

## APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE LODO DE FLOTADOR DE ABATEDOURO DE FRANGOS PRÉ-TRATADO COM NaOH

**Felippe Martins Damaceno** - Universidade Estadual de Maringá (UEM), Campus Regional de Umuarama, Departamento de Meio Ambiente (DAM) – [fmdamaceno2@uem.br](mailto:fmdamaceno2@uem.br)

**Monica Sarolli Silva de Mendonça Costa** - Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGAGRI) - [monica.costa@unioeste.br](mailto:monica.costa@unioeste.br)

**Thiago Edwiges** - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - [thiago.edwiges@gmail.com](mailto:thiago.edwiges@gmail.com)

**Tarcio Rocha Lopes** - Universidade Estadual de Maringá (UEM) - [trcrch@gmail.com](mailto:trcrch@gmail.com)

**Yara Campos Miranda** - Universidade Estadual de Maringá (UEM), Campus Regional de Umuarama, Departamento de Meio Ambiente (DAM) - [ycmiranda2@uem.br](mailto:ycmiranda2@uem.br)

**Resumo:** O lodo de flotador de abatedouro de frangos (LFAF) é um resíduo agroindustrial rico em lipídios e proteínas, apresentando elevado potencial para recuperação energética por meio da digestão anaeróbia. Entretanto, limitações associadas à baixa biodegradabilidade e à lenta etapa de hidrólise podem comprometer a eficiência do processo. Nesse contexto, o presente estudo avaliou a influência de pré-tratamentos alcalinos com hidróxido de sódio (NaOH) sobre a produção de metano e a degradação da matéria orgânica do LFAF. Foram avaliadas cinco concentrações de NaOH (0,02; 0,05; 0,15; 0,25 e 0,50 gNaOH gVS<sup>-1</sup>substrato), aplicadas durante 60 minutos em temperatura ambiente. Posteriormente, foram conduzidos ensaios de potencial bioquímico de metano em condições mesofílicas (37 °C). Os pré-tratamentos promoveram alterações significativas nas características físico-químicas do substrato, especialmente redução dos teores de lipídios e aumento da solubilização da matéria orgânica. As maiores produções acumuladas de metano foram obtidas nos tratamentos 0,25 e 0,50 gNaOH gVS<sup>-1</sup>substrato, alcançando 471,3 e 475,1 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> gVS<sup>-1</sup>, respectivamente, correspondendo a incrementos de até 26,9% em relação ao controle. O pré-tratamento com 0,25 gNaOH gVS<sup>-1</sup>substrato apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho energético e consumo de reagente, demonstrando elevado potencial para aplicação na valorização energética de resíduos da indústria avícola.

**Palavras-chave:** Digestão anaeróbia, Resíduos agroindustriais, Pré-tratamento alcalino, Biogás

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



[abes-rs@abes-rs.org.br](mailto:abes-rs@abes-rs.org.br)



[www.abes-rs.org.br](http://www.abes-rs.org.br)

## ENERGY RECOVERY FROM POULTRY SLAUGHTERHOUSE SLUDGE PRE-TREATED WITH NaOH

**Abstract:** Poultry slaughterhouse flotation sludge (PSFS) is an agro-industrial residue rich in lipids and proteins, presenting high potential for energy recovery through anaerobic digestion. However, limitations associated with low biodegradability and a slow hydrolysis step can compromise the efficiency of the process. In this context, the present study evaluated the influence of alkaline pretreatments with sodium hydroxide (NaOH) on methane production and organic matter degradation in PSFS. Five NaOH concentrations (0.02, 0.05, 0.15, 0.25, and 0.50 gNaOH gVS<sup>-1</sup>substrate) were evaluated, applied for 60 minutes at room temperature. Subsequently, biochemical methane potential assays were conducted under mesophilic conditions (37 °C). The pretreatments promoted significant changes in the physicochemical characteristics of the substrate, especially a reduction in lipid content and an increase in the solubilization of organic matter. The highest cumulative methane productions were obtained in the 0.25 and 0.50 gNaOH gVS<sup>-1</sup> substrate treatments, reaching 471.3 and 475.1 mLN CH<sub>4</sub> gVS<sup>-1</sup>, respectively, corresponding to increases of up to 26.9% compared to the control. The pretreatment with 0.25 gNaOH gVS<sup>-1</sup> substrate showed the best balance between energy performance and reagent consumption, demonstrating high potential for application in the energy recovery of poultry industry waste.

**Keywords:** Anaerobic digestion, Agro-industrial waste, Alkaline pretreatment, Biogas

### 1. INTRODUÇÃO

A produção de carne de frango ocupa posição de destaque no cenário agroindustrial mundial, desempenhando papel fundamental na segurança alimentar e no desenvolvimento econômico de diversos países. Nesse contexto, o Brasil consolidou-se como o maior exportador global e o terceiro maior produtor de carne de frango, alcançando aproximadamente 15 milhões de toneladas produzidas em 2024, sendo mais de 35% desse volume destinado ao mercado externo, com geração de receitas próximas a US\$ 9,9 bilhões (ABPA, 2025). Entretanto, o crescimento contínuo desse setor tem sido acompanhado pelo aumento da geração de resíduos agroindustriais, especialmente aqueles provenientes das operações de abate e processamento.

Dentre os resíduos gerados, o lodo de flotador de abatedouro de frangos (LFAF) destaca-se pela elevada carga orgânica e pelo potencial de recuperação energética. Esse resíduo é produzido durante o tratamento físico-químico dos efluentes industriais e apresenta composição predominantemente constituída por lipídios e proteínas, que podem representar mais de 80% da matéria orgânica total (DAMACENO et al., 2022; DAMACENO et al., 2019). Apesar de suas características favoráveis para o aproveitamento energético, o LFAF ainda é frequentemente destinado à compostagem, produção de farinhas ou disposição em aterros sanitários, alternativas que apresentam limitações relacionadas a

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

custos operacionais, exigências sanitárias e restrições de comercialização decorrentes de potenciais riscos à saúde pública (GOODING; MEEKER, 2016; WANG et al., 2018).

Nesse cenário, a digestão anaeróbia (DA) surge como uma tecnologia sustentável capaz de promover a estabilização da matéria orgânica e, simultaneamente, gerar biogás com elevado teor de metano, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e para a implementação de estratégias de economia circular (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011; YIN et al., 2023). A atratividade da DA para o tratamento do LFAF está associada ao elevado potencial bioquímico de produção de metano de compostos lipídicos e proteicos, estimado em aproximadamente 1.014 e 740 L  $\text{CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$  SV adicionados, respectivamente, valores substancialmente superiores aos observados para carboidratos, cujo potencial gira em torno de 370 L  $\text{CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$  SV adicionados (WAN et al., 2011). Contudo, a eficiência da digestão anaeróbia desse resíduo pode ser limitada por fatores como baixa solubilidade dos compostos orgânicos, hidrofobicidade dos lipídios, formação de espumas e crostas superficiais e, principalmente, pela lentidão da etapa de hidrólise, considerada uma das fases limitantes do processo (ALQARALLEH et al., 2019; CUETOS et al., 2017).

Como o objetivo de superar essas limitações, diferentes técnicas de pré-tratamento têm sido investigadas para aumentar a disponibilidade da matéria orgânica aos microrganismos anaeróbios. Entretanto, grande parte das pesquisas concentra-se em resíduos lignocelulósicos, existindo ainda uma carência de estudos direcionados a resíduos ricos em lipídios e proteínas, como o LFAF (EDWIGES et al., 2019; MACHHIRAKE et al., 2024; YIN et al., 2023; KOWTHAMAN et al., 2021). Os pré-tratamentos podem ser classificados em físicos, térmicos, químicos e biológicos, sendo empregados para promover a desestruturação de matrizes orgânicas complexas e aumentar a fração biodegradável disponível para conversão em biogás (ELALAMI et al., 2020; WANG et al., 2018).

Entre as alternativas químicas, o pré-tratamento alcalino tem recebido atenção especial devido à sua capacidade de promover a saponificação de lipídios, desnaturação de proteínas e rompimento de estruturas orgânicas complexas, resultando em maior solubilização da matéria orgânica e favorecendo a etapa de hidrólise anaeróbia (LI et al., 2012). Além disso, sua aplicação apresenta a vantagem de poder ser realizada em condições brandas de temperatura, reduzindo demandas energéticas adicionais ao processo (BASTOS et al., 2021). Dentre os agentes alcalinos disponíveis, o hidróxido de sódio (NaOH) destaca-se pela elevada eficiência na solubilização de compostos orgânicos, ampla disponibilidade comercial e baixo custo relativo, sendo frequentemente empregado para aumentar a biodegradabilidade de resíduos orgânicos complexos. Estudos recentes demonstram que a utilização de NaOH pode promover incrementos significativos na solubilização da matéria orgânica e, consequentemente, na produção de metano durante a digestão anaeróbia (MACHHIRAKE et al., 2024; LIU et al., 2021).

Considerando o elevado volume de LFAF gerado pela indústria avícola, sua composição rica em compostos energeticamente valiosos e os desafios associados à sua degradação biológica, torna-se necessário ampliar o conhecimento sobre a aplicação de pré-tratamentos alcalinos baseados em NaOH para potencializar o desempenho da digestão anaeróbia. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos do pré-tratamento alcalino com NaOH, aplicado em diferentes concentrações ao lodo de flotador de abatedouro de frangos, sobre a produção de metano em reatores anaeróbios operados em batelada, bem como a eficiência do tratamento dos resíduos, buscando

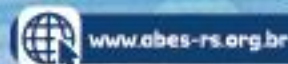
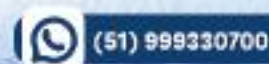
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



contribuir para o aprimoramento de estratégias de valorização energética de resíduos lipoproteicos gerados pela cadeia produtiva avícola.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### *Substrato e inóculo*

O LFAF foi coletado em uma unidade de tratamento físico-químico da linha vermelha de uma agroindústria de abate de aves da região Oeste do Paraná/Brasil. O processo inclui um tratamento preliminar em que o efluente com sangue, vísceras e outros resíduos do abate passam por peneiras e tanque de equalização, seguido de tratamento físico-químico no flotor, local em que o material flotado é recolhido e encaminhado à centrífuga tridecanter que separa água, óleo e lodo.

O inóculo utilizado como fonte de microrganismos para os ensaios de digestão anaeróbia foi fornecido pelo Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás), localizado em Foz do Iguaçu/Brasil. O inóculo foi composto por uma mistura de lodo de reatores anaeróbios que tratam dejetos suínos e bovinos, além de dejetos bovinos brutos na proporção 1: ½ : ½ (w/w) respectivamente, visando garantir ao menos 50% de matéria orgânica (base em sólidos voláteis) e níveis adequados de conversão da matéria orgânica em biogás (EDWIGES et al., 2018).

### *Pré-tratamentos alcalinos com NaOH*

Foram aplicados pré-tratamentos alcalinos em cinco concentrações: 0,02, 0,05, 0,15, 0,25 e 0,5 g/g<sub>VSubstrato</sub> com NaOH. Os pré-tratamentos foram realizados com uma mistura de 250 mL de solução alcalina (água destilada + solução química) e 25 g de LFAF (em base seca), com três repetições para cada concentração. O teor de sólidos totais da mistura foi ajustado para 10% (MACHHIRAKE et al., 2024). Os reagentes utilizados foram de padrão analítico e a pureza do NaOH foi de 99,1%. Após adicionar o LFAF às diferentes soluções de KOH, a mistura foi homogeneizada e ficou em reação durante um período de 60 minutos em temperatura ambiente e o material resultante foi utilizado como substrato nos ensaios em batelada.

### *Ensaios em batelada para a determinação do potencial bioquímico de metano*

Após a aplicação dos pré-tratamentos, o ensaio de potencial bioquímico de metano (PBM) foi realizado de acordo com Holliger et al. (2016). A proporção entre inóculo e substrato (RIS) foi fixada em 3:1 em massa de sólidos voláteis. O experimento foi realizado em frascos reatores de vidro de 125 mL (com volume suficiente de *headspace* para armazenamento do biogás) e conduzido em temperatura mesofílica (37 °C) até o momento em que a produção diária de biogás representar menos de 1% da produção acumulada de biogás. Três reatores adicionais foram utilizados para avaliar a atividade biológica do inóculo, utilizando celulose microcristalina (Sigma-Aldrich, 20 µm de diâmetro) como amostra de referência (controle positivo), a fim de validar a eficácia do inóculo utilizado nos testes e três frascos foram abastecidos apenas com inóculo para avaliar a produção

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

endógena de biogás (controle negativo). Após preenchimentos dos frascos foi expurgado Nitrogênio gasoso ( $N_2$ ) visando criar imediatamente uma condição ambiental livre de oxigênio.

O biogás foi quantificado por meio do deslocamento do gás em uma seringa de vidro de 100 mL (Hamilton / Gastight) até que a pressão interna dos frascos fosse equivalente à pressão atmosférica (pressão manométrica). O volume de biogás produzido foi monitorado diariamente e padronizados nas condições normais de temperatura e pressão por meio da Equação 1.

$$V_0 = V \cdot \frac{(P_L - P_W) \cdot T_0}{P_0 \cdot T} \quad (1)$$

Em que:

$V_0$  = volume de biogás padronizado (mL);

$V$  = volume de biogás registrado (mL);

$P_L$  = pressão atmosférica no momento do registro (mbar);

$P_W$  = pressão de vapor da água (mbar);

$T_0$  = temperatura normalizada (273 K);

$P_0$  = pressão normalizada (1,013 mbar);

$T$  = temperatura ambiente (K).

A pressão de vapor de água ( $P_W$ ) também foi considerada, pois a mesma superestima entre 2 e 8% o volume do biogás produzido em condições normais de temperatura e pressão (STRÖMBERG, NISTOR, LIU, 2014). O cálculo da pressão de vapor de água foi realizado por meio da equação de Antoine (Equação 2), que considera a temperatura ambiente ( $T$ ).

$$P_W = 10^{8,1962 - \frac{1730,63}{T - 39,724}} \quad (2)$$

## Métodos analíticos

Os substratos (antes e depois dos pré-tratamentos) e os digestatos foram caracterizados por meio de análises físico-químicas. Os sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis dissolvidos foram determinados pelos métodos gravimétricos, baseados na secagem, filtração e ignição da amostra (APHA, 2023).

As leituras de pH e CE foram realizadas com um pHmêtro e um condutivímetro de bancada. Para medir o pH das amostras sólidas (lodo) foram preparadas soluções aquosas de proporção 1:5 (massa:volume) e agitadas por 30 min (TEDESCO et al., 1995).

O Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) foi determinado por meio da digestão das amostras com ácido sulfúrico, seguida da destilação utilizando o destilador de Kjeldahl e titulação com  $H_2SO_4$  0,0025 mol (APHA, 2023).

O teor de lipídios foi obtido por extração contínua em aparelho do tipo Soxhlet usando o éter de petróleo como solvente extrator e quantificado por gravimetria (CECCHI, 1999). A proteína bruta foi estimada a partir do NTK como o produto do NTK e 6,25 (um fator de conversão de nitrogênio em proteína, FAO, 2002). O teor de proteínas solúveis foi determinado para a fração líquida dos pré-tratamentos, após centrifugação. O conteúdo total de carboidratos foi estimado por meio da

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

composição aproximada pela diferença entre 100 e a soma da porcentagem de lipídios, proteínas, cinzas e água (FAO, 2002).

As eficiências de remoção de material orgânico foram calculadas a partir das concentrações iniciais ( $C_i$ , antes da digestão anaeróbia) e finais ( $C_f$ , depois da digestão anaeróbia) de ST, SV, DQO, lipídios e proteínas (Equação 3) (Jin et al., 2016).

$$E (\%) = \left( \frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100 \quad (3)$$

A determinação da composição do biogás foi realizada quinzenalmente por meio de cromatografia gasosa (Clarus 680, Perkin Elmer) com detector de condutividade térmica (TCD) e coluna empacotada Plot Q com comprimento de 30 metros e diâmetro interno de 0,32 milímetros. A vazão de 30 mL min<sup>-1</sup> de Hélio (He) foi utilizada como arraste. A calibração do cromatógrafo foi realizada com gás padrão de biogás contendo 2 ± 0,02% de oxigênio, 8 ± 0,1% de nitrogênio, 55 ± 1,0% de metano e 35 ± 0,7% de dióxido de carbono. A amostragem do biogás foi realizada em seringas de vidro próprias para gases.

### Análises estatísticas

O delineamento experimental aplicado tanto na primeira quanto na segunda fase foi inteiramente casualizado, com três repetições para cada tratamento. Os dados obtidos foram avaliados individualmente mediante medidas de tendência central e dispersão, bem como por análise de variância e teste de comparação múltipla de médias de Tukey com 5% de significância.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Efeito dos pré-tratamentos alcalinos no lodo de flotador

Os resultados apresentados na Tabela 1 evidenciam mudanças significativas nas propriedades físico-químicas do substrato após a aplicação de pré-tratamentos alcalinos. Tais alterações são determinantes para a eficiência da digestão anaeróbia em termos de solubilização de sólidos, liberação de nutrientes e modificações na composição orgânica do substrato.

Tabela 1 Características do LFAF antes e após a aplicação dos pré-tratamentos alcalinos utilizando NaOH de 0,02 a 0,50 g / gVS<sub>substrato</sub>.

| Tratamento | pH                 | CE<br>(mS/cm)     | ST (%)            | SV (%)            | SF<br>(%)         | NTK<br>(%)        | PT<br>(%SV)       | LT<br>(%SV)       |
|------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Controle   | 7,19 <sup>e</sup>  | 2,9 <sup>e</sup>  | 10,1 <sup>d</sup> | 91,4 <sup>a</sup> | 8,6 <sup>d</sup>  | 5,7 <sup>a</sup>  | 35,8 <sup>a</sup> | 22,8 <sup>a</sup> |
| NaOH 0,02  | 7,51 <sup>e</sup>  | 5,2 <sup>d</sup>  | 10,4 <sup>d</sup> | 90,1 <sup>a</sup> | 9,9 <sup>d</sup>  | 5,1 <sup>b</sup>  | 31,9 <sup>b</sup> | 22,1 <sup>a</sup> |
| NaOH 0,05  | 9,61 <sup>d</sup>  | 5,3 <sup>d</sup>  | 10,1 <sup>d</sup> | 87,8 <sup>a</sup> | 12,2 <sup>d</sup> | 5,0 <sup>b</sup>  | 31,2 <sup>b</sup> | 17,8 <sup>b</sup> |
| NaOH 0,15  | 10,87 <sup>c</sup> | 19,5 <sup>c</sup> | 10,8 <sup>c</sup> | 71,1 <sup>b</sup> | 28,9 <sup>c</sup> | 4,5 <sup>cd</sup> | 28,1 <sup>c</sup> | 4,6 <sup>c</sup>  |

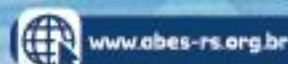
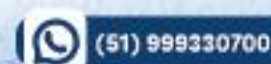
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



|           |                    |                   |                   |                   |                   |                  |                   |                  |
|-----------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| NaOH 0,25 | 11,45 <sup>b</sup> | 39,4 <sup>b</sup> | 11,5 <sup>b</sup> | 63,8 <sup>b</sup> | 36,2 <sup>b</sup> | 4,3 <sup>d</sup> | 26,9 <sup>d</sup> | 5,0 <sup>c</sup> |
| NaOH 0,50 | 13,06 <sup>a</sup> | 75,8 <sup>a</sup> | 12,8 <sup>a</sup> | 53,0 <sup>c</sup> | 47,0 <sup>a</sup> | 3,3 <sup>e</sup> | 20,6 <sup>e</sup> | 3,1 <sup>d</sup> |

CE: condutividade elétrica; ST: sólidos totais; SV: sólidos voláteis; NTK: nitrogênio total Kjeldahl;

PT: proteína total; LT: lipídios totais. Teste de comparação múltipla de médias de Tukey ( $p < 0,05$ ).

(média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ )

O aumento do pH com o incremento das concentrações do alcalinizante era esperado, atingindo valores consideravelmente superiores ao controle (pH 7,19) e acima dos valores ideais recomendados para a digestão anaeróbia quando concentrações superiores a 0,02 g/gSV<sub>substrato</sub> foram adicionadas. Os pré-tratamentos com NaOH resultaram em elevações expressivas nos valores de pH (de 7,51 a 13,06). O NaOH é uma base forte devido ao grau de dissociação da ligação iônica (LEE; HAN, 2013; HAMIDAH et al., 2021). Sua constante de dissociação ( $K_b$ ) a 20 °C é de  $6,3 \times 10^{-1}$ , o que implica em uma grande força de dissociação do NaOH (SPOHRER; WYATT, 2020).

A condutividade elétrica (CE) também aumentou progressivamente com a concentração dos alcalinizantes, sendo significativamente maior nos tratamentos com 0,25 e 0,50 g/g<sub>VS</sub> de NaOH. Esse aumento está relacionado à presença de íons  $Na^+$  adicionados, além dos íons liberados a partir da degradação dos compostos presentes no lodo (MOUNEIMNE et al., 2003; DIAMANTIS et al., 2021). Embora a elevação da CE possa representar um fator inibitório para a atividade metanogênica em concentrações extremas por causar danos às membranas da célula microbiana, Baek et al. (2021) relataram desempenhos na produção de metano igualmente satisfatórios em condições de baixa (6,5 mS/cm) e alta (304 mS/cm) condutividade elétrica.

O aumento das concentrações de NaOH aplicadas nos pré-tratamentos resultou em elevações progressivas nos teores de sólidos totais (ST) e, simultaneamente, em reduções nos teores de sólidos voláteis (SV), nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e proteínas. No entanto, a interpretação direta desses parâmetros na matriz total pode ser limitada, uma vez que os reagentes alcalinos adicionados, de natureza mineral e não volátil, contribuem significativamente para o acréscimo de cinzas e para a diluição relativa dos constituintes orgânicos, como SV, NTK e proteínas.

Já o efeito dos pré-tratamentos alcalinos nos teores de lipídios foi observado na fração sólida. As concentrações de 0,15 a 0,5 g de NaOH por g<sub>VS</sub>substrato resultaram em reduções expressivas no teor de lipídios em comparação com o controle (Tabela 1). Isso pode ser explicado pela reação de saponificação parcial, a qual quebra os triglicerídeos em gliceróis e sabão (ELALAMI et al., 2020).

### ***Influência dos pré-tratamentos na produção de biogás e de metano***

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de produção acumulada de biogás, teor de metano no biogás, produção acumulada de metano e efeito dos pré-tratamentos em relação ao controle. Quando se compara todas as concentrações de pré-tratamentos com NaOH, o pré-tratamento 0,25 g<sub>NaOH</sub>/g<sub>VS</sub>substrato destacou-se com a maior produção de biogás (671,4 mL<sub>N</sub>/g<sub>VS</sub>).

Tabela 2 Produção acumulada de biogás, teor de metano no biogás, produção acumulada de metano e efeito dos pré-tratamentos em relação ao controle.

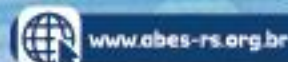
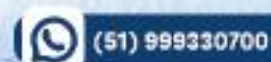
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



| Tratamento | Produção de biogás (mL <sub>N</sub> /g <sub>VS</sub> ) | Teor de CH <sub>4</sub> (%) | Produção de CH <sub>4</sub> (mL <sub>N</sub> /g <sub>VS</sub> ) | Variação da produção de CH <sub>4</sub> em relação ao controle (%) | Efeito     |
|------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------|
| Controle   | 569,2 <sup>d</sup>                                     | 65,8 <sup>c</sup>           | 374,4 <sup>d</sup>                                              | -                                                                  | -          |
| NaOH 0,02  | 620,9 <sup>c</sup>                                     | 64,9 <sup>c</sup>           | 402,9 <sup>c</sup>                                              | +7,6                                                               | sinérgico  |
| NaOH 0,05  | 554,0 <sup>d</sup>                                     | 65,5 <sup>c</sup>           | 363,0 <sup>d</sup>                                              | -3,0                                                               | antagônico |
| NaOH 0,15  | 654,0 <sup>b</sup>                                     | 66,4 <sup>c</sup>           | 434,5 <sup>b</sup>                                              | +16,1                                                              | sinérgico  |
| NaOH 0,25  | 671,4 <sup>a</sup>                                     | 70,2 <sup>b</sup>           | 471,3 <sup>a</sup>                                              | +25,9                                                              | sinérgico  |
| NaOH 0,50  | 607,8 <sup>c</sup>                                     | 78,2 <sup>a</sup>           | 475,1 <sup>a</sup>                                              | +26,9                                                              | sinérgico  |

Os maiores teores de metano foram obtidos nos pré-tratamentos 0,50 e 0,25 g<sub>NaOH</sub>/g<sub>VSsubstrato</sub> (78,2% e 70,2%, respectivamente), destacando-se do controle (65,8%). De modo geral, o teor de metano nos tratamentos apresentou uma tendência de aumento conforme a concentração da base foi maior (Tabela 2). Isso pode ser explicado pela elevação do pH e fornecimento da alcalinidade ao sistema, o que atribui maior estabilidade à atividade metanogênica e menor formação de CO<sub>2</sub> livre devido à sua conversão em metano (HOU et al., 2021). Li et al. (2017) realizaram pré-tratamento de lodo de esgoto com Ca(OH)<sub>2</sub>, até pH 10, em escala piloto e relataram teores de metano de 75,4% no biogás. Os elevados teores de metano, provocados pelos pré-tratamentos alcalinos, podem melhorar potencialmente o aproveitamento energético do biogás (LIU et al., 2021). Os elevados teores de metano nos tratamentos supracitados fizeram que os volumes de metano também se destacassem. Com a produção de 475,1 e 471,3 mL<sub>N</sub>/g<sub>VS</sub> dos pré-tratamentos 0,50 e 0,25 g<sub>NaOH</sub>/g<sub>VSsubstrato</sub>, respectivamente, observou-se um efeito sinérgico de 26,9% e 25,9%, respectivamente, sobre o controle. Como a produção volumétrica de metano foi estatisticamente igual entre os pré-tratamentos 0,50 e 0,25 g<sub>NaOH</sub>/g<sub>VSsubstrato</sub>, pode-se dizer que o pré-tratamento com 0,25 g<sub>NaOH</sub>/g<sub>VSsubstrato</sub> é mais atrativo pensando em custo-benefício e aplicação dessa tecnologia em escalas industriais.

### Eficiência de remoção de material orgânico

Dentre os pré-tratamentos com NaOH, a maior eficiência de remoção de SV foi obtida na concentração de 0,25 g/g<sub>VSsubstrato</sub> (25,2%) (Tabela 3). Como esperado, esse também foi o pré-tratamento que resultou em maiores produções acumuladas de biogás (Tabela 9). Isso porque os SV removidos correspondem aos materiais orgânicos do substrato que foram convertidos em metano, dióxido de carbono, água e outros gases (biogás) pela atividade dos microrganismos (XIAO et al., 2020).

Tabela 3 Eficiências de remoção de sólidos voláteis (VS), proteínas e lipídios do LFAF não tratado (controle) e dos pré-tratamentos com NaOH.

| Tratamento | Remoções              |                        |                       |
|------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
|            | VS (%)                | Proteínas (%)          | Lipídios (%)          |
| Controle   | 23,2±0,2 <sup>d</sup> | 60,4±0,7 <sup>cd</sup> | 75,0±0,7 <sup>d</sup> |

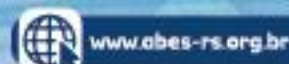
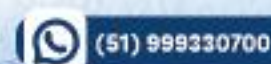
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



|           |                       |                        |                        |
|-----------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| NaOH 0,02 | 22,4±0,4 <sup>e</sup> | 53,0±0,3 <sup>f</sup>  | 81,0±0,3 <sup>c</sup>  |
| NaOH 0,05 | 21,6±0,2 <sup>f</sup> | 57,5±0,4 <sup>de</sup> | 81,6±1,8 <sup>c</sup>  |
| NaOH 0,15 | 23,8±0,0 <sup>c</sup> | 61,7±1,3 <sup>bc</sup> | 89,7±0,7 <sup>b</sup>  |
| NaOH 0,25 | 25,2±0,0 <sup>b</sup> | 63,9±0,6 <sup>bc</sup> | 90,9±0,9 <sup>ab</sup> |
| NaOH 0,50 | 19,6±0,0 <sup>f</sup> | 61,8±0,3 <sup>bc</sup> | 90,9±1,2 <sup>ab</sup> |

As eficiências de remoção de proteínas e lipídios do tratamento controle foram de 60,4 e 75,0%, respectivamente. A remoção de lipídios (75,0 a 90,9%) foi maior que a remoção de proteínas (53,0 a 63,9%) em todos os tratamentos. Isso pode ser um indicativo de que os pré-tratamentos alcalinos foram mais eficientes na hidrólise dos lipídios quando comparados com a das proteínas, tornando-os mais disponíveis à biodegradação (DIAMANTIS et al., 2021). A hidrólise alcalina é conhecida por causar saponificação de lipídios. A saponificação consiste na formação de sais de ácidos graxos (sabão) com alta solubilidade, o que também corrobora com os melhores resultados observados por Ruffino et al. (2016). Liu et al. (2021) relataram que os pré-tratamentos térmicos são altamente eficientes na desnaturação de proteínas de lodo ativado. Jian et al. (2021) pré-trataram lodo de indústria de papel e celulose com calor e NaOH separadamente; e relataram que a concentração de proteínas com o pré-tratamento alcalino (pH = 11) foi de 4.600 mg/L, enquanto com o pré-tratamento térmico foi de 5.900 mg/L. Esses resultados indicaram que proteínas foram solubilizadas mais efetivamente pelo calor que pelos reagentes alcalinos. Contudo, temperaturas elevadas (>100 °C) podem converter essas proteínas em substâncias recalcitrantes (ALQARALLEH et al., 2019). Os pré-tratamentos com 0,15, 0,25 e 0,50 g/g<sub>SVsubstrato</sub> de NaOH melhoraram a remoção de proteínas (61,7 a 63,9%) em comparação com o controle (60,4%). Com relação à remoção dos lipídios, todos os pré-tratamentos resultaram em melhores eficiências de remoção (81,0 a 90,9%) quando comparados com o controle (75,0%).

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os pré-tratamentos alcalinos com NaOH modificaram significativamente as características físico-químicas do lodo de flotador de abatedouro de frangos, promovendo a redução dos teores de lipídios e aumentando a disponibilidade da matéria orgânica para os microrganismos anaeróbios. As concentrações mais elevadas de NaOH também proporcionaram aumento do pH e da condutividade elétrica do substrato.

Os tratamentos com 0,25 e 0,50 g<sub>NaOH</sub>.g<sub>VS</sub><sup>-1</sup>substrato apresentaram os melhores desempenhos quanto à produção acumulada de metano, alcançando incrementos de aproximadamente 26% em relação ao controle. Além disso, esses tratamentos resultaram em maiores teores de metano no biogás e maiores eficiências de remoção de sólidos voláteis e lipídios, evidenciando o efeito positivo do pré-tratamento alcalino sobre a digestão anaeróbia do LFAF.

Considerando os resultados obtidos, o pré-tratamento com 0,25 g<sub>NaOH</sub>.g<sub>VS</sub><sup>-1</sup>substrato mostrou-se a alternativa mais atrativa sob a perspectiva técnico-operacional, uma vez que apresentou desempenho estatisticamente semelhante ao tratamento de maior dosagem, porém com menor

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

consumo de reagente. Dessa forma, o uso de NaOH representa uma estratégia promissora para intensificar a recuperação energética de resíduos lipoproteicos gerados pela indústria avícola.

## REFERÊNCIAS

ABPA, Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório anual de 2024**. Associação Brasileira de Proteína Animal, São Paulo, 2025.

ALQARALLEH R.M., KENNEDY K., DELATOLLA R. Microwave vs. alkaline-microwave pretreatment for enhancing thickened waste activated sludge and fat, oil, and grease solubilization, degradation and biogas production, **Journal of Environmental Management**, v.1, 2019, p.378-392.

APHA, American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**, Washington, American Water Works Association, 24 ed., 2023.

BAEK, G.; ROSSI, R.; SAIKALY, P. E.; LOGAN, B. E. The impact of different types of high surface area brush fibers with different electrical conductivity and biocompatibility on the rates of methane generation in anaerobic Digestion. **Science of The Total Environment**, v.787, n.15 2021, 147683.

Bastos, J.A.; Remor, P.V.; Alino, J.H.L.; Frare, L.M.; Lofhagen, J.C.P.; Edwiges, T. Hydrolysate recycling improves economic feasibility of alkaline pretreatment for bioenergy production, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Volume 9, Issue 5, 2021, 105935, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105935>.

CECCHI, H. M. **Theoretical and practical fundamentals in food analysis**, Campinas, UNICAMP, 1999.

CUETOS, M. J.; MARTINEZ, E. J.; MORENO, R.; GONZALEZ, R.; OTERO, M.; GOMEZ, X. Enhancing anaerobic digestion of poultry blood using activated carbon. **Journal of Advanced Research**, v.8, n.3, p.297-307, 2017.

Damaceno, F.M.; Bastos, J.A.; Alino, J.H.L.; Remor, P.V.; Costa, M.S.S.M.; Edwiges, T. Effect of thermal, alkaline, and thermal-alkaline pretreatments on the anaerobic digestion of poultry slaughterhouse waste. **Environmental Engineering and Management Journal**, May 2022, Vol. 21, No. 5, 727-735.

Damaceno, F.M.; Buligon, E.L.; Restrepo, J.C.P.S.; Chiarelotto, M.; Niedzialkoski, R.K.; Costa, L.A.M. Lucas Junior J., Costa, M.S.S.M. Semi-continuous anaerobic co-digestion of flotation sludge from broiler chicken slaughter and sweet potato: Nutrients and energy recovery. **Science of The Total Environment**, Volume 683, 2019, Pages 773-781, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.314>.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



[abes-rs@abes-rs.org.br](mailto:abes-rs@abes-rs.org.br)



[www.abes-rs.org.br](http://www.abes-rs.org.br)

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources**. Weinheim: Wiley-VCH, 2011. 450 p.

DIAMANTIS, V.; EFTAXIAS, A.; STAMATELATOU, K.; NOUTSOPOULOS, C.; VLACHOKOSTAS, C.; AIVASIDI, A. Bioenergy in the era of circular economy: Anaerobic Digestion technological solutions to produce biogas from lipid rich wastes, **Renewable Energy**, v.168, 2021, p.438-447

EDWIGES T., FRARE L., MAYERA B., LINS L., TRIOLO J. M., FLOTATS X., COSTA M.S.S.M. Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste, **Waste Management**, v.71, 2018, p.618-625.

Edwiges, R.; Bastos, J. A.; Alino, J. H.L.; D'avila, L.; Frare, L.M.; Somer, J.G. Comparison of various pretreatment techniques to enhance biodegradability of lignocellulosic biomass for methane production, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Volume 7, Issue 6, 2019, 103495, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103495>.

ELALAMI, D.; CARRERE, H.; ABDELOUAHDI, K.; GARCIA-BERNET, D.; PEYDECASTAING, J.; VACA-MEDINA, G.; OUKARROUM, A.; ZEROUAL, Y.; BARAKAT, A. Mild microwaves, ultrasonic and alkaline pretreatments for improving methane production: Impact on biochemical and structural properties of olive pomace. **Bioresource Technology**, v.299, 2020, 122591.

FAO, (2002), Food and Nutrition Paper 77: Food Energy, In: Methods of Analysis and Conversion, Factors, Food and agriculture organization of the united nations, Rome, On line at: [https://www.sennutricion.org/media/Docs\\_Consenso/Food\\_energy\\_methods\\_of\\_analysis\\_and\\_conversion\\_factors-FAO\\_2002.pdf](https://www.sennutricion.org/media/Docs_Consenso/Food_energy_methods_of_analysis_and_conversion_factors-FAO_2002.pdf)

GOODING C.H., MEEKER D.L., (2016), Review: Comparison of 3 alternatives for large-scale processing of animal carcasses and meat by-products, **The Professional Animal Scientist**, 32, 259-270.

HAMIDAH, I.; SOLEHUDIN, A.; HAMDANIA, A.; HASANAH, L.; KHAIRURRIJAL, K.; KURNIAWAN, T.; MAMAT, R.; MARYANTI, R.; NANDIYANTO, A. B. D.; HAMMOUTI, B. Corrosion of copper alloys in KOH, NaOH, NaCl, and HCl electrolyte solutions and its impact to the mechanical properties. **Alexandria Engineering Journal**, v.60, n.2, 2021, p.2235-2243.

HOLLIGER, C.; ALVES, M.; ANDRADE, D.; ANGELIDAKI, I.; ASTALS, S.; BAIER, U.; BOUGRIER, C.; BUFFIÈRE, P.; CARBALLA, M.; WILDE, V. DE; EBERTSEDER, F.; FERNÁNDEZ, B.; E. FICARA, I. FOTIDIS, J.-C. FRIGON, H.F. DE LACLOS, D.S.M. GHASIMI, G. HACK, M. HARTEL, I. WIERINCK. Towards a standardization of biomethane potential tests, **Water Sci. Technol.**, 74, 2016, p. 2515-2522.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

HOU, T.; ZHAO, J.; LEI, Z.; SHIMIZU, K.; ZHANG, Z. Supplementation of KOH to improve salt tolerance of methanogenesis in the two-stage anaerobic digestion of food waste using pre-acclimated anaerobically digested sludge by air-nanobubble water. **Bioresource Technology**, 2021, 126360

JIN, Y.; LI, Y.; LI, J. Influence of thermal pretreatment on physical and chemical properties of kitchen waste and the efficiency of anaerobic digestion. **Journal of Environmental Management**, v.180, p.291-300, 2016.

Kowthaman, C.N.; Selvan, V. A. M.; Kumar, P. S. Optimization strategies of alkaline thermo-chemical pretreatment for the enhancement of biogas production from de-oiled algae. **Fuel**, Volume 303, 2021, 121242, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121242>.

LEE, I.; HAN, J.-I. The effects of waste-activated sludge pretreatment using hydrodynamic cavitation for methane production, **Ultrasonics Sonochemistry**, v.20, n.6, 2013, p.1450-1455.

LI, C.; WANG, X.; ZHANG, G.; YU, G.; LIN, J.; WANG, Y. Hydrothermal and alkaline hydrothermal pretreatments plus anaerobic digestion of sewage sludge for dewatering and biogas production: Bench-scale research and pilot-scale verification. **Water Research**, v.117, 2017, p.49-57.

LI, H.; LI, C.; LIU, W.; ZOU, S. Optimized alkaline pretreatment of sludge before anaerobic Digestion. **Bioresource Technology**, v.123, p. 189-194, 2012.

LIU, H.; LI, X.; ZHANG, Z.; NGHIEM, L. D.; GAO, L.; WANG, Q. Semi-continuous anaerobic digestion of secondary sludge with free ammonia pretreatment: Focusing on volatile solids destruction, dewaterability, pathogen removal and its implications. **Water Research**, v.202, n.1, 2021, 117481.

LIU, X.; WANG, Q.; TANG, Y.; PAVLOSTATHIS, S.G. Hydrothermal pretreatment of sewage sludge for enhanced anaerobic digestion: Resource transformation and energy balance. **Chemical Engineering Journal**, v.410, 2021, 127430.

Machhirake, N.; Singh, D.; Yadav, B.R.; Tembhare, M.; Kumar, S. Optimizing alkali-pretreatment dosage for waste-activated sludge disintegration and enhanced biogas production yield. **Environmental Research**, Volume 252, Part 2, 2024, 118876, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118876>.

MOUNEIMNE, A. H.; CARRÈRE, H.; BERNET, N.; DELGENÈS, J. P. Effect of saponification on the anaerobic digestion of solid fatty residues. **Bioresource Technology**, v.90, n.1, p. 89-94, 2003.

RUFFINO B., CAMPO G., CERUTTI A., ZANETTI M., LORENZI E., SCIBILIA G., GENON G. Preliminary technical and economic analysis of alkali and Low temperature thermo-alkali pretreatments for the anaerobic digestion of waste activated sludge, **Waste Biomass Valorization**, v.7, 2016, p.667-675.

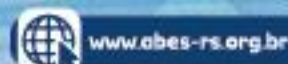
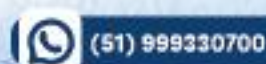
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



SPOHRER, C.; WYATT, Z. **Polyprotic Acids & Bases**. LibreTexts libraries, 2020. Acessado em: 25/01/22. Disponível em: <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Acids\\_and\\_Bases/Monoprotic\\_Versus\\_Polyprotic\\_Acids\\_And\\_Bases/Polyprotic\\_Acids\\_and\\_Bases\\_1](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Acids_and_Bases/Monoprotic_Versus_Polyprotic_Acids_And_Bases/Polyprotic_Acids_and_Bases_1)>.

STRÖMBERG, S.; NISTOR, M.; LIU, J. Towards eliminating systematic errors caused by the experimental conditions in Biochemical Methane Potential (BMP) tests. **Waste Management**, v. 34, p. 1939-1948, 2014.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; WOLKWEISS, S. J. **Analysis of soil, plants and other materials**, UFRS, Porto Alegre, 2<sup>rd</sup> ed., 1995.

WAN, C.; ZHOU, Q.; FU, G.; LI, Y. Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease. **Waste Management**, v.31, n.8, p. 1752-1758, 2011.

WANG SHUNLI; UMAKANTA JENA; KESHAV C. DAS. Biomethane production potential of slaughterhouse waste in the United States. **Energy Conversion and Management**, v. 173, p. 143-157, 2018.

Yin, Z.; Wang, J.; Wang, M.; Liu, J.; Chen, Z.; Yang, B.; Zhu, L.; Yuan, R.; Zhou, B.; Chen, H. Application and improvement methods of sludge alkaline fermentation liquid as a carbon source for biological nutrient removal: A review. **Science of The Total Environment**, Volume 873, 2023, 162341. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162341>.

ZHANG, S.; GUO, H.; DU, L.; LIANG, J.; LU, X.; LI, N.; ZHANG, K. Influence of NaOH and thermal pretreatment on dewatered activated sludge solubilisation and subsequent anaerobic digestion: focused on high-solid state. **Bioresource Technology**, v.185, 2015, p. 171-177.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br