

Fuzzy Logic Application in Multi-Period Performance Analysis of a SWTP

Wendell Q. Lamas and Giorgio E. O. Giacaglia

Abstract — A preliminary study on artificial intelligence techniques applied to analyze a small wastewater treatment plant (SWTP), which is installed at FEG-UNESP, using fuzzy logic to take advantage of biogas produced through wastewater treatment for electric power generation, where different wastewater flows during small plant dairy work were considered, is the goal for this work. This study began with sub-systems identification. After that, this information was used to elaborate on the problem formulation, and they were organized as fuzzy rules representation for small WTP, with multi-period characteristics. After all, the system is simulated with MATLAB®'s Fuzzy Logic Toolbox™, using the Mamdani algorithm. Only wastewater flow and gasometer output valve were considered for the first simulation. Biogas volume in the gasometer was included in a second one. The first results pointed to efficiency in this technology use, which uses verbal language to represent information from staff and makes it so easy. Based on this, it is possible to conclude that a supervisory and control system for the small wastewater treatment plant (SWTP) is fully feasible.

Index Terms — Electric power generation; energy system optimization; fuzzy logic; multi-period criterion; small wastewater treatment plant.

I. INTRODUÇÃO

No Brasil, há um quadro muito desfavorável com relação à rede de esgoto e ao seu tratamento, onde menos de 55 % da população urbana tem rede de esgoto, sendo que menos de 20 % desse esgoto é tratado [1]. Concomitantemente, há o aumento da contaminação dos corpos d'água, principalmente pelo descarte do esgoto *in natura*, o que aponta para uma muito provável carência de água potável e para o descarte na atmosfera do biogás originado nesse tratamento, o que é nocivo ao meio ambiente, principalmente no tocante aos gases de estufa.

Os materiais que constituem o esgoto incluem resíduos alimentícios, esgoto sanitário e dejetos animais, que são substratos possíveis para a produção de gás metano por tratamento anaeróbio [2]. A partir dessa característica, um sistema composto por tratamentos anaeróbio, aeróbio e anóxico do esgoto pode ser considerado como uma possibilidade viável, de baixo investimento e de grande benefício à população onde a água tratada pode ser utilizada para ferti- irrigação, o que diminui o uso de água potável para esse fim; o biofertilizante gerado a partir da separação dos resíduos

sólidos, por processo anóxico, também pode ser aproveitado em áreas agrícolas; e o gás gerado pelo processo anaeróbio pode ser utilizado para acionamento de um motor de combustão interna (MCI) que produz energia elétrica para, no mínimo, autossuficiência energética da miniestação de tratamento de esgoto [3].

Em [2] se discute a respeito das atuais condições do tratamento de esgoto no Brasil e se propõe uma comparação entre cinco tipos de pós-tratamento para reatores anaeróbios. Em uma série de notas técnicas [4]–[9], a SABESP divulgou estudos realizados por renomados pesquisadores da área sanitária com o intuito de pontuar uma série de características de reatores UASB, detalhes de projetos, problemas detectados, soluções para os mesmos, etc.

Características termodinâmicas de estações de tratamento de esgoto são apresentadas por vários autores [10]–[13], como a respeito de alternativas da disposição do material orgânico remanescente [14], da redução do material orgânico [15], sobre a utilização do biogás produzido no processo anaeróbico [16], [17], a modelagem termodinâmica [10], [18] e a associação de um sistema de cogeração a uma ETE [12], [19].

Em [20] é apresentado um problema de otimização multiobjetivo do gerenciamento de efluentes líquidos de uma indústria química e em [21] um modelo otimização *fuzzy* onde o consumo de energia e a qualidade do efluente de uma ETE são os objetivos do mesmo.

Vários autores têm desenvolvido trabalhos práticos e teóricos sobre conjuntos e lógica *fuzzy*, além de temas correlatos [22]–[32], especialmente com aplicações voltadas à área de tratamento de efluentes [33]–[39].

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo preliminar sobre a aplicação de técnicas de inteligência artificial, mais especificamente de lógica difusa, para a análise com vistas à otimização do funcionamento da miniestação de tratamento de esgoto (miniETE) instalada no campus Guaratinguetá da UNESP, maximizando o aproveitamento do biogás produzido durante o tratamento do esgoto para a geração de energia elétrica, considerando as diferentes vazões de esgoto durante o período diário de funcionamento da miniETE.

Essa análise visa corroborar os critérios multi-períodos adotados, por meio de observação do fluxo de pessoas na cantina e no prédio da administração (que fornecem o material para tratamento na miniETE), a serem implantados, futuramente, em um sistema de controle baseado nas regras de inferência estabelecidas.

W. Q. Lamas, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 12602-810, Lorena, São Paulo, Brasil (e-mail: lamaswq@gmail.com).

G. E. O. Giacaglia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, 12060-440, Taubaté, São Paulo, Brasil (e-mail: giacaglia@gmail.com).

II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Para a miniestação de tratamento de esgoto (miniETE), implantada no campus Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista (Figura 1), foi dimensionado um sistema de autogeração, para aproveitamento do biogás produzido na própria estação, que tem a finalidade de gerar energia elétrica para o sistema. Também se utiliza a queda d'água da parte aeróbia para produzir energia mecânica para o sistema de geração que é parte integrante dessa planta de tratamento de esgoto. Há também a perspectiva do uso do efluente tratado (biofertilizante) para a ferti-irrigação de um bosque de plantas em formação, existente no campus de Guaratinguetá.



Fig. 1. Miniestação de tratamento de esgoto implantada na UNESP.

O sistema de autogeração é composto por um motor de combustão interna (MCI), refrigerado a ar, o qual será acionado pela combustão do biogás oriundo do gasômetro que acumula o biogás produzido nos biodigestores anaeróbios e o condiciona à pressão adequada para ser utilizado no sistema. A Figura 2 ilustra o diagrama de blocos da miniestação de tratamento de esgoto associando a autogeração a biogás e a queda d'água.

O esgoto proveniente dos prédios da administração e da cantina do Campus entra no sistema pela caixa de gordura, que é o tratamento preliminar das águas residuárias, eliminando os sólidos mais grosseiros, por exemplo blocos de gordura, via gradeamento.

A seguir, o esgoto passa por um sistema anaeróbio, composto por três biodigestores tipo manta de lodo, que, por meio de um separador de fases em formato helicoidal, separa os resíduos sólidos (lodo), do biogás e da água do esgoto (pré-tratada). Nesse estágio, o lodo excedente é retirado e torna-se biofertilizante. A outra parte do lodo é mantida, pois os micro-organismos ali presentes, com predominância do gênero *Methanosaeta*, segundo [40], digerem a matéria orgânica presente no esgoto e produzem o biogás. Esse biogás é transferido ao gasômetro onde é concentrado e colocado à pressão apropriada para alimentar o MCI, que gera energia elétrica suficiente para manter pequenos sistemas, como uma sala de controle, a iluminação, uma bomba etc.

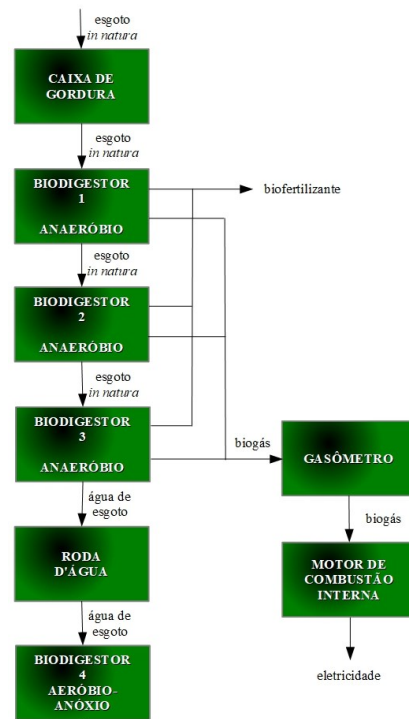


Fig. 2. Diagrama de blocos da miniETE.

A água do esgoto segue o fluxo do sistema até o quarto biodigestor, aeróbio-anóxico, onde micro-organismos aeróbios digerem a matéria orgânica que não foi digerida anaerobicamente, além de transformar o nitrogênio amoniacal em nitrato. Cabe aos micro-organismos anóxicos presentes nesse biodigestor transformar o nitrato em nitrogênio gasoso e remover parte do fósforo na forma de biomassa bacteriana do lodo. Nesse estágio, a água em condição de reuso passa por uma roda d'água que gera potência mecânica a ser utilizada no funcionamento do aerador, o qual supre o biodigestor aeróbio de ar para as bactérias. A água em condição de reuso (tratada) pode ser utilizada na ferti-irrigação de área verde.

Está previsto que a miniETE receba diariamente 70 m³ de esgoto, a uma vazão de 4,28 kg/s, que são destinados a três biodigestores anaeróbios, com a mesma capacidade de armazenamento e tratamento do esgoto, porém geram frações diferenciadas dos 24 Nm³/dia de biogás (vazão de 1,47 kg/s) que são transferidos para o gasômetro associado ao sistema. Esse gasômetro, a sua vez, envia o biogás para um conjunto motor-gerador de capacidade nominal de 5,5 kW, contudo atuando no sistema a 4 kW, por 10 horas de trabalho ao dia, para alimentação do aerador que fornece ar para o quarto biodigestor, desta feita aeróbio, que trata o efluente antes que esse seja transferido para o estágio de purificação anóxia, onde é realizada a separação da água e do lodo (biofertilizante). Essa água pode ser utilizada para ferti-irrigação ou para aquecimento, entrando no trocador de calor a uma vazão de 2 kg/s, a 25 °C, saindo do mesmo a 85 kg/h (0,024 kg/s), já com 60 °C.

Durante o dia, contando das 8h00 às 18h00, a demanda de efluentes varia a cada hora, seguindo a relação percentual: 15,

10, 5, 5, 25, 15, 10, 5, 5 e 5. Caso o gasômetro esteja atuando em sua máxima capacidade de volume e pressão do biogás ali armazenado, as válvulas de saída dos biodigestores anaeróbios se fecham (sinal binário 1). No caso contrário, ou seja, durante o fluxo normal de biogás, essas válvulas acendem à condição de abertas (sinal binário 0).

III. SOLUÇÃO PROPOSTA

Este trabalho foi iniciado com a identificação das partes constituintes do sistema a ser estudado, representadas na Figura 2, sendo relacionadas suas características termo e fluidodinâmicas [41]. A seguir, foi observada especificamente a vazão do esgoto a ser tratado na miniETE em diversos períodos do dia, dentro do horário de funcionamento previsto para a miniETE e o acionamento do MCI, como mencionado na seção II.

Essas informações são utilizadas para elaborar a formulação do problema, que é organizada de forma a representar as regras difusas pertinentes ao funcionamento previsto da miniETE, com características de multi-período. Por fim, o sistema é simulado, com uso do Fuzzy Logic Toolbox™ do aplicativo MATLAB®, sob o algoritmo Mamdani.

Na simulação, são considerados a vazão do esgoto, a quantidade de biogás no gasômetro e a condição da válvula na saída do gasômetro.

IV. RESULTADOS

Para a simulação são estabelecidas as 12 regras a seguir:

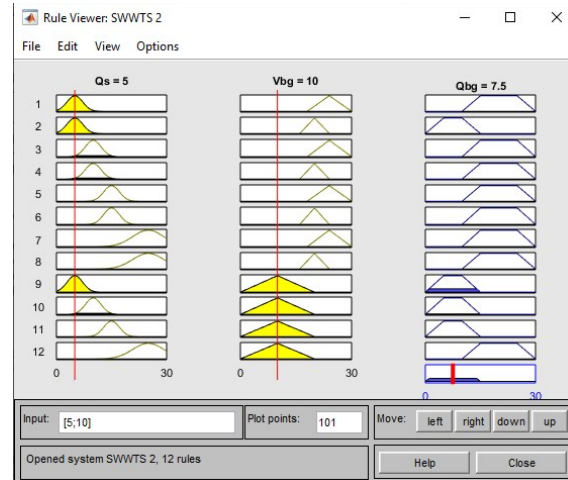
- 1) If (Qs is N) and (Vbg is Z) then (Qbg is 1) (0.2);
- 2) If (Qs is N) and (Vbg is NA) then (Qbg is 0) (0.2);
- 3) If (Qs is N) and (Vbg is N) then (Qbg is 0) (0.2);
- 4) If (Qs is Z) and (Vbg is Z) then (Qbg is 1) (0.4);
- 5) If (Qs is Z) and (Vbg is NA) then (Qbg is 1) (0.4);
- 6) If (Qs is Z) and (Vbg is N) then (Qbg is 0) (0.4);
- 7) If (Qs is PB) and (Vbg is Z) then (Qbg is 1) (1);
- 8) If (Qs is PB) and (Vbg is NA) then (Qbg is 1) (1);
- 9) If (Qs is PB) and (Vbg is N) then (Qbg is 0) (1);
- 10) If (Qs is P) and (Vbg is Z) then (Qbg is 1) (0.8);
- 11) If (Qs is P) and (Vbg is NA) then (Qbg is 1) (0.8);
- 12) If (Qs is P) and (Vbg is N) then (Qbg is 1) (0.8).

A partir dessas regras e dos valores pré-definidos para a vazão de esgoto, para a vazão do biogás e para o estado da válvula, de acordo com o volume do biogás produzido, são realizadas simulações para as quatro vazões estimadas, sejam 5 %, 10 %, 15 % e 25 % do volume total, relacionando-as ao volume estimado para cada condição. As Figuras 3 a 6 ilustram o comportamento da válvula reguladora do volume do biogás no gasômetro para as condições estabelecidas (1,2 Nm³ para início do acionamento do conjunto motor-gerador).

As Figuras 3(a), 3(b) e 3(c) ilustram a simulação para uma vazão de 5 % do previsto para o esgoto, com volumes de biogás de 10 Nm³, 20 Nm³ e 24 Nm³.

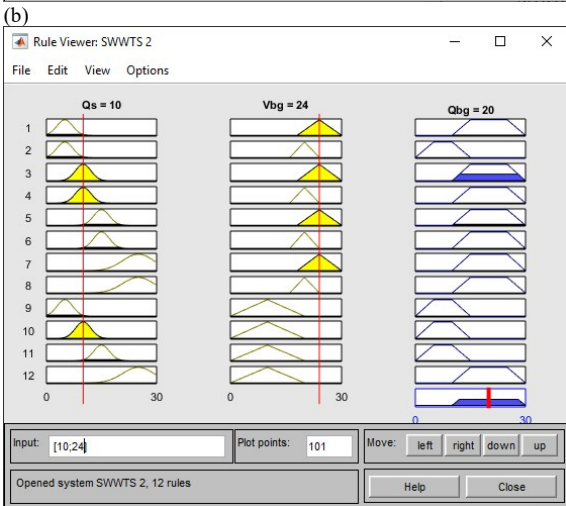
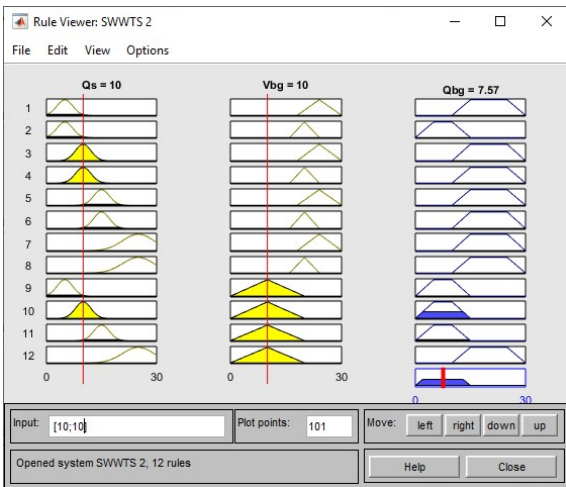
Elas possibilitam observar a dependência direta da abertura da válvula ao volume do biogás, independentemente do baixo fluxo de esgoto. Nesse ponto, o armazenamento de biogás no gasômetro é vital para o funcionamento do conjunto motor-

gerador.



(c) Fig. 3. Simulação para 5 % da vazão total do esgoto: 10 Nm³, 20 Nm³ e 24 Nm³ de biogás no gasômetro.

As Figuras 4(a), 4(b) e 4(c) ilustram a simulação para uma vazão de 10 % do previsto para o esgoto, com volumes de biogás de 10 Nm³, 20 Nm³ e 24 Nm³.

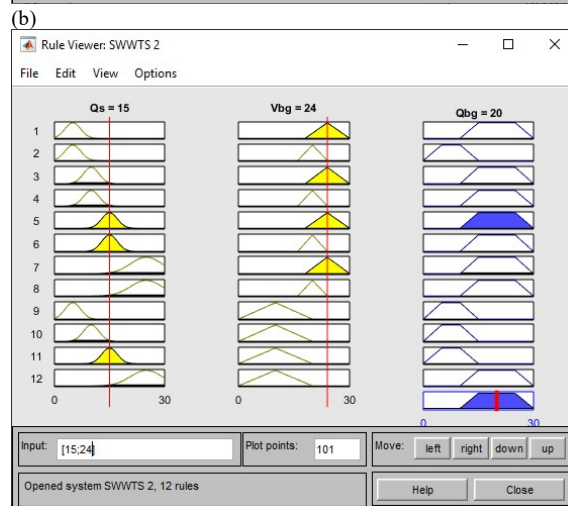
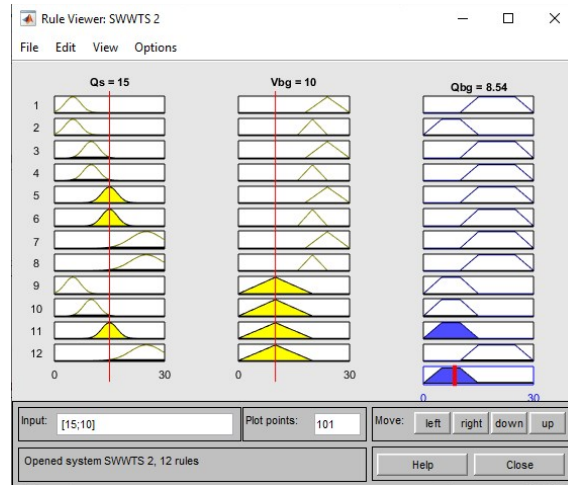


(c)
Fig. 4. Simulação para 10 % da vazão total do esgoto: 10 Nm³, 20 Nm³ e 24 Nm³ de biogás no gasômetro.

As Figuras 4(a), 4(b) e 4(c) corroboram o observado nas Figuras 3, porém, o aumento do fluxo de esgoto propiciou um aumento discreto no volume de biogás. Essa característica está relacionada com a disponibilidade e material orgânico que foi aumentada com a vazão de esgoto. Assim, as bactérias produzirão mais biogás.

As Figuras 5(a), 5(b) e 5(c) ilustram a simulação para uma

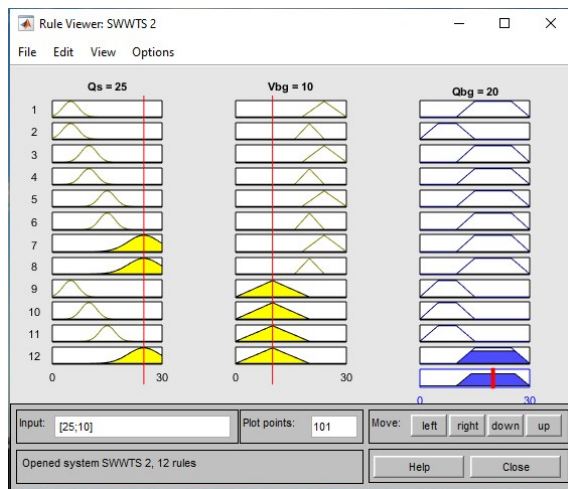
vazão de 15 % do previsto para o esgoto, com volumes de biogás de 10 Nm³, 20 Nm³ e 24 Nm³.



(c)
Fig. 5. Simulação para 15 % da vazão total do esgoto: 10 Nm³, 20 Nm³ e 24 Nm³ de biogás no gasômetro.

Nas Figuras 5 observa-se a tendência das condições anteriores, inclusive que, nos três cenários iniciais, há uma tendência para as condições máximas (24 Nm³) que a vazão de biogás se estabilize em 20 Nm³.

As Figuras 6(a), 6(b) e 6(c) ilustram a simulação para uma vazão de 25 % do previsto para o esgoto, com volumes de biogás de 10 Nm³, 20 Nm³ e 24 Nm³.



(c)
Fig. 6. Simulação para 25 % da vazão total do esgoto: 10 Nm³, 20 Nm³ e 24 Nm³ de biogás no gasômetro.

Nas Figuras 6 observa-se que a condição de 25 % de vazão do esgoto mantém, ao menos, o equivalente a um dos biodigestores anaeróbios em termos de produção de biogás, o

que proporciona a estabilização da vazão de biogás em 20 Nm³ para as três condições de volume.

A Tabela I apresenta a síntese dos resultados obtidos para a simulação proposta.

TABELA I
RESULTADOS OBTIDOS PARA AS PROPORÇÕES ESTABELECIDOS

| Entradas | | Saída |
|----------|------------------------|------------------------|
| Qs [%] | Vbg [Nm ³] | Qbg [Nm ³] |
| 5 | 10 | 7,5 |
| | 20 | 11,4 |
| | 24 | 20 |
| 10 | 10 | 7,57 |
| | 20 | 19,7 |
| | 24 | 20 |
| 15 | 10 | 8,54 |
| | 20 | 20 |
| | 24 | 20 |
| 25 | 10 | 20 |
| | 20 | 20 |
| | 24 | 20 |

Vale salientar que o volume do biogás e o volume do fluxo de esgoto são, respectivamente, 24 Nm³ e 70 m³, estabelecidos em projeto, mencionados na seção II. Os resultados obtidos estão ligados diretamente à capacidade nominal máxima do gasômetro (24 Nm³) e a outros fatores diversos, como a qualidade do material, o tipo e a quantidade de bactérias depositadas nos biodigestores, a temperatura nos biodigestores, o seu tempo de retenção hidráulica, entre outros. Nesse caso específico, o método de defuzificação (centróide) associado às regras “ativadas” nas condições pontuais da simulação, fizeram com que o resultado tendesse a estabilizar em 20 Nm³.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho propiciou observar o desempenho de regras difusas aplicadas a um subsistema específico da miniETE implantada na FEG-UNESP.

Para as condições especificadas foram definidos parâmetros e valores típicos para períodos do dia, coincidentes com o horário determinado para acionamento do MCI. Para esse cenário foram adotadas regras para o funcionamento da válvula de controle do fluxo de biogás, as quais foram transpostas para a ferramenta de lógica difusa do MATLAB®, com o intuito de simular as condições estabelecidas para os cenários configurados.

Foi possível observar que os critérios adotados se mostram plenamente satisfatórios para essas condições e são uma ferramenta plenamente viável a ser aplicada para controle dos subsistemas integrantes da miniETE, sendo necessárias pequenas adequações às características pontuais de cada um.

Outrossim, essa metodologia pode ser plena e eficientemente utilizada para análise do comportamento dos subsistemas da miniETE.

AGRADECIMENTOS

Dr. Wendell de Queiróz Lamas agradece por sua bolsa de produtividade em pesquisa, concedida pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por

meio do processo número 300992/2018-1.

Dr. Giorgio E. O. Giacaglia agradece por sua bolsa de produtividade em desenvolvimento tecnológico e extensão inovadora, concedida pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do processo número 314689/2018-4.

REFERÊNCIAS

- [1] Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), “Série Histórica,” Brasília, DF, 2018.
- [2] E. P. Jordão and P. Além Sobrinho, “Pesquisa e Experiência com Pós-tratamento para Reatores UASB no Brasil.” São Carlos, SP, pp. 1–13, 2004.
- [3] W. de Q. Lamas, J. L. Silveira, and G. E. O. Giacaglia, *Análise Termoeconômica de uma Miniestação de Tratamento de Esgoto com Autossuficiência Energética*. Beau Bassin: Novas Edições Acadêmicas, 2018.
- [4] C. A. de Chernicharo, T. B. Ribeiro, E. S. Pegorini, G. R. C. Possetti, M. K. Miki, and S. N. de Souza, “Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 1: Tópicos de Interesse,” *Rev. DAE*, vol. 66, no. 214, pp. 5–16, 2018.
- [5] T. B. Ribeiro, L. C. da S. Lobato, S. N. de Souza, E. S. Pegorini, and C. A. de L. Chernicharo, “Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 2: Tratamento preliminar, bombeamento e distribuição de vazão,” *Rev. DAE*, vol. 66, no. 214, pp. 17–29, 2018.
- [6] L. C. da S. Lobato, T. B. Ribeiro, B. S. da Silva, C. A. D. Flórez, P. N. P. Neves, and C. A. de L. Chernicharo, “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,” *Rev. DAE*, vol. 66, no. 214, pp. 30–55, 2018.
- [7] E. M. F. Brandt *et al.*, “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,” *Rev. DAE*, vol. 66, no. 214, pp. 56–72, 2018.
- [8] G. R. C. Possetti *et al.*, “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,” *Rev. DAE*, vol. 66, no. 214, pp. 73–89, 2018.
- [9] P. G. S. de Almeida, T. B. Ribeiro, B. S. da Silva, L. dos S. Azevedo, and C. A. de L. Chernicharo, “Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 6: Qualidade do efluente,” *Rev. DAE*, vol. 66, no. 214, pp. 90–108, 2018.
- [10] N. F. T. Özdil and A. Tantekin, “Exergy and exergoeconomic assessments of an electricity production system in a running wastewater treatment plant,” *Renew. Energy*, vol. 97, pp. 390–398, Nov. 2016.
- [11] Y. Sudo, K. Takemura, M. Yoshida, T. Anraku, and S. Tokura, “Thermodynamic Simulation for the Environmental Prediction of High-Efficiency Waste-to-Power Plant Boiler,” *Oxid. Met.*, vol. 85, no. 3–4, pp. 297–310, Apr. 2016.
- [12] A. S. Mehr, M. MosayebNezhad, A. Lanzini, M. Yari, S. M. S. Mahmoudi, and M. G. L. Santarelli, “Thermodynamic assessment of a novel SOFC based CCHP system in a wastewater treatment plant,” *Energy*, vol. 150, pp. 299–309, May 2018.
- [13] G. P. Hammond, R. E. Owen, and R. R. Rathbone, “Indicative energy technology assessment of hydrogen processing from biogenic municipal waste,” *Appl. Energy*, vol. 274, p. 115329, Sep. 2020.
- [14] R. N. Nakashima and S. de Oliveira Junior, “Comparative exergy assessment of vinasse disposal alternatives: Concentration, anaerobic digestion and fertirrigation,” *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 1969–1978, Mar. 2020.
- [15] Q. Wang *et al.*, “Technologies for reducing sludge production in wastewater treatment plants: State of the art,” *Sci. Total Environ.*, vol. 587–588, pp. 510–521, Jun. 2017.
- [16] M. MosayebNezhad, A. S. Mehr, A. Lanzini, D. A. Misul, and M. G. L. Santarelli, “Technology review and thermodynamic performance study of a biogas-fed micro humid air turbine,” *Renew. Energy*, vol. 140, pp. 407–418, Sep. 2019.
- [17] A. Colmenar-Santos, G. Zarzuelo-Puch, D. Borge-Diez, and C. García-Diéguez, “Thermodynamic and exergoeconomic analysis of energy recovery system of biogas from a wastewater treatment plant and use in a Stirling engine,” *Renew. Energy*, vol. 88, pp. 171–184, Apr. 2016.
- [18] K. A. Ismail, M. Patón, and J. Rodríguez, “Thermodynamic Modelling Is Needed to Describe the Effect of High Temperature on Microbial Nitrogen Removal Processes,” in *Frontiers in Wastewater Treatment and Modelling (FICWTM 2017)*, vol. 4, G. Mannina, Ed. Cham: Springer, 2017, pp. 37–42.
- [19] S. Di Fraia, N. Massarotti, L. Vanoli, and M. Costa, “Thermo-economic analysis of a novel cogeneration system for sewage sludge treatment,” *Energy*, vol. 115, pp. 1560–1571, Nov. 2016.
- [20] C. Rerat, S. Papadokostantakis, and K. Hungerbühler, “Integrated waste management in batch chemical industry based on multi-objective optimization,” *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 63, no. 3, pp. 349–366, Mar. 2013.
- [21] H. Zhou and J. Qiao, “Multiobjective optimal control for wastewater treatment process using adaptive MOEA/D,” *Appl. Intell.*, vol. 49, no. 3, pp. 1098–1126, Mar. 2019.
- [22] E. Cox, *The Fuzzy Systems Handbook: A Practitioner’s Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems*. Chestnut Hill, MA: AP Professional, 1994.
- [23] F. M. McNeill and E. Thro, *Fuzzy Logic: A Practical Approach*. Chestnut Hill, MA: AP Professional, 1994.
- [24] M. Negnevitsky, *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*, 3rd ed. Essex: Pearson Education Limited, 2011.
- [25] F. A. C. Gomide, R. R. Gudwin, and R. Tanscheit, “Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações,” in *6th International Fuzzy Systems Association World Congress - IFSA95, Tutorials*, 1995, pp. 1–38.
- [26] G. J. Klir and B. Yuan, *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1995.
- [27] L. R. Medsker, *Hybrid Intelligent Systems*. New York, NY: Springer Science-Business Media, 1995.
- [28] D. Driankov, H. Hellendoorn, and M. Reinfrank, *An Introduction to Fuzzy Control*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996.
- [29] K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*. Menlo Park, CA: Addison Wesley Longman, 1997.
- [30] K. Tanaka and H. O. Wang, *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*. New York, NY: John Wiley & Sons, 2001.
- [31] J. M. Garibaldi, “Fuzzy Expert Systems,” in *Do Smart Adaptive Systems Exist?*, B. Gabrys, K. Leiviskä, and J. Strackeljhan, Eds. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, pp. 105–132.
- [32] R. Jensen and Q. Shen, *Computational Intelligence and Feature Selection: Rough and Fuzzy Approaches*. Piscataway, NJ: IEEE Press / John Wiley & Sons, 2008.
- [33] N. A. M. Saffie, N. M. Shukor, and K. A. Rasmani, “Fuzzy delphi method: Issues and challenges,” in *2016 International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS)*, 2016, pp. 1–7.
- [34] M. Huang, T. Zhang, J. Ruan, and X. Chen, “A New Efficient Hybrid Intelligent Model for Biodegradation Process of DMP with Fuzzy Wavelet Neural Networks,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 41239, Mar. 2017.
- [35] D. O. Araromi, O. T. Majekodunmi, J. A. Adeniran, and T. O. Salawudeen, “Modeling of an activated sludge process for effluent prediction—a comparative study using ANFIS and GLM regression,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 190, no. 9, pp. 495, Sep. 2018.
- [36] E. Pourmand and N. Mahjouri, “A fuzzy multi-stakeholder multi-criteria methodology for water allocation and reuse in metropolitan areas,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 190, no. 7, pp. 444, Jul. 2018.
- [37] R. Srinivas and A. P. Singh, “Impact assessment of industrial wastewater discharge in a river basin using interval-valued fuzzy group decision-making and spatial approach,” *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 20, no. 5, pp. 2373–2397, Oct. 2018.
- [38] A. M. Anter, D. Gupta, and O. Castillo, “A novel parameter estimation in dynamic model via fuzzy swarm intelligence and chaos theory for faults in wastewater treatment plant,” *Soft Comput.*, pp. 1–19, Jul. 2019.
- [39] T. Khosrojerdi, S. H. Moosavirad, S. Ariaifar, and M. Ghaeini-Hessaroeeyeh, “Optimal Allocation of Water Resources Using a Two-Stage Stochastic Programming Method with Interval and Fuzzy Parameters,” *Nat. Resour. Res.*, vol. 28, no. 3, pp. 1107–1124, Jul. 2019.
- [40] R. A. de Oliveira and E. Foresti, “Balanço de massa de reatores anaeróbicos de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) tratando águas residuárias de suinocultura,” *Eng. Agrícola*, vol. 24, no. 3, pp. 807–820, Dec. 2004.
- [41] W. de Q. Lamas, “Análise termoeconômica de uma mini-estação de

tratamento de esgoto com auto-suficiência energética,” Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho,” Guaratinguetá, SP, 2007.

BIOGRAFIAS



Wendell de Queiróz Lamas possui graduação em tecnologia em técnicas digitais pela UNESA (1991), mestrado em engenharia mecânica pela UNITAU (2004) e doutorado em engenharia mecânica pela UNESP (2007). Atualmente é professor doutor na EEL-USP. Tem experiência na área de energia,

com ênfase em análise e otimização de sistemas alternativos de geração de energia, atuando principalmente nos seguintes temas: gestão energética e ambiental na indústria; otimização de sistemas energéticos; eficiência energética (incluindo cogeração).



Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia possui graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela EPUSP (1960), mestrado em Física pela FFCLUSP (1961), PhD em Astronomia pela Yale University (EUA, 1965), doutorado (cátedra) em Engenharia pela EPUSP (1968). É professor titular

aposentado da EPUSP. Atualmente é professor permanente da Universidade de Taubaté, coordenando cursos de pós-graduação. Tem experiência em sistemas de engenharia, cobrindo várias especializações. É autor de 37 livros e capítulos e 81 artigos científicos, no Brasil e Exterior.