

II-1059 -TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA EM CONDIÇÕES MESOFÍLICAS E TERMOFÍLICAS

Naassom Wagner Sales Morais

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutorando em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Rennan Guthierrez Nunes do Nascimento

Graduando em Engenharia Química pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Valdemiro Matsumura de Sousa

Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

André Bezerra dos Santos⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). PhD em Environmental Sciences pela Wageningen University, Holanda. Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC.

Endereço⁽¹⁾: R. Prof. Armando Farias, 713, Pici – Fortaleza, Ceará, Brasil – CEP: 60.440-900 – E-mail: andre23@ufc.br

RESUMO

A digestão anaeróbia termofílica é amplamente estudada para a degradação de compostos orgânicos complexos, como águas residuárias com elevados teores de matéria orgânica particulada e biomassa lignocelulósica, devido à alta taxa metabólica e eficiência enzimática dos microrganismos termofílicos, o que proporciona maior rendimento de biogás, menor tempo de detenção hidráulica e maior velocidade de produção de metano. Nesse contexto, torna-se atraente a investigação do tratamento anaeróbio da água residuária de suinocultura (ARS) sob condições termofílicas, pois esse resíduo agrícola possui elevadas concentrações de matéria orgânica complexa, sólidos suspensos, nutrientes, micropoluentes, hormônios e antibióticos, sendo considerado um efluente com elevado potencial poluidor e elevada carga microbiológica. O objetivo deste trabalho foi avaliar o tratamento anaeróbio da água residuária de suinocultura sob condições mesofílicas e termofílicas em Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente (UASB). O reator mesofílico (RM) foi operado em temperatura ambiente, cerca de 28 °C, e o reator termofílico (RT) a 55 °C. Os reatores foram alimentados com ARS com DQO afluente média de 2,5 g L⁻¹ a uma vazão (Q) de 2,08 mL min⁻¹, resultando em uma Carga Orgânica Volumétrica (COV) de 5 kg_{DQO} m⁻³ d⁻¹, em uma Carga Hidráulica Volumétrica (CHV) de 2 m³ m⁻³ d⁻¹ e em um Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) de 12 h. O RT apresentou menor eficiência de remoção matéria orgânica e menores teores de metano no biogás quando comparado ao RM em todo o experimento. A forma de cultivo do lodo termofílico e problemas operacionais, como o *washout* do lodo, o que diminuiu muito a biomassa termofílica, e a elevada concentração de gorduras na ARS, a qual dificultava a mensuração do volume de biogás de forma mais acurada, colaboraram para o baixo desempenho do RT.

PALAVRAS-CHAVE: Digestão Anaeróbia Termofílica; Água Residuária de Suinocultura; Reator UASB; Metanogênese.

INTRODUÇÃO

Atualmente fontes renováveis de energia correspondem a 10% da matriz energética mundial e essa participação deve pular para 50% até 2050. Entre todas as fontes de energia renováveis, o biogás é especialmente notável, pois é produzido a partir de matéria orgânica complexa (ZABED *et al.*, 2020). Nesse panorama, a Digestão Anaeróbia (DA) representa uma alternativa viável para contribuir com essas fontes bioenergéticas, visto que a DA é um bioprocessos usado para tratar resíduos orgânicos e gerar biocombustíveis, como o biogás. Essa técnica de tratamento ocorre por meio de microrganismos anaeróbios que degradam a matéria orgânica complexa e a removem do efluente por meio da formação de biogás, composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Entre as vantagens desse método estão: baixa produção de lodo, baixo consumo de energia,

produção de fertilizantes e geração de biocombustíveis (MOUSTAKAS; PARMAXIDOU; VAKALIS, 2020). A DA pode ocorrer em condições psicrófilas ($< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), mesofílicas ($25\text{ a }45^{\circ}\text{C}$), termofílicas, ($50\text{ a }60^{\circ}\text{C}$) e hipertermofílicas ($70\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$), sendo a faixa mesofílica a mais utilizada devido proporcionar melhor estabilidade operacional, menor custo e ser a ideal para o crescimento das arqueias metanogênicas (SINGH *et al.*, 2023).

Um sistema anaeróbio termofílico é considerado menos estável em comparação ao mesofílico, pois devido à quebra acelerada de proteínas pode ocorrer um rápido aumento da concentração de amônia livre (NH_3), o que pode inibir a atividade e o crescimento dos microrganismos metanogênicos. Concentrações de NH_3 de até 200 mg/L são benéficas para o metabolismo da microbiota termofílica (SUNG; LIU, 2003), agindo como um tampão natural para resistir à acidificação do acúmulo de ácidos orgânicos nos digestores (YUAN; ZHU, 2016). Entretanto, elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal total ($1.500\text{ a }11.000\text{ mg-N/L}$), resulta na forte inibição do processo de digestão, geralmente indicada pela diminuição nas taxas de produção de CH_4 (RYUE *et al.*, 2020). A NH_3 tem a capacidade de se difundir passivamente na membrana celular microbiana, acarretando desequilíbrio de prótons e deficiência de potássio (LIU *et al.*, 2019). A alta taxa de hidrólise da matéria orgânica também pode ocasionar instabilidade em reatores termofílicos devido ao acúmulo de ácido graxos voláteis (AGVs), o que pode diminuir o pH e ocasionar a acidificação do reator (APPELS *et al.*, 2008). Além desses problemas de instabilidade, o maior consumo de energia e a maior sensibilidade dos microrganismos termofílicos a variações de condições ambientais, como alterações no pH e na temperatura, são as principais desvantagens da DA termofílica (KUSHKEVYCH *et al.*, 2020).

Apesar desses fatores, a DA termofílica acelera o processo de hidrólise, favorecendo uma maior solubilidade de compostos orgânicos, torna as taxas de reação mais rápidas, diminuindo o tempo de detenção hidráulica (TDH), favorece a destruição de patógenos e gera um biogás com elevados teores de CH_4 (ALMEIDA STREITWIESER, 2017). Além disso, dependendo do substrato a ser tratado, as taxas de conversão de matéria orgânica podem ser 2 ou até 3 vezes maiores em comparação com a DA mesofílica (GE; JENSEN; BATSTONE, 2011). Por esses motivos, a DA termofílica está sendo amplamente estudada para a degradação de compostos orgânicos complexos, como águas residuárias com elevados teores de matéria orgânica particulada e biomassa lignocelulósica. Nesse contexto, torna-se atraente a investigação do tratamento anaeróbio da água residuária de suinocultura (ARS) sob condições termofílicas, pois esse resíduo agrícola possui elevadas concentrações de matéria orgânica complexa, sólidos suspensos, nutrientes, micropoluentes, hormônios e antibióticos, sendo considerado um efluente com elevado potencial poluidor (LOURINHO; RODRIGUES; BRITO, 2020; MORAIS *et al.*, 2021). Perante o exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o tratamento anaeróbio da água residuária de suinocultura sob condições mesofílicas e termofílicas em Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo de Fluxo Ascendente (UASB).

MATERIAIS E MÉTODOS

A água residuária de suinocultura (ARS) utilizada como substrato foi obtida em um criatório de suínos localizado no Departamento de Zootecnia (DZO) da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Fortaleza, Ceará, Brasil. Um peneiramento (malha quadrada de abertura de 2 mm) foi aplicado na ARS visando remover sólidos grosseiros e, em seguida, o efluente foi caracterizado conforme o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). A ARS foi armazenada sob refrigeração a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para diminuir a ação dos microrganismos na biodegradação natural da matéria orgânica e para evitar mudanças significativas da tipologia da ARS.

Como inóculo foi utilizado um lodo sanitário obtido de um Reator UASB proveniente de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) localizada no bairro José Walter, no município de Fortaleza, Ceará, Brasil e operava em condições mesofílicas no tratamento de esgoto sanitário. Após a coleta, o inóculo foi caracterizado, apresentando concentrações de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos fixos totais (SFT) e sólidos suspensos voláteis (SSV) de $81,2 \pm 1,6$; $48,3 \pm 0,9$; $32,9 \pm 1,7$, $47,2 \pm 1\text{ g L}^{-1}$, respectivamente. O lodo apresentava em média 58% de fração orgânica (relação $\text{SSV/ST} = 0,58$).

Dois reatores UASB construídos em vidro borossilicato foram utilizados no tratamento da ARS, os quais tinham $1,50\text{ L}$ de volume reacional, com 62 cm de altura útil e com parede dupla no compartimento de digestão para possibilitar o controle de temperatura por meio de recirculação de água. O reator mesofílico (RM) foi operado em temperatura ambiente, cerca de $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, e o reator termofílico (RT) a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

O compartimento de digestão (CDi) dos reatores tinha volume útil 1,02 L com área seccional de 19,62 cm² e altura de 52,0 cm onde eram localizados 4 amostradores de lodo equidistantes 10 cm entre si e dispostos nas alturas 10,5, 20,5, 30,5, 40,5 cm em relação a base. O compartimento de decantação (CDe) tinha volume útil 0,48 L, com área seccional de 47,7 cm² e altura de 10,0 cm, sendo a tubulação de saída do efluente inserida no topo deste compartimento. O separador trifásico (STr) foi instalado a 4 cm a partir da base do CDe e tinha um diâmetro externo de 7,0 cm. A altura do biogás dentro desse compartimento foi controlada pela altura da lâmina de água existente em um equalizador de pressão que estava interligado ao STr. A largura do traspasso, distância entre a parede do STr e a parede interna do CDe foi de 0,40 cm. O compartimento de recirculação de água (CRa) para controle da temperatura, localizado no CDi, tinha altura de 37,0 cm e volume de 0,97 L.

A partida do sistema foi realizada inoculando 750 mL de lodo (50% do volume útil) nos reatores, os quais foram alimentados com ARS com Demanda Química de Oxigênio (DQO) total afluente média de 2,5 g L⁻¹ (35% na fração solúvel e 65% na fração particulada) a uma vazão (Q) de 2,08 mL min⁻¹, resultando em uma Carga Orgânica Volumétrica (COV) de 5 kg_{DQO} m⁻³ d⁻¹, em uma Carga Hidráulica Volumétrica (CHV) de 2 m³ m⁻³ d⁻¹ e em um Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) de 12 h. Os valores da DQO afluente, COV, CHV e TDH foram mantidos constantes por 4 meses (120 dias) de experimento.

Duas bombas peristáltica (ColeParmer MasterFlex L/S 7522-30) foram utilizadas no sistema de tratamento, uma realizava a alimentação dos reatores e outra a recirculação de efluente. Ambas as bombas tinham dois cabeçotes instalados que permitiam o bombeamento da mesma vazão de alimentação e de recirculação para os dois reatores. A bomba de alimentação succionava a ARS, afluente ao sistema, que estava armazenada em um tanque de equalização de 50 L sob refrigeração a 4 °C, e a conduzia aos reatores com a vazão de 2,08 mL min⁻¹. A bomba de recirculação operava com a vazão de 6,93 mL min⁻¹ e destinava o efluente do CDe para o CDi com o objetivo de expandir a manta de lodo e diminuir o efeito pistão ocasionado pelo acúmulo de biogás. Um Banho Termostático ALPHA A6 (Lauda, Germany) conectado ao RT realizava o aquecimento de água a 55 °C e a bombeava para o CRa, controlando, assim, a temperatura do reator. O sistema de tratamento pode ser visualizado na **Figura 1**.

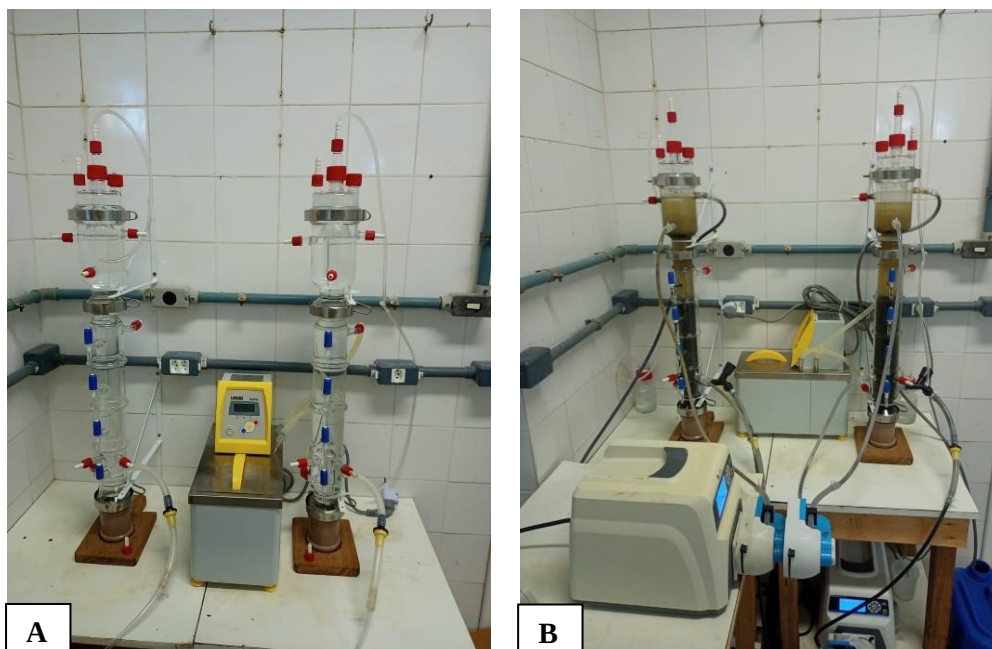


Figura 1: Sistema de tratamento da ARS.

Legenda: O reator da esquerda funcionava em condições mesofílicas, enquanto o reator da direita, conectado com o aquecedor, operava em condições termofílicas. O equipamento localizado entre os reatores é um Banho Termostático responsável pelo aquecimento (a 55°C) e recirculação da água, promovendo, assim, o controle térmico do reator termofílico. A bomba de alimentação encontra-se abaixo da bancada dos reatores e a bomba de recirculação de efluente está no mesmo nível da base dos reatores. A) Reatores antes de serem inoculados. B) Sistema completo de tratamento da ARS após os reatores serem inoculados.

O desempenho dos reatores foi analisado coletando amostras da ARS afluyente e efluente, duas vezes na semana, para caracterização físico-química (APHA, 2017) dos parâmetros apresentados na **Tabela 1**. Também foram coletadas duas vezes por semana 1 mL de biogás dos reatores para análise de composição dos gases CH₄, CO₂, H₂S e N₂ por cromatografia gasosa com detecção por ionização por descarga de barreira dielétrica (GC-BID, Shimadzu, Japão) conforme método descrito por Morais *et al.* (2020). A produção dos ácidos carboxílicos (acético, propiônico, butírico, isovalérico e valérico) foi mensurada duas vezes na semana por meio de um cromatógrafo gasoso com detecção por ionização de chama (HS-GC-FID, Thermo, USA), conforme método descrito por De Sousa e Silva *et al.* (2021).

Tabela 1: Parâmetros e métodos analíticos utilizados para caracterização do afluyente e do efluente dos reatores durante o experimento.

Parâmetros analisados	Procedimento
pH	4500-H ⁺ B
Alcalinidade e Acidez	2310 B.: método titulométrico
Nitrogênio Total	4500-N
Nitrogênio Kjeldahl (NTK) e Nitrogênio Orgânico	4500-N _{org} B.: método macro-Kjeldahl
Nitrogênio Amoniacal	4500-NH ₃ C.: método titulométrico
Nitrito (NO ₂ ⁻) e Nitrato (NO ₃ ⁻)	4110 C.: cromatografia de íons
Demanda Química de Oxigênio – Total (DQO _T), Particulada (DQO _P) e solúvel (DQO _S)	5220 D.: método colorimétrico, digestão em refluxo fechado
Ânions (PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ , F ⁻ , Cl ⁻ e Br ⁻)	4110 C.: cromatografia de íons
Sólidos Totais (ST), Dissolvidos (SD) e Suspensos (SS), Fixos (STF, SDF, SSF) e voláteis (STV, SDV, SSV)	2540 B; 2540 D; 2540 E

Para avaliar o desempenho operacional dos reatores no tratamento anaeróbico da ARS em condições mesofílicas e termofílicas foram analisadas as seguintes variáveis resposta 1) estabilidade dos reatores dada pelo monitoramento do pH, alcalinidade, acidez e nitrogênio amoniacal; 2) eficiência de remoção de matéria orgânica; 3) eficiência de remoção de sólidos suspensos (%); 4) composição do biogás (CH₄ e CO₂, %); 5) composição de ácidos carboxílicos (AGVs, %); e 6) crescimento da fração orgânica do lodo (SSV/ST, %).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros de monitoramento dos reatores que inferem sobre estabilidade operacional e eficiências de remoção de matéria orgânica são apresentados na **Tabela 2**.

Tabela 2: Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de avaliação do desempenho operacional dos reatores.

Parâmetros	Afluyente	Efluente do RM	Efluente do RT
pH	7,0 ± 0,4	7,4 ± 0,4	7,3 ± 0,5
AT (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	527,8 ± 310	593,6 ± 314	536,4 ± 277
AGVs (mgCH ₃ COOH L ⁻¹)	354,5 ± 157	134,5 ± 67	269,9 ± 93
N. Total (mg-N L ⁻¹)	187,2 ± 56,4	100,7 ± 19,5	108,5 ± 23,9
N. Org. (mg N-N.org L ⁻¹)	149,8 ± 57,2	41,4 ± 19,0	54,9 ± 21,9
NH ₃ (mg N-NH ₃ L ⁻¹)	28,4 ± 10,6	49,7 ± 13,4	44,9 ± 11,0
DQO _T (mgO ₂ L ⁻¹)	2543 ± 295	638 ± 240	1129 ± 212
DQO _S (mgO ₂ L ⁻¹)	882 ± 265	351 ± 128	730 ± 195
DQO _P (mgO ₂ L ⁻¹)	1661 ± 350	287 ± 224	399 ± 228
ST (mg L ⁻¹)	2706 ± 1491	1199 ± 344	1536 ± 505
SDT (mg L ⁻¹)	1199 ± 405	987 ± 336	1186 ± 355
SST (mg L ⁻¹)	1507 ± 1379	212 ± 154	350 ± 414
SSV (mg L ⁻¹)	1078 ± 942	171 ± 124	351 ± 348
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	62,6 ± 24,4	74,2 ± 42,8	70,1 ± 44,6

O pH do afluente e do efluente dos reatores manteve-se com caráter alcalino ($\text{pH} \geq 7,0$), indicando a estabilidade da digestão anaeróbia (DA) da água residuária de suinocultura (ARS) e o não acúmulo de ácido graxos voláteis (AGVs) em concentrações nocivas a comunidade metanogênica. Conforme Singh *et al.* (2023) a DA termofílica tem maior propensão a ocasionar acúmulo de AGVs em relação a DA mesofílica devido apresentar alta taxa de hidrólise da matéria orgânica, o que pode diminuir o pH, ocasionar a acidificação do reator e inibir a atividade metanogênica. Contudo, isto não foi observado no RT. Os efluentes dos reatores apresentaram concentrações menores de acidez em comparação ao afluente, indicando também a estabilidade da DA (DE VRIEZE *et al.*, 2012).

A composição de AGVs no efluente do RT foi mais diversa, apresentando ácido valérico (C_5) e ácido isovalérico ($\text{C}_5\text{-iso}$) em praticamente todos os dias de monitoramento, enquanto no efluente do RM a composição de ácidos ficou restrita a ácido acético (C_2), ácido propiônico (C_3) e ácido butírico (C_4) (**Figura 2**). A matriz mais diversificada de AGVs no efluente do RT sugere baixo desempenho da comunidade acetogênica em converter C_3 , C_4 e C_5 em C_2 reduzindo, assim, a capacidade de utilização do acetato pelas arqueias metanogênicas acetoclásticas, o que corrobora para a baixa produção diária de CH_4 neste reator. Outra hipótese é que a rota metabólica dos ácidos mistos pode ter sido favorecida com a temperatura termofílica. Nessa via metabólica, os microrganismos acidogênicos fermentam monômeros orgânicos em uma mistura de C_2 , C_3 , C_4 e C_5 , em quantidades iguais e formando também CO_2 e H_2 (ZHOU *et al.*, 2018). De fato, as concentrações de AGVs no efluente do RT foram sempre superiores às concentrações obtidas no RM.

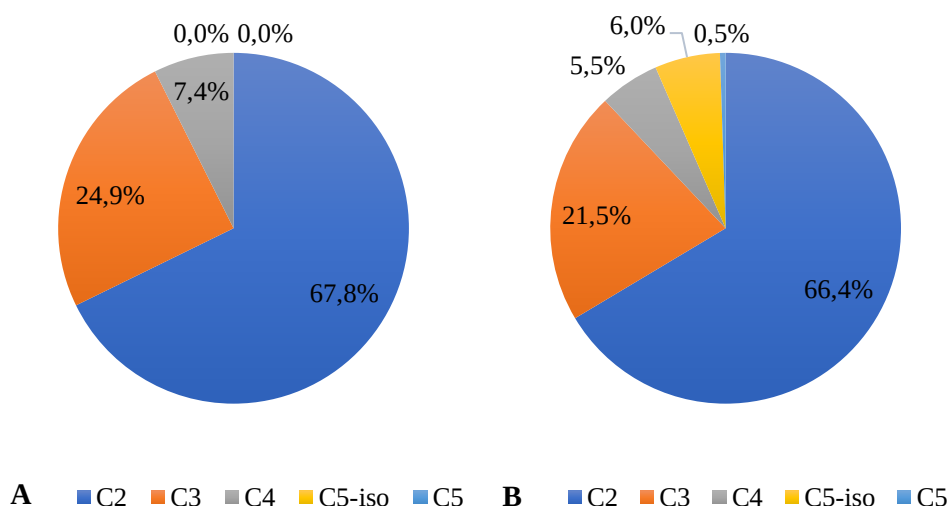


Figura 2: Composição média de AGVs no reator mesofílico (A) e no reator termofílico (B) ao final do experimento.

Conforme dados apresentados na **Tabela 2**, é possível indicar a manutenção da alcalinidade (AT) no efluente dos reatores, indicando estabilidade do processo. A ARS é um substrato rico em proteínas e aminoácidos que são convertidos em amônia (NH_4^+). A combinação de NH_4^+ com o ácido carbônico (H_2CO_3) leva a formação de bicarbonato de amônia (NH_4HCO_3) que gera alcalinidade auxilia a tamponar o pH dos reatores. Entretanto, os metanogênicos são altamente sensíveis ao nitrogênio amoniacal livre (NH_3), sendo $250 \text{ mg N-NH}_3 \text{ L}^{-1}$ e $500 \text{ mg N-NH}_3 \text{ L}^{-1}$ concentrações inibitórias para os metanogênicos acetoclásticos e hidrogenotróficos, respectivamente, em pH neutro (7,0 a 7,3) sob condições termofílicas (SINGH *et al.*, 2023). Os valores de concentração de NH_3 no RT foram inferiores a essas concentrações, indicando que este parâmetro não ocasionou prejuízos a metanogênese da ARS. Além disso, os valores obtidos de AT e AGVs estão em conformidade com valores reportados em outros estudos que avaliaram o tratamento da ARS em digestores anaeróbios de escala laboratorial, bem como o comportamento de redução da concentração de AGVs no efluente e o leve aumento da AT (OLIVEIRA *et al.*, 2020; OLIVEIRA, 2021).

A presença de sulfato (SO_4^{2-}) em uma água residuária pode provocar alteração das rotas metabólicas da DA, sendo um importante parâmetro de monitoramento para avaliar o desempenho de reatores anaeróbios. A redução de SO_4^{2-} é realizada por bactérias sulforredutoras que competem com os microrganismos acetogênicos e metanogênicos pela utilização do substrato, podendo diminuir a disponibilidade de matéria orgânica para a

formação de CH_4 (LI; CHEN; WU, 2019). A sulfetogênese resulta na formação de sulfeto de hidrogênio (H_2S), um composto inibidor para as arqueas metanogênicas. Na ARS utilizada como substrato, o SO_4^{2-} é proveniente em sua maioria da degradação das proteínas provenientes da ração animal. De acordo com Cruz-Salomón *et al.* (2017) a sulfetogênese é favorecida quando a água residuária apresenta razão $\text{DQO}/\text{SO}_4^{2-}$ inferior a 7, sendo que para elevadas relações ($\text{DQO}/\text{SO}_4^{2-} > 10$) a maior parte do H_2S é removido da fase líquida, devido a maior produção de biogás, diminuindo seu efeito tóxico sobre as arqueias metanogênicas. Segundo dados expressos na **Tabela 2**, a razão $\text{DQO}/\text{SO}_4^{2-}$ da ARS afluente aos reatores foi de 40, não contribuindo para a sulfetogênese. Com efeito, o H_2S não foi detectado no biogás gerado nos reatores.

Os resultados de eficiência de remoção de matéria orgânica particulada por diferentes parâmetros de qualidade (DQO_T , DQO_P , ST, SST, SSV) são apresentados na **Figura 3**. Os valores médios de eficiência de remoção desses parâmetros foram superiores no RM em relação ao RT. Apesar disso, as eficiências de remoção de SSV foram elevadas nos dois reatores (RM: $80,8 \pm 13,4$ % e RT: $75,3 \pm 18,2$ %).

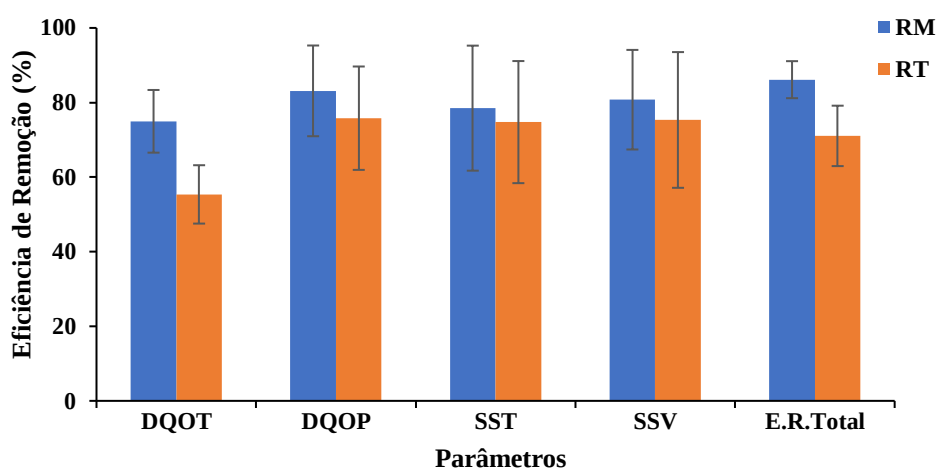


Figura 3: Comparação entre as eficiências médias de remoção de matéria orgânica por diferentes parâmetros de qualidade do efluente aos reatores mesofílico e termofílico.

O efluente do RT apresentou maior parcela de DQO na fração solúvel (65%) do que o efluente do RM (55%), indicando que o ambiente termofílico acelerou o processo de hidrólise da matéria orgânica particulada (**Tabela 3**). Apesar disso, as elevadas concentrações de DQO_S no efluente do RT ($730 \pm 195 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$) sugerem que a utilização do substrato solúvel pelas arqueias metanogênicas ocorreu de forma mais lenta ou limitada. Como discutido anteriormente, houve acúmulo de ácidos de cadeia mais longa (C_4 , C_5 e $\text{C}_{5\text{-iso}}$) no RT, indicando baixa atividade dos microrganismos acetogênicos em converter esses ácidos a C_2 e outros precursores da metanogênese.

Tabela 3: Relações que inferem sobre a hidrólise e consumo da matéria orgânica solúvel.

Parâmetros	Efluente do RM	Efluente do RT
SST/ST (%)	18	23
SDT/ST (%)	82	77
SDV/SDT (%)	37	45
SDF/SDT (%)	63	55
$\text{DQO}_S/\text{DQO}_T$ (%)	55	65
$\text{DQO}_P/\text{DQO}_T$ (%)	45	35

Conforme De Vrieze *et al.* (2016), apesar da taxa de solubilização da matéria orgânica ser maior em condições termofílicas, uma das principais desvantagens da DA termofílica em relação à mesófila é a menor qualidade do efluente que apresenta maior teor de DQO solúvel devido a um menor grau de estabilidade do processo. Com objetivo de sanar esse problema, alguns estudos avaliam a digestão anaeróbia faseada por temperatura (DAFT) que consiste em um processo de dois estágios. O primeiro estágio é o tratamento do resíduo orgânico em um

reator termofílico operando em baixo TDH e elevada COV (até 15 gDQO L⁻¹ d⁻¹), seguido por um estágio de tratamento em reator mesofílico operando com TDH mais elevado e menor COV (1 a 5 gDQO L⁻¹ d⁻¹) (BOLZONELLA *et al.*, 2012). Essa configuração de reatores combina as vantagens da DA termofílica (maiores taxas de hidrólise e conversão) e da DA mesofílica (maior estabilidade do processo e melhor qualidade do efluente) para maximizar a conversão de matéria orgânica em CH₄, possibilitando melhor controle do processo e a otimização da hidrólise/acidogênese em condições termofílicas e da metanogênese em condições mesofílicas (PERVIN *et al.*, 2013). A DAFT costuma ser aplicada no tratamento de lodos, dejetos animais e efluentes com elevada carga de matéria orgânica particulada, como a ARS, embora sua aplicação em escala real ainda ser muito limitada (KIM; NAM; SHIN, 2011).

Corroborando para o fato de que o RM foi mais eficiente na remoção de matéria orgânica, a fração orgânica dos sólidos dissolvidos (SDV) foi rapidamente consumida para a produção de CH₄, gerando um efluente com maior proporção de sólidos dissolvidos não orgânicos (63% de SDF/SDT) em comparação com o efluente do RT (55% de SDF/SDT). Além disso, o RM apresentou melhor desempenho de remoção de DQO durante todo o experimento, obtendo uma média de 86,1 ± 5,0 % de remoção, enquanto RT apresentou média 71,0 ± 8,0 % (**Figura 4**). Consequentemente, o RM apresentou maiores valores de produção de CH₄ por DQO removida e por DQO aplicada em comparação com o RT. A exemplo, obteve-se, em média, no RM 0,483 mgDQO_{CH₄} mgDQO_{remov}⁻¹ enquanto no RT foi obtido 0,353 mgDQO_{CH₄} mgDQO_{remov}⁻¹.

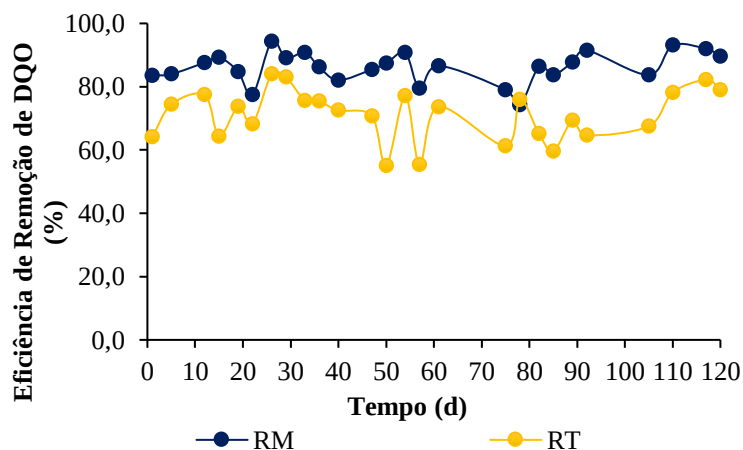


Figura 4: Eficiência de Remoção de DQO nos reatores durante o experimento.

Em harmonia com os resultados já discutidos, o RM apresentou maior geração volumétrica de CH₄ (1,31 L_{CH₄} d⁻¹) e maior teor de CH₄ no biogás (92,4%) em relação ao RT que apresentou a formação média de 1,15 L_{CH₄} d⁻¹ e 76,5% de CH₄ no biogás. A composição média do biogás no RM foi: 92,4% CH₄, 6,9% CO₂ e 0,7% N₂, e no RT foi: 76,5% CH₄, 9,0% CO₂ e 14,5% N₂. Ressalta-se que a quantificação das vazões de biogás pode ter sido comprometida devido a grande quantidade de óleos e gorduras presente na ARS que entupia, frequentemente, o separador trifásico, dificultando a passagem do biogás e, consequentemente, impedindo uma maior precisão na medição da vazão e nos cálculos de produção de CH₄ e dos rendimentos.

Os resultados obtidos neste estudo sugerem que a estratégia de utilizar um lodo mesofílico adaptado ao tratamento de esgotos sanitários para a formação de um lodo termofílico adaptado ao tratamento de ARS foi muito estressante para a microbiota do lodo de inóculo. Isso foi evidenciado principalmente nas três primeiras semanas após a inoculação dos reatores em que o RT perdeu muito lodo por meio de *washout*, devido ao efeito pistão gerado no reator UASB e devido ao envolvimento do lodo pela gordura presente na ARS, bem como por morte celular ocasionada pela seleção microbiológica ocasionada pela temperatura termofílica. Ao final do experimento foram removidos dos reatores cerca de 700 mL de lodo mesofílico e 300 mL de lodo termofílico. Essa diferença de volume de biomassa ativa pode ter colaborado para os menores valores de eficiência de tratamento obtidos na operação do RT. Além do menor volume de lodo, o RT apresentou estabilidade na razão SSV/ST (0,58), permanecendo no mesmo valor do lodo de inóculo, enquanto para o RM essa razão aumentou para 0,67, indicando aumento da parcela de microrganismos ativos na biomassa, fato que também pode explicar a maior eficiência de remoção de matéria orgânica em RM em relação ao RT.

CONCLUSÕES

A digestão anaeróbia (DA) termofílica da água residuária de suinocultura (ARS) foi menos eficiente do que o tratamento mesofílico na remoção de matéria orgânica. Entretanto, entende-se que a forma de cultivo de lodo termofílico não foi ideal e prejudicou o desempenho do reator. Nesse sentido, novas pesquisas devem ser conduzidas visando a formação de uma biomassa termofílica ativa. Recomenda-se, por exemplo, a utilização inicial de substratos facilmente biodegradáveis, como etanol, glicose ou ácidos carboxílicos de cadeia curta, e, após, se obter a estabilidade operacional e a adaptação dos microrganismos as condições ambientais termofílicas substituir o substrato para a ARS. Além disso, outros tipos de reatores, como Reatores de Tanque com Agitação Contínua (CSTR), podem ser avaliados para o cultivo de uma biomassa termofílica.

Alguns problemas operacionais dificultaram a operação dos reatores, como o varrimento (*washout*) do lodo e a elevada concentração de gorduras na ARS, que impedia a mensuração do volume de biogás diário de forma mais acurada. Esse contexto reforça a importância da retirada prévia de gordura antes de reatores biológicos, bem como a avaliação de outras configurações de reatores anaeróbios que sejam mais eficientes para operação com águas residuárias oleosas e gordurosas.

O RT apresentou em todo experimento menores valores para eficiência de remoção de matéria orgânica e menores teores de metano no biogás quando comparado ao RM. Isso indica instabilidade na sintrofia dos microrganismos anaeróbios termofílicos, evidenciada por quantidades significativas de ácido butírico, isovalérico e valérico que não foram convertidos a ácidos de menor cadeia carbônica, dificultando a utilização do substrato solúvel por arqueias metanogênicas.

Além de novos estudos sobre cultivo de inóculo termofílico em outros reatores, também se indica a realização de experimentos que visem o estímulo da sinergia da microbiota anaeróbia, como a aplicação de materiais condutores que favoreçam o fluxo de elétrons entre bactérias e arqueias metanogênicas e, consequentemente, acelerem a cinética de degradação do substrato e aumentem a velocidade de produção de metano. Assim, embora a utilização de condições termofílicas seja uma estratégia atraente para o aprimoramento do tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos complexos, o tratamento mesofílico continua a se apresentar oportuno para águas residuárias que não são descartadas em elevadas temperaturas, como é o caso da ARS, por se mostrar estável, confiável e eficaz mesmo com a grande presença de sólidos em suspensão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA STREITWIESER, D. Comparison of the anaerobic digestion at the mesophilic and thermophilic temperature regime of organic wastes from the agribusiness. *Bioresource Technology*, v. 241, p. 985–992, 2017.
2. APHA. – American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater (2017) 23rd edition. APHA/AWWA/WEF, Washington. 2017.
3. APPELS, L. *et al.* Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 34, n. 6, p. 755–781, 2008.
4. BOLZONELLA, D. *et al.* High rate mesophilic, thermophilic, and temperature phased anaerobic digestion of waste activated sludge: A pilot scale study. *Waste Management*, v. 32, n. 6, p. 1196–1201, 2012.
5. CRUZ-SALOMÓN, A. *et al.* Biogas production from a native beverage vinasse using a modified UASB bioreactor. *Fuel*, v. 198, p. 170–174, 2017.
6. DE SOUSA E SILVA, A. *et al.* S/X ratio impacts the profile and kinetics of carboxylic acids production from the acidogenic fermentation of dairy wastewater. *Environmental Pollution*, v. 287, n. June 2020, p. 1–7, 2021.
7. DE VRIEZE, J. *et al.* Methanosarcina: The rediscovered methanogen for heavy duty biomethanation. *Bioresource Technology*, v. 112, p. 1–9, 2012.

8. DE VRIEZE, J. *et al.* Thermophilic sludge digestion improves energy balance and nutrient recovery potential in full-scale municipal wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*, v. 218, n. 2016, p. 1237–1245, 2016.
9. GE, H.; JENSEN, P. D.; BATSTONE, D. J. Relative kinetics of anaerobic digestion under thermophilic and mesophilic conditions. *Water Science and Technology*, v. 64, n. 4, p. 848–853, 2011.
10. KIM, H. W.; NAM, J. Y.; SHIN, H. S. A comparison study on the high-rate co-digestion of sewage sludge and food waste using a temperature-phased anaerobic sequencing batch reactor system. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 15, p. 7272–7279, 2011.
11. KUSHKEVYCH, I. *et al.* Occurrence of thermophilic microorganisms in different full scale biogas plants. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 21, n. 1, p. 1–12, 2020.
12. LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. *Applied Energy*, v. 240, n. June 2018, p. 120–137, 2019.
13. LIU, Y. *et al.* The roles of free ammonia (FA) in biological wastewater treatment processes: A review. *Environment International*, v. 123, n. November 2018, p. 10–19, 2019.
14. LOURINHO, G.; RODRIGUES, L. F. T. G.; BRITO, P. S. D. Recent advances on anaerobic digestion of swine wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 17, n. 12, p. 4917–4938, 2020.
15. MORAIS, N. W. S. *et al.* Kinetic modeling of anaerobic carboxylic acid production from swine wastewater. *Bioresource Technology*, v. 297, p. 122520, 2020.
16. MORAIS, N. W. S. *et al.* Study on Brazilian agribusiness wastewaters: composition, physical-chemical characterization, volumetric production and resource recovery. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais* (Online), v. 56, n. 2, p. 248–265, 2021.
17. MOUSTAKAS, K.; PARMAXIDOU, P.; VAKALIS, S. Anaerobic digestion for energy production from agricultural biomass waste in Greece: Capacity assessment for the region of Thessaly. *Energy*, v. 191, p. 116556, 2020.
18. OLIVEIRA, J. F. DE *et al.* Principal component analysis as a criterion for monitoring variable organic load of swine wastewater in integrated biological reactors UASB, SABF and HSSF-CW. *Journal of Environmental Management*, v. 262, n. March, 2020.
19. OLIVEIRA, M. G. DE. TRATAMENTO DA ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA UTILIZANDO PROCESSOS BIOLÓGICOS ANAERÓBIOS E MICROAERÓBIOS EM REATORES DE ALTA TAXA. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, p. 78, 2021.
20. PERVIN, H. M. *et al.* Drivers of microbial community composition in mesophilic and thermophilic temperature-phased anaerobic digestion pre-treatment reactors. *Water Research*, v. 47, n. 19, p. 7098–7108, 2013.
21. RYUE, J. *et al.* A critical review of conventional and emerging methods for improving process stability in thermophilic anaerobic digestion. *Energy for Sustainable Development*, v. 54, p. 72–84, 2020.
22. SINGH, R. *et al.* Thermophilic Anaerobic Digestion: An Advancement towards Enhanced Biogas Production from Lignocellulosic Biomass. *Sustainability*, v. 15, n. 3, p. 1859, 2023.
23. SUNG, S.; LIU, T. Ammonia inhibition on thermophilic anaerobic digestion. *Chemosphere*, v. 53, n. 1, p. 43–52, 2003.
24. YUAN, H.; ZHU, N. Progress in inhibition mechanisms and process control of intermediates and by-products in sewage sludge anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 58, p. 429–438, 2016.
25. ZABED, H. M. *et al.* Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 117, n. July 2018, p. 109503, 2020.
26. ZHOU, M. *et al.* Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: A mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways. *Bioresource Technology*, v. 248, p. 68–78, 2018.