

Caracterização de sólido e análise de Capacidade Tampão frente à Acidificação em Substratos de Biodigestão

Enrico Carlos Santos e Santos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) – Campus Cubatão, SP, Brasil.

Jhonatan Batista das Neves

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) – Campus Cubatão, SP, Brasil.

Aline Maria dos Santos Teixeira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rio de Janeiro (IFRJ) – Campus Duque de Caxias, RJ, Brasil.

Flávia Daylane Tavares de Luna

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) – Campus Cubatão, SP, Brasil

D.O.I.:

Resumo: A digestão anaeróbia em biodigestores caseiros representa uma tecnologia sustentável para geração de biogás e biofertilizantes, porém é frequentemente comprometida pela acidificação do meio digestor. Este artigo apresenta uma análise integrada da caracterização físico-química de substratos e sua capacidade tampão frente a perturbações de pH. A metodologia incluiu análise de sólidos e ensaios de capacidade tampão com acompanhamento das variações de pH ao longo do tempo em quatro categorias de substrato: arroz, feijão e frango (AFF); arroz, cenoura e ervilha (ACE); arroz branco cozido (ARR); e cascas de abacaxi (CAB). Os resultados demonstraram teores expressivos de sólidos voláteis em todos os substratos, com destaque para a amostra AFF (37,50% de SV), seguida pelas amostras ARR (34,73%), CAB (33,08%) e ACE (21,15%). A relação SV/ST variou de 0,88 a 0,98, indicando elevada biodegradabilidade. Destaca-se na amostra ARR o teor mais elevado de sólidos fixos (4,93%) em comparação às demais amostras (0,81 a 0,93%), sugerindo possível contribuição inorgânica para a capacidade tampão do sistema. Nos ensaios de capacidade tampão da amostra ARR, observou-se variabilidade entre réplicas: enquanto uma apresentou recuperação de +0,21 unidades de pH frente à acidificação, a outra mostrou recuperação de apenas +0,05 unidades de pH, indicando que a capacidade tampão não apresenta correlação direta com o teor de sólidos voláteis. Conclui-se que a caracterização conjunta de parâmetros físicos e químicos é essencial para o dimensionamento adequado de sistemas de controle de pH em biodigestores, sendo a variabilidade intrasubstrato um fator crítico a ser considerado.

Palavras-chave: Biodigestor; Controle de pH; Capacidade Tampão; Sólidos Voláteis; Sólidos Fixos; Acidificação; Digestão Anaeróbia.

Abstract: Anaerobic digestion in household biodigesters represents a sustainable technology for the generation of biogas and biofertilizers; however, it is often compromised by the acidification of the digestion medium. This article presents an integrated analysis of the physicochemical characterization of substrates and their buffering capacity against pH disturbances. The methodology included solids analysis and buffering capacity assays with monitoring of pH variations over time in four substrate categories: rice, beans, and chicken (AFF); rice, carrots, and peas (ACE); cooked white rice (ARR); and pineapple peels (CAB). The results demonstrated significant levels of volatile solids in all substrates, with emphasis on the AFF sample (37.50% VS), followed by ARR (34.73%), CAB (33.08%), and ACE (21.15%). The VS/TS ratio ranged from 0.88 to 0.98, indicating high biodegradability. The ARR sample showed the highest fixed solids content (4.93%) compared to the other samples (0.81 to 0.93%), suggesting a possible inorganic contribution to the system's buffering capacity. In the buffering capacity assays of the ARR sample, variability between replicates was observed: while one replicate showed a recovery of +0.21 pH units under acidification conditions, the other showed a recovery of only +0.05 pH units, indicating that buffering capacity does not present a direct correlation with volatile solids content. It is concluded that the combined characterization of physical and chemical parameters is essential for the proper design of pH control systems in biodigesters, with intrasubstrate variability being a critical factor to be considered.

Keywords: *Biodigester; pH Control; Buffering Capacity; Volatile Solids; Fixed Solids; Acidification; Anaerobic Digestion.*

1.INTRODUÇÃO

A digestão anaeróbia configura-se como uma tecnologia estratégica para a gestão de resíduos orgânicos e produção de energia renovável, alinhando-se aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), particularmente ao ODS-7, que trata da garantia de acesso a fontes de energias sustentáveis para todos (ONU, 2025). Segundo a Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABiogás, 2023), o Brasil possui um potencial anual de produção de biogás superior a 120 bilhões de Nm³, proveniente principalmente de resíduos agroindustriais, saneamento e resíduos sólidos urbanos. Apesar deste potencial promissor, a implementação em pequena e média escala ainda enfrenta desafios técnicos significativos, entre

os quais se destaca a instabilidade operacional decorrente de variações de pH (Mao et al., 2015; Shahabuddin et al., 2018).

A acidificação, caracterizada pelo acúmulo de ácidos graxos voláteis e queda abrupta do pH, representa uma das principais causas de falha em biodigestores, sendo responsável por aproximadamente 40% das interrupções não planejadas em sistemas de pequena escala (EMBRAPA, 2022). Este fenômeno é particularmente crítico no contexto nacional, onde a diversidade de substratos e condições climáticas variáveis podem amplificar os desequilíbrios microbianos. A compreensão dos mecanismos de tamponamento natural dos substratos torna-se, portanto, fundamental para o desenvolvimento de estratégias de controle eficazes e economicamente viáveis.

A análise de sólidos (totais, voláteis e fixos) fornece informações cruciais sobre a carga orgânica disponível e o potencial de geração de ácidos, enquanto ensaios controlados com adição de ácidos e bases permitem quantificar a capacidade tampão do sistema. Resultados experimentais indicam que substratos comuns na realidade brasileira possuem elevado teor de sólidos voláteis, conferindo alto potencial metanogênico, mas também demonstram susceptibilidade à acidificação caso não haja capacidade tampão adequada (SANTOS et al., 2024). Particularmente, a fração de sólidos fixos, frequentemente negligenciada, pode desempenhar papel relevante na regulação do pH por meio da liberação de espécies minerais com propriedades tamponantes.

Este trabalho tem como objetivo realizar a caracterização físico-química de substratos e avaliar a relação entre os sólidos fixos e o comportamento do sistema frente a perturbações controladas de pH, em meio ácido. A elucidação e o monitoramento rigoroso desses indicadores são cruciais para o dimensionamento preditivo e a gestão otimizada de reatores de digestão anaeróbia, contribuindo para o aprimoramento da robustez operacional e da viabilidade técnica desta tecnologia no contexto da agricultura familiar e do tratamento descentralizado de resíduos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Princípios da digestão anaeróbia e importância do pH

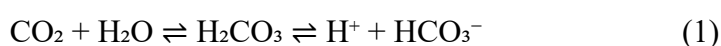
A digestão anaeróbia consiste em um processo biológico no qual microrganismos degradam matéria orgânica em condições anaeróbias, produzindo biogás, composto principalmente por metano e dióxido de carbono, além de digestato rico em nutrientes (MAO et al., 2015).

O pH é uma variável crítica que rege o equilíbrio microbiano nas quatro etapas sequenciais da digestão anaeróbia: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Enquanto as bactérias acidogênicas operam eficientemente em pH mais baixo (5,2-6,3), as arqueias metanogênicas são altamente sensíveis, exigindo uma faixa estreita de pH neutro (6,8-7,8) para sua atividade ótima (Shahabuddin et al., 2018). Esta diferença de tolerância fisiológica cria uma vulnerabilidade inerente ao processo: se a taxa de produção de ácidos voláteis pelas bactérias acidogênicas excede a capacidade de consumo pelas metanogênicas, ocorre acúmulo desses ácidos, levando à queda do pH e inibição da metanogênese.

A acidificação, ou "souring", ocorre quando a taxa de produção de ácidos voláteis excede a capacidade tampão do sistema, levando a uma queda brusca de pH, inibição da metanogênese, redução na produção de biogás e, potencialmente, à falha completa do reator. A recuperação de um sistema acidificado é difícil e frequentemente demanda intervenções externas.

2.2 Sistema de tamponamento e estabilidade

O sistema tampão bicarbonato ($\text{HCO}_3^-/\text{CO}_2$) constitui o principal mecanismo de regulação do pH em sistemas de digestão anaeróbia, atuando como elemento estabilizador frente a perturbações ácido-base. Este equilíbrio químico fundamenta-se na capacidade de neutralização de íons H_3O^+ mediante reação com bicarbonato, conforme descrito por Shahabuddin et al. (2018):



A capacidade tampão do sistema é quantificada pela alcalinidade total, parâmetro que representa a capacidade do meio em neutralizar ácidos fortes até um ponto de equivalência específico. De acordo com Müller e colaboradores (2019), sistemas com elevada alcalinidade ($> 2.000 \text{ mg L}^{-1} \text{ CaCO}_3$) apresentam maior estabilidade frente as perturbações de pH, o que mantém a operação do sistema mesmo sob condições de elevada produção de ácidos voláteis.

A relação entre ácidos voláteis totais e alcalinidade (VFA/ALK) constitui-se como indicador crítico de estabilidade, sendo valores inferiores a 0,3 considerados adequados para operação segura de biodigestores (zona de estabilidade), valores entre 0,3 e 0,8 indicam estado de alerta com risco moderado de acidificação, enquanto valores superiores a 0,8 indicam risco iminente de acidificação (zona crítica) (Park et al., 2020).

2.3 Papel dos sólidos fixos na capacidade tampão

Embora a literatura tradicional enfatize o papel da alcalinidade na forma de bicarbonatos, a fração inorgânica dos substratos - representada pelos sólidos fixos - pode contribuir significativamente para a capacidade tampão do sistema. Os sólidos fixos são constituídos por minerais como carbonatos de cálcio e magnésio, fosfatos, silicatos e outros sais que, ao serem solubilizados ou sofrerem reações de dissolução, podem liberar espécies alcalinizantes para o meio.

Chen e colaboradores (2023) demonstraram que substratos com maior teor de cinzas (fração mineral – sólidos fixos) apresentaram maior resiliência à acidificação em reatores batelada, sugerindo que a liberação gradual de minerais durante a hidrólise atua como mecanismo complementar de tamponamento. Este efeito é particularmente relevante em substratos de origem vegetal, que podem conter quantidades significativas de oxalato de cálcio, fitatos e outros compostos que, ao serem metabolizados, liberam íons com capacidade neutralizante.

A caracterização dos sólidos fixos torna-se, portanto, não apenas um parâmetro de quantificação da fração inorgânica, mas um indicador potencial da capacidade intrínseca do substrato em resistir a variações de pH. Esta relação entre composição mineral e estabilidade química fundamenta a abordagem integrada proposta neste trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização dos substratos

Foram selecionados quatro tipos de substratos representativos de resíduos comuns no contexto doméstico e de agricultura familiar, Tabela 1.

Tabela 1 - Amostras Analisadas.

Amostra	Composição do Substrato	Categoria
AFF	Arroz, Feijão e Frango	Resíduo completo alimentar
ACE	Arroz, Cenoura e Ervilha	Mistura de arroz com resíduos vegetais
ARR	Arroz	Carboidrato

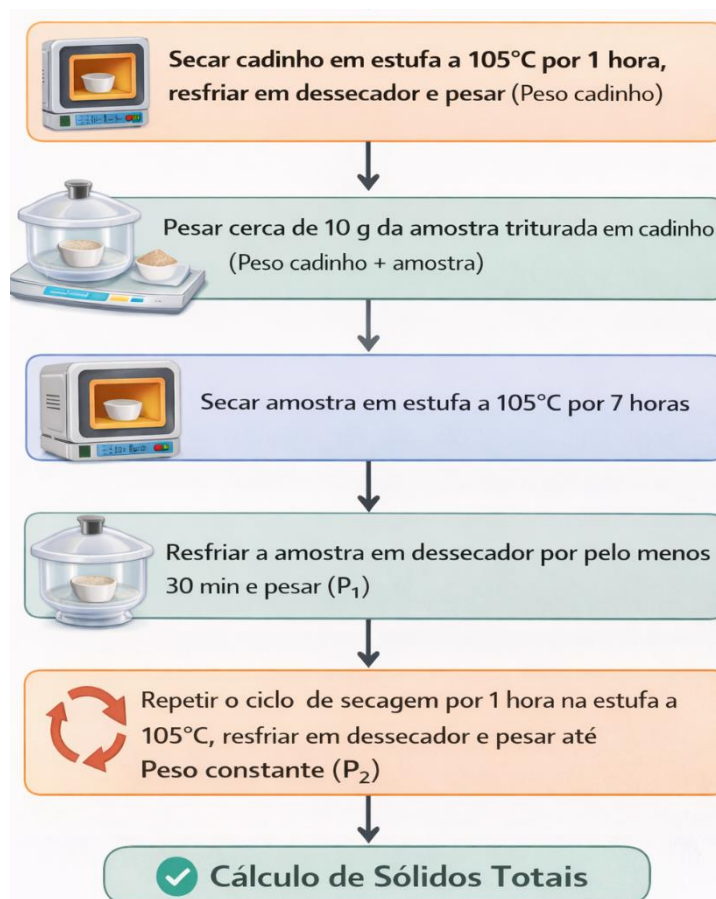
CAB	Cascas de Abacaxi	Resíduos frutícolas
Fonte: Elaborado pelos autores, 2026		

As amostras foram submetidas a trituração mecânica, na proporção 1:1 de substrato e água destilada, para uniformização da granulometria e homogeneização das amostras (Moia et al., 2024; Torres e Luna, 2023).

3.2 Análise de Sólidos

A caracterização dos teores de sólidos foi realizada conforme método gravimétrico descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017), Figuras 1 e 2.

Figura 1 – Fluxograma para a determinação de Sólidos Totais (ST)



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Figura 2 - Fluxograma para determinação de Sólidos Fixos (SF) e Sólidos Voláteis (SV)



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

As Equações 2 a 4 foram utilizadas para a determinação dos valores de sólidos. Os resultados foram expressos como média das duplicatas para cada amostra.

$$\% ST = \frac{(P_2 - P_{\text{cadinho}})}{(P_{\text{cadinho+amostra}} - P_{\text{cadinho}})} \times 100 \quad (2)$$

$$\% SF = \frac{(P_4 - P_{\text{cadinho}})}{(P_{\text{cadinho+amostra}} - P_{\text{cadinho}})} \times 100 \quad (3)$$

$$\% SV = ST - SF \quad (4)$$

3.3 Ensaio de capacidade tampão

O ensaio de capacidade tampão foi realizado exclusivamente com a amostra ARR, em duplicata, para avaliar o comportamento do substrato frente a perturbações ácidas e alcalinas.

O protocolo experimental foi adaptado de Müller e colaboradores (2019). Para tal, foi preparada uma suspensão de 10,00 g amostra ARR triturada e 250,00 mL de água deionizada. A dosagem do reagente neutralizante (HCl ou NaOH 0,1 M) utilizada foi de 0,100 mL min⁻¹, com medições do pH por minuto, em temperatura ambiente e agitação manual. O pHmetro

utilizado foi da marca MS Tecnopon, modelo LUCA-210, e eletrodo de pH combinado com controle de temperatura, previamente calibrado (sensibilidade 96 %). A dosagem do reagente neutralizante ocorreu a cada 5 minutos a fim de garantir a estabilização do sistema.

Para cada réplica, foram realizados ensaios independentes com HCl e com NaOH, totalizando 4 curvas de resposta temporal. A capacidade tampão foi avaliada através dos seguintes parâmetros:

- pH inicial: sem adição de reagente neutralizante
- ΔpH 1ª dose: variação imediatamente após a primeira dosagem
- ΔpH 2ª dose: variação imediatamente após a segunda dosagem
- Recuperação: variação do pH após o período de 10 minutos

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização de sólidos

A caracterização físico-química dos substratos foi realizada através da análise de Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF) e Sólidos Voláteis (SV), cujos valores médios estão apresentados na Tabela 2. Os resultados representam a média de análises em duplicata para cada tipo de substrato, conforme protocolo estabelecido no *Standard Methods* (APHA, 2017). Os resultados indicam expressivos teores de sólidos voláteis (SV) em todas as amostras estudadas, indicando elevado potencial para geração de biogás.

Tabela 2 - Teores médios de sólidos das amostras analisadas

Amostra	ST (%)	SF (%)	SV (%)	SV/ST (%)
AFF	39,10	0,84	38,26	97,85
AFF	37,57	0,83	36,74	97,79
Média ± DP	38,34 ± 1,07	0,84 ± 0,01	37,50 ± 1,07	97,82 ± 0,04
ACE	24,14	0,86	23,28	96,45
ACE	19,78	0,76	19,01	96,14
Média ± DP	21,96 ± 3,08	0,81 ± 0,07	21,15 ± 3,02	96,30 ± 0,22
ARR	38,99	4,53	34,46	88,39
ARR	40,31	5,32	34,99	86,81

Média ± DP	39,65 ± 0,93	4,93 ± 0,56	34,73 ± 0,37	87,60 ± 1,12
CAB	34,81	0,92	33,89	97,36
CAB	33,20	0,94	32,27	97,17
Média ± DP	34,01 ± 1,14	0,93 ± 0,01	33,08 ± 1,15	97,27 ± 0,13
AFF: arroz, feijão e frango; ACE: arroz, cenoura e ervilha; ARR: arroz; CAB: casca de abacaxi				

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

A relação Sólidos Voláteis/Sólidos Totais (SV/ST) mostrou-se elevada em todas as amostras, com valores de $97,82 \pm 0,04\%$ para AFF, $96,30 \pm 0,22\%$ para ACE e $97,27 \pm 0,13\%$ para CAB, indicando excelente biodegradabilidade e predominância de matéria orgânica.

A amostra AFF apresentou o maior teor de sólidos voláteis ($37,50 \pm 1,07\%$), evidenciando o elevado conteúdo orgânico de resíduos alimentares completos. Esse resultado é consistente com a natureza proteica e lipídica dos componentes de origem animal (frango) e leguminosa (feijão), que contribuem para o aumento da fração orgânica volátil.

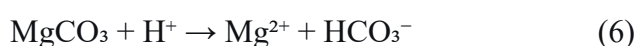
A amostra ACE apresentou o menor teor de sólidos voláteis ($21,15 \pm 3,02\%$) e de sólidos totais ($21,96 \pm 3,08\%$), indicando maior teor de umidade e menor concentração de matéria seca. Apesar do menor potencial absoluto de produção de biogás por massa de substrato, essa amostra mantém relevância para aplicações práticas devido à sua elevada relação SV/ST ($96,30 \pm 0,22\%$), que indica excelente biodegradabilidade da fração seca.

A amostra CAB também mostrou teor significativo de SV ($33,08\%$), confirmando o potencial de resíduos frutícolas para biodigestão, embora com valores ligeiramente inferiores aos encontrados por Santos e colaboradores (2024) para resíduos de abacaxi in natura, possivelmente devido a diferenças na maturação ou variedade da fruta.

A amostra ARR (Arroz puro) apresentou teor de SV de $34,73\%$, valor intermediário entre as demais amostras, porém o maior teor de ST ($39,65\%$). Embora esta amostra apresente relação SV/ST ligeiramente inferior ($0,88$) devido à maior fração inorgânica, mantém alto potencial metanogênico, com mais de um terço de sua composição representada por matéria orgânica volátil. Destaca-se ainda, o teor expressivamente mais elevado de sólidos fixos ($4,93\%$), com fração mineral seis vezes superior em comparação às demais amostras, que variaram entre $0,81\%$ e $0,93\%$ - valores típicos para resíduos alimentares predominantemente orgânicos. Os sólidos fixos representam a fração inorgânica ou mineral do substrato, composta por elementos como cálcio, magnésio, potássio, silício, fósforo e outros minerais que não são volatilizados a 550°C . No caso específico do arroz, estes sólidos fixos podem ser atribuídos à

presença de sílica (comum em cascas e grãos), fitatos (compostos de armazenamento de fósforo) e carbonatos provenientes do solo ou da água de irrigação.

A presença mais significativa de material inorgânico na amostra ARR pode contribuir para a capacidade tampão do sistema de duas formas principais: minerais como carbonatos de cálcio e magnésio atuam como agentes tamponantes diretos, neutralizando ácidos voláteis produzidos durante as etapas iniciais da digestão. A dissolução gradual destes minerais libera íons carbonato e bicarbonato para o meio, conforme as equações 5 e 6:

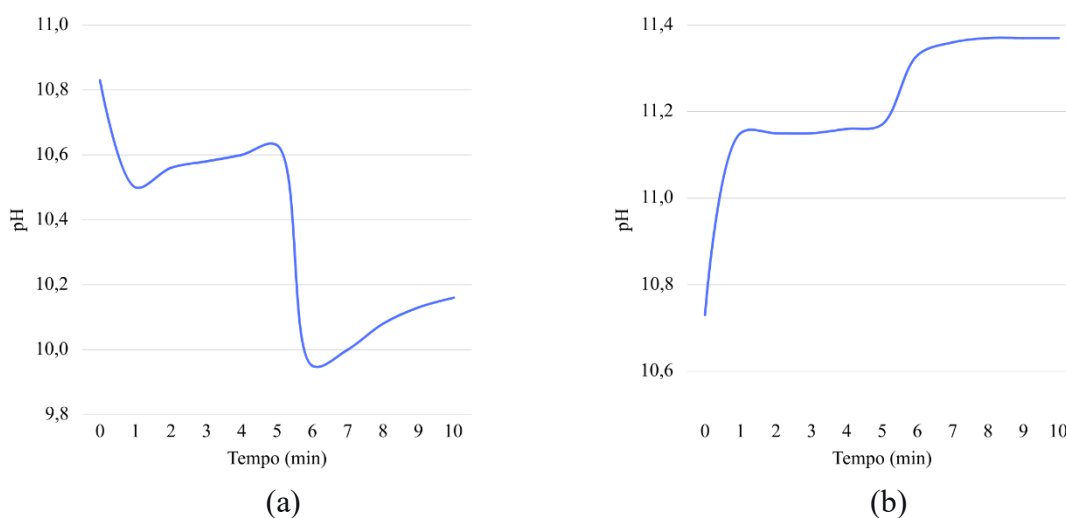


Além do mais, certos minerais podem atuar como nutrientes essenciais para as arqueias metanogênicas, favorecendo o consumo dos ácidos voláteis e indiretamente contribuindo para a estabilidade do pH. O cobalto, níquel, molibdênio e ferro, embora presentes em quantidades-traço, são cofatores enzimáticos cruciais para as metaloenzimas envolvidas na metanogênese (MÜLLER et al., 2019).

4.2 Capacidade Tampão – Amostra ARR

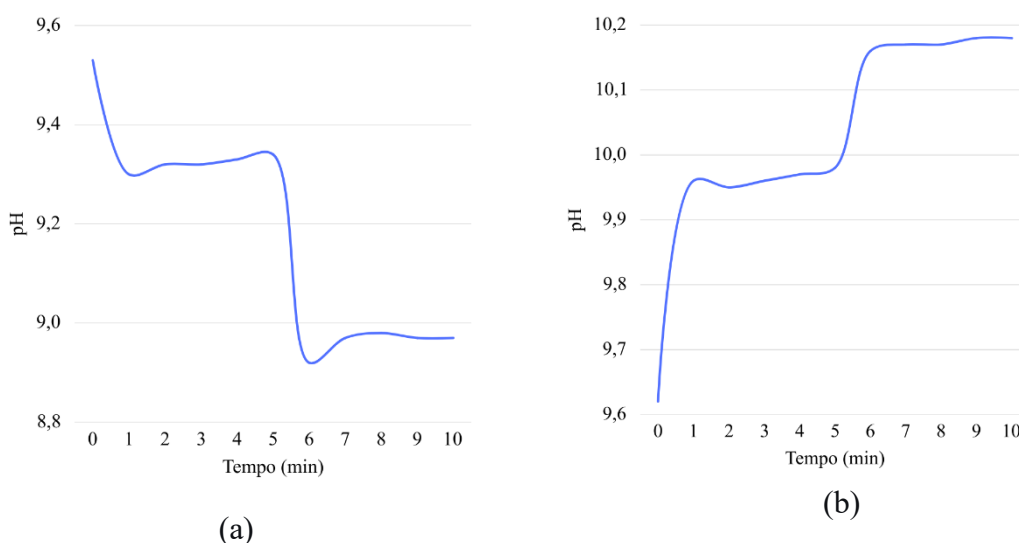
Para avaliar a capacidade tampão da amostra ARR, foram realizados ensaios em duplicata com perturbações ácidas (HCl 0,1 M) e alcalinas (NaOH 0,1 M). As Figuras 3 e 4 apresentam as respostas temporais das duas réplicas, ARR-1 e ARR-2, às perturbações químicas.

Figura 3 - Resposta temporal da réplica ARR-1; (a) à acidificação com HCl 0,1 M e (b) à alcalinização com NaOH 0,1 M.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Figura 4 - Resposta temporal da réplica ARR-2; (a) à acidificação com HCl 0,1 M e (b) à alcalinização com NaOH 0,1 M.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Em todos os ensaios, as dosagens foram realizadas nos tempos 0,5 min (1ª dosagem) e 5 min (2ª dosagem), utilizando 0,50 mL do reagente neutralizante (HCl ou NaOH 0,1 M) contra a suspensão da amostra ARR triturada em 250,00 mL de água destilada. A avaliação da capacidade tampão é crucial para prever a estabilidade do sistema frente a desvios de pH.

Na réplica ARR-1, o pH inicial da suspensão foi aproximadamente 10,78 e após submetida à acidificação, Figura 3(a), observa-se uma queda inicial de pH de aproximadamente 0,40 unidades após a primeira dosagem, seguida de uma recuperação lenta do equilíbrio do sistema, aumentando aproximadamente 0,1 unidade nos minutos subsequentes. A segunda dosagem provocou queda adicional de 0,68 unidades, totalizando uma variação acumulada de 1,08 unidades, com recuperação também gradual do equilíbrio do sistema. Após o período de 5 minutos da segunda dose, o sistema apresentou recuperação de +0,21 unidades, indicando a presença e atuação do sistema tampão. O pH apresentado pela mistura ARR-1 após acidificação foi de aproximadamente 10,15.

Na réplica ARR-1 submetida à alcalinização, Figura 3(b), observou-se aumento inicial de pH de +0,38 unidades após a primeira dosagem, com incremento adicional de +0,16 após a segunda dosagem. Após o período de repouso, observa uma estabilidade no pH em aproximadamente 11,37.

Um comportamento distinto foi observado na réplica ARR-2 submetida à acidificação, Figura 4(a), com pH inicial para a suspensão em torno de 9,68. A queda inicial de pH foi ligeiramente menor (-0,31 unidades) com uma recuperação lenta do equilíbrio até a estabilidade, porém a segunda dosagem provocou queda adicional de -0,42 unidades, resultando em variação acumulada de 0,73 unidades. O aspecto mais relevante foi a recuperação rápida do equilíbrio do sistema, logo no primeiro minuto após a adição da segunda dose, praticamente nula (+0,05 unidades), indicando que o sistema não conseguiu reverter o processo de acidificação, sugerindo esgotamento ou ausência de espécies tamponantes efetivas.

Na réplica ARR-2 submetida à alcalinização, Figura 4(b), o comportamento foi similar ao da réplica ARR-1, com aumento inicial de +0,33 unidades, segunda variação de +0,18 e uma estabilidade em torno de 10,18.

A recuperação parcial do pH evidencia a presença do sistema tampão bicarbonato nas amostras, conforme descrito por Shahabuddin et al. (2018). No entanto, a gestão eficaz desse equilíbrio é crucial, visto que desvios acentuados do pH ótimo (6,8-7,8) podem levar à inibição das bactérias metanogênicas, resultando no colapso do processo.

4.3 Análise comparativa da Capacidade Tampão

A avaliação da capacidade tampão das réplicas é crucial para prever a estabilidade do sistema frente a desvios de pH e dimensionar estratégias de controle. A Tabela 3 apresenta a análise comparativa detalhada da resposta do sistema às perturbações ácidas (HCl) e alcalinas (NaOH), resumizando os choques iniciais (ΔpH 1ª dose), a variação secundária (ΔpH 2ª dose) e a recuperação espontânea após o período de repouso.

Conforme observado na Tabela 3, as réplicas ARR-1 e ARR-2, ambas compostas por arroz, apresentaram respostas distintas frente à acidificação. A réplica ARR-1 apresentou recuperação espontânea de +0,21 após a adição de HCl, indicando atuação efetiva do sistema tampão (SHAHABUDDIN et al., 2018; PEREIRA et al., 2013; MÜLLER et al., 2019). Em contraste, a réplica ARR-2 apresentou recuperação mais limitada (+0,05), sugerindo maior sensibilidade à perturbação ácida.

Tabela 3 - Análise comparativa da capacidade tampão da Amostra ARR

Amostra	Reagente	ΔpH 1ª dose	ΔpH 2ª dose	Recuperação
ARR-1	HCl	-0,40	-0,68	+0,21
ARR-2	HCl	-0,31	-0,42	+0,05
Média $\pm$ DP	HCl	-0,36 $\pm$ 0,06	-0,55 $\pm$ 0,18	+0,13 $\pm$ 0,11
ARR-1	NaOH	+0,38	+0,16	+0,20
ARR-2	NaOH	+0,33	+0,18	+0,20
Média $\pm$ DP	NaOH	+0,36 $\pm$ 0,04	+0,17 $\pm$ 0,01	+0,20 $\pm$ 0,00

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Apesar dessa diferença na resposta inicial, ambas as amostras apresentaram recuperação do pH após o período de repouso, indicando a presença de capacidade tamponante no sistema. Essa variação pode estar associada à natureza heterogênea do arroz, cuja composição pode apresentar diferenças nas proporções de carboidratos, proteínas, compostos minerais e outros constituintes capazes de influenciar o equilíbrio ácido-base do meio. No entanto, a confirmação desse comportamento requer a realização de ensaios adicionais, com maior número de repetições experimentais, a fim de avaliar a reprodutibilidade dos resultados e compreender com maior precisão os fatores que influenciam a resposta do sistema à acidificação.

Os resultados apresentados possuem implicações práticas significativas para a operação eficiente de biodigestores. Para substratos com características similares à réplica ARR-2, que demonstrou vulnerabilidade à acidificação, torna-se essencial o monitoramento rigoroso de pH e a dosagem preventiva de agentes tamponantes. Neste contexto, a prática de co-digestão com materiais de maior estabilidade emerge como estratégia viável para mitigar riscos de acidificação, permitindo balancear a carga orgânica com a capacidade tampão do sistema. A identificação de perfis distintos de resposta química, como demonstrado experimentalmente, possibilita o desenvolvimento de estratégias de controle operacional personalizadas.

A quantificação da capacidade tampão através de ensaios similares aos realizados neste trabalho fornece parâmetros fundamentais para o dimensionamento adequado de sistemas de dosagem de corretores de pH. Esta abordagem permite otimizar custos operacionais através do ajuste preciso das dosagens necessárias, evitando tanto o subdimensionamento (que levaria a colapsos por acidificação) quanto o sobredimensionamento (que implica em custos desnecessários).

A caracterização prévia da capacidade tampão de substratos específicos, considerando sua variabilidade intrínseca, constitui, portanto, ferramenta valiosa para o planejamento e operação sustentável de sistemas de digestão anaeróbia.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou a importância da caracterização integrada de parâmetros físicos e químicos para a avaliação da estabilidade de substratos de biodigestão frente a perturbações de pH. A metodologia proposta, combinando análise de sólidos e ensaios de capacidade tampão com monitoramento temporal, demonstrou potencial para ser uma ferramenta robusta na análise preditiva da estabilidade de reatores.

Os principais achados revelam elevado potencial metanogênico em todos os substratos analisados, com teores de sólidos voláteis variando de $21,15 \pm 3,02\%$ (ACE) a $37,50 \pm 1,07\%$ (AFF). A amostra CAB apresentou teor intermediário de SV ($33,08 \pm 1,15\%$), enquanto a amostra ARR registrou $34,73 \pm 0,37\%$ de SV e maior fração de sólidos fixos ($4,93 \pm 0,56\%$), sugerindo possível contribuição inorgânica para o tamponamento do sistema.

O estudo identificou uma variabilidade na capacidade tampão entre réplicas de um mesmo substrato (ARR): enquanto uma réplica apresentou recuperação de +0,21 frente à acidificação, a outra mostrou recuperação de apenas +0,05. Esta diferença sugere uma

influência da natureza heterogênea do arroz que pode afetar o equilíbrio ácido-base do meio dependendo das proporções de seus constituintes. Contudo, por se tratar de um ensaio preliminar, requer a realização de ensaios adicionais para avaliar a reprodutibilidade dos resultados.

Em termos de aplicação, os perfis de resposta das curvas de capacidade tampão identificados fornecem parâmetros concretos para o dimensionamento e operação eficiente de biodigestores. A necessidade de controle e monitoramento rigoroso do pH é reafirmada, e a caracterização prévia da capacidade tampão dos substratos, considerando sua variabilidade intrínseca, deve ser estudada no planejamento e a sustentabilidade dos sistemas de digestão anaeróbia.

REFERÊNCIAS

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23^a ed. American Public Health Association, 2540 Solids, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO (ABiogás). Potencial de produção de biogás no Brasil: relatório técnico 2023. São Paulo: Abiogás, 2023.

CHEN, L. et al. The role of pH buffering agents in enhancing methane yield from anaerobic digestion. *Journal of Cleaner Production*, v. 414, 136822, 2023.

DOESTHALE, Y. G.; DEVARA, S.; RAO, S.; BELAVADY, B. Effect of milling on mineral and trace element composition of raw and parboiled rice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 30, n. 1, p. 40-46, 1979.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Estudo sobre a estabilidade operacional de biodigestores de pequena escala. Brasília: EMBRAPA, 2022.

MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X.; REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 540-555, 2015.

MÜLLER, R.; FISCHER, S.; KLEIN, P. Impact of acidification and pH recovery on anaerobic digestion performance. *Journal of Hazardous Materials*, v. 380, 120884, 2019.

PARK, S.; LEE, Y.; KIM, T. Optimization of pH control for biogas yield improvement in anaerobic digesters. *Energy*, v. 202, 117924, 2020.

SANTOS, E. C. S. et al. Caracterização de substratos agrícolas para digestão anaeróbia: análise de sólidos voláteis e potencial metanogênico. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 13, n. 2, p. 45-58, 2024.

SHAHABUDDIN, M.; ALAM, M. T.; KRISHNA, B. pH control in anaerobic digestion process for biogas production. *Renewable Energy*, v. 116, p. 342-349, 2018.



ZUBAIR, M.; ANWAR, F.; ALI, S.; IQBAL, T. Proximate composition and minerals profile of selected rice (*Oryza sativa* L.) varieties of Pakistan. Asian Journal of Chemistry, v. 24, n. 1, p. 417-421, 2012.