, 2015).

No que tange à operação e manutenção dos sistemas de tratamento do biogás por adsorção é particularmente importante considerar alguns aspectos adicionais resumidos na **Tabela 2**.

Tabela 2 – Aspectos adicionais de operação e manutenção da unidade de adsorção

Aspectos	Princípios / Diretrizes
Monitoramento das eficiências	• As eficiências do tratamento devem ser realizadas de forma periódica, para evitar que as concentrações de H_2S excedam o limite exigido pelos equipamentos que compõem o sistema de aproveitamento energético do biogás. Esse monitoramento também é fundamental para o planejamento da regeneração ou substituição do adsorvente saturado.
Identificação de vazamentos	• É importante a realização de campanhas de monitoramento de H_2S no sistema e imediações, uma vez que vazamentos de gás contendo H_2S podem provocar eventos locais ou dispersos de maus odores, além da corrosão de estruturas metálicas e de concreto.
Processo de regeneração	• O processo de regeneração do adsorvente saturado difere de acordo com as características ou o tipo do adsorvente utilizado. Caso a regeneração do adsorvente seja viável economicamente, pode-se dessorver os compostos adsorvidos por aumento da temperatura; por despressurização do sistema; ou submetendo-o à passagem de um gás livre do contaminante adsorvido ou que provoque uma reação química.
Remoção de umidade	• O monitoramento da concentração de umidade após o sistema de remoção de água (quando aplicável) também deve ser realizada com frequência adequada, visto que as moléculas de água podem competir com as de H_2S pelos sítios de adsorção e, consequentemente, contribuir para a redução da eficiência de remoção de H_2S pelos adsorventes.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

A dessulfuração por adsorção em carvão ativado é um processo amplamente consolidado em todo o mundo, sendo aplicado principalmente no tratamento fino do biogás, quando há intenção de realizar seu aproveitamento energético em equipamentos que possuem restritivos requisitos de qualidade do biogás. Isso porque, apesar das elevadas eficiências de remoção inerentes a essa tecnologia de tratamento, o custo do adsorvente limita sua aplicação a baixas vazões de biogás e concentrações de H_2S.

Nesse contexto, o emprego de adsorventes alternativos e de baixo custo, a exemplo dos desenvolvidos a partir de resíduos da mineração de ferro e da siderurgia, se apresenta como uma alternativa promissora para a remoção de H_2S do biogás. As pesquisas referentes a esses adsorventes continuam em desenvolvimento, objetivando a otimização das condições operacionais da coluna de adsorção e o aumento da capacidade de adsorção dos adsorventes, de modo a permitir um maior número de regenerações no sistema. Esses avanços contribuirão para a redução da massa de adsorvente necessária na remoção de uma determinada carga de H_2S e permitirão prolongar a vida útil do sistema de adsorção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, N.; BOIVIN, S. A review of biogas purification processes. *Biofuels Bioproducts & Biorefining*, v. 3, p. 42-71, 2009.

AHN, Y.; PANDI, K.; LEE, M.; CHOI, J. Removing hydrogen sulfide from a feed stream using suitable adsorbent materials. *Journal of Cleaner Production*, v. 272, 2020.

ANEROUSIS, J. P.; WHITMAN, S. K. Iron Sponge: Still a Top Option for Sour Gas Sweetening. *Oil and Gas Journal*, v. 18, p. 71-76, 1985.

BARELLI, L.; BIDINI, G.; ARESPACOCHAGA, N.; PÉREZ, L.; SISANI, E. Biogas use in high temperature fuel cells: enhancement of KOH-KI activated carbon performance toward H_2S removal. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, p. 10341-10353, 2017.

BRANDT, E. M. F.; SANTOS, J. M. B.; SOUZA, C. L.; POSSETTI, G. R. C.; BRESSANI- RIBEIRO, T. B.; CARVALHO-JÚNIOR, A. N.; CHERNICHARO, C. A. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 4: Controle de corrosão e emissões gasosas. *Revista DAE* – edição especial, 2018.

BRASIL. *Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto*. 2ed. Brasília, Brasil: Ministério das Cidades, 2017. 183 p.

CASTRILLON, M. C.; MOURA, K. O.; ALVES, C. A.; BASTOS-NETO, M.; DIANA, C. S. AZEVEDO, J. H.; MÖLLMER, J.; WOLF-DIETRICH, E; GLASER, R. CO_2 and H_2S removal from CH_4-rich streams by Adsorption on Activated Carbons Modified with K_2CO_3, NaOH or Fe_2O_3. *Energy Fuels*, p. 1-39, 2016.

CCE. Centro para conservação de energia. *Guia Técnico de Biogás*. Amadora, Portugal: AGEEN, 2000. 117 p.

COPASA, 2021. ETE Sustentável. Disponível em: http://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/esgotamento-sanitario/

valorizacao-do-esgoto/conteudos/ete-sustentavel. Acesso em: 12 de abril de 2021.

FERREIRA, B. O. *Avaliação de um sistema de metanização de resíduos orgânicos alimentares em vista do aproveitamento energético do biogás*. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Recursos Hídricos e Meio Ambiente) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

KOHL, A.; NEILSEN, R. *Gas Purification*, 5th edition, Houston, USA: Gulf Professional Publishing, 1997. 1408 p.

KUHN, J.; ELWELL, A. C.; ELSAYED, N. H.; JOSEPH, B. Requirements, techniques, and costs for contaminant removal from landfill gas. *Waste Management*, v. 63, 2017.

LINDBERG, A.; WELLINGER, A. *Biogas Upgrading and Utilization* - IEA Bioenergy Task 24. Paris: France: International Energy Association, 2006. 20 p.

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.

MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*, 7th ed., New York, USA: McGraw-Hill, 2005. 1130 p.

MONTELEONE, G.; DE FRANCESCO, M.; GALLI, S.; MARCHETTIA, M.; NATICCHIONI, V. Deep H_2S removal from biogas for molten carbonate fuel cell (MCFC) systems. *Chemical Engineering Journal*, n. 173, p. 407- 414, 2011.

MUCHE, H.; ZIMMERMAN, H. Purification of biogas. Wiesbaden, Germany: Vieweg, 1985. 34 p.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. *Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais*. Fortaleza, Brasil: Imprensa, 2014. 258 p.

ORTIZ, F. J. G.; AGUILERA, P. G.; OLLERO, P. Biogas desulfurization by adsorption on thermally treated sewage-sludge. *Separation and Purification Technology*, v. 123, p. 200-213, 2014.

OZEKMEKCI, M.; SALKIC, G.; FELLAH, M. F. Use of zeolites for the removal of H_2S: A minireview. *Fuel Processing Technology,* v. 139, p. 40-60, 2015.

RUTHVEN, D. *Principles of adsorption & adsorption processes*. 1st ed. New Jersey, USA: John Wiley and Sons Inc., 1984. 464 p.

SANTOS, J. M. B; SOUZA, C. L.; BRANDT, E. M. F.; POSSETTI, G. R. C.; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanço nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 1 - Tópicos de interesse. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental,* v. 1, n. 1, p 5-19, 2021.

SANTOS, J. M. B. *Viabilidade do uso de adsorventes desenvolvidos a partir de resíduos da siderurgia e da mineração de ferro para o beneficiamento de biogás*. 2018, 119 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

SURRA, E.; NOGUEIRA, M. C.; BERNARDO, M.; LAPA, N.; ESTEVES, I.; FONSECA, I. New adsorbents from maize cob wastes and anaerobic digestate for H2S removal from biogas. *Waste Management*, v. 94, p. 136-145, 2019.

SUZUKI, M. *Adsorption engineering*. Tokyo, Japan: Kodansha, 1990. 295 p.

U.S. Army. Corps of Engineers. *Engineering and Design: Adsorption design guide*. Hawaii, USA: University Press of the Pacific, 2001. 99 p.

WASAJJA, H.; LINDEBOOMA, R. E. F.; VAN LIER, J. B.; ARAVIND, P.V. Techno-economic review of biogas cleaning technologies for small scale offgrid solid oxide fuel cell applications. *Fuel Processing Technology,* v. 197, 2020.

XIAO, Y.; WANG, S.; WU, D.; YUAN, Q. Experimental and simulation study of hydrogen sulfide adsorption on impregnated activated carbon under anaerobic conditions. *Journal of Hazardous Materials*, v. 153, p. 1193-1200, 2008.

ZICARI, S. M. *Removal of hydrogen sulfide from biogas using cow-manure compost*. 2003. 132 f. Thesis (Master of science). Faculty of the Graduate School of Cornell University, New York, 2003.

ZULKEFLI, N.; MASDAR, M.; ISAHAK, W.; JAMALIAH, M.; REJAB, S.; CHEW, M. Removal of hydrogen sulfide from a biogas mimic by using impregnated activated carbon adsorbent. *Plos one*, v.14. 2019.

© 2021 Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos de licença Creative Commons.

https://doi.org/10.5327/276455760101007

Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios
Nota Técnica 5 – Combustão direta de biogás em queimadores

Part A: Advances in tools and techniques for estimating biogas production and treatment in anaerobic-based STPs
Technical Note 5 - Direct combustion of biogas in burners

Giovana Kaminski[1], Gustavo Rafael Collere Possetti[2]*, Michael Mannich[3], Felipe Owczarzak de Mello e Silva[4], Julio Cezar Rietow[5], Miguel Mansur Aisse[6], José Fabrício Pujatti[7]

RESUMO

A combustão direta do biogás em queimadores deve ser realizada sempre que sua recuperação energética não for viável técnica ou economicamente. Mesmo nas ETEs que possuem sistemas de aproveitamento energético de biogás, os queimadores são indispensáveis e devem ser acionados temporariamente quando existir produção excedente de biogás ou paralisações nas unidades que o processam. A queima do biogás minimiza as emissões de metano para a atmosfera, contribuindo para o gerenciamento de emissões de gases indutores do efeito estufa, além de reduzir as emissões de gases odorantes e corrosivos, em especial do sulfeto de hidrogênio. Os queimadores são, portanto, fundamentais para reduzir impactos ambientais e sociais inerentes às emissões de biogás, sendo inclusive imprescindíveis para a segurança das infraestruturas das ETEs e da saúde ocupacional de operadores. Nesse contexto, esta Nota Técnica (NT) visa apresentar os elementos técnicos associados com a combustão direta do biogás em queimadores, reportando: (i) fundamentos sobre queima de biogás; (ii) tipos e principais características de queimadores disponíveis no mercado; (iii) métodos para determinação da eficiência de queimadores; e (iv) critérios para a instalação e a operação de queimadores em ETEs.

Palavras-chave: queimadores, biogás, tratamento de esgoto, combustão direta

ABSTRACT

The direct combustion of biogas in burners must be carried out whenever its energy recovery is not technically or economically feasible. Even in STPs that have biogas energy recovery systems, the burners are indispensable (necessary) and must be activated temporarily when there is an excess of biogas production or stops in the systems that process it. The biogas combustion reduces minimizes methane emissions to the atmosphere, contributing to the management of greenhouse gas emissions, in addition to reducing emissions of odorous and corrosive gases, especially hydrogen sulfide. Burners are, therefore, essential to reduce environmental and social impacts inherent to biogas emissions and are even essential for the safety of the STPs infrastructure and the occupational health of operators. In that context, this Technical Note (TN) aims to present the technical elements associated with the direct combustion of biogas in burners, reporting: (i) fundamentals about biogas burning; (ii) types and main characteristics of burners available on the market; (iii) methods for determining burner efficiency; and (iv) criteria for the installation and operation of burners in STPs.

Keywords: burners, biogas, sewage treatment, direct combustion

[1]Engenheira Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestre em Engenharia Ambiental pela UFPR. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[2]Engenheiro Ambiental pela UFPR e Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal Tecnológica do Paraná (UTFPR). Mestre e Doutor em Ciências pela UTFPR. Gerente da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[3]Engenheiro Ambiental pela UFPR. Mestre e Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR. Professor adjunto do Departamento de Engenharia Ambiental da UFPR. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFPR.
[4]Engenheiro Mecânico pela UFPR. Pós-Graduação em Engenharia de Soldagem pela UFPR. Engenheiro Internacional de Soldagem pelo *International Institute of Welding* (IIW). Engenheiro da Gerência de Pesquisa e Inovação da Sanepar.
[5]Engenheiro Ambiental e de Segurança do Trabalho pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR). Mestre e aluno de doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[6]Engenheiro Civil pela UFPR. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos. Doutor em Engenharia Hidráulica pela Universidade de São Paulo. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da UFPR.
[7]Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre e Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG. Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, pertencente ao quadro permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG.
***Endereço para correspondência:** Avenida Visconde de Guarapuava, 2943 – Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE) – Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade. Curitiba, PR. CEP: 80010-100. e-mail: gustavo_possetti@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

Queimadores são componentes que promovem a destruição dos compostos presentes em um gás por meio do processo de combustão. Sendo amplamente utilizados na indústria, os queimadores são indispensáveis em estações de tratamento de esgoto (ETE) que produzem biogás. Isso porque a combustão direta do biogás em queimadores minimiza as emissões de gases tóxicos e odoríferos presentes em sua composição, como, por exemplo, o sulfeto de hidrogênio (H_2S). Adicionalmente, a queima do biogás mitiga as emissões de metano (CH_4), principal constituinte do biogás, reduzindo, consequentemente, as emissões de gases indutores de efeito estufa associadas ao processo anaeróbio de tratamento do esgoto. Destaca-se ainda que durante a queima do biogás, o CH_4, um gás altamente inflamável, é quimicamente convertido em compostos mais estáveis, e, portanto, tal prática reduz os riscos operacionais associados com explosões. Logo, os queimadores são fundamentais para reduzir impactos ambientais e sociais inerentes às emissões atmosféricas de ETEs que produzem biogás, sendo inclusive imprescindíveis para a segurança de infraestruturas e da saúde ocupacional de operadores.

Ressalta-se, contudo, que quando se efetua a combustão direta do biogás em um queimador, a energia química presente em sua composição é desperdiçada. Por isso, em ETEs que possuem sistemas de aproveitamento energético do biogás, o queimador deve ser acionado somente em situações esporádicas ou emergenciais, motivadas pelo excesso de produção de biogás em relação ao seu consumo, ou causadas por paralisações de equipamentos devido a falhas operacionais e serviços de manutenção. Por outro lado, em ETEs que não efetuam o aproveitamento energético do biogás, o queimador deve ser acionado continuamente de forma a garantir condições operacionais seguras (Possetti *et al.*, 2019).

Apesar do aproveitamento energético do biogás apresentar vantagens significativas e ser visto como uma prioridade no âmbito da aplicação dos conceitos de economia circular, a combustão direta do biogás em queimadores é a realidade predominante do controle de emissões gasosas em países em desenvolvimento como o Brasil. No entanto, os conhecimentos técnicos consolidados acerca dos queimadores nem sempre estiveram pronto-disponíveis e bem difundidos entre os profissionais que atuam no setor de saneamento do país e tão pouco priorizados no desenvolvimento de projetos e operação de ETEs ao longo dos últimos anos. Por isso, esta Nota Técnica (NT) cumpre o papel de sumarizar alguns fundamentos e orientar a aplicação das boas práticas de engenharia acerca do uso de queimadores para biogás em ETEs, vislumbrando a elaboração e/ou aprimoramento de projetos e processos em conformidade com os conceitos mais recentes de ETEs sustentáveis.

Nesse contexto, esta NT visa apresentar os elementos técnicos associados com a combustão direta do biogás em queimadores, complementando o conteúdo descrito na **NT 1** (Santos *et al.*, 2021) e reportando em detalhes os fundamentos sobre a queima de biogás, os tipos e principais características de queimadores disponíveis no mercado, os principais métodos para determinação da eficiência de queimadores e os critérios para orientar a instalação e a operação de queimadores em ETEs.

2. FUNDAMENTOS DO PROCESSO

A combustão do biogás visa, principalmente, a conversão de seus compostos, especialmente CH_4 e H_2S, em óxidos e vapor d'água, componentes esses menos nocivos ao meio ambiente e à saúde humana. Simplificadamente, a combustão é um processo que envolve uma reação química entre um combustível (biogás) e um comburente (ar atmosférico), liberando energia. Para que a reação de combustão ocorra, é necessário um mecanismo de ignição que pode ser induzido (p. ex.: via centelhamento) ou espontâneo (p. ex.: com o atingimento de patamares térmicos). A combustão completa ocorre quando há disponibilidade de O_2 na quantidade suficiente para oxidar todos os compostos combustíveis. Quando é fornecida uma quantidade menor de O_2, a combustão será dita incompleta (Vlassov, 2008; Caine, 2000).

A queima do biogás pode provocar ruído, fumaça e poluição luminosa noturna, além de gerar produtos indesejáveis, caso seja realizada de maneira inadequada. Assim, o projeto dos queimadores deve procurar maximizar,

principalmente, a conversão de CH_4 e H_2S, de forma a minimizar as suas emissões atmosféricas e outros subprodutos provenientes da queima incompleta do biogás (Ling, 2007).

2.1. Reação de combustão

Na maioria dos processos de combustão utiliza-se o ar atmosférico como fonte de fornecimento de O_2 para a combustão, o qual é composto, basicamente, em volume, por 21% de oxigênio (O_2) e 78% de nitrogênio (N_2) em volume. Portanto, para representar a reação de combustão do biogás, é razoável considerar essas proporções de O_2 e N_2 presentes no ar atmosférico, conforme **Equação 1** (Bizzo, 2003).

$$\underbrace{A\,CH_4 + B\,CO_2 + C\,N_2 + D\,H_2S + E\,O_2}_{\text{BIOGÁS}} + \overbrace{x\,(O_2 + 3{,}76\,N_2)}^{\text{AR ATMOSFÉRICO}} \rightarrow \rightarrow \underbrace{\alpha\,CO_2 + \beta\,SO_2 + \gamma\,H_2O + y\,N_2}_{\text{PRODUTOS DA COMBUSTÃO}} \quad (1)$$

Na qual: A, B, C, D e E - % em volume de CH_4, CO_2, N_2, H_2S, O_2 presente no biogás, respectivamente; X - volume de O_2 necessário para combustão completa do biogás; A - volume de CO_2 resultante do processo de combustão de biogás; B - volume de SO_2 resultante do processo de combustão de biogás; γ - volume de vapor de H_2O resultante do processo de combustão de biogás; y - volume de N_2 resultante do processo de combustão de biogás.

O N_2, por ser um composto inerte, não participa da reação de combustão, se mantendo geralmente inalterado ao final da reação. Na prática, o objetivo da combustão do biogás em queimadores é estabelecer a maior eficiência possível da conversão/destruição dos compostos presentes em sua composição. Destaca-se, contudo, que a eficiência de destruição do biogás é dependente de três fatores: (i) temperatura de combustão; (ii) proporção da mistura ar – combustível (fornecimento de oxigênio suficiente para a completa oxidação dos compostos); e (iii) tempo de residência dos gases com a chama na câmara de combustão do queimador (Caine, 2000).

2.2. Temperatura de combustão

Para uma boa destruição do biogás é recomendado que a temperatura de sua queima seja superior à temperatura de autoignição (TAI) dos principais compostos a serem oxidados, sendo 540 °C e 260 °C, respectivamente para CH_4 e H_2S (Lewandowski, 2000; Caine, 2000). A TAI é a temperatura mínima na qual ocorre a combustão, independente de uma fonte de ignição. O simples contato do combustível com o comburente na referida temperatura já é suficiente para iniciar a reação exotérmica. Temperaturas acima de 850 °C previnem o rearranjo das moléculas do biogás em compostos perigosos, tais como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), dioxinas, furanos e hidrocarbonetos parcialmente oxidados. Ao mesmo tempo em que se requer altas temperaturas para queima eficiente de biogás, não é recomendado exceder 1.200 °C, já que a oxidação de N_2 nessa temperatura resultará na formação de óxido nitroso N_2O, sendo esse um dos principais gases de efeito estufa (Caine, 2000).

2.3. Proporção da mistura ar - combustível

Para a completa oxidação, é necessário determinar a quantidade de ar atmosférico (V_{AR}), em volume, requerida para queimar certo volume de biogás. Esse parâmetro é obtido por meio da razão estequiométrica ar-combustível. No caso da combustão de biogás, é necessário o conhecimento dos teores dos componentes do biogás e o teor de oxigênio presente no ar atmosférico. A razão estequiométrica ar-biogás pode ser estabelecida por meio da determinação da variável "x" apresentada na **Equação 1**, a qual é obtida a partir do balanceamento dos átomos de O_2 inerentes à reação. Juntamente, a partir da determinação da relação de volumes entre O_2 e N_2 no ar atmosférico, é possível estabelecer o volume total de ar necessário para a combustão completa de um determinado volume de biogás (Bizzo, 2003).

O fornecimento de menor quantidade de ar pode resultar na combustão incompleta de biogás e, consequentemente, na emissão de CH_4 e outros produtos indesejáveis, como o monóxido de carbono (CO), um gás tóxico e que provoca a poluição do ambiente. Para assegurar que haja combustão completa de todos os compostos combustíveis do biogás, é recomendado fornecer à câmara de combustão uma quantidade de ar maior que a estequiométrica. Se houver ar em excesso, os produtos de combustão do biogás irão conter O_2. Esse ar em excesso garante que não ocorram

pontos na câmara de combustão com falta de ar (Vlassov, 2008). Normalmente, esse excesso de O_2 é estabelecido de forma a manter uma concentração de O_2 nos produtos da combustão de, pelo menos, 3% (Lewandowski, 2000). Para a adequada combustão do biogás e, sobretudo, do CH_4 presente em sua composição, é recomendada uma relação ar-biogás variando entre 10:1 e 15:1 (Caine, 2000).

De modo geral, queimadores de biogás não dispõem de controle do fluxo de entrada de ar atmosférico e, portanto, sua entrada ocorre na câmara de combustão de modo passivo. Nesse contexto, pode-se fazer o uso de equações matemáticas que permitam a estimativa do fluxo de ar atmosférico a partir do conhecimento da vazão mássica de biogás e da vazão mássica do gás resultante da combustão. Essa estimativa permite estabelecer os balanços de massa que se fizerem necessários para o monitoramento e controle da eficiência do processo de combustão, bem como para a determinação da eficiência de operação dos queimadores (ver item 4 desta NT).

2.4. Tempo de residência

Para que as reações cinéticas químicas ocorram de forma satisfatória é necessário oferecer tempo de residência suficiente. Geralmente, o tempo de residência na câmara de combustão varia entre 0,5 e 2,0 segundos. Tempos de residência menores correspondem a eficiências de destruição menores e vice-versa (Lewandowski, 2000). Assim, a partir do conhecimento do volume de ar necessário para oxidar um determinado volume de biogás, é possível estimar o tempo de residência do biogás na câmara de combustão de um queimador. Para tanto, faz-se necessária a definição da densidade do biogás, da mistura ar-biogás antes da queima e dos gases de combustão. Lewandowski (2000) descreveu os requisitos para o alcance de distintas taxas de eficiência de destruição de compostos envolvendo a associação de tempo de residência dos gases na câmara de combustão e a temperatura acima da TAI para esses compostos, conforme sumarizado na **Tabela 1**.

Na prática, os padrões operacionais de tempo de residência e temperatura de queima para assegurar uma combustão de biogás praticamente completa variam entre países, podendo assumir valores de 850 °C por 0,6 segundos até 1.200 °C por 0,3 segundos (Caine, 2000). A Norma Brasileira (NBR) 12.209/2011, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), estabelece as condições que garantem a completa oxidação térmica do biogás. Para um sistema de combustão direta de biogás, o fluxo de gás deve ser exposto a temperaturas entre 750 e 815 °C, em uma câmara de combustão com tempo de residência de 1 a 2 segundos. A queima deve ser realizada na presença de O_2, por meio de mistura turbulenta de O_2 e do biogás (ABNT, 2011). Exemplos de padrões internacionais referentes à combustão completa de biogás em queimadores estão destacados em Caine (2000).

3. TIPOS DE QUEIMADORES DE BIOGÁS

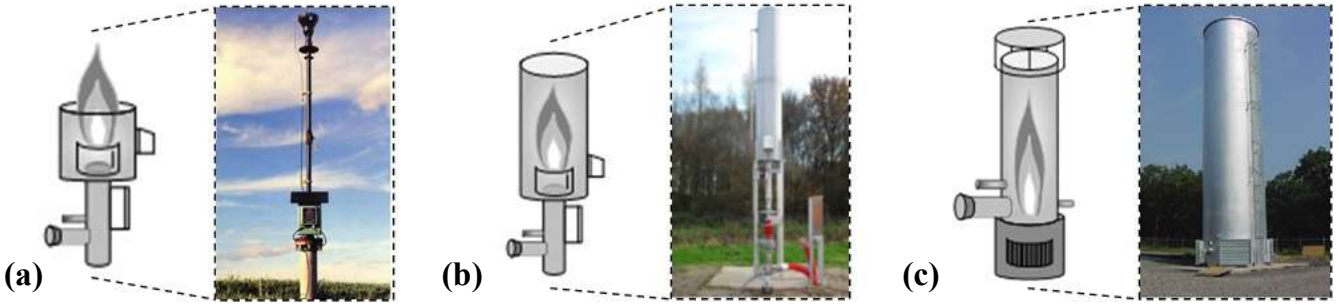
Existem basicamente três tipos de queimadores de biogás disponíveis no mercado, sendo eles: aberto, semi-enclausurado e enclausurado (**Figura 1**). Cada um deles possui características próprias que influenciam no processo de combustão direta do biogás.

Importantes parâmetros para a comparação entre os tipos de queimadores disponíveis no mercado estão sumarizados na **Tabela 2**. Já na **Tabela 3** é apresentada uma comparação qualitativa dos aspectos econômicos, sociais, ambientais e operacionais inerentes aos tipos de queimadores, facilitando a avaliação de suas respectivas vantagens e desvantagens.

Tabela 1 – Requisitos para a destruição térmica de CH_4 e H_2S.

Eficiência de destruição (%)	Temperatura acima da TAI (°C)	Temperatura para CH_4 (°C)	Temperatura para H_2S (°C)	Tempo de residência (s)
95,00	150	690	410	0,50
98,00	205	745	465	0,50
99,00	250	790	510	0,75
99,90	290	830	550	1,00
99,99	345	885	605	2,00

Fonte: Adaptado de Lewandowski (2000).



Fonte: Adaptado de Barton (2008), Baukal (2013) e Hofstetter Gastechnik (2019).

Figura 1 – Representação esquemática e imagens dos tipos de queimadores para biogás disponíveis no mercado: (a) aberto, (b) semi-enclausurado e (c) enclausurado.

Tabela 2 – Parâmetros típicos dos queimadores aberto, semi-enclausurado e enclausurado.

Parâmetro	Tipo de Queimador		
	Aberto	Semi-enclausurado	Enclausurado
Porte da ETE	Pequeno	Médio-Grande	Médio-Grande
Faixa usual de aplicação ($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	< 7	<100	> 100
Eficiência (%)	< 50	98 a 99	98 a 99,95
Temperatura de queima (°C)	< 500	> 500	800 a 1200
Custo de aquisição (R$)*	6.000 a 15.000	> 100.000	200.000 a 500.000

Nota: *Os valores são meramente referenciais e podem variar em função do fornecedor, da tecnologia, dos materiais e dos métodos para automação e controle do processo.
Fonte: Adaptado de Kaminski *et al.* (2018).

Tabela 3 – Matriz de comparação qualitativa de queimadores para biogás aberto, semi-enclausurado e enclausurado.

Aspectos	Critérios	Tipo de Queimador		
		Aberto	Semi-enclausurado	Enclausurado
Econômicos	Custo de aquisição	+++++	++	+
	Consumo de energia elétrica	++++	++	++
Sociais	Controle de compostos odorantes	+	+++	+++++
	Impacto visual da chama	+++	++++	+++++
Ambientais	Destruição de metano	+	++++	+++++
	Liberação de compostos não oxidados	+	++++	+++++
Operacionais	Dispersão dos gases de combustão	+++++	+++	++
	Simplicidade operacional	+++++	+++	+++
	Temperatura de queima	++	+++	+++++
	Estabilidade da chama	+	+++	+++++
	Tempo se residência	+	+++	+++++
	Riscos de explosão	++	++	++
	Emissão de radiação	++	++	+++
	Possibilidade de monitoramento e controle do processo	+	++	+++++
	Emissão de ruídos	++	++	+++

Nota: +++++: mais favorável; +: menos favorável e; ++++, +++, ++: notas intermediárias, em ordem.
Fonte: Adaptado de Kaminski *et al.* (2018).

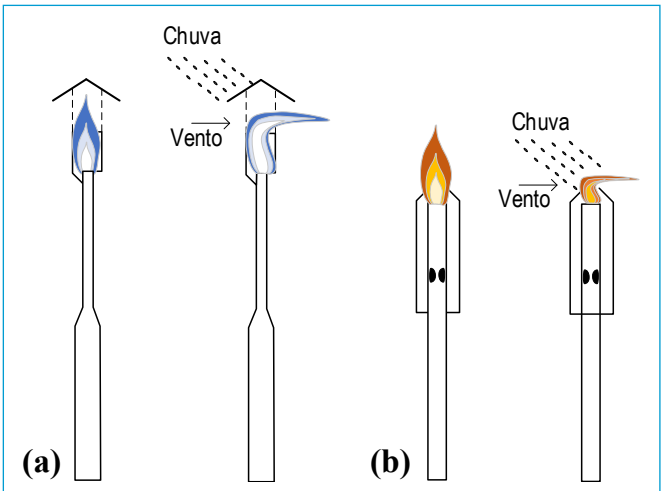
3.1. Queimadores abertos

Os queimadores abertos, também conhecidos como *flares*, são o tipo de queimador mais utilizado para combustão de gases provenientes de ETEs, sendo a forma mais simplificada de tratamento do biogás. Nesses queimadores, a combustão não ocorre de forma controlada. Embora existam no mercado

equipamentos para vazões até 1.500 $Nm^3 \cdot h^{-1}$ (Hernández *et al.*, 2017), esses queimadores são recomendados para vazões de biogás pequenas e irregulares, de até 7 $Nm^3 \cdot h^{-1}$ (Barton, 2008; Baukal, 2013; Fokal, 2019). Desse modo, os queimadores abertos são usualmente adequados para ETEs de menor porte, com produção de biogás de forma contínua (podendo apresentar variações nos valores de vazão) e com baixa complexidade no controle dos processos, sendo majoritariamente de operação manual. Sua aplicação é usual, sobretudo, quando há restrições de investimento que impedem a utilização de queimadores com queima controlada e de maior eficiência. Por apresentarem chamas totalmente expostas, os queimadores abertos não devem ser instalados próximos das unidades de produção e armazenamento de gás, assim como locais próximos a equipes de campo, construções, árvores, linhas de energia elétrica e outros. Detalhes sobre distâncias para a instalação de queimadores abertos e outros aspectos de segurança podem ser consultados na **NT 6** desta coletânea (Rietow *et al.*, 2021).

Queimadores abertos não possuem câmara de combustão ou a possuem, porém com dimensões muito reduzidas. Isso faz com que a chama nos queimadores abertos fique exposta à atmosfera (sujeita às condições meteorológicas, como vento e chuva), sem que haja garantia de contato prolongado entre a chama e o biogás. Há diferentes tipos de queimadores abertos disponíveis no mercado. Conforme ilustrado na **Figura 2**, quando as condições de proteção da chama contra vento e chuva são aprimoradas, diferentes impactos podem ser observados em situações cotidianas, influenciando o desempenho do queimador.

Independente do modelo de queimador aberto, a intensidade da chama é baixa e o ar ambiente rapidamente a resfria ou, até mesmo, a apaga totalmente. Esses fatores contribuem para tornar a chama menos estável, acarretando uma chance maior de apagamentos, e resultando na formação de subprodutos indesejáveis e compostos não oxidados, o que implica em uma eficiência reduzida de destruição do biogás (Barton, 2008; Baukal, 2013). Além disso, em geral, os queimadores abertos não possuem válvulas de fechamento automáticas ou de isolamento que são acionadas quando a operação apresenta falhas, prevenindo a liberação de gás para a atmosfera. Destaca-se, contudo, que dispositivos de segurança contra explosão e incêndio devem estar instalados nas proximidades dos queimadores. Nesse sentido, ETEs que possuem queimadores abertos devem possuir minimamente dispositivos de guiamento, manobra e de segurança contra retorno de chama (**Figura 3**).



Fonte: Adaptado de Fokal (2019).

Figura 2 – Representação esquemática da influência de vento e chuva sob dois modelos de queimadores abertos de biogás: (a) com dispositivo de proteção contra vento e chuva e (b) sem dispositivo de proteção contra vento e chuva.

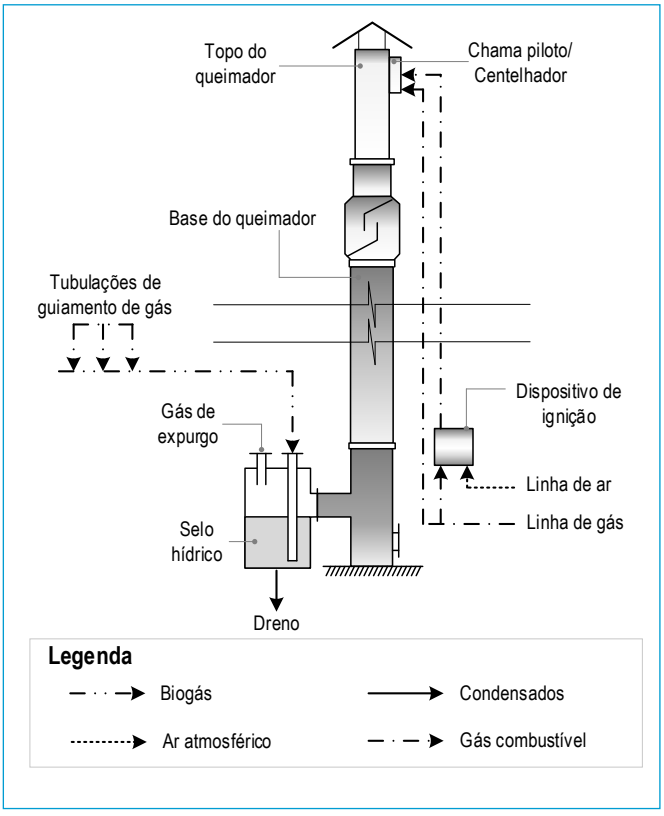


Figura 3 – Representação esquemática de um sistema de combustão direta de biogás com queimador aberto.

O requisito de segurança contra o retorno de chama pode ser obtido pelo emprego de um selo hídrico, o qual mantém pressões positivas no gás e impede que ocorram retornos da chama para a linha de gás. Outro dispositivo de extrema importância que previne o retorno da chama para as tubulações é a válvula corta chamas, que deve ser posicionada adjacente ao bocal de queima. O sistema de ignição pode ser realizado por meio de chama piloto, a qual pode ser projetada para atuação manual ou automática ou mesmo por meio de um ignitor. Há no mercado alternativas que promovem a alimentação desse ignitor por meio de um painel solar. A automação do sistema de ignição garante uma combustão contínua, reascendendo a chama quando a temperatura de queima diminuir (Stone *et al.*, 1992).

Devido ao fato de a chama ficar exposta ao meio ambiente, queimadores abertos são, geralmente, elevados o suficiente para evitar que a radiação provocada pela chama atinja pessoas e equipamentos. Elevar a altura do queimador pode prevenir condições potencialmente perigosas ao nível do solo, onde a chama aberta (isto é, uma fonte de ignição) está localizada perto de uma unidade de processo. Além disso, os produtos da combustão podem ser dispersos acima das áreas de trabalho para reduzir os efeitos de ruído, calor, fumaça e odores desagradáveis. Por outro lado, elevar a altura do queimador dificulta o acesso para realização de manutenções (Baukal, 2013). Ademais, a ausência de câmara de combustão e o calor intenso associado à chama aberta dificultam o monitoramento do gás resultante do processo de combustão (Caine, 2000). Em geral, o consumo de energia elétrica dos queimadores abertos é baixo, uma vez que é reduzido (ou mesmo inexistente) o requisito de pressurização do gás.

Não há controle sobre a temperatura de queima e do tempo de residência dos gases em contato com a chama para maximizar a eficiência de combustão (Caine, 2000). A taxa de eficiência de destruição de biogás é de difícil determinação, pois queimadores abertos não são capazes de manter uma temperatura de combustão constante, além de ser muito difícil calcular o tempo de contato dos gases na zona de combustão. Sendo assim, estima-se que o queimador aberto tenha eficiência de destruição de biogás tipicamente inferior a 50% (Fokal, 2021). Estudos realizados por Leahey *et al.* (2001) obtiveram eficiências de combustão variando entre 11 a 50%, para H_2S, e entre 10 a 53%, para CH_4.

3.2. Queimadores enclausurados

Os queimadores enclausurados (fechados), por sua vez, possuem uma câmara de combustão na qual há proteção da chama contra chuva e vento. A câmara de combustão geralmente é de aço carbono, sendo revestida internamente com material refratário, normalmente com isolamento térmico por fibra cerâmica, com vistas a minimizar a perda de calor para a atmosfera (temperatura externa da parede de aço menor que 80 °C), proporcionando temperaturas de queima mais altas (da ordem de 1.000 °C). A alta temperatura interna, associada a um maior tempo de residência dos gases no interior da câmara, assegura uma alta eficiência de destruição de biogás (Barton, 2008). Sua estrutura permite o monitoramento de temperatura, vazão de gás e coleta de amostras, permitindo, dessa forma, a avaliação da eficiência do processo de combustão. Os queimadores enclausurados são operacionalmente mais seguros que os queimadores abertos, uma vez que não possuem chama visível, evitando problemas de poluição luminosa, e de emissão de radiação e ruído. Em contrapartida, promovem menor dispersão dos gases de combustão (Ling, 2007).

Os modelos de queimadores enclausurados são adequados para ETEs de médio e grande porte. O mercado disponibiliza equipamentos para vazões de até 10.000 $Nm^3 \cdot h^{-1}$ (Hernández *et al.*, 2017) e sua utilização é recomendada para ETEs com vazões de biogás acima de 100 $Nm^3 \cdot h^{-1}$.

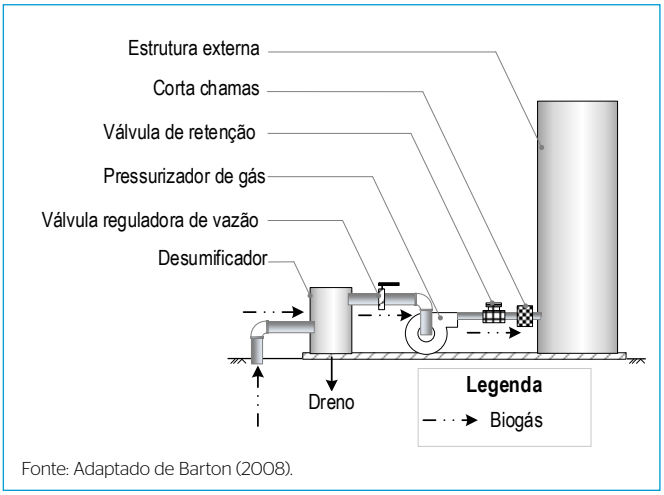
Devido ao seu processo de combustão apresentar maiores níveis de controle, é comum que junto a esses equipamentos existam compressores/sopradores de biogás, garantindo as misturas adequadas na câmara de combustão para maximizar as eficiências de conversão. Nesse sentido, a planta onde o equipamento será instalado deve apresentar procedimentos de operação que não permitam entrada de ar atmosférico nos volumes de acúmulo de biogás, assim como perdas, uma vez que tais equipamentos de pressurização podem gerar pressões negativas e, consequentemente, acarretar a introdução de O_2 nos

gases conduzidos e elevar os riscos de explosão (Rietow *et al.*, 2021). Por apresentarem controles de temperaturas, vazões, pressões, misturas e ignição, os queimadores enclausurados apresentam custos de investimento e operação maiores que aqueles inerentes aos demais tipos de queimadores.

Queimadores enclausurados podem possuir portas para amostragem em sua estrutura, as quais permitem que a composição do combustível seja verificada antes de se misturar com o ar atmosférico. Isso possibilita a mensuração direta da eficiência de destruição de compostos presentes no biogás, a partir da relação entre as concentrações na entrada e saída do queimador (ver item 4).

Como a combustão do biogás ocorre sob condições controladas, o queimador enclausurado garante a conversão quase completa de biogás em óxidos e vapor d'água. A combinação de altas temperaturas e tempo de retenção mínimo dos gases no interior da câmara de combustão, associado à eliminação de zonas frias dentro da câmara, garante uma alta eficiência de destruição do biogás. Esses queimadores possuem eficiências típicas de destruição de CH_4 e H_2S superiores a 98-99,95%. Contudo, na prática, dependendo das condições de instalação e operação dos queimadores nas ETEs, essas eficiências podem ser menores. Kaminski (2020) avaliou a eficiência de queimadores enclausurados instalados em seis ETEs brasileiras com vazão de biogás de 891 até 2.837 $Nm^3 \cdot h^{-1}$, utilizando analisadores de gases e medidores de vazão de gás e obteve eficiências de destruição de CH_4 variando entre 93,1 e 99,8% e de H_2S variando entre 40,7 e 98,5 %. Esses resultados demonstram a importância da avaliação *in situ* da eficiência dos queimadores, mesmo sendo eles enclausurados e dimensionados para atuarem com elevadas eficiências de destruição de biogás.

Assim como a combustão de gás em queimadores abertos, o sistema de queima enclausurada necessita de dispositivos de guiamento, manobra e de segurança (**Figura 4**). Desse modo, uma válvula controladora de vazão é necessária para a segurança do funcionamento de todo o sistema. O sistema de pressurização de gás pode ser constituído por ventiladores ou sopradores, possuindo função de exercer pressão suficiente para que o processo de queima ocorra a uma taxa adequada. A válvula de controle de pressão possui função de cortar o fluxo gasoso de forma imediata, em situações de emergência. Finalmente, como em queimadores abertos, a válvula corta chamas tem função de impedir que eventualmente chamas se propaguem pelo gasoduto a partir do queimador (Barton, 2008). Além disso, há o sistema de ignição, o qual pode se dar a partir do uso de chama piloto ou centelhamento por meio de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de Barton (2008).

Figura 4 – Representação esquemática do sistema de combustão direta de biogás com queimador enclausurado.

Idealmente deve-se buscar a automação e controle do sistema de combustão em queimadores enclausurados. A automação potencializa ainda mais sua capacidade de destruição do biogás, graças a comunicação entre os dispositivos nele instalados. É recomendado que alarmes sonoros sejam disparados quando o queimador operar a baixas (760 °C) e altas (1.100 °C) temperaturas. Esse dispositivo assegura que o processo de combustão não exceda temperaturas seguras de operação do material de confecção do queimador, além de evitar a formação dos compostos de CO e de NOx devido à baixa e alta temperatura, respectivamente.

3.3. Queimadores semi-enclausurados

Os queimadores semi-enclausurados combinam características dos queimadores abertos e enclausurados. Esse tipo de queimador possui o bocal de chama envolto por uma câmara de combustão, como em queimadores enclausurados

(Progeco, 2019). As câmaras de combustão dos queimadores semi-enclausurados tipicamente não possuem material isolante, nem dispõem de controle de temperatura de chama e da admissão de ar e combustível. A ignição da mistura ar-combustível ocorre dentro dessa câmara de combustão, prevenindo a dispersão da chama, de forma a deixá-la com visibilidade parcial ou nula. Essa proteção impede eventuais apagamentos e garante que a chama permaneça dentro da zona de combustão, sendo possível o alcance de temperaturas superiores à 500 °C (Combustion Research Associates, 2019). Os queimadores semi-enclasurados possuem, contudo, câmaras de combustão de menores dimensões que aquelas verificadas para queimadores enclausurados. Assim, o tempo de residência do biogás no interior da câmara de combustão dos queimadores semi-enclasurados é menor que aquele verificado em queimadores enclausurados, porém suficientemente maior que aquela inerente aos queimadores abertos.

Esse tipo de queimador é aplicável para a combustão do biogás em uma ampla faixa de vazões, sendo recomendado sobretudo para ETEs de médio e grande portes, cujas vazões de biogás sejam acima de 100 Nm^3/h. Projetados de forma a ter longa vida útil e operar a qualquer momento, o objetivo dos queimadores semi-enclausurados é a queima imediata de biogás a um custo menor que aquele praticado para os queimadores enclausurados, e com eficiências superiores aquelas verificadas em queimadores abertos, mas ligeiramente menores que as eficiências usuais de queimadores enclausurados. São relatadas eficiências típicas de 98 até 99% na destruição do CH_4 e H_2S presentes no biogás (Ecosecurities, 2019; Innovations, 2019. Sua operação pode ser completamente automática, usando apenas controles de relés. Mesmo os modelos mais simplificados devem possuir válvula solenoide, selo hídrico e válvula corta chamas (Hofstetter Gastechnik, 2019).

4. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DE DESTRUIÇÃO DE GASES EM QUEIMADORES

Eficiência representa o grau de sucesso com que um processo de transferência ou conversão de energia é realizado. Os métodos para a determinação da eficiência do processo de queima do biogás, apresentados na **Tabela 4** são pautados na destruição de CH_4 e/ou H_2S, por serem os compostos que causam mais inconvenientes no gerenciamento do biogás de ETEs.

Como as determinações diretas das eficiências de destruição do biogás dependem criticamente das medições dos teores dos seus compostos após a queima, experimentalmente suas execuções se tornam viáveis apenas em queimadores enclausurados e semi-enclasurados, os quais permitem a amostragem do gás de combustão. Para queimadores abertos, contudo, essa condição não se viabiliza e, portanto, tais determinações podem ser realizadas apenas de forma indireta e baseadas em inferências a partir das medições de temperatura de chama, estimativas do tempo de residências dos gases em contato com a chama ou montagem de experimentos, que de certa forma modificam as condições de guiamento da chama.

Tabela 4 – Métodos para a determinação da eficiência do processo de queima do biogás

Método/Equação	Observações
1. Comparação entre os teores dos compostos presentes no biogás antes e após a queima. A estimativa de eficiência da queima de um composto x (ex.: CH_4 ou H_2S) é realizada por meio de um balanço entre os fluxos de massa que entram e saem do queimador (**Equação 2**). $E_x = 1 - \frac{\dot{m}_x}{\dot{m}_{x_biogas} + \dot{m}_{x_ar}}$ (2)	E_x: eficiência de destruição do composto x presente no biogás m_x: fluxo mássico do composto x presente no biogás na saída do queimador ($kg \cdot s^{-1}$) m_{x_biogas}: fluxo mássico do composto x presente no biogás na entrada do queimador ($kg \cdot s^{-1}$) m_{x_ar}: fluxo mássico do composto x no ar atmosférico que entra no queimador ($kg \cdot s^{-1}$)
2. Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) (McDaniel; Tichenor, 1983) A estimativa da eficiência de destruição do CH_4 é realizada tomando como base apenas a composição final do gás de combustão (**Equação 3**). $E_{EPA} = \frac{[C]CO_2}{[C]CO_2 + [C]CO + [C]HCNQ}$ (3)	E_{EPA}: eficiência de destruição do CH_4 (%); $[C]CO_2$, $[C]CO$ e $[C]HCNQ$: teores de CO_2, CO e hidrocarbonetos (HCNQ) não queimados, respectivamente, ou seja, a concentração de CH_4 no gás de combustão ($mgC \cdot m^{-3}$)

Nesse contexto, de forma mais prática, as estimativas ou monitoramento da eficiência de destruição do biogás em queimadores pode ser feita com base na medição da temperatura de queima e do tempo de residência dos gases na câmara de combustão, tomando como referência a **Tabela 1**, conforme apresentado por Kaminski (2017).

Para garantir a eficiência do queimador, é prudente a adoção de uma medida que regule e mantenha a vazão e a pressão de biogás constante. Isso pode ser realizado, por exemplo, com: (i) instalação de válvulas reguladoras hídricas ou mecânicas que permitam o armazenamento do biogás no topo dos reatores anaeróbios devidamente enclausurados, e/ou em um gasômetro até o momento em que o volume de biogás seja suficiente para reunir as condições de queima mais eficiente; e (ii) adoção de compressores ou ventiladores que possam guiar ativamente o biogás até o queimador.

O exemplo a seguir ilustra os cálculos utilizados para a estimativa da eficiência de destruição de CH_4 e H_2S com base nos resultados reportados na **Tabela 1.**

Exemplo: Estimar a eficiência de destruição de CH_4 e H_2S em um queimador enclausurado instalado em uma ETE de grande porte dotada de reatores UASB, com base nos resultados apresentados na **Tabela 1.**

Dados de entrada:

- Comprimento da câmara de combustão: 3 m
- Área de seção transversal (A_{ST}) da câmara de combustão: 0,39 m² (equivalente a um diâmetro de 0,7 m).
- Produção média de biogás encontrada ($Q_{biogás}$): 100 $Nm^3 h^{-1}$.
- Densidade dos gases de combustão (ρ_S): considerando a combustão completa do biogás no queimador enclausurado, assume-se a densidade do CO_2 (ρ_S) igual a 0,82 kg m^{-3}
- Relação de volume de ar necessário para combustão de um volume de biogás (V_{AR}): 15:1
- Temperatura de queima (T): 850 °C

Solução:

a) Determinação da vazão mássica de biogás ($\dot{m}_{biogás}$):

$$\dot{m}_{biogás} = \frac{Q_{biogás} \times \rho_{biogás}}{3.600\ s \cdot h^{-1}} = \frac{100\ Nm^3 \cdot h^{-1} \times 0{,}72\ kg \cdot m^{-3}}{3.600\ s \cdot h^{-1}} = 0{,}02\ kg \cdot s^{-1}$$

b) Determinação da vazão mássica de mistura gasosa entre ar/biogás ($\dot{m}_E$):

$$\dot{m}_E = \dot{m}_{biogás} \times (1 + V_{AR}) = 0{,}02\ kg \cdot s^{-1} \times [1 + 15] = 0{,}32\ kg \cdot s^{-1}$$

c) Determinação da vazão volumétrica dos gases de combustão (Q_S):

$$Q_S = \frac{\dot{m}_E \times 3600}{\rho_S} = \frac{0{,}32\ kg \cdot s^{-1} \times 3.600\ s \cdot h^{-1}}{0{,}82\ kg \cdot m^{-3}} = 1.404\ m^3 \cdot h^{-1}$$

d) Determinação da velocidade dos gases de combustão (V_S):

$$v_S = \frac{Q_S}{3.600 \times A_{ST}} = \frac{1.404\ m^3 \cdot h^{-1}}{3.600 \times 0{,}39\ m^2} = 1{,}0\ m \cdot s^{-1}$$

e) Tempo de residência dos gases na câmara de combustão (t):

$$t = \frac{C}{V_s} = \frac{3\ m}{1\ m \cdot s^{-1}} = 3s$$

f) Estimativa da eficiência de destruição de CH_4 e H_2S:

Considerando que o queimador enclausurado em estudo apresentou um tempo de residência igual a 3 s e uma temperatura de queima de 850 °C, e comparando esses resultados com os dados apresentados na **Tabela 1**, estima-se uma eficiência de destruição de CH_4 superior a 99,90% e de H_2S de 99,99%.

5. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO E OPERAÇÃO DE QUEIMADORES

5.1. Aquisição e operação

Os queimadores apresentam uma vasta gama de opções quanto aos materiais de fabricação, controles, dimensões e funcionalidades. Cabe aos profissionais responsáveis pela elaboração da especificação de compra avaliar não somente o tipo, modelo, mas também a definição das demais características baseadas nas demandas operacionais, capacidade técnica das equipes de campo, facilidade de manutenção e capacidade de investimento. Adicionalmente, a seleção do queimador a ser utilizado também deve ser pautada nas características dos processos ligados à produção e condicionamento do biogás na ETE em questão. Nesse sentido, devem ser avaliadas as condições de vazão, pressão, armazenamento, concentrações e características estruturais e operacionais locais. Na **Tabela 5** são apresentados importantes aspectos que devem ser observados durante o processo de aquisição e operação de queimadores de biogás em ETEs.

5.2. Dimensionamento, instalação e monitoramento

Os queimadores devem ser dimensionados para comportar uma capacidade correspondente ao volume máximo de biogás gerado, com um fator adicional de segurança superior a 10%. A NBR 12.209/11 estabelece o uso de dois queimadores para ETEs com capacidade acima de 250 $L \cdot s^{-1}$ de vazão média de esgoto e sem aproveitamento do biogás. A especificação do equipamento deve, também, apresentar as dinâmicas, capacidades, condições atuais e necessidades da unidade onde será instalado, permitindo que as lógicas e programações inseridas nos sistemas de queima atendam às expectativas da equipe de engenharia. É possível também solicitar que, após a instalação do sistema, o fabricante execute um período de operação assistida com equipe própria, permitindo um maior tempo de ajuste e aprendizado das equipes de operação e manutenção. Garantias de desempenho e de materiais devem ser incluídas, protegendo o cliente de más execuções, instalações e projetos. Os sistemas de queima devem ser monitorados após sua instalação para se confirmar o atingimento de premissas definidas nas especificações, cabendo aos fornecedores os ajustes e incrementos necessários para o cumprimento total das condições. Informações de segurança sobre a instalação e operação de queimadores estão destacadas na **NT 6** desta coletânea (Rietow *et al.*, 2021).

As seguintes características gerais são recomendadas para queimadores instalados em ETEs (adaptado de Noyola *et al.*, 2006):

- A temperatura do gás de saída deve ser menor que 900 °C.
- O tempo de residência do biogás no queimador deve ser de pelo menos 3 segundos.
- Os componentes do queimador a uma distância de até 1m da chama devem ser em chapa de aço inoxidável de espessura adequada. Isso também se aplica ao bico de saída da chama e ao escudo defletor.
- O bico de saída da chama deve estar localizado pelo menos 3 m acima do nível do solo.
- O escudo defletor de vento e chuva deve ter pelo menos 600 mm de comprimento ou seu comprimento pelo menos cinco vezes o diâmetro do queimador, o que resultar em um comprimento maior.
- Pelo menos um corta-chamas horizontal com um coletor de gotejamento deve ser instalado a uma distância não superior a 3 m da base do queimador.
- Todos os componentes elétricos e o painel, exceto a vela ou os eletrodos de ignição, devem ser instalados a uma altura não superior a 2 m do nível do solo.

5.3. Sistema de ignição

Outro aspecto relevante no processo de tomada de decisão é a escolha pelo sistema de ignição do queimador. A utilização de sistema de ignição ou uma chama piloto assegura o acendimento da corrente de biogás em qualquer circunstância. Ele é de especial importância em situações como a partida da ETE, quando a geração de gás é nula ou intermitente. Nesse contexto, existem dois sistemas de ignição possíveis, sendo eles: (i) ignição por velas de ignição; e (ii) queimador piloto que assegura que sempre há chama no queimador (Brasil, 2017; Hernández *et al.*, 2017). Os queimadores pilotos poderão utilizar biogás quando a pressão disponível for superior a 15 mbar.

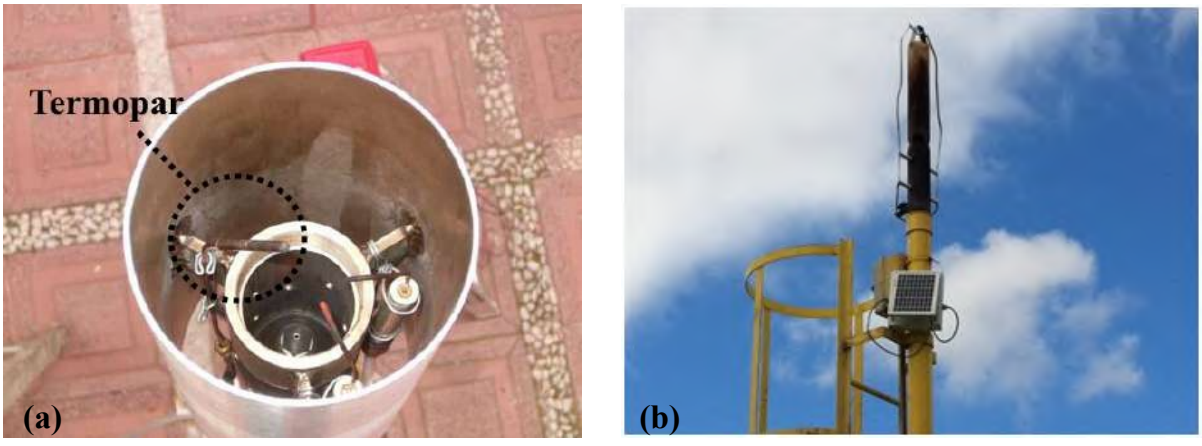
Tabela 5 – Aspectos a serem observados durante o processo de aquisição e operação de queimadores de biogás em ETEs.

Característica	Funcionalidade
Controle de temperatura	• Sua finalidade é possibilitar uma rápida avaliação sobre a eficiência do processo de combustão e conversão dos gases, assim como garantir controles de segurança para o processo de queima. • É possível solicitar que o queimador opere apenas dentro de uma faixa específica de temperatura, havendo a interrupção do processo caso as condições definidas não sejam obedecidas.
Faixa de temperatura	• Especificada com base no tempo de residência/contato dos gases dentro da câmara de combustão. • Para atingir as maiores eficiências possíveis, usualmente é definida entre 800 a 1.000 °C para queimadores com 0,5 segundos de tempo de residência. • Todos os equipamentos, materiais, funcionalidades e demais itens do queimador devem ser dimensionados e selecionados para operar em regime de trabalho constante nesta faixa de temperatura.
Detecção de chama	• Sua finalidade é garantir segurança operacional, de forma a interromper o processo caso não haja chama na câmara de combustão. Alguns queimadores apresentam chama piloto, que também necessita de sistemas de detecção.
Processo de ignição	• Centelhamento: utilizado quando há variações excessivas na concentração de CH_4 no biogás ou nas taxas de produção/pressão de biogás, porém demanda maior manutenção. • Chama piloto: esse sistema varia entre fabricantes, e cabe a equipe de engenharia responsável pela elaboração da especificação verificar se a planta oferece os requisitos necessários para tal funcionalidade.
Controle de vazão	• Sua finalidade é proporcionar um regime estável de queima, diminuindo ao máximo o número de ciclos diários de trabalho. É realizado através de sopradores/compressores com controle de rotação por meio de inversores de frequência, atrelados à medição de pressão ou níveis volumétricos nos armazenamentos de biogás. • Os queimadores podem ser solicitados apenas com ajuste de vazão através de inversores, possibilitando apenas a definição do valor de vazão desejado, sem haver modulação ao longo do processo.
Materiais de fabricação	• Materiais metálicos que se encontram em contato direto com a chama do processo ou que ultrapassem a temperatura de 350 °C devem apresentar resistência comprovada ao regime de trabalho e corrosão. Aços inoxidáveis do tipo AISI310 são os mais utilizados neste sentido. • Para trabalho em temperaturas abaixo dos 350 °C são comumente selecionados os aços inoxidáveis AISI304L ou AISI316L, a depender das capacidades de investimento e concentrações de gases corrosivos na planta e no biogás.
Isolamento térmico	• Necessário para queimadores voltados à alta eficiência de combustão e conversão. • Deve ser especificado para atender as faixas de temperatura definidas, protegendo os demais materiais do queimador e auxiliando na manutenção da temperatura interna, assim como reduzindo a temperatura das superfícies externas. • Usualmente utilizam-se mantas cerâmicas que possam atender as temperaturas especificadas em regime constante de trabalho, com aplicação de argamassa cerâmica para proteção contra contato direto da chama.
Corta chamas	• Deve ser utilizado nos pontos próximos à possíveis fontes de chama, sempre respeitando as distâncias máximas definidas pelos fabricantes, assim como cumprindo rigorosamente as rotinas de inspeção e manutenção definidas pelos mesmos. • Usualmente são instaladas abaixo dos queimadores, evitando possíveis retornos de chama e protegendo as linhas de condução de gás e demais equipamentos. • Deve-se atentar ao tipo construtivo e posição de instalação para se evitar acúmulos de umidade.
Proteção contra vento e chuva	• Em queimadores de alta eficiência, torna-se necessário a instalação de proteção superior contra chuvas, ventos e outros materiais que possam cair dentro da câmara de combustão. • Usualmente utiliza-se chapa metálica tipo "chapéu-chinês", com diâmetro maior que a saída do queimador, ou solução equivalente
Válvulas solenoides	• Devem ser instaladas nas linhas de alimentação de biogás aos queimadores, especificadas para operar com gases de combustão em áreas classificadas, para controle dos processos de queima e redução de riscos de explosão. • Tais válvulas são responsáveis pela liberação e bloqueio do biogás, controladas pelo sistema de combustão, sendo do tipo fechadas.
Inspeção e acesso	• Em queimadores de alta eficiência, é necessário prever aberturas para realizar amostragem de gases para definição das eficiências de queima, verificação de componentes (principalmente ligados ao controle do processo, como ignição, sensores de temperatura e outros) e realização de testes. • O projeto também deve prever ergonomia e facilidades para as equipes de manutenção e operação.
Quadro de comando e alimentação	• Necessário nos casos de queimadores de alta eficiência, promovendo o controle do processo através das leituras de sensores e lógicas de operação programadas. Devem permitir a leitura de todas as instrumentações associadas ao sistema de queima, assim como permitir o acionamento e definição de valores e parâmetros por meio de interface homem-máquina (IHM) e controlador lógico programável (CLP). • Também é responsável pelo registro da operação, paradas e alarmes, permitindo que as equipes de campo sejam avisadas nas necessidades de intervenção e ocorrências (alarmes sonoros, visuais, mensagens do tipo SMS e comunicação com sistemas supervisórios da planta).
Medidor de vazão	• Utilizado em todos os tipos de queimadores, a depender das necessidades e interesses da equipe de engenharia da planta. Pode ser utilizado para controle do processo, de forma interligada ao sistema do queimador, ou apenas para registro dos volumes produzidos e direcionados à combustão.

Caso não seja possível, uma alternativa é o uso de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), que pode ser empregado de forma intermitente para diminuir consumo. Para o controle da chama, podem ser empregados termopares ou sensores ópticos. O monitoramento da chama do piloto, mediante termopar, constitui segurança adicional e possibilita a programação de seu acendimento remoto e automático, caso a chama se apague (**Figura 5-a**). Os sistemas de ignição podem ser caracterizados por: (i) autoignição - um dispositivo gerador de faísca (vela ou eletrodo) acoplado a um transformador de ignição (componente utilizado para gerar uma centelha de alta tensão elétrica) acende a frente da chama (**Figura 5-b**); (ii) autoreignição - um sensor de temperatura colocado na ponta do queimador envia um sinal ao transformador de ignição para que o piloto acenda novamente se por algum motivo a chama se apagar; (iii) ignição manual - o piloto é ligado manualmente por um botão de ignição que ativa um transformador de ignição; e (iv) ignição remota - o sistema de ignição é automático e pode ser ligado local ou remotamente a partir de uma sala de controle, por exemplo (Hernández *et al.*, 2017).

5.4. Suprimento de ar

As questões envolvendo a forma de suprimento de ar também devem ser consideradas na escolha do queimador. Como em todos os processos de combustão, um suprimento adequado de O_2 para uma boa mistura ar/combustível é necessário para garantir a combustão completa e minimizar a emissão de fumaça. Os queimadores podem apresentar diferentes fontes de O_2: (i) injeção de vapor; (ii) injeção de ar; e (iii) sem injeção. O sistema de injeção de vapor na zona de combustão da chama visa promover turbulência à mistura e induzir a entrada de ar atmosférico na chama. Essa indução ocorre por meio do aumento da taxa de difusão do ar atmosférico para a chama, criado pela injeção de vapor. Já o sistema de injeções de ar utiliza de ventiladores, posicionados anteriormente a queima, para fornecer o ar necessário para a turbulência e combustão completa do biogás. Esses ventiladores injetam ar na parte inferior e interna do queimador. Por fim, a forma mais simplificada são os queimadores sem nenhum auxílio de injeções de ar ou vapor, operando somente com o ar proveniente da difusão atmosférica. A entrada de ar no processo de combustão ocorre, portanto, de forma passiva. Seu uso é limitado, em geral somente os gases de baixo calor de combustão e/ou de baixa razão estequiométrica ar-gás são adequados para queima nessa condição (Stone *et al.*,1992).



Fonte: Adaptado de Hernández *et al.* (2017).

Figura 5 – Dispositivos integrantes de um queimador: (a) termopar para medição da temperatura da chama e (b) centelhador de chama piloto alimentado com painel solar.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta NT apresentou uma visão holística acerca da combustão direta do biogás em ETEs, disponibilizando elementos que podem orientar profissionais do setor de saneamento quanto a escolha e operação desses queimadores. Na adoção desses componentes, é recomendado analisar aspectos quanto ao porte da ETE, proximidade com a vizinhança, reclamações sobre maus odores, qualidade do ar local e global, recursos financeiros disponíveis, entre outros. Devem ser levantadas as características do biogás quanto à vazão, composição e temperatura. Assim, a partir do conhecimento das características do gás, deve-se: (i) fazer uma análise dos aspectos técnicos, econômicos, sociais, ambientais e operacionais inerentes ao uso de cada um dos tipos de queimadores disponíveis no mercado; (ii) elencar os critérios prioritários de seleção de acordo com as necessidades locais, para então, finalmente; e (iii) definir o tipo de queimador, a fonte de suprimento de ar e os demais acessórios necessários.

Os custos relacionados com a aquisição, implementação e operação de um queimador influenciam diretamente na tomada de decisão acerca do tipo de queimador a ser adotado em uma ETE. O custo de sistemas de queima depende do grau de sofisticação desejado (ou seja, controle manual ou automático) e do número de acessórios escolhidos, como câmara de remoção de água, selo hídrico, painel de controle, entre outros. No Brasil, atualmente, não há uma lei federal específica que obrigue o emprego de queimadores de biogás em ETEs e tão pouco uma legislação que verse sobre a eficiência de destruição do biogás. Contudo, todas as ETEs com tecnologia anaeróbia devem implementar os mecanismos mais eficientes possíveis para que efetivamente promovam a captura e a queima de biogás, visando, notadamente, o controle das emissões de CH_4 e H_2S. Sempre que viável, deve-se realizar a combustão do biogás com vistas ao seu aproveitamento energético. Contudo, mesmo nessas situações, a instalação de um queimador é imprescindível.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio obtido das seguintes instituições: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG); Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis; Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar e a Universidade Federal do Paraná – UFPR.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. 2ª ed. Rio de Janeiro, , 2011. 57 p.

BARTON, A. C. T. *Assessment of Australian biogas flaring standards*. Canberra, Australia: GHD Pty Ltd, 2008. 29 p.

BAUKAL, C. E. *The john zink hamworthy combustion handbook: Applications*. 2ª ed. Boca Raton, USA: CRC press., v. 3, 2013. 452 p.

BIZZO, W. A. *Geração, distribuição e utilização de vapor*. Campinas, Brasil: FEM/Unicamp, 2003. 146 p.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades/Probiogás. *Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto*. 2 ed. Brasília, DF, 2017. 183 p.

CAINE, M. *Biogas flares: state of the art and market review*. Topic report of the IEA Bioenergy Agreement Task 24-Biological conversion of municipal solid waste, Abingdon, UK: AEA Technology Environment, 2000. 9 p.

COMBUSTION RESEARCH ASSOCIATES. *Enclosed flares - thermal destruction of waste gases & vapours*. 2019. Disponível em: http://contechind.com.br/instrumentacao/medidor-de-vazao/ medidor-de-vazao-de-gas-termal/. Acesso em: mar. 2019.

ECOSECURITIES. Methane recovery and electricity generation project-gcm 23. c2019. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1158830601.57/ReviewInitialComments/ZL25ZITY2ROPNLXFCF3T6O5UMHB09L. Acesso em: mar. 2019.

FOKAL. *Queimadores de biogas*. 2019. Disponível em: http://www.fokal.com.br/QueimadorBiogas/. Acesso em: mar. 2019.

HERNÁNDEZ, J. E. L.; HIGAREDA, B. L. R.; CABRAL, C. B. G.; MORGAN-SAGASTUME, J. M. *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás em plantas de tratamiento de aguas residuales*. Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México, 1er. Edición, Ciudad de México, México: GIZ México, SENER, SEMARNAT, CONAGUA, ENEAS, 2017. 238 p.

HOFSTETTER GASTECHNIK. *Emergency flares*. 2019. Disponível em: http://www.hofstetter-gt.ch/en/ products/emergency_flare_emf.htm. Acesso em: mar. 2019.

INNOVATIONS, T. *Combustion and energy recovery – biogas flare system*. 2019. Disponível em: http: //www.tridenti.com.my/combustion.php. Acesso em: mar. 2019.

KAMINSKI, G. *Avaliação da eficiência de destruição do biogás proveniente do tratamento aneróbio do esgoto doméstico utilizando um queimador enclausurado*. 2017. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

KAMINSKI, G. *Avaliação in-situ da eficiência de queimadores enclausurados de biogás em ETEs no Paraná*. 2020. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

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. *Proceedings*. Curitiba, Brasil: Universität Stuttgart, UFPR, SENAI e ABES-PR, 2018.

LEAHEY, D. M.; PRESTON, K.; STROSHER, M. Theoretical and Observational Assessments of Flare Efficiencies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 51, n. 12, p. 1610-1616, 2001.

LEWANDOWSKI, D. *Design of Thermal Oxidation Systems for Volatile Organic Compounds*. Boca Raton, USA: CRC Press., 2000. 368 p.

LING, A. L. *Flare selection and sizing* (engineering design guideline). Johor Bahru, Malaysia: KLM technology group, 2007. 128 p.

MCDANIEL, M.; TICHENOR, B. A. *Flare efficiency study*. Austin, USA: Engineering Science, Industrial Processes Branch, Industrial Environmental Research Laboratory, 1983.134 p.

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.

PANDULLO, D. K. S. S. K. L. R. F. Flares. [S.l.]: Citeseer, 1995.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; CABRAL, C. B. G.; MOREIRA, H. C.; PLATZER, C.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; CHERNICHARO, C.A.L. Energy recovery from biogas in UASB reactors treating sewage. Chapter 8. In Chernicharo, C.A.L.; Bressani-Ribeiro, T. (Eds.) *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation,* London, UK: IWA Publishing, 2019. p. 194-236.

PROGECO. *Emr adv - semi-enclosed flare stack*. 2019. Disponível em: https://www.progecosrl.com/en/ emr-advanced-biogas-combustion-flare.html. Acesso em: mar. 2019.

RIETOW, J. C.; POSSETTI, G. R. C.; CARNEIRO, C.; AISSE, M. M. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 6 - Levantamentos de riscos e classificação de atmosferas explosivas em ETEs com produção de biogás. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 1, n. 1, p 75-86, 2021.

SANTOS, J. M. B; SOUZA, C. L.; BRANDT, E. M. F.; POSSETTI, G. R. C..; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 1 - Tópicos de interesse. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental,* v. 1, n. 1, p 5-19, 2021.

STONE, D. K.; LYNCH, S. K.; PANDULLO, R. F.; EVANS, L. B.; VATAVUK, W. M. Flares. Part I: Flaring technologies for controlling VOC-containing waste streams. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 42, n. 3, p. 333-340, 1992.

VLASSOV, D. *Fundamentos de combustão*. In: Curso de Especialização em Motores e Combustíveis, VIII, 2008, Curitiba; Programa brasileiro de formação em motores e combustíveis: UTFPR, 2008. 69 p. Disponível em: <http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/motores/downloads/FUNDAMENTOS%20DA%20COMBUSTÃO.pdf>. Acesso em: jun. 2020.

© 2021 Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos de licença Creative Commons.

https://doi.org/10.5327/276455760101008

Parte A: Avanço nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios
Nota Técnica 6 – Levantamento de riscos e classificação de atmosferas explosivas em ETEs com produção de biogás

Part A: Advances in tools and techniques for estimating biogas production and treatment in anaerobic-based STPs
Technical Note 6 - Surveying risks associated with explosions and classification of explosive atmospheres in STPs with biogas production

Julio Cezar Rietow[1], Gustavo Rafael Collere Possetti[2]*, Charles Carneiro[3], Miguel Mansur Aisse[4]

RESUMO

As estações de tratamento de esgoto (ETEs) com sistemas anaeróbios, especialmente aquelas dotadas de reatores do tipo UASB, estão sendo amplamente utilizadas no Brasil. Uma das principais vantagens desses sistemas está na produção de biogás, um subproduto dotado de grande potencial energético por conter metano em sua composição. Sendo um gás inflamável, o metano em determinadas concentrações de mistura com o ar atmosférico pode vir a formar uma mistura gasosa explosiva. A identificação das principais fontes de riscos de liberação de biogás e também das disponibilidades de ventilação sobre essas fontes são fundamentais para a classificação de áreas das ETEs em zonas de riscos e, consequentemente, para orientar os procedimentos necessários para mantê-las em segurança. Desse modo, a presente nota técnica apresenta os principais requisitos para levantamento de riscos associados com explosões e classificação de atmosferas explosivas em ETEs com produção de biogás.

Palavras-chave: atmosferas explosivas; zonas de risco; mistura inflamável; extração ativa do biogás.

ABSTRACT

Sewage treatment plants (STPs) with anaerobic systems, especially those with UASB reactors, have been widely used in Brazil. One of the main advantages of these systems is the biogas production, a by-product with great energy potential because it contains methane in its composition. As a flammable gas, methane at certain concentrations of mixture with atmospheric air can form an explosive gas mixture. The identification of the main sources of risk of biogas release and also the availability of ventilation over these sources are fundamental for the classification of areas of the STPs in risk zones, and, consequently, to guide the necessary procedures to keep them safe. Thus, this technical note presents the main requirements for surveying risks associated with explosions and classification of explosive atmospheres in STPs with biogas production.

Keywords: explosive atmospheres; risk zones; flammable mixture; active biogas extraction

[1]Engenheiro Ambiental e de Segurança do Trabalho pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR). Mestre e aluno de Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[2]Engenheiro Ambiental pela UFPR e Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal Tecnológica do Paraná (UTFPR). Mestre e Doutor em Ciências pela UTFPR. Gerente da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.
[3]Engenheiro Agrônomo, Mestre em Ciências do Solo e Doutor em Geoquímica de águas pela UFPR. Pós-doutorado em Engenharia e Ciência da Água pela UNESCO-IHE (Holanda). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do ISAE.
[4]Engenheiro Civil pela UFPR. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos. Doutor em Engenharia Hidráulica pela Universidade de São Paulo (USP). Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da UFPR.
***Endereço para correspondência:** Avenida Visconde de Guarapuava, 2943 – Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE) – Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade. Curitiba, PR. CEP: 80010-100. E-mail: gustavo_possetti@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a grande maioria das estações de tratamento de esgoto (ETEs) que empregam processos anaeróbios não fazem o armazenamento e/ou uso do biogás produzido. Geralmente, esse gás é captado e conduzido até um queimador, onde é termicamente destruído com o intuito de diminuir as taxas de emissão de metano (CH_4) e mitigar emissões odoríferas (H_2S). Entretanto, o aproveitamento energético do biogás produzido nas ETEs tende a se tornar uma prática cada vez mais comum no País, sendo capaz de alavancar a universalização dos serviços de coleta e tratamento de esgoto. Isso se deve, principalmente, pelo Brasil possuir o maior parque de reatores anaeróbios do mundo e, também, pela potencialidade do aproveitamento do biogás reduzir os custos intrínsecos ao tratamento do esgoto (Possetti *et al.*, 2019).

Independente do aproveitamento ou não do biogás, ETEs que possuem reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB, do inglês *upflow anaerobic sludge blanket*) e/ou digestores anaeróbios de lodo, por motivos de segurança, devem ser caracterizadas como plantas de biogás. Sendo assim, dispositivos de transporte e manobra desse gás devem, minimamente, ser implantados na ETE, visando não somente ao correto gerenciamento do biogás, mas também à segurança dos trabalhadores e da comunidade circunvizinha (Rietow *et al.*, 2017). Na maior parte do tempo, os reatores anaeróbios e digestores de lodo, bem como os dispositivos e equipamentos empregados no gerenciamento do biogás, não apresentam problemas significativos de segurança relacionados com vazamentos ou entradas de ar. Porém, em algumas situações, como, por exemplo, em processos de manutenção e de extração ativa do biogás, pode haver a liberação de gases para a atmosfera ou até mesmo a entrada de ar no sistema. Desse modo, em determinadas concentrações de mistura com o oxigênio atmosférico, o CH_4 presente no biogás pode formar áreas sujeitas a atmosferas explosivas. Nesses casos, para que uma explosão ocorra é preciso apenas que haja uma fonte de ignição com energia o suficiente para iniciar o processo (Brasil, 2017).

A partir dessas constatações, destaca-se que nem sempre será possível eliminar um ambiente sujeito à atmosfera explosiva. Nesse sentido, o responsável técnico pela parte de segurança da ETE deverá assegurar que não existam fontes de ignição nesses ambientes. Para tanto, é necessário identificar e classificar as áreas sujeitas a atmosferas explosivas, conforme estabelecido na Norma Brasileira (NBR) IEC 60079-10-1/2018, adaptada da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC, do inglês *International Electrotechnical Commission*) (ABNT, 2018). O principal objetivo da classificação é facilitar a adequada seleção e instalação de equipamentos a serem utilizados com a devida segurança em tais áreas. Nesse contexto, a presente nota técnica tem por objetivo complementar os elementos reportados na nota técnica 1 (**NT 1**) (Santos *et al.*, 2021) e apresentar os principais pontos de interesse do processo de classificação de atmosferas explosivas, sendo eles: (i) levantamento dos principais riscos de segurança em ETEs com produção de biogás; (ii) fundamentos do processo de explosão; (iii) identificação das principais fontes de riscos de explosão; (iv) avaliação do grau e da disponibilidade de ventilação nas fontes de riscos; (v) classificação em zonas de riscos das áreas sujeitas a atmosferas explosivas; (vi) equipamentos elétricos em zonas de riscos; e (vii) medidas de segurança a serem tomadas em processos de extração ativa do biogás.

2. PRINCIPAIS RISCOS DE SEGURANÇA EM ETES COM PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O aproveitamento energético do biogás já tem sido empregado em larga escala em vários países, sobretudo, na Alemanha. Em 2006, esse país contava com cerca de 2.700 plantas de produção de biogás conectadas à rede de energia elétrica, representando aproximadamente 1.000 MW de potência instalada. Esse elevado número de ETEs com aproveitamento energético do biogás se deve, principalmente, ao investimento do governo alemão nos setores de produção de energias limpas e renováveis, fazendo com que concomitantemente os procedimentos de segurança em plantas dessa natureza fossem concebidos e rigorosamente implantados (Deublein e Steinhauser, 2011). No Brasil, os incentivos a serem realizados nos próximos anos no setor de saneamento deverão trazer maiores discussões sobre as potencialidades do aproveitamento energético do biogás produzido em ETEs. Contudo, cabe destacar

que legislações específicas acerca de segurança para esse processo ainda são incipientes no país. Desse modo, para que o biogás não passe de uma solução vantajosa para um problema de segurança, é necessário que haja a criação de normas específicas relacionadas com a temática, visando, principalmente, à minimização de acidentes relacionados com intoxicação, asfixia, explosões e incêndios nas plantas de tratamento (Scarponi *et al.*, 2015).

Estudo realizado por Moreno *et al.* (2015) identificou 169 acidentes documentados ocorridos entre os anos de 1995 e 2014 envolvendo diferentes tipos de plantas de produção de biogás no mundo. Entre o período de 2007 e 2011, houve um aumento significativo no número de acidentes, sendo esse fato associado ao incremento na implantação de sistemas de aproveitamento de biogás. Os dados apontam que os acidentes foram ocasionados devido a: (i) inalação de substâncias tóxicas e asfixiantes (40%); (ii) incêndio (23%); e (iii) explosões (19%). O percentual restante, 18%, não teve causa confirmada. De modo geral, constatou-se que todos os acidentes foram ocasionados, principalmente, devido a falhas de equipamentos, falta de manutenção no sistema e erros operacionais. Os acidentes com explosões foram responsáveis por aproximadamente 70% dos casos de mortes, ficando à frente de asfixia (21%) e incêndios (9%). Um diagrama de Ishikawa com as principais causas de acidentes ocorridos em instalações com aproveitamento energético de biogás está representado na **Figura 1**.

Fonte: Adaptado de Moreno *et al.* (2015).

Figura 1 – Diagrama de Ishikawa com as principais causas de acidentes em plantas de biogás.

3. FUNDAMENTOS DO PROCESSO

Uma explosão pode ser caracterizada como uma súbita e violenta liberação de energia, podendo esta ser ocasionada devido à diferença de pressão (p. ex.: ruptura de um vaso pressurizado) ou a presença de substâncias químicas com propriedades explosivas (p. ex.: CH_4, que tem propriedades inflamáveis). Tratando-se de ETEs com produção de biogás, as explosões de origem química são as que mais facilmente podem ocorrer. Em função da velocidade da frente de sua chama, a explosão química pode ser dividida em deflagração e detonação (Cartwright e Pascon, 2016):

- Deflagração: explosão que se propaga a uma velocidade subsônica, ou seja, aquela abaixo da velocidade do som (aproximadamente 1.220 $km \cdot h^{-1}$). Adicionalmente, uma deflagração pode ser caracterizada de acordo com o local em que ela ocorra, sendo eles: na atmosfera, em um recipiente fechado (pré-volumétrica) e em uma tubulação.
- Detonação: explosão que se propaga à velocidade supersônica (acima de velocidade do som). Em função da quantidade de energia presente no processo, uma detonação sempre será acompanhada de uma forte onda de choque. Esta última possui elevada pressão em sua frente de chama, podendo, desse modo, ocasionar grandes rupturas nas instalações da ETE e até mesmo levar a óbito pessoas próximas ao local de origem (Silva, 2007).

Independente do tipo de explosão, sua ocorrência somente existirá caso o ambiente apresente uma mistura ar-combustível explosiva e uma fonte de ignição com energia o suficiente para iniciar o processo. Tratando-se especificamente de ETEs com produção de biogás, uma atmosfera explosiva só ocorrerá caso o CH_4 e o ar atmosférico se combinem em uma determinada faixa de concentração. Toda mistura de gás possui uma energia mínima de ignição (EMI), sendo que, abaixo desta, é impossível se provocar uma explosão. Essa energia é caracterizada por elevar a pressão em um ambiente de atmosfera explosiva, fazendo com que a explosão gere maiores proporções de destruição. Uma faísca de um circuito elétrico ou até mesmo o aquecimento de um equipamento instalado em um ambiente explosivo podem ser fontes de ignição e, consequentemente, provocar uma explosão (Brasil, 2017). Na **Tabela 1**, são apresentados os principais tipos de fontes de ignição.

Tabela 1 – Principais tipos de fontes de ignição.

Ignição de origem elétrica	Ignição de origem não elétrica
• Equipamento elétrico do tipo comum (sem proteção para atmosferas explosivas) • Arco elétrico oriundo de soldas, contato elétrico, ferramentas portáteis, centelhas nas escovas de rotores, entre outros • Correntes circulantes • Centelhas devido a curto-circuito • Falha de aterramento • Descargas atmosféricas (raios) e radiação ionizante • Rádio frequência e ondas eletromagnéticas	• Centelhas ou fagulhas geradas mecanicamente por meio de: esmeril, lixadeira, impacto de peças ferrosas, impacto de hélices de ventilador, entre outros • Chama exposta (maçarico) • Gases de combustão • Brasa de cigarro • Fricção/atrito de mancal ou rolamento de motor • Fricção de brocas e furadeiras • Descarga de eletricidade estática acumulada em correias e escovas

Fonte: Adaptado de Suzuki e Oliveira (2002).

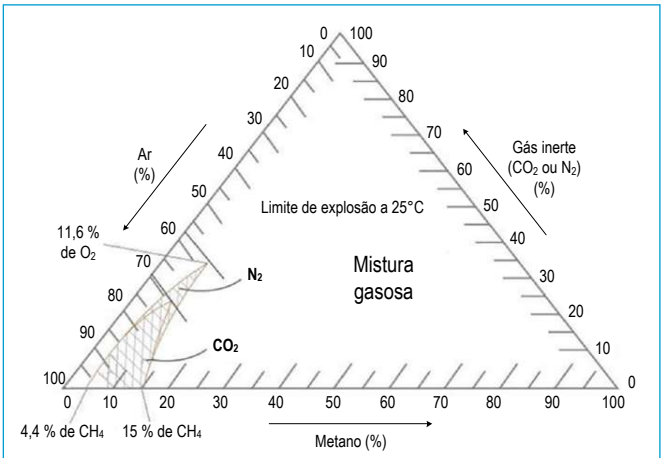
Os dados de explosividade do biogás, geralmente, não estão prontamente disponíveis na literatura. Isso se deve pelo biogás ser formado por uma variedade de gases. Dessa forma, na prática, é comum adotar para o biogás os dados de explosividade do CH_4, sendo este caracterizado por ser uma substância pura (Schroeder *et al.*, 2014). Algumas das características de explosividade dos gases presentes no biogás são apresentadas na **Tabela 2.**

Adotando os limites de explosão do CH_4, pode-se estabelecer a faixa explosiva para as relação ar-combustível e também com os gases inertes presentes no biogás, conforme apresentado na **Figura 2**. A faixa explosiva entre CH_4 e ar atmosférico encontra-se entre 4,4% (limite inferior de explosão) e 15% (limite superior de explosão) de concentração de CH_4. A presença de gases inertes, como o nitrogênio gasoso (N_2) e o gás carbônico (CO), por exemplo, quando em elevadas concentrações no meio, proporcionam o estreitamento da faixa de explosividade, fazendo com que os limites de explosão se igualem próximo da concentração do ar atmosférico de 58% (ou aproximadamente 11,6% de oxigênio). Destaca-se, contudo, que a faixa de explosividade também depende da temperatura. Finalmente, não é possível a explosão de uma mistura gasosa fora dessa faixa de explosividade (Deublein e Steinhauser, 2011). Logo, uma estratégia para operar sistemas de biogás de forma segura consiste em manter as concentrações de CH_4 e/ou de oxigênio (O_2) em sua composição sempre fora da faixa de explosividade.

Tabela 2 – Características de explosividade de alguns gases presentes no biogás.

Características	Unidade	CH_4	H_2S	H_2
Limite inferior de explosão	%v/v	4,4	3,9	4,0
Limite superior de explosão	%v/v	15,0	50,2	77,0
Temperatura de autoignição	°C	595	270	560
Energia mínima para ignição	mJ	0,29	-	0,017
Densidade do gás (relação ao ar)	-	0,55	1,19	0,07

Fonte: Deublein e Steinhauser (2011).



Fonte: adaptado de DWA (2010); Deublein; Steinhauser (2011); Brasil (2017).

Figura 2 – Diagrama triangular da faixa explosiva de metano, ar e gases inertes, a 25 °C.

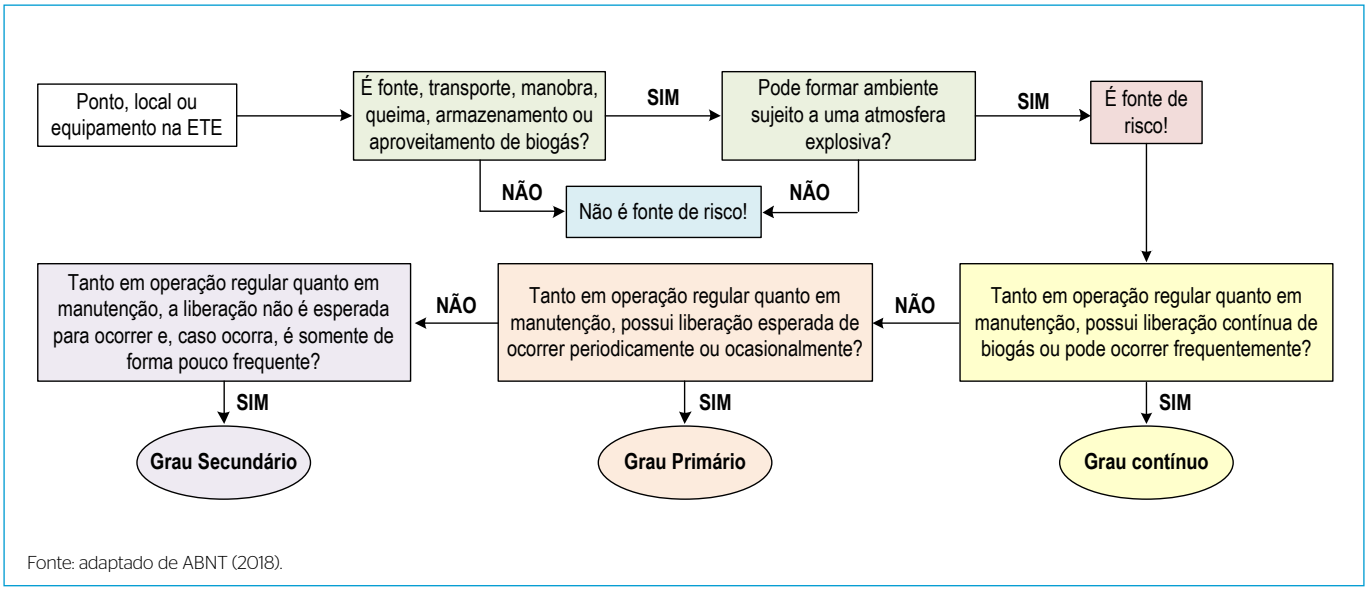
4. IDENTIFICAÇÃO DAS PRINCIPAIS FONTES DE RISCOS DE EXPLOSÃO

Fontes de riscos são pontos ou locais nos quais gases podem ser liberados para a atmosfera de modo a propiciar a formação de uma atmosfera explosiva. Geralmente, as fontes de riscos se constituem de equipamentos

instalados na ETE, tais como: reatores, tanques, bombas, tubulações, queimadores, gasômetros, entre outros. A avaliação das fontes de riscos deve levar em consideração apenas a operação em condições normais dos equipamentos instalados, sendo a manutenção parte integrante desse processo. Falhas de equipamentos não são consideradas como sendo parte de operação em condições normais. A NBR IEC 60079-10-1/2018 estabelece que o equipamento considerado como fonte de risco deverá ter definido o seu grau de liberação de gases inflamáveis para atmosfera baseado na frequência de ocorrência e na duração do vazamento (ABNT, 2018). Sendo assim, a classificação dos graus de liberação de gases inflamáveis são (**Figura 3**): (i) grau contínuo - liberação contínua ou que é esperada para ocorrer frequentemente; (ii) grau primário - liberação esperada para ocorrer periodicamente ou ocasionalmente durante operações normais; e (iii) grau secundário - liberação que não é esperada para ocorrer em operações normais e, caso ocorra, é somente de forma pouca frequente. Para a correta identificação das fontes de riscos, é necessário que se tenha, minimamente, a planta do local a ser classificado, contendo informações sobre tubulações, reatores, tanques, dispositivos de queima e/ou aproveitamento, entre outros equipamentos e instalações.

5. AVALIAÇÃO DO GRAU E DA DISPONIBILIDADE DE VENTILAÇÃO NAS FONTES DE RISCOS

As classificações de zonas de riscos de atmosferas explosivas devem levar em consideração o grau e o nível de disponibilidade de ventilação nesses ambientes. Uma ventilação pode ser entendida como sendo o movimento de ar e sua renovação com o ar fresco por meio de efeitos naturais (p. ex.: vento) e, também, pelo uso de meios artificiais (p. ex.: ventiladores e exaustores). Taxas adequadas de ventilação promovem a dispersão do gás inflamável, evitando, dessa forma, a persistência de uma atmosfera explosiva. Normalmente, com o aumento da ventilação sobre uma fonte de risco, a extensão da área classificada é reduzida. Por outro lado, barreiras ou obstáculos, que possam impedir a ventilação sobre essas fontes tendem a aumentar a extensão das áreas classificadas. O grau de ventilação está relacionado, de acordo com a NBR IEC 60079-10-1/2018, com o potencial de dispersão de gases inflamáveis na atmosfera, podendo ser caracterizado como (ABNT, 2018): (i) ventilação alta (VA) - o grau de VA normalmente é aplicado apenas para pequenas áreas fechadas, em que um sistema artificial de ventilação age sobre uma fonte de risco; (ii) ventilação média (VM) - o grau de VM é aquele responsável por controlar a dispersão de gases inflamáveis para a atmosfera.



Fonte: adaptado de ABNT (2018).

Figura 3 – Fluxograma de classificação de grau de uma fonte de risco.

Ambientes abertos com ventilação natural geralmente são classificados como VM; e (iii) ventilação baixa (VB) - o grau VB pode ser caracterizado por ter restrições de fluxo de ar (p. ex.: locais com depressões e ambientes com obstáculos ou barreiras). Por sua vez, o nível de disponibilidade de ventilação pode ser entendido como a frequência dessa na área a ser classificada. Os níveis de ventilação estão compreendidos em três grupos, sendo eles: (i) boa - ventilação presente de modo contínuo; (ii) satisfatória - ventilação presente em condições normais de operação, sendo que descontinuidades podem ser admitidas desde que ocorram por curtos períodos de tempo; e (iii) pobre - ventilação que não atende aos requisitos de ventilação boa e satisfatória. Normalmente, emprega-se o nível de disponibilidade boa para ambientes abertos. Na **Figura 4**, é ilustrado um fluxograma de classificação de grau e disponibilidade de ventilação a ser aplicado em uma ETE.

6. CLASSIFICAÇÃO EM ZONAS DE RISCOS DAS ÁREAS SUJEITAS A ATMOSFERAS EXPLOSIVAS

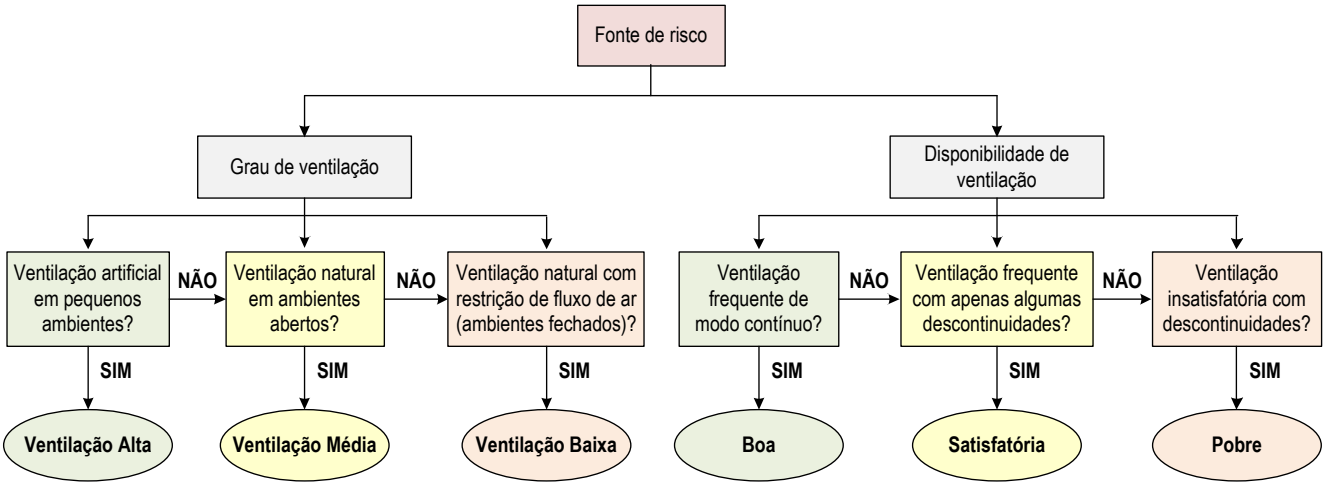
Após a identificação das principais fontes e graus de riscos presentes na ETE, bem como a avaliação dos aspectos relacionados a ventilação nessas fontes, deve-se então realizar o processo de classificação das áreas sujeitas a atmosferas explosivas. A NBR IEC 60079-10-1/2018 determina que essa classificação deve ser dividida em zonas de riscos, sendo elas relacionadas com a probabilidade de frequência e duração da formação de atmosferas explosivas.

Desse modo, as zonas podem ser divididas em:

- Zona 0 - área na qual uma atmosfera explosiva de gás está presente de modo contínuo ou por longos períodos de tempo.
- Zona 1 - área na qual uma atmosfera explosiva de gás é provável de ocorrer de modo ocasional em condições normais de operação.
- Zona 2 - área na qual uma atmosfera explosiva de gás não é provável de ocorrer em condições normais de operação.

O grau da fonte de risco e o grau de ventilação influenciam a classificação de zonas de risco, conforme apresentado na **Tabela 3**.

Geralmente, em áreas bem ventiladas, fontes de riscos de grau contínuo resultam em Zona 0. Por sua vez, fontes de riscos de grau primário resultam quase sempre em Zona 1 e, por fim, fontes de riscos de grau secundário resultam em Zona 2. Em ETEs com produção de biogás, o reator UASB, o



Fonte: adaptado de ABNT (2018).

Figura 4 – Fluxograma de classificação de grau e disponibilidade de ventilação.

Tabela 3 – Influência do grau da fonte de risco e da ventilação para a classificação de zonas de riscos.

Grau da fonte de risco	Grau de ventilação						
	Alto			Médio			Baixo
	Disponibilidade de ventilação						
	Boa	Satisfatória	Pobre	Boa	Satisfatória	Pobre	Boa, satisfatória ou pobre
Contínuo	NC*	Zona 2	Zona 1	Zona 0	Zonas 0 e 2	Zonas 0 e 1	Zona 0
Primário	NC*	Zona 2	Zona 2	Zona 1	Zonas 1 e 2	Zonas 1 e 2	Zona 1
Secundário	NC*	NC*	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 1

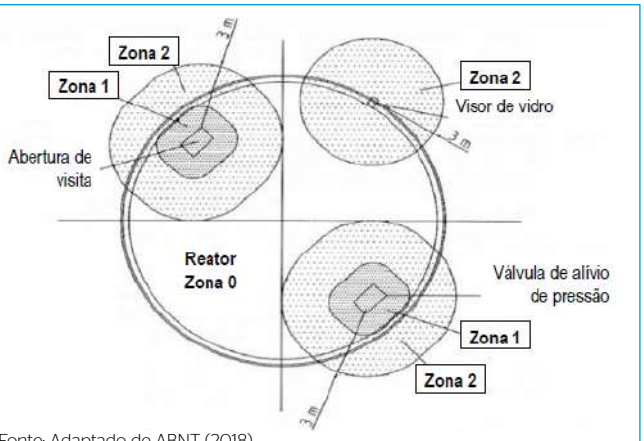
Nota: *NC = não classificada
Fonte: Adaptado de ABNT (2018).

digestor anaeróbio e o reservatório de biogás, em condições especiais de operação (manutenção, por exemplo), podem ser classificados como Zona 0. Equipamentos instalados na planta, como válvulas de alívio de pressão, queimadores, válvulas corta-chamas, selos hídricos e filtros, que possam liberar gás inflamável durante operação normal, podem ser enquadrados como Zona 1. A Zona 2 possui basicamente os mesmos itens da Zona 1, porém é caracterizada por não se prever a liberação de gás inflamável durante operação normal. Flanges, conexões e acessórios de tubulação, geralmente, podem ser classificados como Zona 2 (Deublein e Steinhauser, 2011). Na **Figura 5**, é apresentado um exemplo da aplicação da classificação de zonas de riscos em um digestor anaeróbio de lodo com produção de biogás.

Além da classificação, a zona de risco deve ter sua extensão determinada, a qual está diretamente relacionada com o limite inferior de explosão dos gases inflamáveis. Sendo assim, a extensão da zona de uma área classificada irá existir até o momento em que a concentração de gases inflamáveis diminua para valores abaixo daqueles estabelecidos pelo limite inferior de explosão. Além disso, parâmetros, como taxa de liberação de gases inflamáveis, ventilação, densidade, topografia e condições climáticas, também podem influenciar na extensão das zonas. A NBR IEC 60079-10-1/2018 não apresenta valores fixos para a extensão das zonas de riscos.

Alguns estudos já realizados em diferentes plantas de produção de biogás delimitam a extensão da Zona 0 como sendo aquela similar à área do recipiente que a contém (**Tabela 4**). Em condições de boa ventilação, a extensão da Zona 1 deve ser igual a 1 metro a partir dos componentes pertencentes a essa classificação. Em ambientes fechados com condições precárias de ventilação, a extensão da Zona 1 deve ser aumentada para 4,5 metros a partir de seus componentes. Ainda, a extensão da Zona 2, em ambientes com boa ventilação, pode variar de 1 a 3 metros a partir de seus componentes. Em ambientes fechados, a extensão da Zona 2 deve ser igual à própria área de confinamento (Deublein e Steinhauser, 2011).

Na **Figura 6**, é apresentando um exemplo de classificação de zona de risco com as suas devidas extensões em uma ETE dotada de reatores UASB.



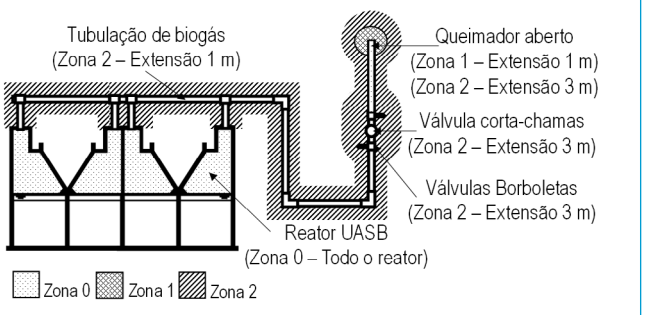
Fonte: Adaptado de ABNT (2018).

Figura 5 – Exemplo de zonas de riscos em um digestor anaeróbio de lodo.

Tabela 4 – Influência da disponibilidade de ventilação na extensão das zonas de riscos.

Tipo de zona	Extensão da zona (m)		
	Disponibilidade de ventilação		
	Boa	Satisfatória	Pobre
Zona 0	TA*	TA*	TA*
Zona 1	1	1	4,5
Zona 2	1 a 3	3	TA*

Nota: *TA = todo ambiente
Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2011).



Fonte: Rietow (2016).

Figura 6 – Representação das zonas de riscos e suas extensões em uma ETE dotada de reator UASB.

Um dispositivo que merece atenção no que diz respeito à extensão da zona de risco é o queimador. A antiga NBR 12.209/1992, que tratava de projetos de ETEs, possuía em seu escopo maiores restrições na utilização de queimadores quando comparado com a versão atualizada em 2011 (Brasil, 2011). A NBR de 1992 estabelecia que os queimadores deveriam ser instalados a uma distância mínima de 30 m de digestores, reatores e gasômetros, e, ainda, a 20 m de qualquer tipo de edificação. A atual norma não estabelece nenhuma distância que deva ser utilizada como fator de segurança em ETEs. Porém, cabe destacar que o Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em ETEs, com base em normas Europeias, estabelece que (Brasil, 2017): (i) os queimadores devem ser instalados de forma que suas chamas, gases e componentes quentes não ofereçam riscos às pessoas; (ii) a chama e a saída de gases e fumaça devem estar a uma altura mínima de 3 m; (iii) a área a partir de um raio de 5 m do queimador deverá estar livre de vegetação; (iv) queimadores do tipo aberto e enclausurado deverão ser instalados a distâncias superiores a 5 m de edificações e vias trânsito; e (v) anteparos contravento e protetores contra chuva são recomendados em queimadores do tipo aberto.

Deublein e Steinhauser (2011) estabelecem que a chama do queimador deve ficar a 4 m do solo e pelo menos 5 m de edificações e vias de trânsito. O Guia Técnico de Manejo e Aproveitamento do Biogás em ETEs do México recomenda uma distância mínima de segurança de 6 m entre queimadores e as unidades que possuem o biogás armazenado. De forma específica, caso o queimador seja do tipo aberto, então o guia mexicano indica que a distância seja aumentada para, no mínimo, 15 m (México, 2017). A partir dessas constatações, destaca-se que queimadores não devem ser instalados de forma alguma sobre a cobertura de reatores anaeróbios, fato esse muito comum em ETEs no Brasil. Adicionalmente, dispositivos de segurança também devem ser instalados nos queimadores, tais como: desligamento automático de alimentação de gás, dispositivo de ignição automática de chama, equipamentos de controle de chamas e proteção contra raios. Informações adicionais sobre queimadores para biogás estão apresentadas na **NT 5** da presente coletânea (Kaminski *et al.*, 2021).

7. EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS EM ZONAS DE RISCOS

A classificação das zonas de riscos em uma ETE com produção de biogás deve ser utilizada como base para a escolha adequada de equipamentos elétricos. Isso se deve ao fato desses equipamentos poderem atuar como fontes de ignição pelo centelhamento normal de seus contatos, por uma fagulha em seus circuitos ou ainda pelo seu aquecimento provocado pela passagem de corrente elétrica (Suzuki e Oliveira, 2002). Isso posto, deve-se evitar ao máximo a instalação de equipamentos elétricos em áreas classificadas como zonas de riscos. Entretanto, em algumas situações, a instalação desses equipamentos é essencial para o correto desenvolvimento das atividades. Nesses casos, devem ser utilizados equipamentos elétricos especialmente desenvolvidos para uso em atmosferas explosivas (ATEX). Sendo assim, a NBR IEC 60079-10-1/2018 especifica os requisitos gerais para a instalação de equipamentos elétricos em áreas classificadas. A normativa em questão ainda estabelece um código para cada tipo de equipamento elétrico. Esse código é composto pelo símbolo "Ex" seguido de uma letra referente ao tipo de proteção. Na **Tabela 5**, são apresentados os principais tipos de proteção existentes para equipamentos instalados em atmosferas explosivas. A NBR IEC 60079-10-1/2018 ainda ressalta que tais equipamentos devem possuir documentação e certificação de conformidade emitida por órgãos competentes (ABNT, 2018).

8. EXTRAÇÃO ATIVA DO BIOGÁS EM ETES

Com o intuito de mitigar os problemas com maus odores e até mesmo de propiciar um maior controle e/ou taxa de recuperação de biogás para o seu aproveitamento, tem-se verificado que algumas ETEs possuem iniciativas de captura "forçada" dos gases produzidos em reatores anaeróbios e digestores de lodo com o auxílio de equipamentos eletromecânicos, tais como sopradores, ventiladores e compressores. Essa técnica, chamada de extração ativa de biogás, tem sido adotada para promover o guiamento preferencial dos gases até os queimadores, reservatórios de biogás e/ou dispositivos de aproveitamento energético (p. ex.: secador térmico de lodo, conjunto motogerador de energia elétrica, sistemas de purificação de biogás, entre outros exemplos). Se por um lado tal prática aprimora a eficiência de captura do biogás, melhorando sua condição de queima, tratabilidade e conversão energética, por outro ela potencializa a ocorrência de eventuais acidentes associados à formação de atmosferas explosivas. Isso se deve pela extração ativa, se realizada de forma inadequada, induzir a formação de misturas explosivas compostas pelo CH_4 presente no biogás e pelo O_2 involuntariamente incorporado ao sistema devido à ausência de estanqueidade de tubos, conexões, dos reatores anaeróbios e, eventualmente, de digestores anaeróbios (Sanepar, 2016). Para realização da extração ativa do biogás, o enclausuramento da unidade é requisito imprescindível, sendo realizado para evitar vazamento de gases, riscos de explosão, perdas do potencial energético de recuperação de biogás, emissões difusas de gases de efeito estufa e de gases odoríferos (Possetti *et al.*, 2018).

Por questões de segurança, recomenda-se que toda extração ativa de biogás atenda minimamente aos seguintes requisitos:

1. O reator anaeróbio deve ser hermético (estanque).
2. A escuma deve ser removida do reator anaeróbio com frequência adequada.
3. O biogás deve ser previamente condicionado - remoção de água e de partículas.
4. Os sopradores, ventiladores ou compressores devem possuir certificado ATEX e de controle de velocidade.
5. Os teores de CH_4 e de O_2 devem ser mensurados para evitar o manejo de misturas explosivas.

Tabela 5 – Tipos de proteção de equipamentos elétricos instalados em áreas classificadas.

Tipo de proteção	Símbolo	Características	Zonas de riscos
À prova de explosão	Ex d	Capaz de suportar explosão interna sem permitir que essa se propague para o meio externo. Esse tipo de proteção é construído de forma que, caso haja uma ignição interna, o equipamento será capaz de resistir mecanicamente à pressão, impedindo que a explosão se propague para o meio externo.	Zona 1 Zona 2
Pressurizado	Ex p	Invólucros com pressão positiva interna superior à pressão atmosférica. Desse modo, caso exista a presença de uma mistura inflamável ao redor do equipamento, esta não entrará em contato com partes que possam causar uma ignição.	Zona 1 Zona 2
Imerso em óleo	Ex o	As partes que podem causar centelhas ou alta temperatura se situam em um meio isolante. Esses tipos de proteção só são aplicáveis à equipamentos fixos.	Zona 1 Zona 2
Imerso em areia	Ex q		
Imerso em resina	Ex m		
Segurança aumentada	Ex e	Medidas construtivas adicionais são aplicadas a equipamentos que em condições normais de operação não produzem arcos, centelhas ou altas temperaturas. Equipamentos típicos com segurança aumentada são os motores de gaiola, transformadores de potência, luminárias e caixas de distribuição e de ligação.	Zona 1 Zona 2
Segurança intrínseca	Ex ia	Dispositivo ou circuito que em condições normais (aberturas e fechamento de circuito) ou anormais (curto circuito) de operação não possui energia suficiente para inflamar a atmosfera explosiva. São classificados em duas categorias: "ia" e "ib". A categoria "ia" diz respeito à uma maior proteção, suportando até 4 falhas no dispositivo. Já a categoria "ib" suporta até 3 falhas no dispositivo.	Zona 0
	Ex ib		Zona 1 Zona 2
Não ascendível	Ex n	Dispositivo ou circuito que em condições normais de operação não são capazes de provocar a ignição de uma atmosfera explosiva de gás, bem como não é provável que ocorra algum defeito que seja capaz de causar a inflamação dessa atmosfera.	Zona 2
Especial	Ex s	Usado para casos ainda não previstos em norma. Previsto para permitir o desenvolvimento de novos tipos de proteção pelos fabricantes.	-

Fonte: Adaptado de Suzuki e Oliveira (2011); WEG (2016); UTFPR (2016); ABNT (2016); ABNT (2018).

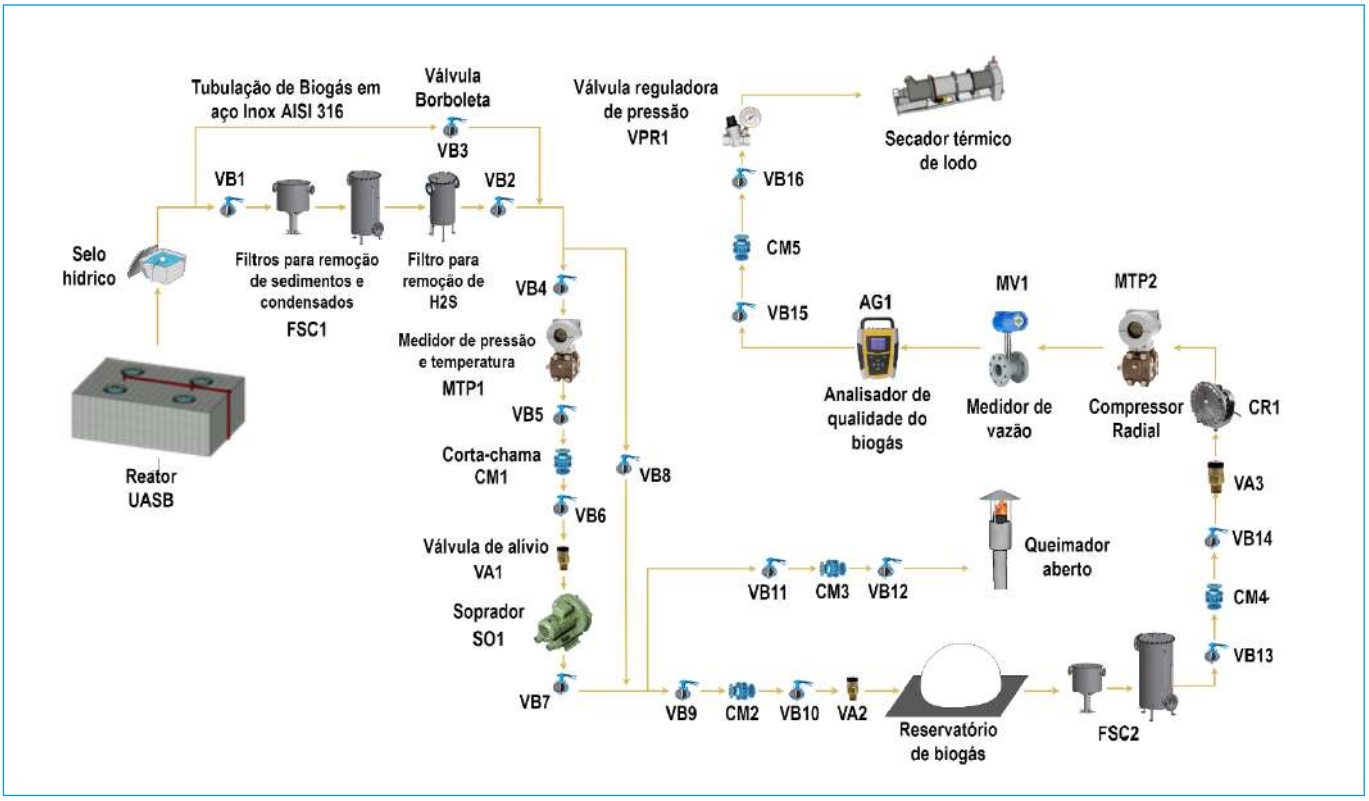


Figura 7 – Diagrama esquemático para a realização da extração ativa do biogás de reatores UASB e de sua utilização, por exemplo, para a secagem térmica do lodo.

Tabela 6 – Diretrizes adicionais para o processo de extração ativa de biogás

Aspecto	Diretrizes
Sopradores, ventiladores ou compressores	• Devem ser dimensionados de acordo com a taxa de produção de biogás, as quais podem ser obtidas por meio de medições ou estimativas com uso do programa computacional ProBio 2.0, conforme apresentado na NT 2 da presente coletânea (Possetti *et al.*, 2021). • Devem ser especificados para superar minimamente as perdas de carga impostas pela tubulação de gás e pelos componentes nela fixados. • Devem ser dotados de componentes que permitam a variação e o controle automático de suas velocidades de guiamento de biogás. Conversores de frequência podem ser utilizados para tais fins e devem ser acionados em tempo real, a partir das medições da vazão de biogás e das concentrações de CH_4 e de O_2. Isso porque, de acordo com Possetti *et al.* (2013), as taxas de produção de biogás em reatores anaeróbios seguem um comportamento temporal variável, periódico e não-estacionário, o qual é criticamente dependente das variações de vazão e das características do esgoto que chegam nas ETEs (Sanepar, 2016).
Medição das de CH_4 e O_2 presentes nas tubulações que guiam o biogás dos reatores anaeróbios	• Deve ser realizada de modo a diagnosticar a presença de misturas explosivas formadas pela incorporação involuntária de ar, devido à falta de estanqueidade do reator ou à execução inadequada de atividades rotineiras de operação/manutenção do sistema. • Os resultados dessas medições devem ser utilizados para acionar (ligar ou desligar) os sopradores, ventiladores ou compressores (Sanepar, 2016). • O guiamento "forçado" do biogás deve ser automaticamente interrompido, caso sejam detectadas concentrações de CH_4 e/ou de O_2 que indiquem a presença de misturas explosivas (faixa de explosividade reportada no item 3 do presente documento).
Operação de remoção de escuma	• Tratando-se especificamente de reatores UASB, destaca-se que o enclausuramento do reator acarreta na necessidade de um maior controle sobre a retirada de escuma. • Como boa parte das ETEs no Brasil que possuem reatores UASB não possuem dispositivos automáticos de retirada de escuma, faz-se necessário abrir as tampas instaladas nos topos dos reatores para auxiliar a retirada desse material ou, em algumas situações, baixar o nível de água do reator para executar tal procedimento. • Para que a queima do biogás não seja prejudicada, nem tampouco ocorram possibilidades de explosões no sistema devido à entrada de ar nas câmaras de gás e em tubulações, é de extrema importância que durante a retirada de escuma a linha de transporte de biogás esteja fechada. Sendo assim, é obrigatório que válvulas de bloqueio estejam instaladas na linha de gás de forma a permitir o isolamento dos reatores submetidos à execução da tarefa. • Caso o reator possua a cortina retentora de escuma no compartimento de decantação, esses procedimentos deverão ser aplicados, além da câmara de gás, nessas áreas dos reatores (Sanepar, 2016; Lobato *et al.*, 2018).

6. Válvulas corta-chama devem ser instaladas à montante de componentes que podem causar ignição, tais como sopradores, ventiladores ou compressores, além do queimador.
7. Os tubos de guiamento do biogás devem ser fabricados, preferencialmente, em aço inox AISI 316.

Para exemplificar essas recomendações, a **Figura 7** sumariza um exemplo de aplicação de dispositivos de segurança em ETEs dotadas de reatores UASB que realizam o processo de extração ativa do biogás. Na **Tabela 6**, são apresentadas diretrizes adicionais para esse processo.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As ETEs com reatores anaeróbios no Brasil já ultrapassam o número de 1.000 unidades instaladas. Os principais problemas de segurança envolvendo a inadequada gestão do biogás em ETEs estão relacionados à formação de ambientes explosivos. Sendo assim, as ETEs com produção de biogás devem ser submetidas ao processo de classificação de suas áreas com potenciais riscos de explosão. Entretanto, cabe destacar que poucas são as ETEs no Brasil que utilizam a classificação de atmosferas explosivas em suas normativas de segurança. Isso se deve, principalmente, pela temática ser pouca difundida dentro do setor de saneamento, além dos elevados custos de equipamentos e instalações para subsidiar a segurança nessas plantas.

O possível crescimento no número de ETEs que realizam o aproveitamento energético do biogás no Brasil, ao longo dos próximos anos, deverá consolidar a importância das questões intrínsecas aos projetos de segurança e saúde do trabalho. Desse modo, a presente nota técnica sumariza elementos que possibilitam a classificação de atmosferas explosivas como ferramenta integrante das questões que fazem uma ETE se tornar sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis, do Corpo de Bombeiros do Estado do Paraná, em especial ao Major Ivan Ricardo Fernandes e da Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar, em especial pelos profissionais da Gerência de Pesquisa e Inovação – GPIN; Bárbara Zanicotti Leite Ross, Fernanda Janaína Oliveira Gomes da Costa, Alexandre Moreno Lisboa, Felipe Owczarzak de Mello e Silva e Luiz Gustavo Wagner.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12209: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. 1ª ed. Rio de Janeiro, Brasil, 1992.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. 2ª ed. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR IEC 60079-0: Equipamentos – requisitos gerais. 2ª ed. Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR IEC 60079-10-1: Classificação de áreas – atmosferas explosivas. 1ª ed. Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades/Probiogás. *Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto*. 2ª ed. Brasília, D F. 2017. 183 p.

CARTWRIGHT, P.; PASCON, P. E. Explosões – Parte 1. Disponível em: <http://www.processos.eng.br/Portugues/PDFs/explosoesI.pdf>. Acesso em: 20/08/2016.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources*. 2nd Ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH e Co KGaA, 2011. 550 p.

DWA. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. DWA-M 363: Origem, Tratamento e Utilização do Biogás. Hennef, Germany: DWA, 2010. 72 p.

KAMINSKI, G.; POSSETTI, G. R. C.; MANNICH, M.; DE MELLO E SILVA, F. O.; RIETOW, J. C.; AISSE, M. M.; PUJATTI, J. F. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 5 - Combustão direta de biogás em queimadores. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 1, n. 1, p. 59-73, 2021.

LOBATO, L. C. S.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; SILVA, B. S.; FLÓREZ, C. A. D.; NEVES, P. N. P.; CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 3: Gerenciamento de lodo e escuma. *Revista DAE* – edição especial, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

MORENO, V. C.; PAPASIDERO, S.; SCARPONI, G. E.; GUGLIELMI, D.; COZZANI, V. Analysis of accidents in biogas production and upgrading. *Journal Renewable Energy*, v. 96, p. 1127-1134, 2015.

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. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), Curitiba - PR, 2013.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; COSTA, F. J. O. G.; WAGNER, L. G.; LOBATO, L. C. S.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; MELO, D. F.; REIS, J. A.; CHERNICHARO C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 5: Biogás e emissões fugitivas de metano. *Revista DAE* – edição especial, v. 66, n. 214, p. 73-89, 2018.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; CABRAL, C. B. G.; MOREIRA, H. C.; PLATZER, C.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; CHERNICHARO, C.A.L. Energy recovery from biogas in UASB reactors treating sewage. In Chernicharo, C.A.L.; Bressani-Ribeiro, T. (Eds.) *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation*London, UK: IWA Publishing, 2019. p. 194-236,

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; LOBATO L. C. S.; AISSE, M. M.; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 2 - Programa computacional de estimativa de produção de biogás – ProBio 2.0. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 1, n.1, p. 21-34, 2021.

RIETOW, J. C. *Classificação de atmosferas explosivas em estações de tratamento de esgotos domésticos*. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho). Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2016.

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.

SANEPAR. Companhia de Saneamento do Paraná. Orientações para a minimização de riscos associados com a extração ativa de biogás em reatores anaeróbios. Informe Técnico Conjunto APD/USES/USPE 001/2016.

SCARPONI, G. E.; GUGLIELMI, D.; V. MORENO, V. C.; COZZANI, V. Risk assessment of a biogas production and upgrading plant. *Chemical Engineering Transactions*. v. 43, p. 1921-1926, 2015.

SCHROEDER, V.; SCHALAU, B.; MOLNARNE, M. Explosion protection in biogas and hybrid power plants. *Procedia Engineering,* v. 84, p. 259-272, 2014.

SANTOS, J. M. B; SOUZA, C. L.; BRANDT, E. M. F.; POSSETTI, G. R. C.; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanço nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 1 - Tópicos de interesse. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental,* v. 1, n.1, p 5-19, 2021.

SILVA, W. C. L. *Blast – Efeitos da Onda de Choque no Ser Humano e nas Estruturas*. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007.

SUZUKI, H.; OLIVEIRA, R. Instruções gerais para instalações em atmosferas explosivas - plataformas marítimas de perfuração e de produção. Manual técnico – Petrobrás. 2ª ed, 2002. 241 p.

UTFPR. Universidade Federal Tecnológica do Paraná.. Apostila áreas classificadas - instrumentista reparador. Disponível em: < http://paginapessoal.utfpr.edu.br/camaral/instrumentacao-industrial/15%20-%20Apostila%20areas%20classificadas%20-%20instrumentista%20reparador.pdf/view>. Acesso em: 20/01/2021.

WEG. Atmosferas explosivas – segurança e confiabilidade. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cartilha-de-atmosferas-explosivas-50039055-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em: 17/08/2016.

© 2021 Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos de licença Creative Commons.