

II-995 – APLICAÇÃO DE UM SENSOR ULTRASSÔNICO DE BAIXO CUSTO PARA O MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DE SÓLIDOS SUSPENSOS EM UM SISTEMA DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA-PLENA

Rafael Pessoa Santos Brochado⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Thiago de Alencar Neves⁽²⁾

Químico pela Universidade Federal de Mato Grosso, Doutor em Química pela Universidade Estadual de Campinas e Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

Lariza dos Santos Azevedo⁽³⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Mestre e Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Sócia-diretora do Centro de Referência em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto.

Carolina Gemelli Carneiro⁽⁴⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental e mestre em engenharia ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pesquisadora e engenheira de projetos do *Water technology group* na Universidade de Ciências aplicadas *NHL Stenden, Leeuwarden*, Países Baixos.

Luewton Lemos Felício Agostinho⁽⁵⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Saneamento pelo Departamento de Saneamento e Hidráulica da Universidade Federal do Ceará. Doutor (PhD) em física aplicada pela *Delft University of Technology*. Pós doutor pela *Wetsus European Center of Excellence for Sustainable Water Technology*. Professor e coordenador do *Water Technology Group* pela Universidade *NHL Stenden* da Holanda.

Endereço⁽¹⁾: Rua Bernardo Guimarães, 455- Funcionários - Belo Horizonte - MG - CEP: 30140-080- Brasil - Tel: (31) 99328-1517 - e-mail: rafaelrpsb@gmail.com.

RESUMO

O gerenciamento de lodo é um aspecto muito relevante na operação de estações de tratamento de esgoto (ETEs). Em sistemas de lodos ativados, é comum haver monitoramento diário (ou contínuo) de sólidos suspensos totais no tanque de aeração (SSTA). Se tal controle não for feito adequadamente, o tanque de sedimentação secundário pode operar em condições de sobrecarga, resultando na perda de sólidos para o efluente ou, ainda, prejudicar a remoção de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e nitrogênio. Existem muitos sistemas comercialmente disponíveis aplicados no monitoramento em tempo real de sólidos (*e.g.*, sensores ópticos ou ultrassônicos). Apesar de disponíveis comercialmente, a maior parte desses sensores tem um custo elevado e ainda existem problemas relacionados a operacionalidade dos mesmos e cuja assistência técnica pode ser dificultada por se tratarem de produtos estrangeiros. O problema mais relevante é o acúmulo progressivo de sólidos, que causa erros de medição. Neste trabalho, os autores investigaram a aplicação de um sensor ultrassônico (US) de baixo custo para monitoramento de SSTA em uma ETE de lodos ativados em escala plena localizada em *Leeuwarden* (Países baixos). O sensor testado é semelhante ao usado por Neves *et al.* (2021). As principais diferenças estão relacionadas a um sistema integrado de tratamento e aquisição de dados em tempos pré-definidos que permitiu o tratamento do sinal em tempo real. Os valores gerados pelo sensor foram comparados com um sensor óptico comercial instalado na mesma ETE e com os resultados obtidos de análises gravimétricas periódicas. Os resultados mostraram que as medições do sensor US, do sensor óptico e análise gravimétrica não apresentaram diferenças significativas no período de testes para uma significância de 5%. Os erros absolutos foram em média de 0,05% (sensor US) e 0,03% (sensor óptico) de SSTA em comparação com a análise gravimétrica. Ajustes na calibração do sensor e testes com maior variabilidade na concentração de lodo ainda são necessários para utilização do sensor de forma contínua em sistema SSTA e outras tipologias de tratamento.

PALAVRAS-CHAVE: lodo aeróbio, gerenciamento de lodo, atenuação do sinal, pulso-eco, tratamento de esgoto, monitoramento ETEs.

INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios de uma ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) é o monitoramento das condições operacionais de suas unidades. Esse aspecto é fundamental para controlar a qualidade do efluente final e atender aos aspectos regulatórios e ambientais. O monitoramento de sólidos, por exemplo, é essencial para evitar que haja sobrecarga deste parâmetro na ETE e consequentemente perda do mesmo para o efluente final, ocasionando na deterioração da qualidade do corpo hídrico receptor (VON SPERLING, 2007; LOBATO *et al.* 2018).

Os sistemas de lodos ativados são responsáveis pelo tratamento da maior parte dos esgotos de grandes centros urbanos no Brasil, com 354 unidades instaladas até 2020 (ANA, 2020). Para estes sistemas é recomendada uma frequência diária de monitoramento de sólidos suspensos totais (SST) nos tanques de aeração (VON SPERLING, 2007), realizada majoritariamente por meio de análise gravimétrica. Todavia, a mão de obra envolvida nas análises e coleta, o custo com membranas para filtração do licor misto e o tempo de secagem das amostras (1 hora) são aspectos que corroboram para que a frequência de monitoramento seja menor em grande parte das ETEs.

Sistemas de monitoramento de sólidos em tempo real são capazes de otimizar o controle operacional de ETEs de forma mais sistemática, com dados de monitoramento mais representativos e custo de operação inferior ao da análise gravimétrica, uma vez que os custos associados ao sensor são basicamente relacionados ao tempo do operador com a limpeza do mesmo. Atualmente no mercado existem sensores cujos custos variam entre R\$ 6.000,00 e R\$ 40.000,00 (BROCHADO, 2022), a depender da cotação do câmbio. Todavia, não existe opção nacional disponível para esses sensores, o que poderia não somente reduzir os custos finais de aquisição, mas também oferecer manutenção local especializada. Nesse contexto, o presente trabalho investigou a adoção de um sensor ultrassônico (US) de desenvolvimento híbrido (Brasil – Holanda) em um sistema de lodos ativados em escala-plena.

OBJETIVO

Avaliar o desempenho e operacionalidade de um sensor ultrassônico para medição em tempo real de SST em um sistema de lodos ativados em escala-plena em relação às medições de SST da análise gravimétrica e de um sensor óptico comercialmente disponível.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada no trabalho se baseou no trabalho realizado por Neves *et al.* (2021), quando o mesmo sensor foi utilizado em um reator UASB escala-piloto e demonstrou correlação positiva da atenuação do sinal com a análise gravimétrica de sólidos totais (limite de quantificação de até 1% de ST). Neste trabalho, dois aspectos diferenciam-se do trabalho de Neves *et al.* (2021): o fato dos testes terem sido conduzidos em escala-plena e a implementação de um sistema de coleta de dados de forma contínua que permitiu maior representatividade dos dados coletados.

O sensor ultrassônico utilizado é constituído de um transdutor de 200 kHz, uma superfície refletiva de vidro e um tubo PVC vazado de diâmetro de 55 mm, assegurando que a superfície de vidro seja mantida a uma distância fixa do transdutor, de forma que o fluxo de esgoto passe pela trajetória do sinal ultrassônico. O funcionamento do sensor ocorre por meio da técnica pulso-eco, que determina que quanto maior a quantidade de sólidos, maior a atenuação do sinal do eco que retorna ao transdutor. O transdutor é responsável por transformar a energia elétrica em mecânica na forma de ondas sonoras ultrassônicas e receber o seu eco transformando-a em energia elétrica novamente. A partir disso, o sinal recebido é filtrado e amplificado em uma caixa de controle, que contém também um sistema para o tratamento do sinal. Dessa forma, a área correspondente ao sinal gerado pode ser convertida em um valor numérico. A correlação entre o valor dessa área e a concentração de SSTA (Sólidos suspensos no tanque de aeração) foi utilizada para a calibração do sensor. A representação esquemática do princípio de funcionamento do sensor US é apresentada na Figura 1.

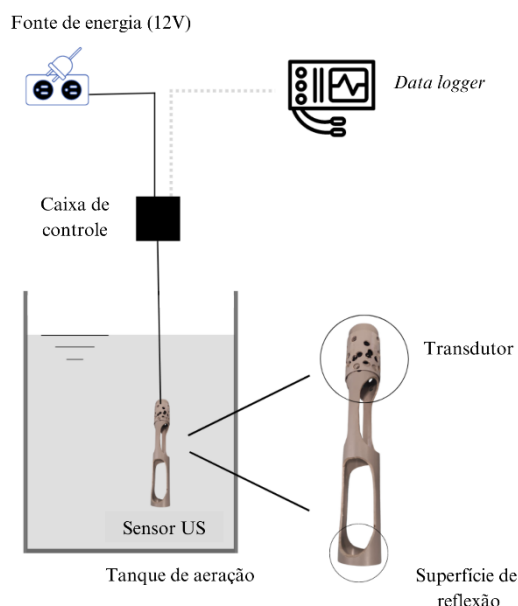


Figura 1: Representação esquemática do princípio de funcionamento do sensor ultrassônico investigado.

- **Local do teste**

O sensor US foi testado por 33 dias em uma ETE de lodos ativados localizada na cidade de *Leeuwarden* (Países baixos). A ETE é constituída por esteiras mecânicas (tratamento preliminar), carrosséis divididos em zonas aeróbias e anóxicas, decantadores secundários, digestores e adensadores de lodo. O sensor US foi posicionado em uma das unidades do carrossel, afastado da zona de mistura mecânica onde a aeração ocorre, a 50 m do sensor óptico já utilizado para monitoramento da ETE (Figura 2). Foi realizada a limpeza do sensor US antes de cada coleta para a análise gravimétrica de SSTA. Comparativamente, a limpeza do sensor óptico, no geral, era realizada 2 vezes na semana pelos próprios operadores da ETE. A frequência de limpeza é, todavia, uma variável a ser considerada e dependente das condições pluviométricas locais. Os resultados obtidos pelo sensor US foram comparados com os resultados obtidos pelo sensor óptico e pela análise gravimétrica (usada como referência).

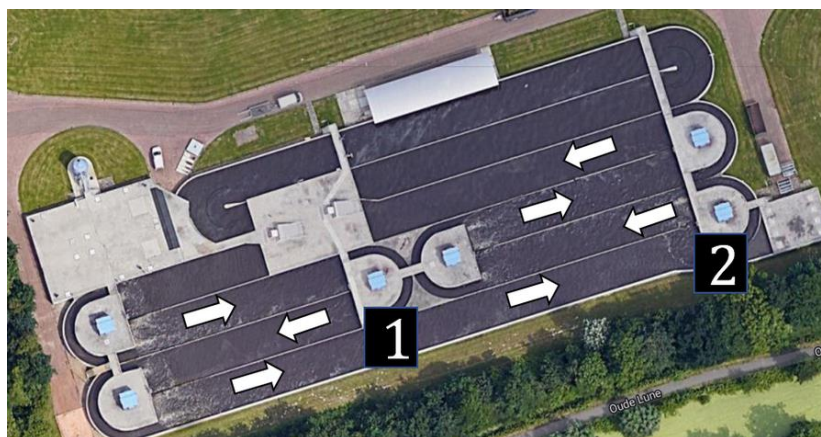


Figura 2: Unidade de Carrossel do sistema de lodos ativados da ETE *Leeuwarden*. Sendo, 1 - Posicionamento do sensor óptico e 2 - Posicionamento do sensor US.

Para a análise dos resultados, houve a exclusão de dados cuja medição era acima de 0,45% de SSTA. Tal critério foi adotado para reduzir o impacto que o acúmulo de sólidos teria na leitura do sensor. Já que é sabido que os

tanques de aeração dos sistemas de lodos ativados não devem operar com valores acima de 4500 mg.L⁻¹ (aproximadamente 0,45% de SST) (VON SPERLING, 2007). Por esse motivo, o critério de exclusão das medições dos dados obtidos pelos sensores com valores acima de 0,45% de SSTA é plausível. Esse critério, no entanto, apenas reduz e não garante a completa exclusão da influência do acúmulo de sólidos na medição de concentração de SSTA.

• Testes estatísticos

Para determinar se seriam utilizados testes estatísticos paramétricos ou não paramétricos, foi realizado teste *Shapiro Wilk* que indicou que a distribuição dos dados era normal com 95% de confiança para o grupo das medições referentes aos sensores e da análise gravimétrica. Para tanto, foram utilizados os dados pontuais obtidos antes do dia operacional 21 no momento de coleta para análise gravimétrica, portanto, com um n relativamente pequeno (n=6). O teste t pareado (paramétrico) foi utilizado considerando que as variáveis eram dependentes e submetidas em situações praticamente idênticas. Só foram comparados os dados referentes ao momento da coleta de amostras para análise gravimétrica. Apesar do sensor óptico estar localizado a cerca de 50 metros do sensor ultrassônico e do local de coleta para análise gravimétrica, esse fator foi considerado desprezível para os testes estatísticos propostos, devido à elevada aproximação de um sistema de mistura completa na unidade testada.

As hipóteses do teste t pareado realizado entre cada uma das 3 variáveis pode ser descrito por:

H0: A diferença entre as médias é igual a zero, para uma significância de 5%.

Ha: A diferença entre as médias não é igual a zero, para uma significância de 5%.

RESULTADOS OBTIDOS

Nas Figura 3 e Figura 4 podem ser observados os resultados obtidos durante os testes em escala-plena realizados na ETE localizada no município de *Leeuwarden*. Figura 3 é possível verificar a variabilidade das medições para ambos os sensores e o teste gravimétrico ao longo de 33 dias de operação. De forma similar, pode ser observada na Figura 4, a variabilidade temporal dos dados, sendo possível identificar os períodos em que os resultados obtidos com o sensor US estiveram em maior conformidade com o sensor óptico e o teste gravimétrico, além da identificação de períodos em que os sensores demandavam limpeza, caracterizados por uma superestimação dos valores de SSTA. Já na Figura 5 é possível verificar o acúmulo de sólidos aderidos ao tubo de suporte do sensor 2 dias após o procedimento de limpeza utilizado previamente às análises.

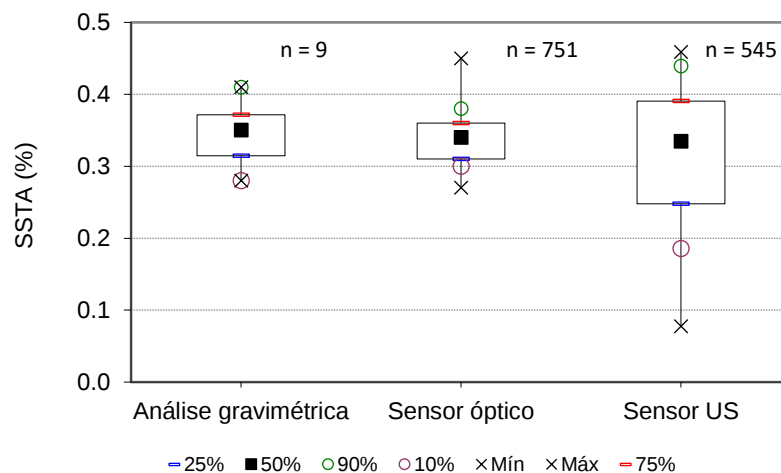


Figura 3: Box-plot da concentração de sólidos suspensos obtidas a partir de análise gravimétrica, sensor óptico e sensor US referente a 33 dias de operação. O número de amostras (n) realizadas é apresentado para cada método avaliado.

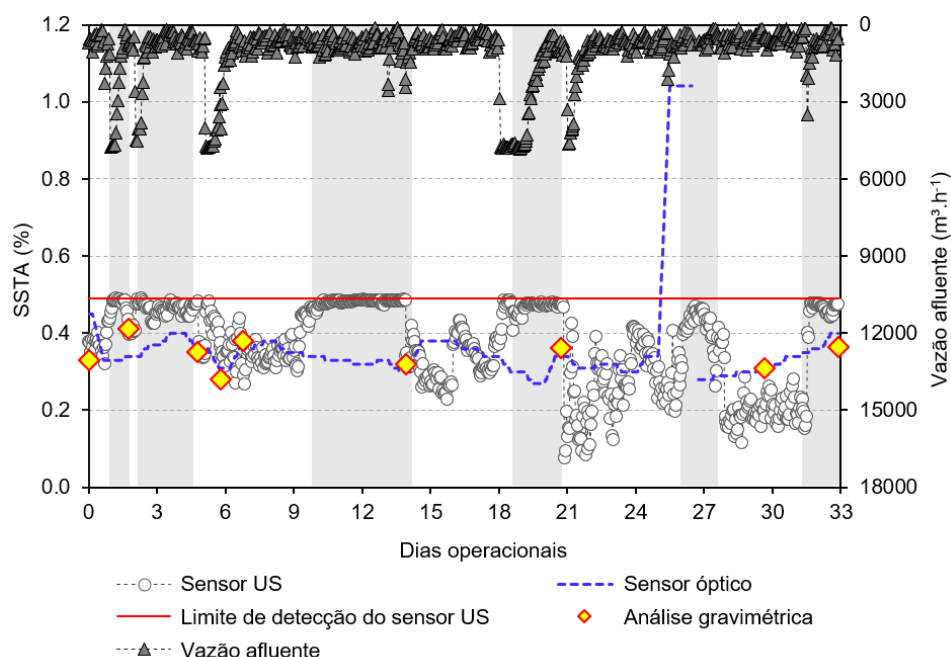


Figura 4: Série temporal das medições do sensor US, óptico e análise gravimétrica de SSTA e vazão afluyente. As faixas cinzas representam os momentos em que o sensor US teve o sinal completamente atenuado devido ao bloqueio físico por sólidos aderidos ao tubo PVC suporte do sensor.



Figura 5: Sólidos acumulados na superfície do tubo PVC de suporte do sensor US na ETE Leeuwarden.

Na Tabela 1 são mostrados os dados obtidos com o sensor US e comparados com o sensor óptico e ao teste gravimétrico padrão, desconsiderando os períodos em que os sensores demandavam limpeza e o período em que os valores medidos pelo sensor US foram demasiadamente subestimados (a partir do dia operacional 21). A partir dos dados apresentados, pode-se observar que o erro absoluto de ambos os sensores foi similar, variando de 0,01 a 0,10%. O teste t pareado realizado não detectou diferenças significativas ($p > 0,05$) entre as médias das medições correspondentes a análise gravimétrica, sensor óptico e ultrassônico, portanto, não foi possível rejeitar H_0 .

Tabela 1: Comparativo das medidas e do erro absoluto do sensor óptico e sensor US em relação a análise gravimétrica de SSTA do sistema de lodos ativados da ETE Leeuwarden.

Gravimétrico (SSTA - %)	Sensor US (SSTA - %)	Erro absoluto do sensor US (SSTA %)	Sensor óptico (SSTA - %)	Erro absoluto do sensor óptico (SSTA %)	Erro absoluto entre os sensores (SSTA %)
0,33	0,38	0,05	-	-	-
0,41	0,40	0,01	0,34	0,07	0,06

Gravimétrico (SSTA - %)	Sensor US (SSTA - %)	Erro absoluto do sensor US (SSTA %)	Sensor óptico (SSTA - %)	Erro absoluto do sensor óptico (SSTA %)	Erro absoluto entre os sensores (SSTA %)
0,35	0,38	0,03	0,36	0,01	0,02
0,28	0,38	0,10	0,31	0,03	0,07
0,38	0,29	0,09	0,36	0,02	0,07
0,32	0,34	0,02	0,30	0,02	0,04
		$\bar{X}$ 0,05		$\bar{X}$ 0,03	$\bar{X}$ 0,05

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos mostra que a mediana dos valores de SSTA medidos pelos dois sensores e pela análise gravimétrica não apresentaram diferenças significativas para uma significância de 5% (Figura 3). No entanto, os valores do sensor US apresentaram uma maior amplitude, como pode-se observar a partir da faixa interquartil (percentil 25% - 75%). Mesmo assim, a maior parte das medidas para ambos os sensores e também para a análise gravimétrica ficou situada dentro da faixa dos valores típicos da literatura, entre 0,2% - 0,4% (METCALF & EDDY, 2003), indicando que o sistema estava operando de maneira adequada no que diz respeito ao controle de sólidos.

Na Figura 4 verifica-se que as medidas obtidas pelos sensores foram similares na maior parte do tempo se comparadas aos resultados obtidos a partir da análise gravimétrica. É possível observar que o sensor US frequentemente atingiu seu limite de detecção (0,48%). Isso porque sólidos provenientes do esgoto bruto e que não foram retidos no tratamento preliminar, especialmente cabelos, ficam aderidos ao suporte do sensor e bloqueiam o sinal, ocasionando uma falsa leitura de concentração elevada de sólidos (Figura 5). Tal situação também é observada no sensor óptico, cujo princípio de funcionamento se baseia na atenuação do sinal, no entanto, ao invés do som é utilizado a luz. No dia operacional 25, o sensor óptico passou a medir concentrações de SSTA de até 1% (vide Figura 4). Tal fato se deveu à falta de limpeza pelo operador responsável, ou seja, as medidas durante esse período foram superestimadas, da mesma forma como ocorreu com o sensor US. A superestimativa dos sensores pôde ser confirmada pelo teste gravimétrico.

O limite de detecção do sensor ultrassônico pode ser ajustado conforme as características do lodo do qual se pretende medir a concentração de sólidos. Isso pode ser feito alterando-se a amplitude do sinal diretamente na caixa de controle ou ainda ajustando a distância e a angulação da superfície refletora em relação ao transdutor. Vale destacar, no entanto, que existe uma distância mínima para que não haja sobreposição do sinal inicial e do refletido, o que impede um tratamento apropriado do mesmo (BROCHADO, 2022).

A frequência de limpeza dos sensores era similar, entretanto, o acúmulo de sólidos no sensor ultrassônico foi superior, o que evidencia a necessidade de aprimoramento do design do suporte do mesmo. Ademais, a utilização de grade/proteção logo a montante da localização do sensor US poderia reduzir a quantidade de sólidos aderidos ao seu suporte. Porém, deve ser avaliado o impacto de tal proteção na representatividade do fluxo do licor misto pelo sensor US, uma vez que a proteção pode ocasionar em um redirecionamento de fluxo e alteração das características de distribuição dos sólidos momentaneamente.

Outra informação relevante obtida pelas medições é o fato de o sensor US ter subestimado a concentração de SSTA a partir do dia operacional 21 (Figura 4). Assim, valores inferiores a 0,1% foram registrados, embora a análise gravimétrica e o sensor óptico tenham mantido suas medições em torno de 0,3% de SSTA. Tal resultado evidencia a necessidade de calibração do sensor US a cada 21 dias. Novos testes devem ser feitos para confirmar o tempo de calibração necessário.

Uma preocupação observada por Neves *et al.* (2021) era a influência que a variação da vazão em um reator escala-plena teria na precisão dos dados obtidos a partir do uso do sensor. Conforme demonstrado na Figura 4, a variação da vazão foi da ordem de 10 até 4000 m³.h⁻¹ e não resultou em uma mudança na tendência das medidas feitas pelo sensor ultrassônico ou pelo óptico.

A Tabela 1 mostra que no geral o erro médio absoluto do sensor US e do sensor óptico foram similares (0,05% e 0,03%, respectivamente) em relação à análise gravimétrica e que não houve diferença significativa entre as medições ($p > 0,05$). O erro máximo absoluto do sensor óptico foi 0,07%, enquanto do sensor ultrassônico foi 0,10% de SSTA. Tais erros podem estar associados a um bloqueio parcial do sinal de ambos os sensores

decorrentes de um acúmulo parcial de sólidos. Outra possibilidade é o erro humano relativo à execução da análise gravimétrica, que engloba amostragem e análise laboratorial.

Há de se destacar que o desempenho do sensor US pode ser aprimorado com a aplicação de algoritmos de tratamento de sinal mais complexos ou com ferramentas de IA (inteligência artificial). É importante ressaltar também que variações na temperatura e a presença de bolhas interferem no sinal (TECHAVIPOO *et al.*, 2004; HAN *et al.* 2020) e devem ser investigadas e consideradas no tratamento deste.

De maneira geral, os resultados mostram que o sensor US pode se tornar uma ferramenta relevante para o desenvolvimento da tecnologia nacional em pró do monitoramento em tempo real nas ETES brasileiras. *A posteriori*, os sensores podem ser usados para operação de ETES automatizadas, isto é, com ações operacionais programadas baseadas nas medições dos sensores. Além do benefício operacional providenciado às companhias de saneamento, a utilização de sensores aliados a sistemas modernos de transmissão de dados, como a internet das coisas (IoT) pode, futuramente, favorecer a um melhor controle e fiscalização por parte das agências reguladoras, que podem ser informadas em tempo real das condições operacionais das ETES.

CONCLUSÕES

As medições do sensor US foram comparadas com um sensor óptico comercial e validadas pela análise gravimétrica de SSTA. Os resultados obtidos com ambos os sensores foram coerentes com as medições feitas pela análise gravimétrica. A concentração de SSTA oscilou em torno de 0,3% o que corresponde a valores típicos da literatura (0,2%-0,4%) para o bom funcionamento do tanque de aeração do sistema de lodos ativados. As medições dos sensores comparados a análise gravimétrica não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$), sendo que o erro absoluto médio em relação à análise gravimétrica foi de 0,03% e 0,05% para o sensor US e o sensor óptico, respectivamente. Os resultados foram promissores, demonstrando a viabilidade da aplicação do sensor US no monitoramento de SST em tempo real para as ETES. Entretanto, ainda devem ser avaliadas estratégias para aprimoramentos e aplicação comercial do sensor, em especial em relação à frequência de calibração e redução do acúmulo de sólidos no suporte de reflexão ultrassônica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio financeiro recebido da *Regieorgaan* SIA, da Fundação *Oranjewoud* e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Pelo apoio técnico da Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA e da *Wetterskip Fryslân*. E do apoio técnico e financeiro da *YNOVIO B.V.*, do *Lamp-Ion B.V.*, do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto (INCT ETES Sustentáveis), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e da *NHL Stenden Hogeschool*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Atualização da base de dados de estações de tratamento de esgoto no Brasil. Brasília: Atlas esgoto (2020).
2. APHA/AWWA/WEF. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 23 ed.; American Public Health Association, 266 (2017).
3. BROCHADO, R.P.S. *Real time monitoring of solids by a low-cost ultrasonic sensor: signal analysis and application in full-scale activated sludge systems and Uasb reactors*. Dissertação de mestrado – Programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte, julho de 2022.
4. HAN, JING.; LV, SHUAI.; WU, ZHONGPENG.; ZHANG, MINGWEI.; BAI, JIN. *Study on measurement of sound attenuation coefficient in bubble wake by pool*. E3S Web Conf, 206, 03013. doi:10.1051/e3sconf/202020603013. (2020).
5. LOBATO, L.C. S.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; DA 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. Sabesp: Revista DAE, [s.l.], v. 66, n. 214, p.30-55. (2018).
6. METCALF & EDDY, I. *Wastewater engineering : treatment and reuse*, 4 ed.; McGraw-Hill, (2003).

7. NEVES, P.N.P.; AZEVEDO, L.S.; HOEP, M.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; WIERSMA, M.; FERREIRA, R.N.; WAGTERVELD, R.M.; YNTEMA, D.; CHERNICHARO, C.A.L.; AGOSTINHO, L.L.F. *Real-Time Determination of Total Solids in UASB Reactors Using a Single Emitter Ultrasonic Sensor*. *Water*, 13. doi:10.3390/w13111437. (2021).
8. TECHAVIPOO, U.; VARGHESE, T.; CHEN, Q.; STILES, T.; ZAGZEBSKI, J.; FRANK, G. *Temperature dependence of ultrasonic propagation speed and attenuation in excised canine liver tissue measured using transmitted and reflected pulses*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 115, 2859–2865. doi:10.1121/1.1738453. (2004).
9. VON SPERLING, M. *Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors*; IWA Publishing (2007).