



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DE ALCALINIDADE, ACIDEZ E FOS/TAC EM UMA PLANTA DE CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA EM ESCALA REAL

Thiago Marenda Rosa de Lima (1)

Engenheiro Químico pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Especialista em Tecnologia da Cadeia Produtiva de Biogás pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial pela Universidade Federal do Paraná (PPGMAUI/UFPR). Supervisor de Qualidade em Planta de Biogás com Co-digestão de Resíduos Orgânicos e Lodo Sanitário pela Rotaria do Brasil e mais de 9 anos de experiência em Tratamento de Efluentes pela Sanepar.

Petherson Fonseca Krul (2)

Engenheiro de Bioprocessos e Biotecnologia pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Analista da Rotaria do Brasil.

Aretha Rodrigues Fiore (3)

Técnica em Química com 24 anos de experiência na área de Saneamento

Carolina Bayer Gomes Cabral (4)

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEA/UFSC). Doutoranda em Engenharia Sanitária pela Universidade Técnica de Berlin (TU Berlin). Diretora do setor de consultoria e projetos especiais da Rotaria do Brasil

Orlando Antônio Duarte Hernández (5)

Engenheiro Industrial pela Universidade Nacional Experimental do Táchira, Venezuela, Mestre em Gestão e Auditorias Ambientais, Universidade Europeia Miguel de Cervantes (UEMC), Espanha. Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Endereço⁽¹⁾: Rua Teodoro Manoel Dias, 421 – Santo Antônio de Lisboa - Florianópolis - SC - CEP: 88050-540 - Brasil - Tel: (48) 3234-3164 - e-mail: thiago.lima@rotaria.net.

RESUMO

A co-digestão anaeróbia de lodo de esgoto com substratos orgânicos vem consolidando-se como alternativa eficaz para o tratamento de resíduos, com a geração de biogás como coproduto valorizável. Este estudo avaliou os efeitos da alcalinidade, acidez e relação FOS/TAC sobre a produção e qualidade do biogás em uma planta de co-digestão de lodo de ETE, resíduo de frutas e verduras e resíduo de peixe. Os valores médios observados — alcalinidade de 6070 ± 526 mg CaCO₃/L, acidez de 2210 ± 283 mg ácido acético/L e FOS/TAC de 0,38 — indicam alta capacidade de tamponamento e estabilidade do sistema frente às diversas variações inerentes a operações em escala real. A produção média de biogás foi de 9644 ± 2314 Nm³/dia, com $63,30 \pm 2,75\%$ de metano. A análise estatística revelou forte correlação entre os parâmetros operacionais e o desempenho da planta, com destaque para o FOS/TAC ($R^2 = 1$ para produção de biogás e $R^2 = 0,9661$ para teor de metano). Os resultados reforçam o papel do FOS/TAC como indicador de estabilidade, da acidez como alerta frente à carga orgânica e da alcalinidade como reflexo da capacidade de tamponamento oriunda da eficiência de metabolização de substratos pela microbiota envolvida na digestão anaeróbia.

PALAVRAS-CHAVE: Co-digestão anaeróbia, escala real, índices de processo.

INTRODUÇÃO

Em um contexto de transição energética mundial, a digestão anaeróbia tem ganhado cada vez mais destaque a partir do tratamento e estabilização de resíduos orgânicos com foco na produção de biogás, o qual vem valorizando-se como um ativo energético voltado à geração de energia térmica, elétrica e à produção de biocombustíveis, como biometano e hidrogênio verde. Tal cenário tem impulsionado a expansão de plantas de biogás em escala real visando a digestão de resíduos industriais, alimentícios, agropecuários e provenientes de atividades de saneamento (CIBIOGAS, 2024). Nesse sentido, de acordo com Hansen et al. (1999), o estabelecimento de parâmetros de controle é fundamental para que tais empreendimentos operem de forma adequada, possibilitando a rápida identificação de perturbações de processo e o estabelecimento de faixas operacionais que potencializem os resultados produtivos. Dentro deste contexto, os parâmetros de acidez, alcalinidade e FOS/TAC aparecem como métricas que, sendo analisadas em conjunto, possibilitam o monitoramento e controle da estabilidade dos



biodigestores frente às diferentes variações de processo inerentes a plantas de escala real de forma fácil, eficiente e de baixo custo (Lili et al., 2011).

A acidez está relacionada à concentração de ácidos orgânicos voláteis (AOVs), formados na etapa de acidogênese como metabólitos intermediários, e sendo posteriormente consumidos nas fases seguintes do processo. O acúmulo excessivo desses compostos pode levar à acidificação do meio reacional e à consequente inibição do sistema (Cabbai et al., 2016), favorecendo a atividade das bactérias acidogênicas em detrimento da capacidade de consumo dos intermediários pelas comunidades metanogênicas (Nkuna et al., 2022). A alcalinidade, por sua vez, expressa em mg CaCO₃/L, representa a concentração total de compostos alcalinos com capacidade tamponante, formados nas etapas de acetogênese e metanogênese, os quais atuam na neutralização dos ácidos voláteis, evitando quedas abruptas de pH (Nielsen, 2006; Kunz et al., 2022). Já o parâmetro FOS/TAC avalia a estabilidade global do sistema por meio da razão entre a concentração de ácidos orgânicos voláteis (FOS) e a concentração de carbono inorgânico total (TAC), refletindo a eficiência da microbiota na metabolização dos substratos alimentados ao sistema (Lili et al., 2011). Dessa forma, a análise da variação desses parâmetros diante de diferentes estratégias operacionais torna-se fundamental para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre os processos de digestão anaeróbia em escala real, permitindo o gerenciamento seguro e eficiente das plantas de biogás.

O presente artigo consiste em um estudo de caso cujo objetivo é analisar o impacto da acidez, alcalinidade e FOS/TAC sobre o volume e a qualidade do biogás produzido em uma planta de biogás situada na Região Metropolitana de Curitiba-PR. A planta opera com foco na codigestão anaeróbia de lodo sanitário, resíduos de frutas e verduras, e resíduos de pescado. Adicionalmente, o estudo discute de que forma esses parâmetros são influenciados pelas variações no recebimento dos substratos orgânicos e pelas cargas orgânicas volumétricas (COVs) aplicadas aos biodigestores.

OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo avaliar a influência dos parâmetros de acidez (mg ácido acético/L) e alcalinidade (mg CaCO₃/L), bem como a relação entre estes dois indicadores (FOS/TAC), sobre a eficiência produtiva de uma planta de biogás em escala real, focada na codigestão de lodo sanitário, resíduos de frutas e verduras e resíduos de peixe. Dentro deste contexto, o trabalho se concentrou na avaliação diária da produção de biogás (Nm³/dia) e da concentração de metano (%) intrínseca ao ativo energético gerado, visando identificar como a variação dos parâmetros supracitados influenciou a eficiência do processo de digestão anaeróbia. Dessa forma, buscou-se definir as faixas operacionais de acidez, alcalinidade e FOS/TAC que maximizem o volume e a qualidade do biogás produzido na planta. Além disso, buscou-se compreender de que forma a recepção de resíduos na unidade e as estratégias de alimentação dos biodigestores, representadas pela COV (KgSV/m³reator.dia), impactam os indicadores estudados.

METODOLOGIA UTILIZADA

O trabalho foi executado em uma planta de biogás localizada na Região Metropolitana de Curitiba/PR, cujo sistema de digestão anaeróbia é composto por dois tanques de hidrólise (buffers de 600 m³), dois biodigestores do tipo CSTR (5.000 m³) e um pós-digestor (3.400 m³). Ressalta-se que os tanques de hidrólise e biodigestores do sistema descrito operam em paralelo, sob condições de temperaturas mesofílicas. Na unidade, o biogás produzido é inicialmente tratado para remoção de umidade e sulfeto de hidrogênio (H₂S), sendo posteriormente queimado e convertido em energia elétrica por dois motogeradores de Ciclo Otto. Não obstante, há também o aproveitamento térmico dos gases de escape deste processo, que aquecem a água posteriormente bombeada a serpentinas instaladas nos tanques de hidrólise, biodigestores e pós-digestor visando a manutenção das temperaturas mesofílicas do sistema.

A avaliação dos parâmetros de alcalinidade, acidez e FOS/TAC foi realizada no período de 01 de janeiro de 2024 a 31 de dezembro de 2024, com análises laboratoriais executadas pelo menos duas vezes por semana. Os resultados referentes à alcalinidade, acidez e FOS/TAC representam as médias dos dois biodigestores de 5.000 m³. Os volumes de biogás foram registrados nas mesmas datas, considerando a somatória do volume acumulado a cada 3 horas, mensurado a partir de um sensor do tipo Vortex (Lima et al., 2024). Em relação ao teor de metano, utilizou-se a média de oito medições diárias, registradas através de equipamentos portáteis de análise de qualidade de biogás (modelos Sewerin Multitec® BioControl 560 e Gás Data GFM 436), equipados com sensores infravermelhos para medição de metano e dióxido de carbono e células eletroquímicas para análise de sulfeto de hidrogênio e oxigênio, conforme Lima et al. (2024) e Krul (2025). Adicionalmente, as



cargas orgânicas volumétricas (COVs - $\text{Kg}_{\text{SV}}/\text{m}^3_{\text{REATOR.dia}}$) alimentadas aos biodigestores foram calculadas diariamente, conforme metodologia apresentada por Kunz et al (2022).

No que se refere às análises de alcalinidade e acidez, utilizou-se o método de titulação de 5 pontos de pH, conforme descrito por Moosbrugger (1992). A metodologia para a análise de FOS/TAC foi baseada no trabalho de Lili et al. (2011), que avalia a alcalinidade parcial e intermediária, além de estabelecer a relação entre elas. Essa relação é fundamental para entender o equilíbrio do processo em digestores anaeróbios, indicando a necessidade de ajustes na adição ou redução de substrato.

Nesse sentido, os parâmetros de processo e indicadores de produção supracitados foram analisados a partir de estatística descritiva e gráficos Box-plot conforme descrito por Cabral (2016), com o intuito de integrar os dados registrados sob uma ótica global, visando a identificação de outliers e estabelecimento de uma parametrização que represente a realidade operacional da planta.

Além disso, analisou-se correlação entre a variação de alcalinidade, acidez e FOS/TAC e o desempenho produtivo em termos de geração de biogás e concentração de metano, por meio de regressão linear e polinomial utilizando-se o software Microsoft Excel. Nesse sentido, os valores de R^2 obtidos foram empregados na avaliação da força de correlação entre as variáveis abordadas no presente trabalho, conforme apresentado na Tabela 1 (Krul, 2025; Duong e Lim, 2023; Yildirim e Ozkaya, 2023). Ressalta-se que esta metodologia também foi utilizada para avaliar a correlação entre COV e os parâmetros de alcalinidade, acidez e FOS/TAC.

Tabela 1 – Valores de R^2 e forças de correlação atreladas

Coeficiente de Regressão Linear (R^2)	Força de Correlação
Maior ou igual a 0,9	Forte
Maior ou igual a 0,55 e inferior a 0,9	Moderadamente Forte
Inferior a 0,55	Fraca

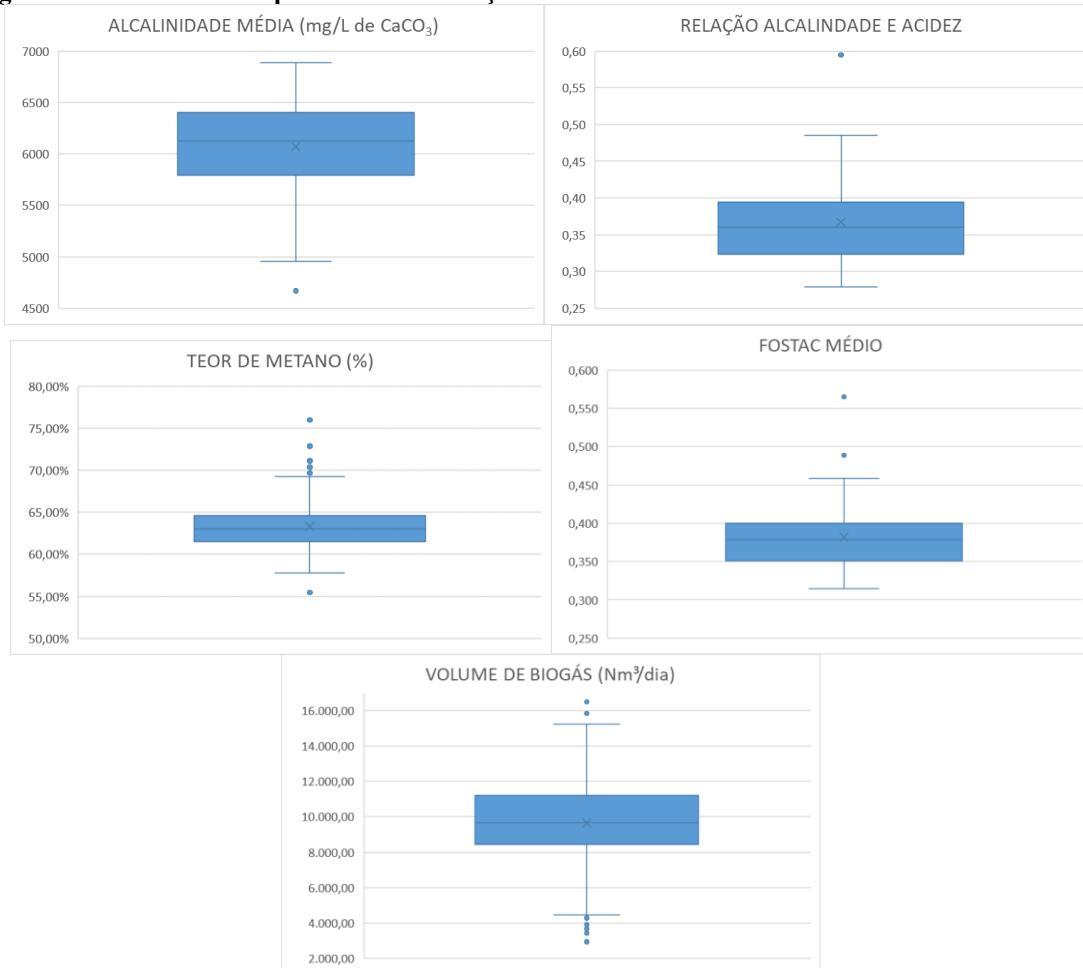
Fonte: KRUL (2025).

Além disso, realizou-se uma análise temporal linear visando a comparação dos dados de FOS/TAC com a geração de biogás e o teor de metano, possibilitando uma análise sistemática e robusta dos dados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A caracterização de um sistema de biodigestão a partir de seus parâmetros de processo e indicadores de produção é fundamental para a construção de um conhecimento operacional robusto e eficiente na tomada ágil e assertiva de decisões. Sendo assim, a Figura 1 apresenta, por meio de gráficos box-plot, a variação nos valores de acidez, alcalinidade, FOS/TAC, produção de biogás e teor de metano ao longo do período analisado.

Figura 1- Gráficos de box plot de caracterização do sistema



Fonte: Os autores (2025).

Os resultados de alcalinidade apresentados pelo gráfico de box plot da Figura 1, demonstram que o sistema apresenta uma média de 6.070 ± 526 mg CaCO₃/L. Além disso, as maiores concentrações de resultados estão na faixa de 5.800 a 6.400 mg CaCO₃/L. Dentro deste contexto, nota-se que a planta apresenta uma alta capacidade de tamponamento, com uma faixa segura de operação dos biodigestores, quando comparada à faixa ideal de alcalinidade de 2.500 a 5.000 mg CaCO₃/L apresentada por Kunz et al., (2022). Como demonstrado na Figura 2, os valores gerados pela planta também foram superiores à faixa registrada em um estudo de análise de codigestão entre Lodo de ETE e resíduos alimentícios, a qual variou entre 3100 e 4740 mg CaCO₃/L (Heo et al., 2004). Dessa forma, pode-se dizer que o sistema permanece estável mesmo diante das diferentes variações operacionais inerentes a uma planta de escala real, mantendo uma capacidade de tamponamento adequada à neutralização dos diferentes níveis de acidez provenientes da alimentação dos biodigestores ao longo do período avaliado. Tais resultados corroboram com o trabalho de Martín-González et al. (2013), que descreve que um sistema de digestão anaeróbia com valores de FOS/TAC de até 0,400 permanece estável diante de níveis de alcalinidade variando na faixa de 4000 a 8000 mg CaCO₃/L.



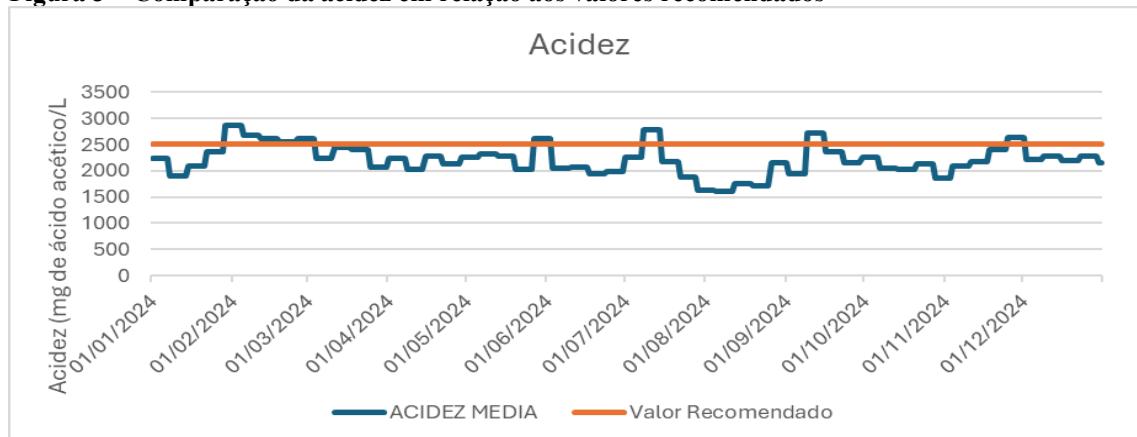
Figura 2 - Comparação da Alcalinidade em relação ao valor mínimo recomendado



Fonte: Os autores (2025)

Em relação à acidez, o sistema registrou uma média histórica de 2.210 ± 283 mg ácido acético/L, com uma faixa interquartílica variando entre 2.044 a 2.358 mg ácido acético/L. Ressalta-se, nesse sentido, que um sistema de biodigestão permanece estável quando sua acidez apresenta concentrações inferiores a uma faixa limitante de 2.500 a 3.500 mg ácido acético/L, conforme demonstrado Figura 3, de modo que valores superiores a este intervalo são indicativos de sobrecarga (Balaguer et al., 1992 e Martín-González et al., 2013). Neste contexto, as variações de processo que resultaram nas concentrações de acidez superiores a 3.000 mg ácido acético/L, apresentadas, são decorrentes de momentos nos quais houve um aumento no recebimento de substratos orgânicos como frutas, verduras e peixe em relação ao lodo de esgoto, o que potencializa a proporção de metabólitos ácidos no sistema. Observa-se, no entanto, que tais ocorrências são normalizadas rapidamente, podendo ser caracterizadas como *outliers*.

Figura 3 – Comparação da acidez em relação aos valores recomendados



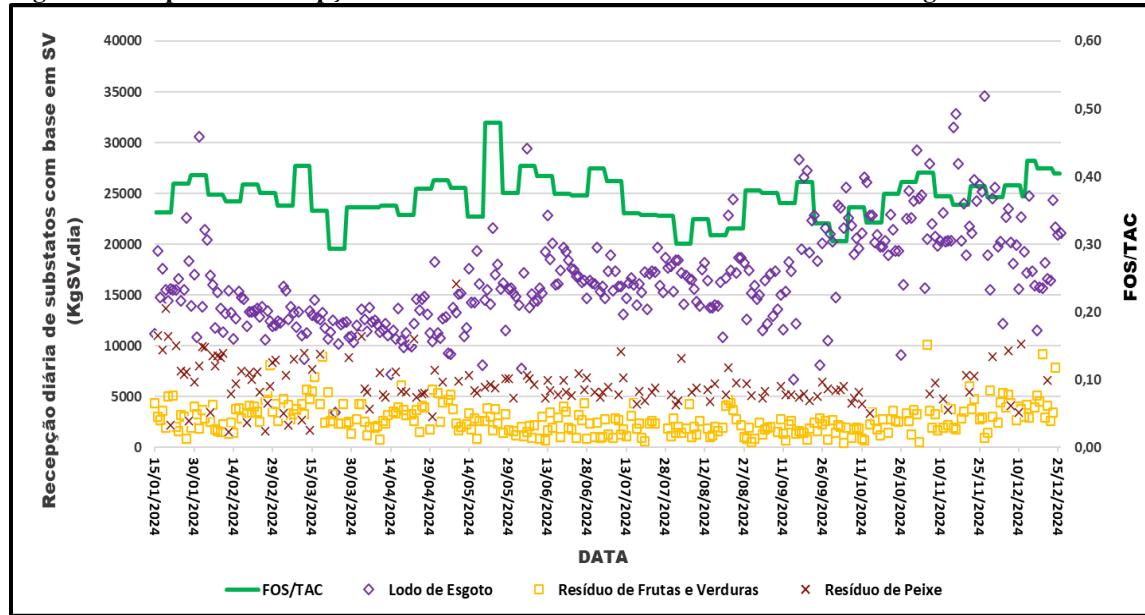
Fonte: Os autores (2025).

Quando comparado com a literatura (Tabela 2), os valores de FOS/TAC registrados na planta apresentaram uma maior repetibilidade dentro da faixa de máxima produção de biogás variando entre 0,35 e 0,4, com uma média de $0,380 \pm 0,031$. Além disso, demonstra-se conforme a Figura 1 que o sistema se mantém estável e dentro da faixa ideal visando a máxima produção de biogás durante a maior parte do tempo, mesmo com variações de recepção de substratos como lodo sanitário, resíduos de frutas e verduras e resíduos de peixe.



A partir da Figura 4, observa-se também um impacto da sazonalidade de alguns substratos sobre os índices de FOS/TAC obtidos, de modo que os períodos com maiores valores deste parâmetro são aqueles nos quais registrou-se uma intensificação da entrada de substratos orgânicos com características mais ácidas na planta (resíduos de frutas e verduras e resíduo de peixe). Neste contexto, mesmo diante de tais cenários, os indicadores de FOS/TAC, mantiveram-se dentro ou próximos de sua faixa ideal, conforme demonstrado na Tabela 2, sendo mais um indicativo de estabilidade do processo de digestão anaeróbia realizado na planta.

Figura 4 – Impacto da recepção de substratos sobre o FOS/TAC médio dos biodigestores



Fonte: Os autores (2025).

Tabela 2 - Valores de referência para interpretação da relação de FOS/TAC

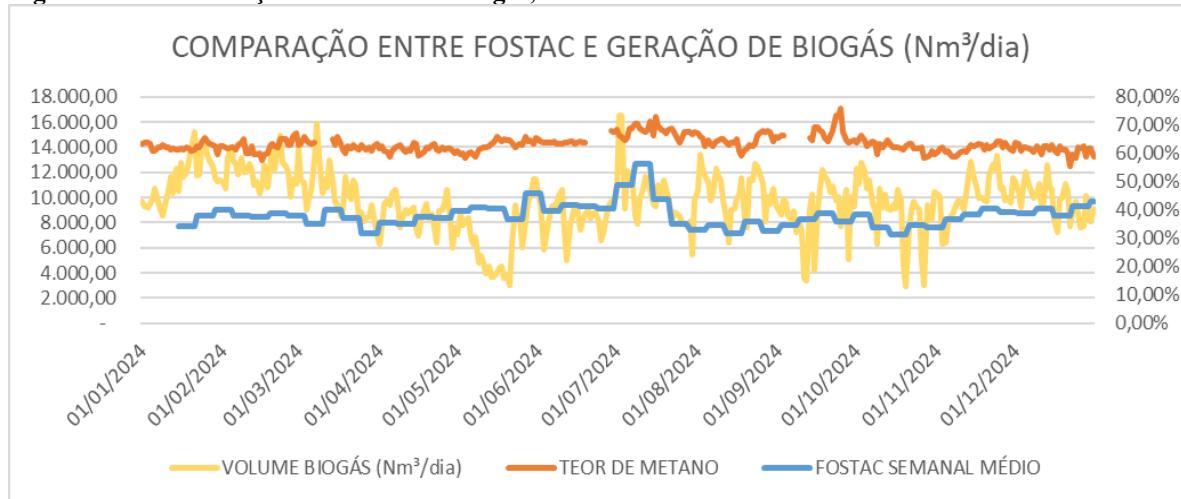
Situação do Sistema	Relação FOS/TAC
Entrada de Biomassa altamente excessiva	> 0,6
Entrada de Biomassa excessiva	0,5 - 0,6
Entrada de Biomassa acima da capacidade	0,4 - 0,5
Produção de biogás no máximo	0,3 - 0,4
Entrada de Biomassa está baixa	0,2 - 0,3
Entrada de Biomassa está baixa demais	< 0,2

Fonte: Adaptado de Lili *et al* (2011)

Não obstante, observa-se também o impacto positivo do controle dos parâmetros de alcalinidade, acidez e FOS/TAC sob a estabilidade produtiva de processos de digestão anaeróbia. Tal constância de processo é comprovada através da Figura 5 e corroborada pelos resultados de Balaguer et al. (1992), segundo os quais mesmas relações de FOS/TAC de 0,4, quando mensuradas em condições de acidez abaixo de 2.500 mg ácido acético/L, tendem a apresentar estabilidade produtiva no processo de produção de biogás. Neste aspecto, considerando o ano de 2024, obteve-se uma produção média de $9.644 \pm 2.314 \text{ Nm}^3/\text{dia}$ de biogás a uma concentração média de metano de $63,30 \pm 2,75\%$, conforme apresentado nos gráficos de volume de biogás e teor de metano, indicados nas Figuras 1 e 5. Segundo Ojea et al. (2022) a mesma planta de biogás apresentou um valor de produção médio de biogás de $7.271,80 \text{ Nm}^3/\text{dia}$ no período de julho a setembro de 2022. Considerando que tal controle foi estabelecido em janeiro de 2024, este trabalho demonstra que a análise do FOS/TAC auxilia nas decisões estratégicas da planta relacionadas à adição ou redução de substratos alimentados, potencializando seus índices produtivos.



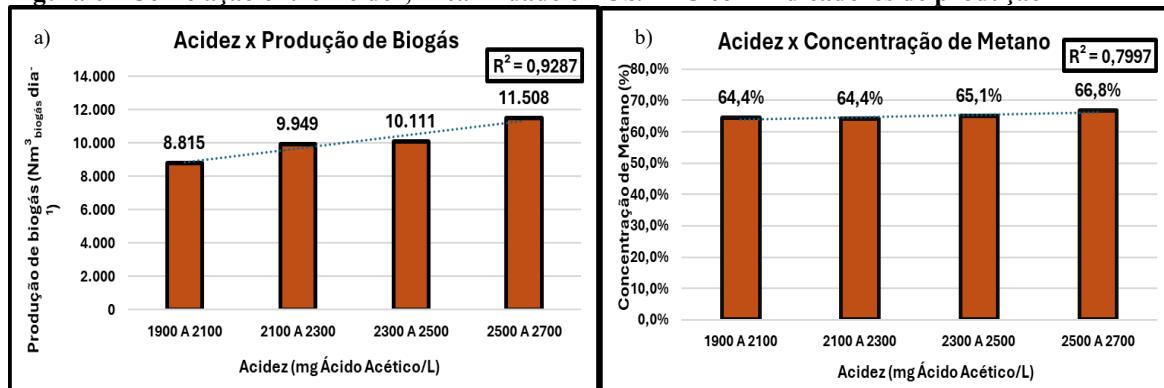
Figura 5 - Demonstração do volume de biogás, teor de metano e FOS/TAC no ano de 2024

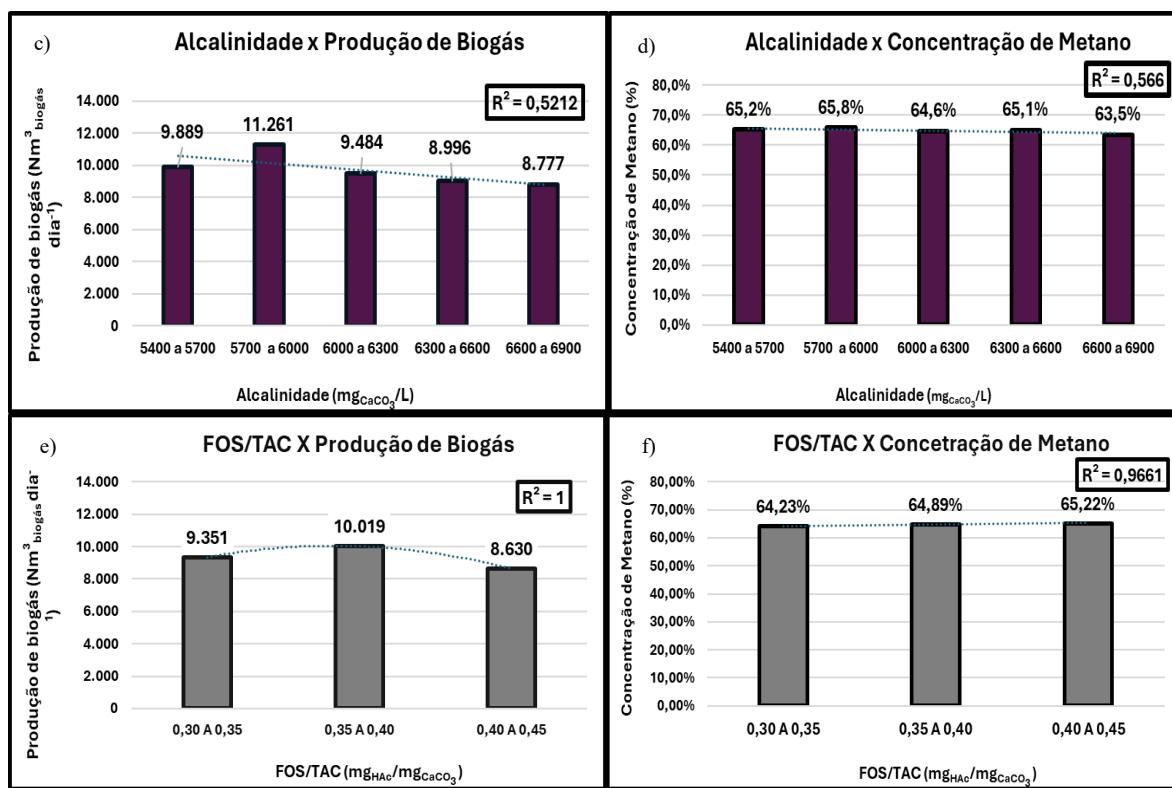


Fonte: Os autores (2025).

Diante dos resultados discutidos anteriormente no presente trabalho, percebe-se que, de modo geral, o sistema de biodigestão permaneceu ao longo de todo o período avaliado em uma condição de estabilidade, não sendo submetido a riscos de sobrecarga. No entanto, além de uma avaliação geral sobre o status operacional de uma planta, é necessária a construção de um *know-how* específico acerca do impacto das diferentes variações de processo sobre os indicadores de produção (Heo et al., 2004; Program 2020). A Figura 6 ilustra a força de correlação entre as variações de acidez, alcalinidade e a razão FOS/TAC, representadas por faixas operacionais específicas, em relação aos indicadores de produção de biogás e concentração de metano. Neste contexto, a maioria das correlações foi realizada por meio de regressões lineares, conforme a metodologia proposta por Krul (2025) e Yingratanasuk et al. (2024). É importante destacar, no entanto, que a avaliação dos impactos da variação da razão FOS/TAC sobre a produção de biogás foi conduzida utilizando uma regressão polinomial. Essa abordagem se justifica, uma vez que o impacto desse parâmetro sobre o indicador em questão não segue uma relação linear, evidenciando que as melhores produtividades são alcançadas em valores intermediários. Por outro lado, as extremidades da faixa analisada podem indicar restrições ou excessos na alimentação dos biodigestores, conforme discutido por Lili et al. (2011).

Figura 6 - Correlação entre Acidez, Alcalinidade e FOS/TAC com indicadores de produção



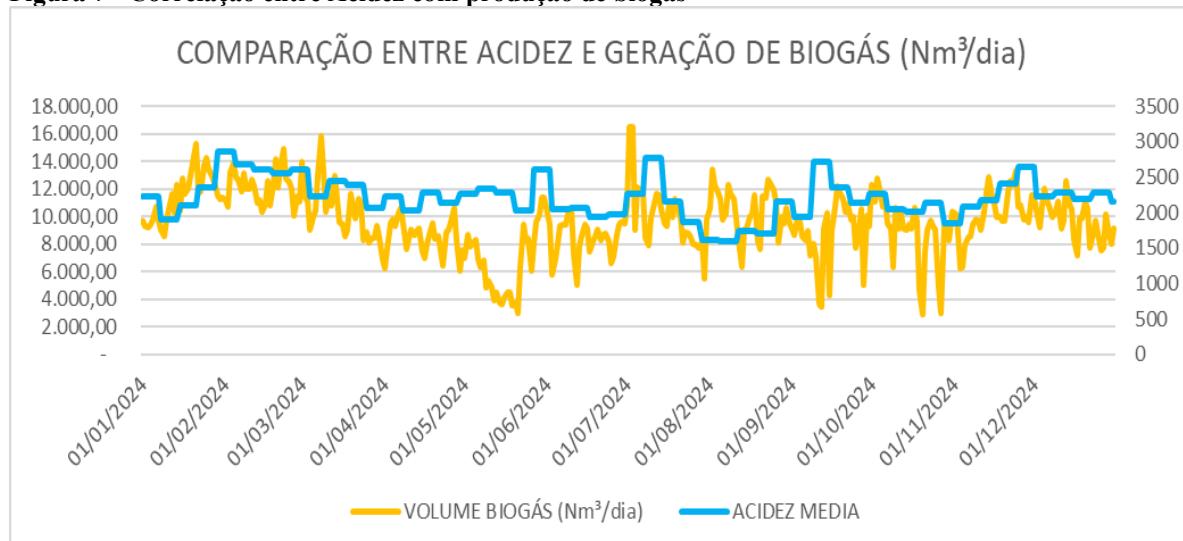


Fonte: Os autores (2025).

Comparando-se isoladamente os efeitos da variação de acidez e alcalinidade sobre os indicadores avaliados, percebe-se um impacto maior do primeiro parâmetro, de modo que a concentração de ácidos orgânicos voláteis no sistema possui uma correlação forte com o seu desempenho produtivo. Ressalta-se, nesse sentido, que as correlações analisadas se baseiam em uma comparação diária dos dados, de modo que os resultados são pautados no impacto momentâneo da variação de acidez sobre os indicadores analisados. Destaca-se, no entanto, que contextos de aumento de acidez são atrelados a uma potencialização inicial da produção de biogás devido à maior carga orgânica aplicada ao sistema, sendo frequentemente seguidos por uma redução na qualidade e volume de geração em decorrência da inibição de microrganismos metanogênicos pelo acúmulo excessivo de ácidos orgânicos voláteis (Kunz et al, 2022.; Charles et al, 2011). Diante disso, conforme observado na Figura 7, observaram-se ao longo do período analisado diversos picos de acidez cujo resultado foi condizente aos pontos anteriormente discutidos, caracterizados por um aumento inicial de produção de biogás e uma queda sequencial e consecutiva neste indicador. Exemplos claros desta tendência foram observados nos meses de fevereiro, junho, julho e novembro.

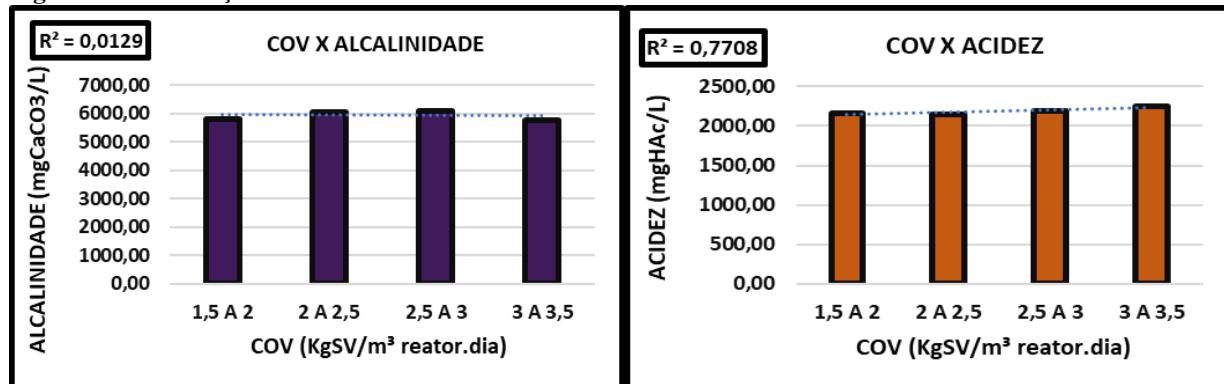
Em contrapartida, a alcalinidade demonstra uma relação fraca com a produção de biogás e moderadamente forte no que tange à concentração de metano. Tal cenário deve-se a dois fatores centrais: a dependência da alcalinidade em relação à acidez e à alta capacidade tamponante do sistema avaliado. Considerando que as variações na concentração de compostos alcalinos resultam da demanda de neutralização dos ácidos orgânicos voláteis adicionados ao sistema, a alcalinidade se configura como uma variável dependente dos níveis de acidez. Além disso, a elevada capacidade tamponante dos biodigestores minimiza variações bruscas na alcalinidade total. Dessa forma, a acidez se torna um parâmetro mais apropriado para a avaliação do status operacional e do desempenho produtivo do sistema, refletindo a resposta da microbiota envolvida na digestão anaeróbia frente a estratégia de alimentação dos biodigestores, representada pelos índices de carga orgânica volumétrica aplicada (Boe, 2006; Holm-Nielsen e Oleskowicz-Popiel, 2013; e Nielsen, 2006). Tal afirmação pode ser verificada a partir da Figura 8, que avalia o impacto da variação da COV aplicada sobre a acidez e alcalinidade dos biodigestores. Nesse sentido, verificou-se uma correlação moderadamente forte entre COV e acidez e praticamente nula no que se refere ao impacto do parâmetro de alimentação dos biodigestores sobre a alcalinidade.

Figura 7 - Correlação entre Acidez com produção de biogás



Fonte: Os autores (2025).

Figura 8 – Correlação entre COV e os indicadores de alcalinidade e acidez



Fonte: Os autores (2025).

Adicionalmente, a correlação direta entre a razão FOS/TAC e os indicadores de desempenho avaliados, evidenciada por um R^2 de 1, confirma que a relação entre acidez e alcalinidade proporciona uma avaliação mais precisa do sistema em comparação ao uso isolado de um desses parâmetros. Essa constatação endossa as afirmações de Lebuhn et al. (2015), uma vez que reflete o balanço entre os ácidos orgânicos voláteis introduzidos no sistema e a capacidade da microbiota anaeróbia de convertê-los em biogás e compostos alcalinos responsáveis pelo tamponamento do meio reacional.

Sendo assim, percebe-se que o parâmetro FOS/TAC avaliado no presente trabalho apresenta, de modo geral, níveis de correlação fortes ou moderadamente fortes em relação à produção de biogás e concentração de metano atreladas ao sistema estudado, de modo que o controle adequado das concentrações de alcalinidade e acidez influencia diretamente no desempenho produtivo da planta.

Em relação às faixas recomendadas de cada um dos parâmetros avaliados, percebe-se uma tendência oposta entre alcalinidade e acidez. Nesse sentido, o primeiro parâmetro teve a faixa de 5.700 a 6.000 mg CaCO₃/L atrelada aos melhores desempenhos produtivos, havendo também um impacto inversamente proporcional da concentração de compostos tamponantes sobre a produção de biogás e concentração de metano. Em contrapartida, ao avaliar o efeito da acidez sobre tais indicadores, as maiores produções momentâneas de



biogás foram alcançadas na faixa de 2.500 a 2.700 mg ácido acético/L. Tal cenário deve-se ao fato de que, em um sistema com alta capacidade tamponante, o aumento da alimentação de substratos orgânicos direcionada ao sistema, cuja consequência é a maior concentração de ácidos orgânicos, gera um aumento proporcional e momentâneo da produção de biogás (Charles et al., 2011; Lili et al., 2011; e Murto et al., 2004). No entanto, este aumento inicial é frequentemente seguido pelo acúmulo excessivo de ácidos orgânicos voláteis e queda no desempenho produtivo da planta (Nielsen, 2006). Dessa forma, a manutenção destas condições a longo prazo não é tecnicamente viável, o que justifica as médias de acidez discutidas anteriormente no presente trabalho, cujos valores encontram-se em faixas diferentes às supracitadas, tendendo a apresentar valores mais intermediários. Neste contexto, sugere-se manutenção da faixa de acidez entre 2.100 a 2.300 mg ácido acético/L, considerando um desvio padrão de 283 mg ácido acético/L. Dessa forma, garante-se a obtenção de bons resultados produtivos de forma simultânea a manutenção da segurança operacional, evitando que o sistema seja exposto a valores de acidez superiores a 2.500 mg ácido acético/L, indicativa de cenários de sobrecarga conforme discutido por Balaguer et al (1992).

Em relação à razão FOS/TAC, percebe-se que a média operacional da planta (0,38) é compatível à faixa de 0,35 a 0,40, atrelada aos melhores resultados de produção e qualidade de biogás, conforme Krul (2025). Este cenário corrobora com os valores de referência indicados por Lili et al. (2011), segundo os quais a produção de biogás é maximizada na faixa de FOS/TAC de 0,30 a 0,40. Sendo assim, percebe-se que apesar da variabilidade nos valores de acidez e alcalinidade, a razão entre estes dois parâmetros se mantém historicamente adequada ao desempenho produtivo da planta avaliada.

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no presente trabalho ressaltam a importância de se acompanhar a variação dos valores de acidez, alcalinidade e relação FOS/TAC diante das diversas estratégias operacionais adotadas em plantas de escala real, visto o impacto relevante de tais indicadores sobre o desempenho produtivo do processo de codigestão avaliado. De modo geral, evidenciou-se a razão FOS/TAC como um forte indicador de estabilidade e desempenho de processo com valor médio de 0,38. Essa métrica apresentou correlação significativa com a produção de biogás, conforme demonstrado pela regressão polinomial ($R^2 = 1$), além de uma forte relação linear com a concentração de metano ($R^2 = 0,9661$). A acidez revelou-se um parâmetro essencial na avaliação da estratégia de alimentação dos biodigestores, impactando diretamente a produção de biogás com valor médio de 2210 ± 283 mg ácido acético/L, sendo controlada para evitar a inibição do processo. Não obstante, a alcalinidade representa o resultado do processo de biodigestão, definindo a capacidade de tamponamento do sistema e apresentando uma média 6070 ± 526 mg CaCO₃/L. Embora possua uma menor influência direta na produção imediata de biogás, verifica-se sua importância pela estabilidade do processo. Por fim, os resultados indicaram que apesar das variações inerentes a operações em escala real, a planta apresentou capacidade de absorção e aproveitamento das variações na maior parte do período avaliado. Portanto, a implementação de práticas de monitoramento e gestão integrada desses parâmetros é fundamental para garantir a estabilidade do processo de digestão anaeróbia, assim como, o direcionamento para a otimização do processo produtivo.

RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se a continuidade dos acompanhamentos e controles dos parâmetros que impactam a produção de biogás para uma análise temporal mais completa.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BALAGUER, M. D.; CAÑIZARES, C.; VICENTE, T.; PARDO, J. M. *Start-up of an UASB reactor treating potato-starch wastewater using an alkalimetric follow-up procedure*. 1992.
2. BOE, K. Online monitoring and control of the biogas process. Environment, 2006. Technical University of Denmark.
3. CABBAI, V.; DE BORTOLI, N.; GOI, D. *Pilot plant experience on anaerobic codigestion of source selected OFMSW and sewage sludge*. Waste Management, v. 49, p. 47–54, 2016.
4. CABRAL, C. B. G. C. Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário. 2016. Universidade Federal de Santa Catarina.
5. CHARLES, W.; CARNAJE, N. P.; CORD-RUWISCH, R. *Methane conversion efficiency as a simple control parameter for an anaerobic digester at high loading rates*. Water Science and Technology, v. 64, n. 2, p. 534–539, 2011.
6. CIBIOGÁS. Panorama do Biogás 2023. Foz do Iguaçu, 2024.
7. DUONG, C. M.; LIM, T.-T. *Use of regression models for development of a simple and effective biogas decision-support tool*. Scientific Reports, v. 13, n. 4933, p. 11, 2023.
8. HANSEN, K. H.; ANGELIDAKI, I.; AHRING, B. K. *Improving thermophilic anaerobic digestion of swine manure*. Water Research, v. 33, n. 8, p. 1805–1810, 1999.
9. HEO, N. H.; PARK, S. C.; KANG, H. *Effects of mixture ratio and hydraulic retention time on single-stage anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge*. Journal of Environmental Science and Health - Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, v. 39, p. 1739–1756, 2004.
10. HOLM-NIELSEN, J. B.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. *Process control in biogas plants*. Woodhead Publishing Limited, 2013.
11. KRUL, P. F. Avaliação de parâmetros operacionais em planta de codigestão anaeróbia de lodo de ETE com resíduos orgânicos em escala real e seus impactos na produção de metano. 2025. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.
12. KUNZ, A.; STEINMETZ, L. R.; RADIS, R. et al. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. 2. ed. Concórdia: Embrapa, 2022.
13. LEBUHN, M.; WEISS, S.; MUNK, B.; GUEBITZ, G. M. *Microbiology and molecular biology tools for biogas process analysis, diagnosis and control*. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, p. 1–40, 2015.
14. LILI, M.; BIRÓ, G.; SULYOK, E. et al. Novel approach on the basis of FOS/TAC method. 2011.
15. LIMA, T. M. R. de; CABRAL, C. B. G. C.; FIORE, A. R. et al. *Avaliação da produção de biogás por meio da co-digestão de lodo sanitário, resíduos de frutas e verduras, resíduos de peixe e outros resíduos orgânicos em escala plena*. Anais... AESABESP-Associação dos Engenheiros da Sabesp, p. 1–17, 2024.
16. MARTÍN-GONZÁLEZ, L.; FONT, X.; VICENT, T. *Alkalinity ratios to identify process imbalances in anaerobic digesters treating source-sorted organic fraction of municipal wastes*. Biochemical Engineering Journal, v. 76, p. 1–5, 2013.
17. MOOSBRUGGER, R. E. *Simple titration procedures to determine H₂CO₃ alkalinity and short-chain fatty acids in aqueous solutions containing known concentrations of ammonium, phosphate and sulphide weak acid/bases*. Republic of South Africa: Water Research Commission, 1992.



18. MURTO, M.; BJÖRNSSON, L.; MATTIASSON, B. *Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure*. *Journal of Environmental Management*, v. 70, n. 2, p. 101–107, 2004.
19. NIELSEN, H. B. Control Parameters for Understanding and Preventing Process Imbalances in Biogas Plants. Emphasis on VFA Dynamics. 2006. BioCentrum-DTU, Technical University of Denmark.
20. NIELSEN, H. B.; UELLENDALH, H.; AHRING, B. K. *Regulation and optimization of the biogas process: Propionate as a key parameter*. Biomass and Bioenergy, 2007.
21. OJEA, A. P. C. dos S.; MARENDA, T.; ANTONIO, O.; HERNANDEZ, D.; AISSE, M. M. Avaliação preliminar do desempenho e produção de um digestor anaeróbio a partir da codigestão de lodo de ETE com resíduos orgânicos urbanos e industriais. 2022.
22. PROGRAM, E. P. A. A. Anaerobic Digester / Biogas System Operator Guidebook. 2020.
23. YILDIRIM, O.; OZKAYA, B. *Prediction of biogas production of industrial scale anaerobic digestion plant by machine learning algorithms*. *Chemosphere*, v. 335, e138976, 2023.
24. YINGRATANASUK, N.; KATESAENG, P.; KENGCHUWONG, M.; TRISUPAKITTI, S.; MORRIS, J. *Biogas Energy Potential using Linear Regression Analysis*. *Rattanakosin Journal of Science and Technology (RJST)*, v. 6, n. 3, p. 87–96, 2024.