

Consolidação da tecnologia de reatores UASB no estado do Paraná para o tratamento de esgotos sanitários

Consolidation of the technology UASB reactors in the state of Paraná for the treatment of sanitary sewage

Julio Cezar Rietow^{1*} , Miguel Mansur Aisse¹ , Luiz César Baréa², Cleverson Vitório Andreoli³ , Gustavo Rafael Collere Possetti² 

RESUMO

O clima favorável e os menores custos de construção e operação, se comparados com sistemas aeróbios de tratamento, fizeram dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manto de lodo (UASB) uma das tecnologias de tratamento de esgoto sanitário mais empregadas nos países da América Latina e Caribe, sobretudo no Brasil. Este último é caracterizado por deter o maior parque de reatores anaeróbios do mundo. A consolidação dos reatores UASB no país se deu principalmente pelo pioneirismo do estado do Paraná no desenvolvimento de pesquisas e na adoção dessa tecnologia como ferramenta capaz de impulsionar os índices de coleta de tratamento de esgotos sanitários ainda no início da década de 1980. Presente em mais de 230 estações de tratamento de esgoto espalhadas pelo Paraná, os reatores UASB, também conhecidos no estado por reatores anaeróbios de leito fluidizado, sofreram ao longo dos últimos 40 anos uma série de adaptações de modo a propiciar a melhora dos sistemas de retirada de lodo, espuma e biogás. Desse modo, o presente artigo de revisão teve como objetivo contextualizar o histórico e a importância dos reatores UASB no estado do Paraná para o setor de saneamento brasileiro, trazendo os principais aspectos ocorridos nas últimas quatro décadas de emprego dessa tecnologia.

Palavras-chave: reatores anaeróbios; decanto-digestor; unidade biodigestora; Companhia de Saneamento do Paraná.

ABSTRACT

The favorable climate and lower construction and operating costs, compared to aerobic treatment systems, have made the upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors one of the most used sewage treatment technologies in Latin America and Caribbean, especially in Brazil. The latter is characterized by holding the largest park of anaerobic reactors in the world. The consolidation of UASB reactors in Brazil was mainly due to the pioneering spirit of the state of Paraná in the development of research and the adoption of this technology as a tool capable of boosting the rates of sewage treatment collection in the early 1980s. Present in more than 230 sewage treatment plants throughout Paraná, the UASB reactors, also known in the state as anaerobic fluidized bed reactors, have undergone a series of adaptations over the last 40 years in order to improve the systems for removing sludge, scum, and biogas. Thus, this review article aimed to contextualize the history and importance of UASB reactors in the state of Paraná for the Brazilian sanitation sector, bringing the main aspects that occurred in the last four decades of use of this technology.

Keywords: anaerobic reactors; digester decant; biodigester unit; Paraná Sanitation Company.

INTRODUÇÃO

A crise energética mundial ocorrida nas décadas de 1970 e 80 foi um divisor de águas para os países em desenvolvimento no que diz respeito à escolha de tecnologias de tratamento de esgoto sanitário. Nessa época, predominavam em boa parte do mundo os processos aeróbios de tratamento, especialmente o sistema de lodos ativados. No Brasil, as estações de tratamento de esgoto (ETEs) dotadas

dessa tecnologia estavam instaladas sobretudo nas Regiões Sudeste e Sul do país. O estado de São Paulo inaugurava, em 1982, a ETE Suzano, obra integrante do Programa Saneamento da Grande São Paulo. Esse programa ainda contemplava outras duas plantas de tratamento, a ETE Barueri e a ETE ABC (SABESP, 1982). No estado do Paraná, já operavam a ETE Bom Retiro, implantada no município de Londrina em 1969, e a ETE Belém, inaugurada em 1979 na capital, Curitiba.

¹Universidade Federal do Paraná - Curitiba (PR), Brasil.

²Companhia de Saneamento do Paraná - Curitiba (PR), Brasil.

³Consultoria e Engenharia Ambiental - Curitiba (PR), Brasil.

*Autor correspondente: julio.rietow@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 19/12/2022 - **Aceito:** 04/02/2023

O início da operação da ETE Belém, que contava com a tecnologia de lodos ativados na modalidade carrossel, deixou evidentes à Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) os elevados custos operacionais desse sistema, especialmente os de energia elétrica (FRANCO, 1976). Tal fato fez com que a Sanepar buscasse alternativas de tratamento menos onerosas e que garantissem remoção satisfatória dos poluentes presentes nos esgotos sanitários. Diante desse cenário, os projetistas da companhia começaram as conversas com os pesquisadores da Universidade de Wageningen (Holanda), especificamente com o professor Gatzte Lettinga, a respeito de uma tecnologia adaptada dos filtros anaeróbios denominada de reatores anaeróbios de manto de lodo (*upflow anaerobic sludge blanket* — UASB).

Na Holanda, os primeiros estudos envolvendo a aplicação de reatores UASB ocorreram na década de 1970 e tinham como premissa o tratamento de efluentes industriais, especificamente os de processamento de batata e de beterraba. Posteriormente, os estudos tiveram como foco a utilização dos reatores UASB para o tratamento de esgotos sanitários. Os resultados obtidos em escala laboratorial e piloto intensificaram as vantagens do emprego dessa tecnologia em países de clima tropical, sendo então a temperatura fator determinante para o bom desempenho do reator UASB (CHERNICHARO et al., 2018).

Caracterizados por apresentar menor produção de lodo se comparado com os processos aeróbios de tratamento e ainda com a possibilidade de gerar biogás, um subproduto dotado de elevado potencial energético, os reatores UASB tiveram suas primeiras unidades instaladas no Brasil no início da década de 1980, notadamente no estado do Paraná, sob a denominação inicial de usinas gaseificadoras de esgoto. Os principais diferenciais dessa tecnologia eram o seu baixo custo de implantação, da ordem de 20% dos custos, e cerca de 70% da eficiência de um sistema convencional de lodo ativado com desinfecção. Isso permitiu que a Sanepar ampliasse o seu parque de tratamento, mesmo em um quadro de grande limitação orçamentária para os investimentos em coleta e tratamento de esgotos observados no país, pois havia clara priorização de implantação de sistemas de tratamento e distribuição de água.

Ao longo dos anos, essa tecnologia foi sofrendo adaptações, de modo a propiciar melhor eficiência de remoção da matéria orgânica presente no esgoto sanitário, bem como aumentar a capacidade de coleta e armazenamento do biogás produzido. Desse modo, no Paraná, uma variante do reator UASB foi criada, sendo essa tecnologia chamada de reator anaeróbio de leito fluidizado (RALF), o qual foi amplamente empregado em todo o território paranaense (BARÉA, 2015).

Com os bons resultados obtidos, o emprego da tecnologia UASB no território paranaense serviu de base para que outros estados brasileiros pudessem melhorar os seus índices de coleta e tratamento de esgoto sanitário. Sendo assim, dada a importância do emprego da tecnologia UASB no contexto do saneamento brasileiro e especialmente paranaense, o presente artigo teve como objetivo descrever os principais acontecimentos que retratam os 40 anos de utilização dos reatores UASB no estado do Paraná. Os primeiros estudos e projetos realizados para tratamento de esgotos sanitários de pequenas comunidades, as investigações de aproveitamento energético do biogás para cocção de alimentos, as adaptações estruturais realizadas que culminaram no desenvolvimento do RALF e o emprego em larga escala dessa tecnologia como mecanismo para alavancar os índices de coleta e tratamento dos esgotos sanitários no estado são alguns dos temas discutidos neste artigo.

PROCESSOS ANAERÓBIOS ANTECEDENTES À TECNOLOGIA UASB

Estudos pioneiros realizados por Mouras em 1881 (criação do digestor automático de Mouras), Kniebühler em 1887 (elaboração do primeiro tanque do tipo Dortmund), Scott-Moncrieff em 1891 (construção de um sistema híbrido de dois estágios de tratamento de esgoto), Cameron em 1895 (desenvolvimento do primeiro tanque séptico), Travis em 1904 (elaboração de duas tecnologias distintas de tratamento do esgoto tendo como base os fundamentos do processo hidrolítico), Imhoff em 1906 (criação do Tanque Imhoff) e, especialmente, Young e McCarty em 1960 (desenvolvimento do filtro anaeróbio), entre outros, conforme apresentado na Figura 1, serviram de alicerce para que em meados da década de 1970 o professor Gatzte Lettinga e demais pesquisadores da Universidade de Wageningen, na Holanda, desenvolvessem a tecnologia conhecida por reatores UASB.

O grande diferencial dessa nova tecnologia anaeróbia em relação às anteriores se devia ao fato de o esgoto passar por um manto de lodo, no sentido vertical ascendente, dentro do reator, fazendo dessa maneira que a alimentação se desse pelo fundo e a coleta do efluente na parte superior da unidade de tratamento. Por meio dessa mudança, obteve-se maior eficiência de remoção de matéria orgânica.

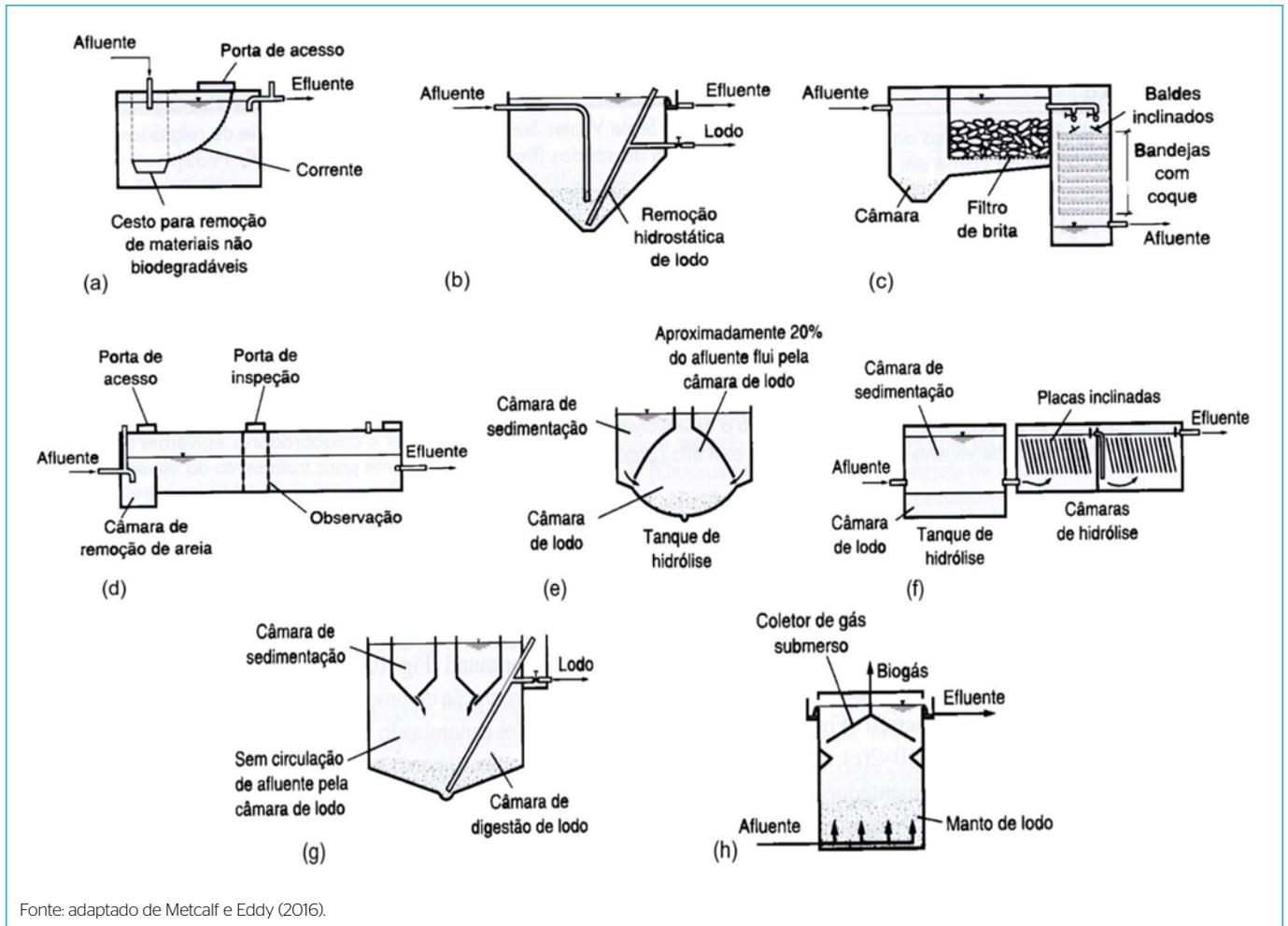
Inicialmente empregados para efluentes industriais de elevada carga orgânica (processamento de batata e beterraba), os reatores UASB foram aos poucos sendo utilizados no tratamento de esgotos sanitários (LETTINGA et al., 1981; LETTINGA; ROERSMA; GRIN, 1983). Com base nos resultados obtidos, foi possível constatar como principais vantagens da tecnologia UASB a sua simplicidade construtiva e operacional (não havendo necessidade do emprego de equipamentos eletrointensivos), o desenvolvimento do lodo de alta sedimentabilidade por causa da sua formação granular e, por fim, a produção de biogás, que pode ser empregado para fins energéticos. Nesse contexto, a tecnologia UASB rapidamente se espalhou pelos países tropicais como Colômbia, Índia e Brasil. Neste último, a aceitação da tecnologia UASB foi notória, colocando-o atualmente em posição de vanguarda em nível mundial (JORDÃO; PESSÓA, 2017).

DIFUSÃO DA TECNOLOGIA UASB NO ESTADO DO PARANÁ

Os primeiros projetos e estudos

A ideia de empregar um tratamento de esgoto de baixo custo e com potencialidade de produção energética por meio do biogás foi o gatilho para que a tecnologia UASB se iniciasse no Brasil. O estado do Paraná, por meio de sua companhia de saneamento, foi o principal responsável pela introdução desses reatores no país, entretanto cabe destacar que o marco simbólico do emprego da tecnologia UASB no estado se deu em 1980, durante o projeto de construção da Usina Hidrelétrica de Segredo, construída pela Companhia Paranaense de Energia (Copel). Essa usina foi considerada a primeira do país a possuir um projeto de redução de impactos ambientais. Para tanto, prospectou-se o tratamento do esgoto gerado no canteiro de obras da usina.

A estação de tratamento projetada contava com um processo unitário primário, do tipo tanque Imhoff, seguido de um filtro biológico percolador, de alta taxa, acoplado a um decantador secundário. O efluente desse sistema era



Fonte: adaptado de Metcalf e Eddy (2016).

Figura 1 - Evolução das principais tecnologias anaeróbias no tratamento de esgoto sanitário: (A) digestor automático de Mouras (1881); (B) tanque Dortmund (1887); (C) tanque de dois estágios de Scott-Moncrieff (1891); (D) tanque séptico de Cameron (1895); (E) Tanque de Travis com duas câmaras (1904); (F) tanque de Travis com câmaras de hidrólise (1904); (G) tanque Imhoff (1906); (H) reator UASB (1980).

encaminhado para uma lagoa rasa seguida de outro tanque Imhoff (utilizado para a sedimentação das algas produzidas na lagoa). Com base nas publicações de Lettinga e colaboradores do fim da década de 1970, os responsáveis pela obra decidiram transformar o tanque Imhoff, do tratamento primário, em um reator do tipo UASB, visando principalmente à maximização da produção de biogás na unidade de tratamento. O sistema concebido poderia então viabilizar a utilização do biogás no restaurante do canteiro de obras da usina para a cocção de alimentos (GOMES, 1989).

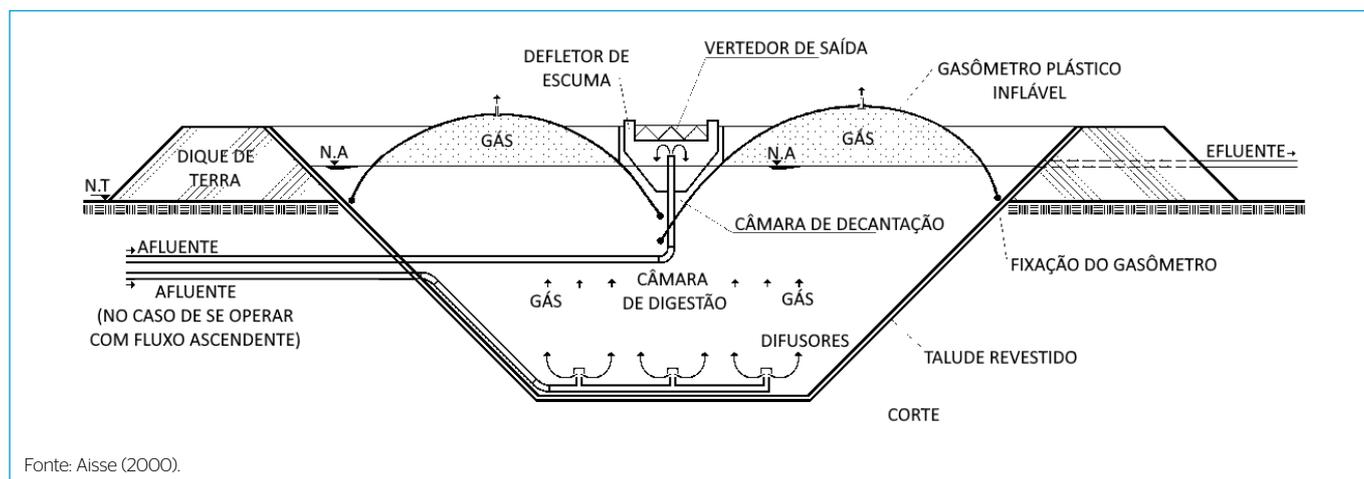
Ainda em 1980, em parceria com a Sanepar e a Copel, a Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR), por meio de seu Laboratório de Hidráulica, Saneamento e Meio Ambiente (LHISAMA), implantou uma instalação piloto similar à empregada no canteiro de obras da Usina Hidrelétrica de Segredo. Localizada no *campus* da PUC-PR, em Curitiba, a instalação piloto tinha capacidade de tratar o esgoto de uma população de 500 habitantes e foi uma das primeiras em território nacional a mensurar a eficiência de remoção de matéria orgânica e de produção de biogás em um decanto-digestor tipo UASB, tratando esgoto sanitário.

O reator (biodigestor anaeróbico alternativo) empregado no projeto da PUC-PR para o tratamento de esgotos ditos diluídos possuía paredes

impermeabilizadas e construídas em taludes de terra. Adicionalmente, o reator também dispunha de campânulas plásticas visando à coleta do biogás produzido e à separação hidráulica entre as câmaras de decantação e câmaras inferiores. A Figura 2 ilustra uma versão desses reatores, aplicados em dois estágios, o primeiro à semelhança dos tanques Imhoff e o segundo operando como reatores UASB. O fluxograma do tratamento contemplava ainda unidades terciárias para produção (lagoas rasas), decantação e digestão anaeróbica de algas, para fins de maximizar a produção de metano (biogás) da ETE. A solução técnica para separação das algas se apoiava em uma proposta da Universidade da Califórnia, que apontava que o emprego de lagoas sob sistema de agitação permitia a sedimentação posterior dessa biomassa (GOMES; AISSE; OBLADEN, 1981).

A estação de tratamento de esgoto de Pirai do Sul

Enquanto grande parte das companhias de saneamento ainda realizava estudos em escala piloto, a Sanepar já implantava em 1983 a primeira ETE com tecnologia UASB visando ao aproveitamento energético do biogás. Localizada no município de Pirai do Sul (PR), a planta tinha capacidade para tratar o esgoto de cerca de 10 mil habitantes. Uma particularidade da ETE era que ela contemplava



Fonte: Aisse (2000).

Figura 2 - Decanto-digestor tipo UASB.

uma unidade primária (decanto-digestor), incluída originalmente para proteger o sistema de alimentação da unidade secundária (unidade biodigestora), especificamente a obstrução dos tubos de alimentação e os difusores. O reator, conforme a Figura 3, foi projetado em forma de tronco de cone, com suas paredes escavadas no terreno. Possuindo cobertura em lona plástica e decantadores internos construídos em placas rígidas, apoiadas sobre postes de concreto pré-moldados, o reator apresentava volume útil de 3.170 m³.

Além dessas unidades para o tratamento do esgoto sanitário, a planta contava com células operadas em batelada para a degradação anaeróbia de resíduos sólidos urbanos produzidos na cidade de Pirai do Sul. Desse modo, a ETE contava com a produção de biogás oriunda tanto do tratamento do esgoto quanto dos resíduos sólidos e agrícolas do município. O biogás produzido na estação era então coletado, canalizado e distribuído para a comunidade local visando à substituição do gás liquefeito do petróleo (GLP) para a cocção de alimentos. Ademais de possibilitar a redução expressiva das emissões de gases de efeito estufa por meio dessa alternativa de aproveitamento, a Sanepar tinha como objetivo melhorar as relações de convivência com a população de entorno à ETE, fornecendo o biogás a princípio com custos bem inferiores ao GLP (Figura 4). Na Figura 5 é apresentado o fluxograma do processo empregado na ETE de Pirai do Sul.

Tratamento dos esgotos sanitários de pequenas comunidades

O funcionamento do tanque biológico, proposto no início do século 20 por Winslow e Phelps (1911), para o tratamento de esgotos da cidade de Boston (Estados Unidos), assemelhava-se ao de um reator UASB, no entanto as câmaras de digestão e de sedimentação não eram separadas fisicamente, tal como ocorre em uma fossa séptica de câmara única. Com base na literatura anteriormente citada e nas experiências acumuladas, a Sanepar realizou algumas mudanças estruturais nos reatores UASB ditos como clássicos. Uma das principais mudanças foi a criação de um reator em tronco cônico, com seção transversal circular escavada no terreno, conforme a Figura 6.

Essa nova unidade de tratamento, com eficiência esperada de 30 a 40% de remoção da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), ficou conhecida como reator anaeróbio de leito fluidizado (RALF) (ERICSSON, 1985).

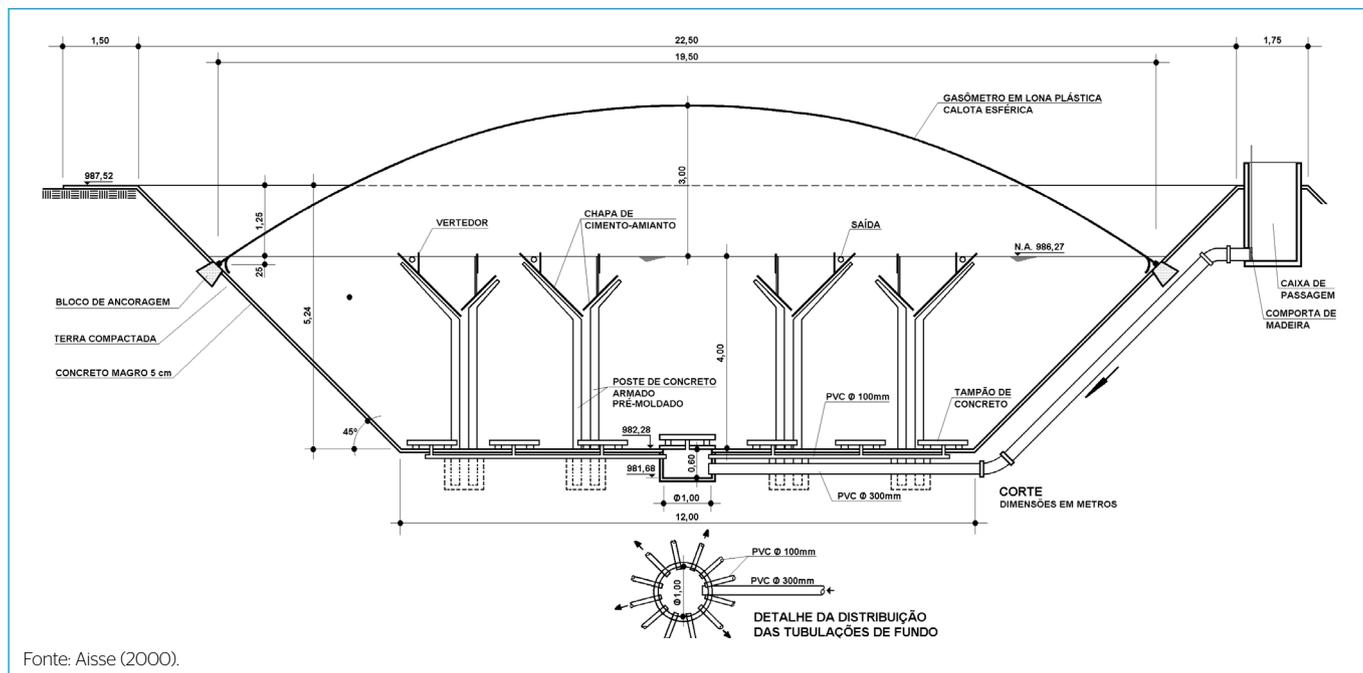
Posteriormente se constatou que o manto de lodo era flocofento e não fluidizado, porém o nome popularizou-se na Sanepar (BARÉA, 2015). Quanto a sua concepção e projeto, nos reatores de pequena capacidade foi possível utilizar uma única entrada de esgotos, localizada no vértice do cone invertido. Para capacidades maiores, adotou-se a forma troncocônica, havendo necessidade de distribuir a entrada de esgoto no reator. A coleta do efluente da unidade dava-se por meio de um vertedor periférico de difícil nivelamento. Como parâmetros de dimensionamento à época, podem ser citados (ERICSSON, 1985):

- Tempo de detenção hidráulica (TDH): de 3 (baixa eficiência) a 8 horas;
- Velocidade ascensional: manto de lodo de 1 a 2 m.h⁻¹;
- Distribuição de difusores: um a cada 4 ou 5 m² de área do fundo do reator;
- Carga orgânica: cerca de 10 kg DBO.m⁻³ lodo por dia.

O registro dos primeiros reatores do tipo RALF para tratamento de esgoto sanitário implantados pela Sanepar em núcleos habitacionais no Paraná ocorreu em 1981, no município de Curitiba. Possivelmente, a utilização desses reatores marcou o início do emprego da tecnologia UASB no Brasil para o tratamento de esgotos sanitários de pequenas comunidades.

No ano de 1985, foi realizado em Curitiba o Encontro Nacional sobre Digestão Anaeróbia com aproveitamento do gás metano, fomentado pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep). Decorrente desse evento, a Sanepar, com o apoio do Instituto de Saneamento Ambiental (Isam, antigo Lhisama) da PUC-PR e da Universidade Federal do Paraná, procurou desenvolver modelos inovadores de reatores para o tratamento de esgotos sanitários que sintetizavam em si eficiência adequada de tratamento aos requisitos de preservação do meio ambiente. Para tanto, os modelos teriam de ser pautados na investigação de processos de tratamento de baixo custo de implantação, manutenção e operação.

Na etapa de operação assistida dos reatores desenvolvidos, obtiveram-se parâmetros de caracterização e do funcionamento de quatro reatores do tipo RALF projetados e construídos pela Sanepar, em conjuntos habitacionais de portes distintos, localizados nas regiões oeste e noroeste de Curitiba. Assim, podem ser citados os RALF Caiçara, Bracatingas, Augusta e Itatiaia (BOLLMANN; AISSE, 1989). O reator da ETE Caiçaras assemelhava-se ao tanque biológico, e o



Fonte: Aisse (2000).

Figura 3 - Estação de tratamento de esgoto Pirai do Sul: unidade biodigestora secundária.



Fonte: Companhia de Saneamento do Paraná (1983).

Figura 4 - Estação de tratamento de esgoto de Pirai do Sul (PR): distribuição do biogás produzido para a cocção de alimentos nas residências da comunidade local.

da ETE Bracatingas era similar aos reatores da ETE de Pirai do Sul. Na Tabela 1 estão as características desses reatores, tais como forma, tipo de cobertura, presença de separador trifásico (decantador interno), entre outros.

Na Figura 7 são apresentadas as representações esquemáticas dos RALFs implantados nas ETEs das comunidades Caiçara e Itatiaia. O fluxograma das ETEs era bastante simplificado, apontando apenas o tratamento preliminar (grade média, desarenador tipo canal e calha Parshall) e o reator anaeróbio. Todavia, cabe destacar que na ETE Bracatingas um tanque Imhoff foi empregado como unidade primária de tratamento, seguido do RALF (unidade secundária, conforme a Figura 8). Adicionalmente, esse sistema ainda contemplava um leito de secagem para desaguamento do lodo anaeróbio produzido.

A DIFUSÃO DA TECNOLOGIA NO BRASIL E NA AMÉRICA LATINA

A tecnologia UASB iniciou sua aplicação no Brasil, ao mesmo tempo no setor industrial, especialmente em fecularias, usinas de álcool e açúcar (vinhoto) e na sequência em indústrias de bebidas e cervejarias. O vinhoto, por exemplo, apresenta alta concentração de matéria orgânica (DBO de até 20.000 mg.L⁻¹), representando um grave problema ambiental se não tratado de forma adequada. Ao se aplicar essa água residuária, por exemplo, oriunda da produção do álcool por meio da mandioca, em reatores UASB conduzidos em escala semipiloto (58 L), resultaram cargas orgânicas volumétricas (COV) de até 12 kg.m⁻³ por dia, com eficiência de até 90% na remoção de DQO. Tornava-se também oportuna a utilização do biogás produzido, podendo este atender de 15 a 20% da demanda do processo industrial de fecularias (PATZA; PAWLOWSKY; GABARDO, 1983). Esses resultados também serviram de estímulo para a difusão da tecnologia no setor de saneamento básico.

O reator em escala de demonstração (64 m³) construído em Cali (Colômbia), no início da década de 1980, por meio de uma parceria entre os governos colombiano e holandês, representou uma das primeiras experiências na América Latina do emprego de reatores UASB tratando esgoto sanitário. O reator, de seção quadrada, feito de concreto, operava com tempos de detenção hidráulica de 6 h e até menos, apresentando eficiência superior a 70% de remoção de matéria orgânica. Investigava-se também nesse reator a variação da COV, o número de pontos de alimentação no fundo do reator, a produção de biogás e o manejo do lodo anaeróbio descartado (HASKONING, 1984). Os bons resultados obtidos no reator de Cali propiciaram as bases iniciais de critérios e parâmetros de projeto, manutenção e operação de reatores UASB (LETTINGA, 2014).

Em 1985, o estado de São Paulo começou a implantar as primeiras ETEs com tecnologia UASB. Cabe destacar que, assim como no estado do Paraná, as companhias de saneamento de São Paulo também realizaram adaptações

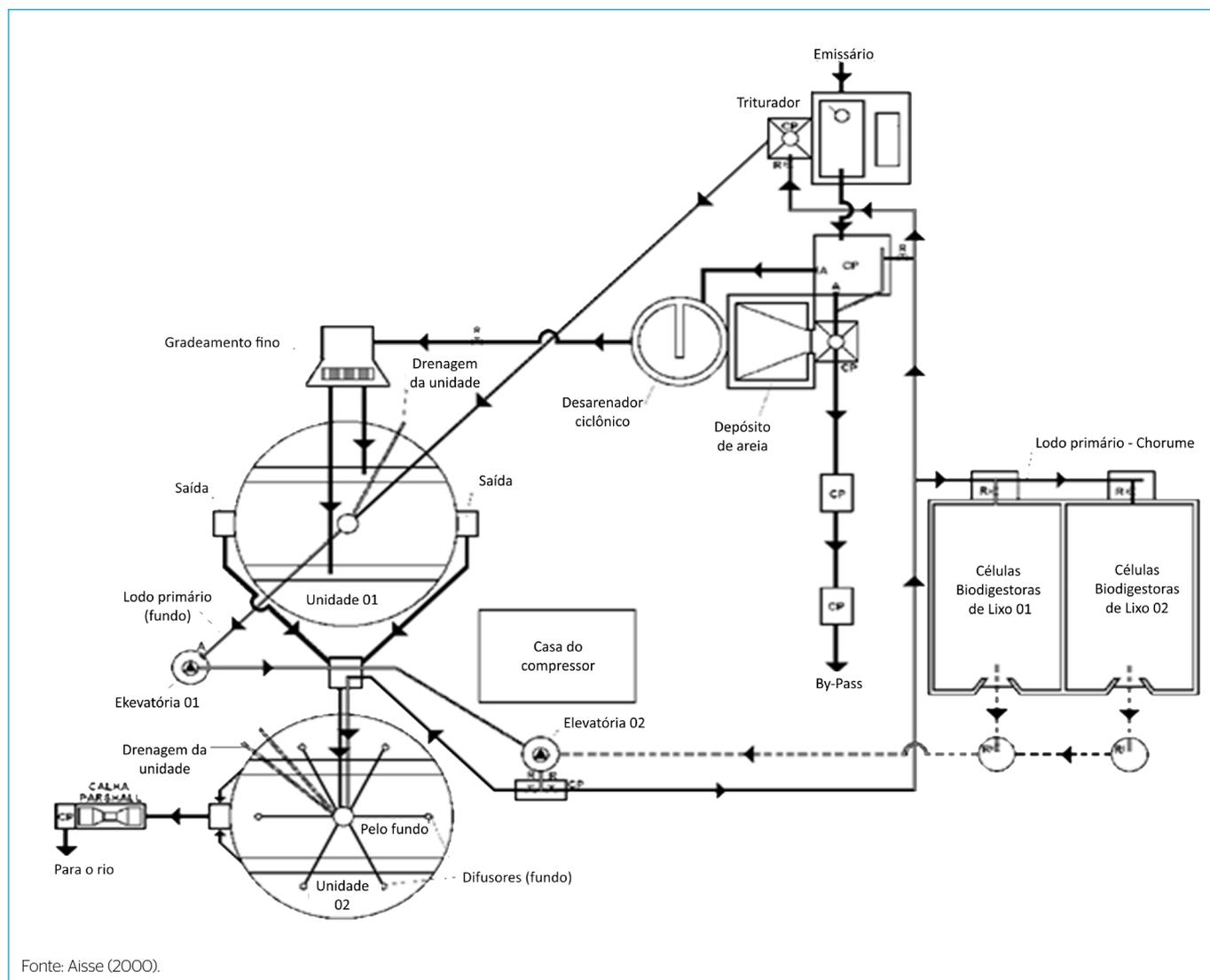


Figura 5 - Fluxograma da estação de tratamento de esgoto de Pirai do Sul (PR) da Companhia de Saneamento do Paraná.

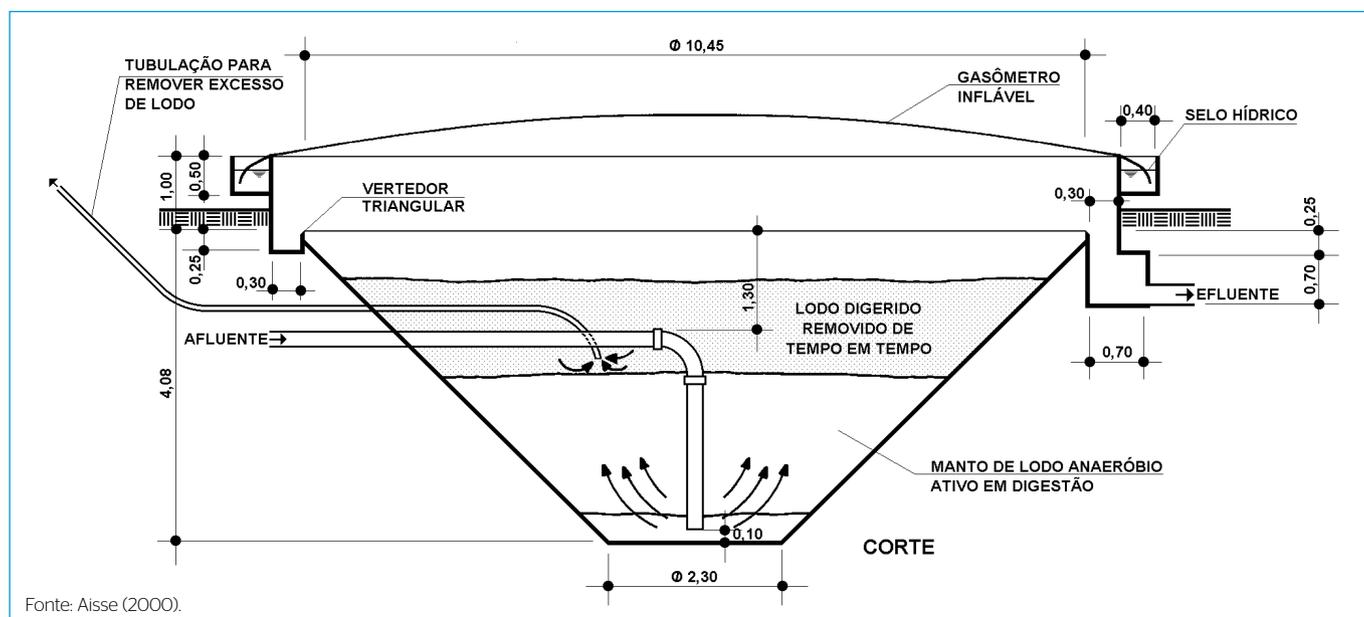


Figura 6 - Representação esquemática de um reator anaeróbio de leito fluidizado.

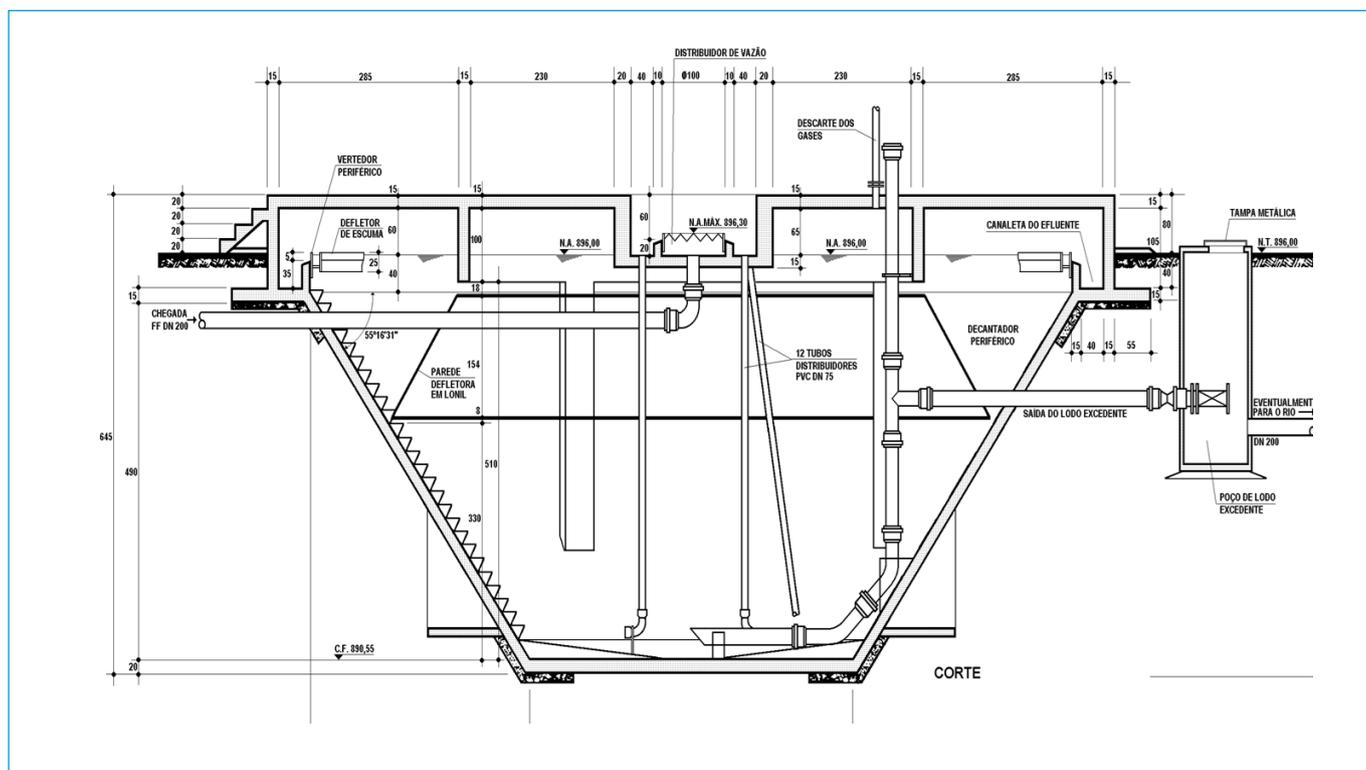
e melhorias nos reatores UASB. Esse fato culminou no desenvolvimento do reator anaeróbico de fluxo ascendente (RAFA). Uma das primeiras plantas de tratamento de esgoto em São Paulo a empregar a tecnologia UASB/RAFA foi a ETE Jesus Netto, da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp). O reator anaeróbico empregado nessa estação se deu pela reforma de um tanque Imhoff de 680 m³, entretanto ressalta-se que as primeiras adaptações realizadas na unidade de tratamento não alcançaram resultados satisfatórios de desempenho operacional do reator. Em 1986, ainda em São Paulo, foi projetado e construído pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo um reator com a tecnologia UASB com volume de 120 m³, capaz de atender a uma população de aproximadamente quatro mil habitantes (VIEIRA, 1988).

No estado do Paraná, por sua vez, os RALFs também sofreram uma série de modificações com a finalidade de aperfeiçoar o processo de tratamento de esgoto e captura de biogás. Não obstante, por causa da sua seção transversal circular, que demanda maior área em planta, os reatores do tipo RALF passaram a ser empregados em ETEs de pequeno e médio portes. Conforme a Figura 9, os RALFs modificados contaram com novos sistemas de distribuição, coleta de gases, separadores trifásicos em lona, vertedores triangulares, dispositivos de coleta de espuma, entre outros componentes.

Tendo como meta um plano ousado para melhorar as condições do quadro de tratamento de esgoto no Paraná, a Sanepar então iniciou na década de 1990 a implantação em larga escala da tecnologia UASB/RALF para atender a uma população, na época, de aproximadamente 2,5 milhões de habitantes em todo o estado (BARÉA, 2015).

Os resultados obtidos pelas companhias de saneamento dos estados do Paraná e de São Paulo, bem como por experiências de implantação de reatores UASB em outros países, como, por exemplo, na Colômbia (ETE de Bucaramanga) e na Índia (ETE de Kampur), fomentaram o emprego dessa tecnologia para o restante do território brasileiro ao longo dos anos de 1990 e 2000. Somado a isso, o Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (Prosab), fomentado e custeado pela Finep, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e pela Caixa Econômica Federal, também foi preponderante para a disseminação da tecnologia UASB no Brasil. Destacam-se os editais do Prosab voltados para a temática do tratamento de esgotos em 1999 — tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo (CAMPOS, 1999) — e 2001 — pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios (CHERNICHARO, 2001). Diante desse contexto, as instituições de pesquisa e universidades, em parceria com as companhias de saneamento, foram responsáveis pelo desenvolvimento de uma série de estudos que consolidaram os bons resultados obtidos com o tratamento de esgoto em reatores UASB.

Em 1998, a Sanepar inaugurou uma das maiores plantas anaeróbias de tratamento de esgoto do Brasil. Localizada no município de Curitiba, a ETE Atuba Sul tinha capacidade para tratar uma vazão de esgoto de aproximadamente 1.500 L.s⁻¹. O sistema de tratamento da planta era composto de 16 reatores do tipo UASB de seção retangular. A opção por esse modelo de reator anaeróbico se deu, principalmente, pelo grande porte da ETE — unidades de tratamento com seção retangular (Figura 10) exigem menor área do terreno se comparadas com aquelas de seção circular (como os



Fonte: Aisse (2000) citando RALF Módulo IX - Tipo (engenheiro Décio Jurgensen, Companhia de Saneamento do Paraná).

Figura 9 - Representação esquemática de um reator anaeróbico de leito fluidizado com melhorias.

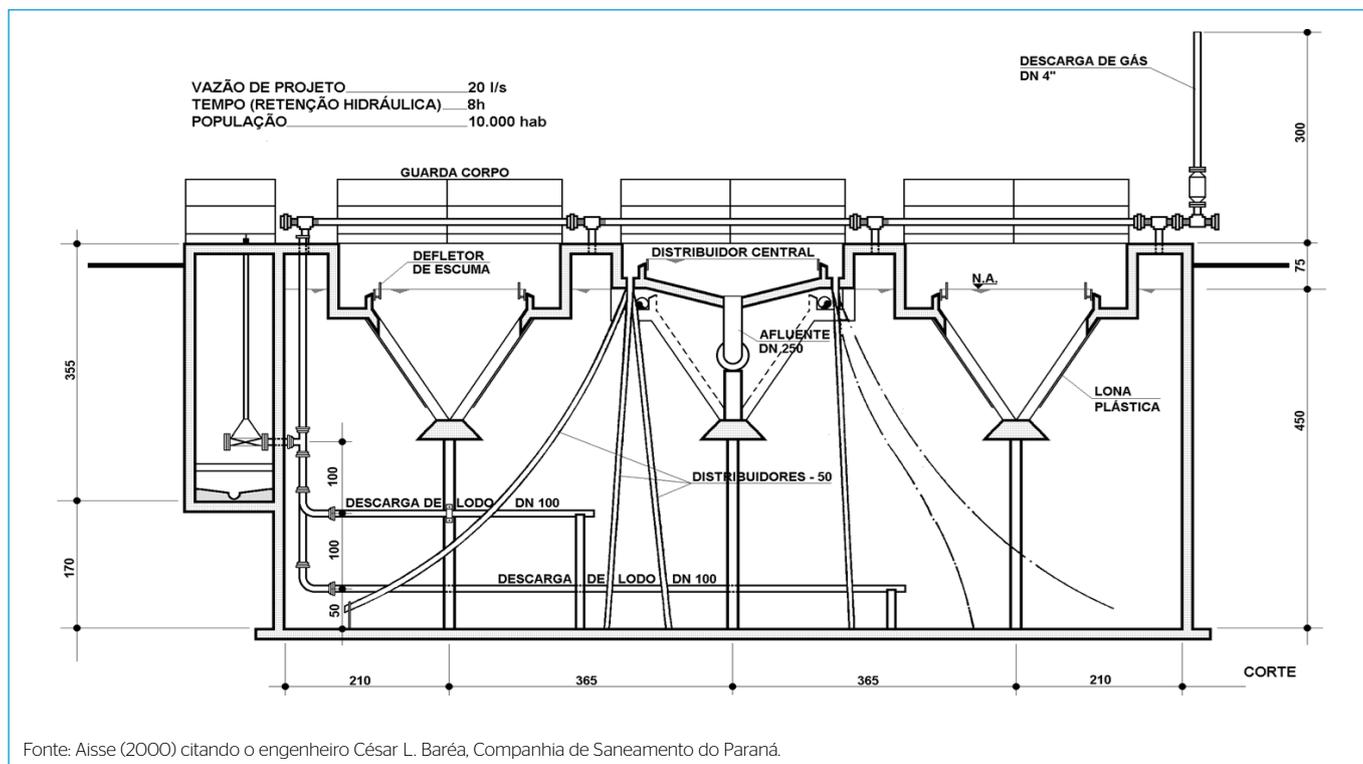


Figura 10 - Representação esquemática de um reator UASB retangular modificado.

RALFs, por exemplo). Depois da ETE Atuba Sul, a Sanepar implantou mais três plantas de tratamento de médio porte no município de Curitiba (ETE Padilha, ETE Santa Quitéria e ETE CIC Xisto), todas dotadas de reatores UASB de seção retangular.

Outras cidades no país também iniciaram a implantação de ETEs de grande porte dotadas de reatores UASB. Em 2006, a Companhia de Saneamento de Minas Gerais inaugurou a maior planta de tratamento anaeróbio do Brasil. A ETE Onça, localizada na região metropolitana de Belo Horizonte (MG), tem capacidade para tratar uma vazão de esgoto de 3.600 L.s^{-1} . Outro exemplo a ser citado do emprego da tecnologia UASB em plantas de grande porte é a ETE Anhumas, localizada em Campinas (SP). Inaugurada em 2007, a estação é capaz de tratar uma vazão de 1.200 L.s^{-1} de esgoto sanitário (MIKI, 2010).

PRINCIPAIS PONTOS DE APRIMORAMENTO DA TECNOLOGIA UASB

Para que a tecnologia UASB continue sendo amplamente empregada no Paraná e no Brasil, uma série de aprimoramentos devem ser realizados com o intuito de melhorar o gerenciamento de lodo, espuma e gases odorantes produzidos nos reatores (CHERNICHARO *et al.*, 2018).

Os problemas envolvendo o gerenciamento de lodo em reatores UASB estão relacionados com a falta e/ou não efetividade de uma rotina de descarte desse material. O excesso de lodo nos reatores acarreta a passagem de quantidades significativas de sólidos para o compartimento de decantação, comprometendo dessa forma a qualidade final do efluente tratado. Além disso, por ocupar um volume acima da capacidade de retenção do compartimento de digestão (manta e leito de lodo), o acúmulo excessivo de lodo pode ocasionar a diminuição do

TDH do esgoto dentro do reator UASB, reduzindo assim a eficiência do processo de tratamento (LEITÃO *et al.*, 2010; LOBATO *et al.*, 2018).

Definida como uma camada de materiais flutuantes que se desenvolve na superfície dos reatores UASB, a espuma é composta principalmente de gorduras, óleos e lodo flotado. Esse material é caracterizado por se acumular tanto na superfície do compartimento de decantação quanto na parte interna dos separadores trifásicos. A inexistência de uma rotina operacional de descarte de espuma pode ocasionar uma série de prejuízos ao bom funcionamento dos reatores UASB. O espessamento desse material na superfície do compartimento de decantação pode acarretar a perda de qualidade do efluente tratado, bem como possíveis danos estruturais nas paredes do separador trifásico. Já o acúmulo de espuma na parte interna dos separadores pode restringir a passagem do biogás produzido para eventuais dispositivos de queima e/ou aproveitamento energético. Nesses casos, o biogás tende a ser redirecionado, por causa da diferença de pressão, para o compartimento de decantação do reator, em que acaba saindo dissolvido com o efluente tratado (ROSS *et al.*, 2016; LOBATO *et al.*, 2018).

Outro aspecto de grande relevância que tem causado uma série de discussões sobre o emprego da tecnologia UASB no Brasil é a emissão de gases odorantes. Vinculados principalmente ao gás sulfídrico produzido durante o processo anaeróbio de tratamento de esgoto, os odores nas ETEs podem causar impactos sobre o bem-estar da população que reside no entorno da planta de tratamento. Caracterizado pelo odor de ovo podre, o gás sulfídrico é perceptível ao olfato humano em concentrações da ordem de $0,5 \text{ ppb}$ (BRANDT *et al.*, 2018). A maior parcela do gás sulfídrico emitido para a atmosfera se encontra dentro da mistura de gases do biogás. Quando encaminhado para um queimador de baixa eficiência, como é o caso da maior parte das ETEs no país que

possuem processos anaeróbios de tratamento, o gás sulfídrico presente no biogás não é devidamente destruído, acarretando emissões odorantes e também possíveis problemas de corrosão. O gás sulfídrico, na presença de umidade e oxigênio, pode ser oxidado e transformado em ácido sulfúrico, sendo este um composto altamente corrosivo em peças metálicas e estruturas de concreto (BRANDT *et al.*, 2018).

Além dos desafios citados anteriormente, a pressão por sistemas mais sustentáveis de tratamento de esgoto faz com que práticas de recuperação de recursos, como o biogás, por exemplo, sejam levadas em consideração nos possíveis aprimoramentos a serem realizados nos reatores UASB.

EMPREGO DOS REATORES UASB NO CONCEITO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO SUSTENTÁVEIS

As ETEs sustentáveis são caracterizadas pela capacidade de transformar o esgoto em recursos que geram valor agregado para a sociedade. Portanto, em estações que utilizam reatores UASB como tecnologia de tratamento, o foco está na valorização do biogás produzido. De acordo com Possetti *et al.* (2019), a tomada de decisão por determinada alternativa de aproveitamento do biogás, elétrica, térmica ou de cogeração de energia, deve levar em consideração as questões de escala e/ou porte da planta de tratamento, bem como os aspectos de viabilidade ambiental, social e econômico-financeira.

O aproveitamento térmico do biogás para secagem e higienização do lodo tem se destacado como uma importante alternativa para a redução dos custos atrelados ao gerenciamento desse material. Além disso, dependendo do porte da ETE, apenas a energia térmica advinda da combustão do biogás seria suficiente para secar e higienizar todo o lodo produzido na planta de tratamento, entretanto os exemplos de aplicação de uso de secadores comerciais de lodo, que utilizam o biogás produzido em ETEs dotadas de reatores UASB, ainda são incipientes no Brasil. Uma das poucas experiências relatadas é a da ETE Vieira (Montes Claros), em Minas Gerais. Nessa planta, os gases quentes oriundos da queima do biogás são direcionados para um secador rotativo, responsável por elevar o teor de sólidos totais presentes no lodo de 20 para 80%. Ressalta-se que no estado do Paraná a ETE Atuba Sul está em fase final de implantação de um sistema térmico movido a biogás para a secagem do lodo produzido na própria planta de tratamento. Com capacidade para tratar o esgoto de 800 mil habitantes, estima-se que a referida ETE possua potencial de 3.700 m³.d⁻¹ de produção de biogás.

Exemplos de aproveitamento térmico da combustão do biogás para aquecimento de água em caldeira, interligada a um piso radiante em que será depositado o lodo, têm se demonstrado como uma interessante alternativa para a secagem e possível higienização desse material em ETEs de pequeno porte (POSSETTI *et al.*, 2012; WAGNER *et al.*, 2015; RIETOW *et al.*, 2018). Adicionalmente, o aproveitamento térmico do biogás nesses sistemas pode ser combinado com outra fonte de energia, como a solar, por exemplo (WAGNER *et al.*, 2017).

A geração de energia elétrica em ETEs dotadas de reatores UASB também tem se destacado como uma promissora alternativa de aproveitamento energético do biogás, entretanto estudos realizados por Valente (2015) e Rosenfeldt *et al.* (2017) salientaram a viabilidade dessa alternativa apenas em ETEs de grande porte (população atendida > 100 mil habitantes). Isso se deve, principalmente,

aos elevados custos de aquisição e operação dos equipamentos para geração de energia elétrica.

No Brasil, um dos poucos exemplos de plantas de tratamento de esgoto dotadas de sistemas de geração de energia elétrica por meio do biogás é a ETE Jacuípe, localizada no estado da Bahia. A ETE é responsável por atender a uma população de aproximadamente 100 mil habitantes. O equipamento de geração de energia elétrica instalado é um motor a gás de 200 kW. No estado do Paraná, um exemplo de planta com geração de energia elétrica do biogás produzido em reatores UASB é a ETE Ouro Verde. Localizada no município de Foz do Iguaçu, essa estação foi a primeira usina brasileira de geração distribuída de energia elétrica movida a biogás produzido em reatores UASB a ser cadastrada na Agência Nacional de Energia Elétrica e a primeira do país a aderir ao sistema de compensação de energia elétrica. Com capacidade para tratar o esgoto de uma população de até 35 mil habitantes, a ETE Ouro Verde é responsável por gerar cerca de 50 m³.d⁻¹ de biogás. Após passar por um processo de tratamento, o biogás é encaminhado para um motor de combustão interna com capacidade de gerar 22 kW de energia elétrica.

Por fim, o processo de cogeração de energia pode ser entendido como o aproveitamento dos gases quentes de exaustão oriundos de processos termodinâmicos de geração de energia elétrica. O potencial térmico desses gases pode ser utilizado em uma ETE, por exemplo, como energia complementar ao processo de secagem e higienização térmica do lodo. Os principais equipamentos disponíveis no mercado para a geração de energia elétrica com capacidade de aproveitamento dos gases quentes residuais são motores de combustão interna (ciclo Otto e ciclo *diesel*), turbinas e microturbinas a gás (POSSETTI *et al.*, 2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os reatores UASB são atualmente um dos processos de tratamento de esgotos sanitários mais empregados no Brasil. De acordo com os dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, das 2.768 ETEs implantadas, 1.047 possuem os reatores UASB em seus sistemas de tratamento (BRASIL, 2017), fazendo do país o maior parque de reatores anaeróbios do mundo. Somente no estado do Paraná, existem cerca de 230 ETEs que possuem esse tipo de tecnologia. Conforme apresentado neste artigo, o pioneirismo do estado do Paraná e de sua companhia de saneamento, que orientou a implantação de seu parque de tratamento com base nas pesquisas desenvolvidas na própria empresa e em cooperação com universidades, por meio do emprego dos reatores UASB desde o início da década de 1980, trouxe novas perspectivas para o tratamento dos esgotos sanitários no Brasil.

Apesar das inúmeras vantagens mencionadas, destaca-se que essa tecnologia ainda apresenta desafios de concepção, construção e operação a serem superados. Desse modo, para que a tecnologia UASB não caia em descrédito no Brasil, uma série de aprimoramentos deve ser realizada visando principalmente ao correto gerenciamento de lodo, escuma e gases odorantes oriundos dessas unidades de tratamento. Além disso, ressalta-se que grande parte das companhias de saneamento do país que possuem reatores UASB em seus sistemas de tratamento de esgotos não faz o armazenamento nem/ou o uso do biogás produzido, fazendo com que a energia química presente no metano seja desperdiçada e, em muitos casos, o biogás seja lançado na atmosfera sem nenhum tratamento, contribuindo para os problemas de aquecimento

global. Estima-se que somente o estado do Paraná possua produção de biogás de 89 mil m³.d⁻¹, representando um potencial químico para aproveitamento superior a 550 mil kWh.d⁻¹.

Ainda que pesem esses desafios a serem superados, ressalta-se que o emprego dessa tecnologia alavancou, mesmo ainda aquém do necessário, os índices de coleta e tratamento de esgotos em boa parte do território nacional, sobretudo no estado do Paraná. Para o futuro, acredita-se que os reatores UASB deverão continuar sendo a tecnologia de tratamento mais empregada no país, reduzindo de forma significativa os custos de construção e operação de ETEs,

possibilitando dessa forma que mais municípios brasileiros acessem sistemas de tratamento de esgoto.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Rietow, J.C.: Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição, Investigação, Metodologia. Aisse, M.M.: Escrita — Primeira Redação, Investigação, Conceituação, Validação. Baréa, L.C.: Investigação, Conceituação. Andreoli, C.V.: Escrita — Revisão e Edição, Validação. Possetti, G.R.C.: Conceituação, Validação.

REFERÊNCIAS

- AISSE, M.M. *Sistemas econômicos de tratamento de esgotos sanitários*. Rio de Janeiro: Editora ABES, 2000. 192 p.
- BARÉA, L.C. *Projeto compartilhando conhecimento: recomendações técnicas de projeto de estações de tratamento de esgoto*. Curitiba: Editora Sanepar, 2015. 147 p.
- BOLLMANN, H.A.; AISSE, M.M. Avaliação da aplicação de reatores anaeróbios de fluxo ascendente no tratamento de esgotos domésticos de pequenas comunidades. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 15., 1989, Belém. *Anais* [...]. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1989. p. 140-154.
- 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 odorantes. *Revista DAE*, v. 66, ed. esp., n. 214, p. 56-72, 2018. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.041>
- BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. *Atlas esgotos: despolição de bacias hidrográficas*. Brasília: ANA, 2017.
- CAMPOS, J.R. (Coord.). *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. Rio de Janeiro: Editora ABES, Projeto PROSAB, 1999. 443 p.
- CHERNICHARO, C.A.L. (Coord.). *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios*. Rio de Janeiro: Editora ABES, Projeto PROSAB, 2001. 220 p.
- 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, n. 214, p. 5-16, 2018. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.038>
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Grupo de Coordenação da SANEGRAN. SABESP inicia operação da primeira unidade de tratamento de esgotos do Programa SANEGRAN. *Revista DAE*, n. 129, p. 45-49, 1982.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO ESTADO DO PARANÁ (SANEPAR). *Comunicação Pessoal*. Acervo do Museu de Saneamento, 1983.
- ERICSSON, A.A. *Tratamento de esgoto sanitário em reator anaeróbio de lodo fluidizado (RALF)*. Curitiba: Editora Sanepar, 1985. 13 p.
- FRANCO, P.N.C. Aplicação do processo de aeração prolongada em Curitiba. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, p. 350-365, 1976.
- GOMES, C.S. Tratamento anaeróbio de esgoto sanitário: proposições baseadas em 8 anos de experiência e utilização pela Sanepar. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 15., 1989, Belém. *Anais* [...]. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1989. p. 155-168.
- GOMES, C.S.; AISSE, M.M.; OBLADEN, N.L. *Estudo técnico dos biodigestores anaeróbios alternativos: fundamentos teóricos do estudo*. Curitiba. Editora LHSAMA/PUCPR, 1981. 32 p.
- HASKONING, R. *Anaerobic treatment and re-use of domestic wastewater. Pilot Plant Study*, Cali, Colombia. 3. ed. Nijmegen: Royal Haskoning, 1984. 65 p.
- JORDÃO, E.P.; PESSÓA, C.A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 8. ed. Rio de Janeiro: Editora ABES, 2017. 916 p.
- LEITÃO, R.C.; SANTAELLA, S.T.; VAN HAANDEL, A.C.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. The effect of operational conditions on the hydrodynamic characteristics of the sludge bed in UASB reactors. *In: WORLD CONGRESS ON ANAEROBIC DIGESTION*, 12., 2010, Guadalajara, México. *Proceedings* [...]. Guadalajara, México: International Water Association, 2010.
- LETTINGA, G. *My Anaerobic Sustainability Story*. Amsterdã: Lettinga Foundation, 2014. 200 p.
- LETTINGA, G.; ROERSMA, R.; GRIN, P. Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperatures using a granular bed UASB reactor. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 25, n. 7, p. 1701-1723, 1983.
- LETTINGA, G.; VAN VELSEN, A.F.M.; HOBMA, S.; ZEEUW, W. Feasibility of anaerobic digestion for the direct treatment of, and the energy recovery from urban wastes. *Studies in Environmental Science*, v. 9, p. 97-109, 1981. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)71356-6](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)71356-6)
- 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 espuma. *Revista DAE*, v. 66, ed. esp., n. 214, p. 30-55, 2018. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.040>

- METCALF & EDDY. *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos*. 5. ed. Porto Alegre: Editora AMGH, 2016. 2008 p.
- MIKI, M.K. Dilemas do UASB. Seção: Práticas operacionais e de Empreendimento. *Revista DAE*, n. 183, p. 25-37, 2010.
- PATZA, M.G.B.; PAWLOWSKY, U.; GABARDO, M.T. Tratamento anaeróbio de vinhoto de mandioca pelo reator de leito de lodo granulado. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 12., 1983, Balneário Camboriú. *Anais [...]*. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1983. 33 p.
- POSSETTI, G.R.C.; JASINSKI, V.P.; ANDREOLI, C.V.; BITTENCOURT, S.; CARNEIRO, C. Sistema térmico de higienização de lodo de esgoto movido a biogás para ETEs de médio e pequeno porte. *In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 2012, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. *Anais [...]*. 2012.
- 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. (org.). Anaerobic reactors for sewage treatment: design, construction and operation*. Londres: IWA, 2019. p. 194-236.
- RIETOW, J.C.; WAGNER, L.G.; CARNEIRO, C.; AISSE M.M.; POSSETTI, G.R.C. Estudo comparativo entre alternativas de sistemas de secagem e higienização térmica de lodo para estações de tratamento de esgoto de médio e pequeno porte. *In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE ESTAÇÕES SUSTENTÁVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO, INCT ETEs Sustentáveis*, 1., 2018, Curitiba, Paraná, Brasil. *Anais [...]*. 2018.
- ROSENFELDT, S.; CABRAL, C.B.G.; PLATZER, C.; HOFFMANN, H.; FREITAS, D.; CRUZ, A.O. Análise da viabilidade econômica de ETE para geração de energia elétrica no Brasil. *In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA*, 2017, João Pessoa, Paraíba, Brasil. *Anais [...]*. 2017.
- ROSS, B.Z.L.; CARNEIRO, C.; MARQUES, C.J.; COSTA, F.J.O.G.; FROEHNER, S.; AISSE, M.M. Impacto da incorporação de espuma em lodo de esgoto com fins agrícolas. *Revista DAE*, v. 64, p. 6-18, 2016. <https://doi.org/10.4322/dae.2016.002>
- 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*. Tese (Doutorado em Energy Planning), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- VIEIRA, S.M.M. Anaerobic treatment of domestic sewage in Brazil: Research results and full-scale experience. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANAEROBIC DIGESTION*, 5., 1988, Bolonha. *Anais [...]*. 1988. p. 185-196.
- WAGNER, L.G.; POSSETTI, G.R.C.; CARNEIRO, C.; URBANETZ, J. Avaliação do desempenho operacional de duas configurações de um sistema térmico para higienização e secagem de lodos de esgoto movido a biogás e energia solar. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 29., 2017, São Paulo, São Paulo, Brasil. *Anais [...]*. 2017.
- WAGNER, L.G.; POSSETTI, G.R.C.; CARNEIRO, C.; URBANETZ, J. Sistema térmico de higienização e secagem térmica de lodo de esgoto movido a energia solar e biogás. *In: CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL*, 2015, São Paulo, São Paulo, Brasil. *Anais [...]*. 2015.
- WINSLOW, C.E.A.; PHELPS, E.B. Investigations on purification of Boston sewage. *Journal of Infection Diseases*, v. 8, n. 3, p. 259-288, 1911. <https://doi.org/10.1093/infdis/8.3.259>