



II CONPESQ
**Congresso de Pesquisa,
Pós-Graduação e Inovação**

Os novos rumos da ciência pós-pandemia

12 a 16 de abril de 2021 Universidade Federal do Cariri - UFCA

**REMOÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM REATORES
UASB TRATANDO ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE FRIGORÍFICO
INDUSTRIAL**

GUALBERTO, Igor Leandro¹

Centro de Ciências e Tecnologia,
Universidade Federal do Cariri
igor-g-1@hotmail.com

SOUZA NETO, Manoel Belizário de²

Centro de Ciências e Tecnologia,
Universidade Federal do Cariri
manoel.bsouszaneto@gmail.com

SILVA, Ruan Evislon Ferreira da³

Centro de Ciências e Tecnologia,
Universidade Federal do Cariri
evislon.ruan@gmail.com

GONÇALVES, Allan Bruno Dantas⁴

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
Universidade Federal do Ceará
allanbrunoeng@gmail.com

BRITO, Maria Gorethe de Sousa Lima⁵

Centro de Ciências e Tecnologia,
Universidade Federal do Cariri
gorethe.lima@ufca.edu.br

RESUMO: Esta pesquisa busca investigar, por meio de um estudo experimental, a eficiência de remoção de matéria orgânica em reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo com diferentes configurações do separador de fases, operados de forma idêntica e submetidos a diferentes carregamentos orgânicos de efluentes de frigorífico industrial. Para isto, foram utilizados dois reatores com diferentes configurações do elemento de separação de fases, um no modelo convencional (R1) e o outro no modelo Y (R2). Os efluentes destes reatores foram monitorados por meio das análises de

1 Bolsista do PIICT/PIBIC/UFCA no Edital 01/2020/PRPI.

2 Bolsista do PIICT/PIBITI/UFCA no Edital 06/2019/PRPI.

3 Bolsista do PIICT/PIBITI/UFCA no Edital 06/2019/PRPI.

4 Doutorando em Engenharia Civil (Saneamento Ambiental) da UFC.

5 Orientadora, Docente do Curso de Engenharia Civil da UFCA.

temperatura, pH, e matéria orgânica. Dos resultados obtidos depreende-se que os dois reatores apresentaram satisfatória estabilidade operacional, uma vez que os valores de pH permaneceram na faixa neutra. Este resultado foi corroborado pela boa eficiência de remoção de matéria orgânica (74% para o R1 e 73% para o R2). Ao se analisar estatisticamente os dados, foi verificado que não existiram diferenças significativas entre os desempenhos operacionais dos reatores estudados. Também foi constatado que as diferentes configurações do separador de fases não exerceram efeito significativo na eficiência de remoção de matéria orgânica. Assim, este resultado sugere que a escolha da configuração do separador de fases, modelo convencional ou modelo Y, deve ser feita com base em aspectos financeiros e de estabilidade estrutural. Ademais, o tratamento de efluentes de frigorífico industrial por meio de reatores UASB, apesar de ser satisfatório na remoção de matéria orgânica, necessita de um pós-tratamento no efluente produzido para que estes possam atender a critérios de lançamento impostos pela legislação vigente.

PALAVRAS-CHAVE: Matéria orgânica; Reator UASB; Separador de fases; Carga orgânica volumétrica.

ABSTRACT: This research seeks to investigate, by means of an experimental study, the efficiency of removal of organic matter in anaerobic upflow reactors and sludge blanket with different configurations of the phase separator, operated in an identical way and submitted to different organic loads of industrial refrigerator effluents. For this, two reactors with different configurations of the phase separation element were used, one in the conventional model (R1) and the other in the Y model (R2). The effluents of these reactors were monitored through the analysis of temperature, pH, and organic matter. From the results obtained, it appears that the two reactors showed satisfactory operational stability, since the pH values remained in the neutral range. This result was corroborated by the good efficiency in removing organic matter (74% for R1 and 73% for R2). When analyzing the data statistically, it was found that there were no significant differences between the operational performances of the studied reactors. It was also found that the different configurations of the phase separator did not have a significant effect on the efficiency of removal of organic matter. Thus, this result suggests that the choice of the phase separator configuration, conventional model or Y model, should be made based on financial and structural stability aspects. In addition, the treatment of industrial refrigerator effluents by means of UASB reactors, despite being satisfactory in removing organic matter, requires a post-treatment in the effluent produced so that they can meet the discharge criteria imposed by current legislation.

Keywords: Organic matter; UASB reactor; Phase separator; Volumetric organic load.

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de esgotos sanitários e seus impactos nas águas naturais são questões que suscitam bastante preocupação no Brasil e no mundo, uma vez que a escassez de água de boa qualidade limita o desenvolvimento e impacta diretamente na saúde da população e nos custos de investimento em saúde feitos pelo poder público.

De acordo com o relatório da Organização Mundial da Saúde (OMS), 4,2 bilhões de pessoas no mundo não possuem serviços de esgotamento sanitário de forma segura (UNICEF; WHO, 2019). No Brasil, a média do índice de atendimento total com rede de esgotos, em 2019, foi de 54,1%. Na região Nordeste do Brasil, este índice foi de apenas 28,3%, onde 82,7% deste foi tratado. Porém, ao se considerar o total de esgotos gerados nesta região, o índice de tratamento reduz para 33,7% (BRASIL, 2020).

Este cenário é bastante preocupante, uma vez que é na região Nordeste, em especial no

Semiárido, que se encontra a principal situação de escassez hídrica do Brasil. Essa região convive historicamente com períodos de seca que geram severos impactos socioeconômicos e ambientais. Somente em 2017, cerca de 38 milhões de pessoas foram afetadas por eventos de secas e estiagens no Brasil, sendo 80% desse total apenas na região Nordeste. Ainda devido às secas, no período de 2003 a 2016, dos 1.794 municípios da região Nordeste, 1.409 (78,5%) decretaram Situação de Emergência ou Estado de Calamidade Pública (HERNANDEZ, 2020).

Assim, diante do exposto, surge a necessidade, por parte das instituições governamentais e da sociedade em geral, de pensar em soluções ou alternativas para diminuir o risco da ocorrência de crises hídricas na região do Semiárido brasileiro. Assim, tecnologias e ideias inovadoras, mais sustentáveis, relacionadas, por exemplo, ao tratamento de esgotos, com recuperação de recursos (água, energia e nutrientes), se apresentam como possíveis soluções.

Dentre as tecnologias de tratamento de esgotos existentes, o reator anaeróbico de fluxo ascendente com manta de lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* - UASB) é muito utilizado em países tropicais para o tratamento de esgotos com diferentes concentrações de matéria orgânica, tanto solúvel quanto complexa (BUSTILLO-LECOMPTE; MEHRVAR, 2015; PUYOL *et al.*, 2009; REN *et al.*, 2009). De acordo com Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em ETEs sustentáveis (INCT ETEs sustentáveis), no Brasil, existem aproximadamente 900 reatores UASB, o que coloca o país como o maior parque de reatores anaeróbios do mundo. Ainda segundo o INCT ETEs sustentáveis, cerca de 40% das ETEs localizadas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-oeste do Brasil empregam reatores UASB (CREA-MG, 2018). No estado do Ceará, Nordeste do Brasil, em 2017, o município de Fortaleza se destacava por possuir 19 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do tipo UASB (MARQUES; NUNES, 2017). Contudo, em muitos municípios da região do Semiárido brasileiro, principalmente os de pequeno porte, as experiências com este tipo de reator são menores.

O satisfatório desempenho operacional destes reatores é devido, principalmente, a formação de lodo granular compacto, que assegura uma elevada atividade metanogênica específica e alta estabilidade, que ocorre de forma natural e espontânea quando as condições ambientais são adequadas para a auto imobilização das bactérias. Estes fatores permitem que o reator funcione com tempos de detenção hidráulicos reduzidos, o que implica em equipamentos de menor dimensão e menor custo. Outras vantagens importantes, clássicas de sistemas anaeróbios, são: baixa produção de lodo, não requer aeração e produz gás metano (METCALF; EDDY, 2016; VAN HAANDELL; LETTINGA, 1994).

Contudo, apesar das vantagens e ampla disseminação de reatores UASB, existem vários

estudos que apontam falhas nas etapas de projeto, construção e operação desta tecnologia (CHERNICHARO *et al.*, 2015; CHERNICHARO; STUETZ, 2008; HEFFERNAN *et al.*, 2011; LEITÃO *et al.*, 2005; MIKI, 2010; POSSETTI *et al.*, 2018; VAN HAANDEL *et al.*, 2006). Projetos inadequados que negligenciam, por exemplo, o gerenciamento da fase gasosa, propiciam condições que favorecem o escape do biogás para o compartimento de decantação. Em consequência, ocorre o arraste de sólidos, prejudicando a qualidade do efluente do reator, além de ter impacto direto no aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE) e de gases odorantes (POSSETTI *et al.*, 2018). A perda de material orgânico particulado resulta no aumento da fração da Demanda Química de Oxigênio (DQO) descarregada com o efluente e, em consequência, no comprometimento da eficiência do tratamento (VAN HAANDEL *et al.*, 2015).

Assim, depreende-se que tão importante quanto estabelecer condições favoráveis para maiores eficiências de remoção de matéria orgânica em reatores UASB é aprimorar o desempenho dos elementos de separação de fases, para que a retenção do lodo seja realizada de forma mais eficiente na zona de digestão anaeróbia destes reatores.

A maior retenção de lodo permite que o reator suporte maiores carregamentos de esgotos, contribuindo, deste modo, para uma maior geração de metano (ROCHA *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2018).

Neste contexto, a presente pesquisa teve como objetivo realizar um estudo investigativo sobre o efeito da configuração do elemento de separação de fases na eficiência de remoção de matéria orgânica, em reatores UASB operados de forma idêntica, contínua e submetidos a diferentes carregamentos orgânicos de efluentes de frigorífico industrial. Para alcançar tal objetivo foram analisadas as características físico-químicas dos afluentes e dos efluentes dos reatores, notadamente com relação a temperatura, pH e matéria orgânica.

2 METODOLOGIA

Esta pesquisa possui uma abordagem hipotético-dedutiva, em que as hipóteses serão verificadas através de métodos experimentais e estatísticos, com nível exploratório, descritivo e explicativo considerando-se que o estudo propiciará um olhar abrangente do problema investigado e a identificação de variáveis com aplicação prática, visando à interferência na própria realidade.

A proposta consiste no monitoramento do desempenho de dois diferentes tipos de elementos de separação de fases (um do modelo convencional e outro do modelo Y) na remoção

de matéria orgânica produzida em reatores UASB tratando águas residuárias de frigorífico industrial.

2.1 LOCAL DE IMPLANTAÇÃO DA PESQUISA

O sistema experimental foi instalado em uma área selecionada no Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), da Universidade Federal do Cariri (UFCA), Cidade de Juazeiro do Norte – Ceará, Região Nordeste do Brasil.

2.2 APARATO EXPERIMENTAL

Esta pesquisa foi desenvolvida em dois reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo, reatores UASB, em escala piloto, um com a configuração convencional e outro com a configuração do tipo Y. As configurações diferem para que se possa fazer um comparativo entre as estabilidades e os desempenhos operacionais dos dois modelos, que foram operados de maneira idêntica (com mesma vazão e sem descarga intencional de lodo).

Os referidos reatores foram feitos em tubos de policloreto de vinila (PVC) em formatos cilíndricos. O reator convencional possui capacidade para reter 24 litros de esgoto e tem as seguintes dimensões: 1,36 m de altura e 0,15 m de diâmetro (Tabela 1). Este reator é formado por três regiões: a base localizada na parte inferior (zona de digestão), a intermediária (manta de lodo) e a de separação trifásica (zona de decantação), situada na parte superior. Imediatamente abaixo das aberturas do separador trifásico encontra-se um defletor de gases, como mostra a Figura 1-A.

Já o reator do tipo Y, com capacidade para reter 28 litros de esgoto, possui as seguintes dimensões: 1,36 metros de altura, 0,15 m de diâmetro (Tabela 1). Este reator ainda possui um corpo cilíndrico (braço do reator), formando um ângulo de 45° com a parte vertical do reator. O ponto onde o braço é conectado ao reator UASB dista 0,95 m da sua base inferior. Este reator é formado por três regiões: a base, localizada na parte vertical inferior (zona de digestão), a parte superior onde é coletado o biogás (zona de separação do gás) e a parte lateral (braço do reator) onde ocorre a separação líquido - sólido (zona de sedimentação) por meio da descarga do efluente em sua extremidade livre, conforme mostra a Figura 1-B. Em ambos os reatores, os dispositivos de separação de fases foram confeccionados utilizando garrafas pet.

O reator UASB do tipo Y difere do reator convencional por possuir dois separadores bifásicos, enquanto que o reator UASB convencional, formato mais tradicional, apresenta apenas um único separador trifásico na parte vertical superior.

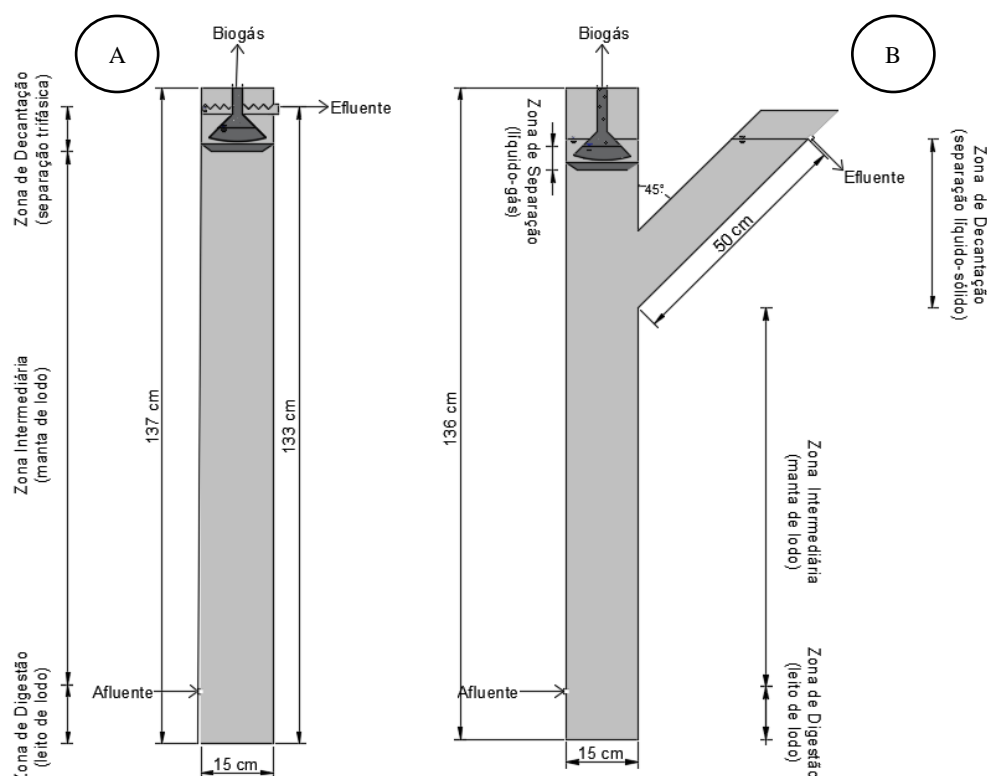
Tabela 1 – Dimensões dos reatores com a configuração convencional (R1) e do tipo Y (R2)

| <i>Variáveis</i> | <i>R1</i> | <i>R2</i> |
|--------------------------------|-----------|-----------|
| Altura (m) | 1,37 | 1,36 |
| Volume (m ³) | 0,024 | 0,028* |
| Área da base (m ²) | 0,018 | 0,018 |

* No cálculo do volume do reator modelo Y (R2) é somado o volume do braço.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura 1 – Dimensões do reator convencional (A) e do reator modelo Y (B)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

2.3 ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA

O efluente industrial utilizado durante a pesquisa foi coletado no Frigorífico Industrial do Cariri, Localizado na Avenida Paulo Maia, nº 2000, Município de Juazeiro do Norte – CE, limitado entra as coordenadas geográficas com latitude igual a 7°13'14.58" S e longitude igual a 39°20'48.97" O.

A agroindústria frigorífica efetua o abate de bovinos e suínos, processa os subprodutos, possui unidades de graxaria e triparia. Funcionando 3 (três) dias por semana, 6 (seis) horas por dia. Possui capacidade de abate diário para 200 bovinos e 120 suínos. O efluente gerado é uma mistura do banho dos animais, da lavagem dos currais e pocilgas, da sala do abate, da triparia

e bucharia, do preparo das carcaças e dos subprodutos.

A captação da água residuária gerada no frigorífico foi feita no tanque de reservação, onde se acumulava o efluente dos 03 dias de abate. Foram coletados 100 litros, acondicionados em 05 recipientes com capacidade para 20 litros (Figura 2), que, após preenchidos, foram transportados para o sistema experimental montado Universidade Federal do Cariri.

No sistema experimental de tratamento de efluentes da UFCA, ilustrado na Figura 3, o efluente do frigorífico foi armazenado em um tanque de reservação com capacidade para 500 litros, instalado a 1 m de altura acima dos reatores. Posteriormente o efluente fluía, por ação da gravidade, para reservatórios com capacidade para 20 litros (tanques de equalização), nos quais foram instaladas boias de nível mecânicas para controlar a dispersão de líquidos no interior dos mesmos, mantendo-os sempre cheios. Dos tanques de equalização, instalados a 0,5 m de altura acima dos reatores, os efluentes do frigorífico, também pela ação da gravidade, e com vazões constantes, foram conduzidos até os reatores UASB por meio de dispositivos de entrada (tubos de ¼” de diâmetro). Estes dispositivos lançavam os esgotos na parte central dos reatores, a 0,18m de sua base, visando favorecer um maior contato entre a matéria orgânica afluyente e a biomassa presente na zona de digestão do reator.

Figura 2 – Coleta da água residuária no frigorífico industrial



Fonte: Autor (2021).

Figura 3 – Representação real do sistema experimental



Fonte: Autor (2021).

2.4 PARTIDA DOS REATORES

O lodo utilizado para a inoculação dos reatores foi cedido pela Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE) e foi retirado de um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo – UASB que operava em condições mesófilas no tratamento de esgoto sanitário. Este lodo anaeróbio ativo apresentava concentrações de sólidos totais e sólidos totais voláteis de 44,2 g/L e 29,1 g/L, respectivamente, bem como relação STV/ST média foi 0,66, qualificando o lodo como inóculo com aproximadamente 66% de fração orgânica (microrganismos). Após a caracterização, o lodo foi aclimatado nos reatores. A inoculação foi realizada com o volume de 2 kg de lodo para cada reator, aproximadamente 10% do volume dos reatores, totalizando 4 kg de lodo.

A estimativa do volume de lodo de inóculo necessário à partida dos reatores foi calculada conforme as recomendações de Chernicharo (2016). Os reatores foram operados a temperatura ambiente, com média de 29,7°C e com tempo de detenção hidráulica de 6,5 e 7,5 horas nos reatores R1 e R2, respectivamente.

2.5 COLETA E MONITORAMENTO DOS EFLUENTES

A coleta do esgoto afluente aos reatores foi realizada no tanque de equalização (Figura 04). No R1, a coleta do efluente foi realizada através de uma canaleta com vertedores triangulares localizada na parte superior (Figura 05), já no R2 a coleta foi realizada na extremidade livre onde ocorria a descarga do efluente (Figura 06).

Figura 4 – Tanque de equalização (afluente)



Fonte: Autor (2021).

Figura 5 – Canaleta com vertedores triangulares (R1)



Fonte: Autor (2021).

Figura 6 – Extremidade livre onde ocorre a descarga do efluente (R2)



Fonte: Autor (2021).

O monitoramento dos reatores UASB foi realizado por meio de 17 coletas. A estratégia de monitoramento seguiu as diretrizes sugeridas por Chernicharo (2016), cujos parâmetros analisados, pontos, frequência de amostragem e metodologias utilizadas em cada análise estão apresentadas na Tabela 2. As condições operacionais de funcionamento dos reatores estão apresentadas na Tabela 3.

Os parâmetros de temperatura e pH foram determinados in loco, e os demais foram realizados no Laboratório de Saneamento (LASAN) da Universidade Federal do Cariri (UFCA) – Campus Juazeiro do Norte.

Tabela 2 – Parâmetros analisados durante o monitoramento dos reatores UASB

| <i>Parâmetros</i> | <i>Unidade</i> | <i>Metodologia</i> | <i>Amostragem</i> | <i>Frequência</i> |
|---|---------------------|---|----------------------|-------------------|
| <i>Eficiência de remoção de matéria orgânica</i> | | | | |
| Demanda química de oxigênio (DQO) | mgO ₂ /L | Refluxação fechada 5220-C | Afluente Efluente | semanal |
| Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) | mgO ₂ /L | Incubação: 5210-B Oxigênio dissolvido: 4500-O G | Afluente Efluente | semanal |
| <i>Estabilidade operacional</i> | | | | |
| Temperatura (T) | ° C | Termômetro com filamento de mercúrio 2550-A | Afluente Efluente | semanal |
| Potencial hidrogeniônico (pH) | - | Eletrométrico 4500-B | Afluente Efluente | semanal |

Fonte: adaptada de Chernicharo (2016).

Tabela 3 – Condições operacionais dos reatores R1 e R2 em função das cargas orgânicas volumétricas

| Parâmetros | Valores médios | | | |
|--|----------------|--------|--------|--------|
| | R1 | | R2 | |
| Carga orgânica volumétrica (kgDQO/m ³ .d) | 6,5 | 8,4 | 5,6 | 7,2 |
| Vazão afluente (m ³ /h) | 0,0037 | 0,0037 | 0,0037 | 0,0037 |
| Tempo de funcionamento do reator (h) | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Tempo de detenção hidráulica (h) | 6,5 | 6,5 | 7,5 | 7,5 |
| Carga hidráulica volumétrica (m ³ /m ³ .d) | 3,7 | 3,7 | 3,2 | 3,2 |
| Carga biológica (kg DQO/kgSTV.d) | 0,2 | 0,4 | 0,2 | 0,4 |
| Velocidade ascensional do fluido (m/h) | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 |

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

2.6 QUANTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MONITORAMENTO

Em conformidade com os parâmetros recomendados para avaliação do comportamento dos reatores UASB foram definidos cálculos para interpretação dos dados obtidos. Para a obtenção dos resultados de eficiência de remoção dos parâmetros analisados e estatística básica aplicada, assim como implementação de gráficos, foi utilizado o software Microsoft Excel® 2016.

A eficiência em termos de remoção (%) dos constituintes da água residuária foi determinada a partir do cálculo da razão entre a diferença das concentrações (afluente e efluente) e a concentração de efluente de cada parâmetro, como descrito na Equação 1.

$$E = \frac{(X_{Afluente} - X_{Efluente})}{X_{Afluente}} \quad (1)$$

onde, E corresponde a eficiência de remoção do constituinte específico (%), $X_{Afluente}$ a concentração do constituinte no afluente do reator (mg/L) e $X_{Efluente}$ a concentração do constituinte no efluente do reator (mg/L).

No tratamento dos dados, realizou-se a análise descritiva, contendo: máximo, mínimo, média, coeficiente de variação e quartis. Esses valores estão apresentados na Seção de resultados em forma de tabela e gráficos (*box-plot*) com o objetivo de comparar visualmente os resultados experimentais em cada reator operado.

Para analisar o efeito da estabilidade e do desempenho operacional, carga orgânica volumétrica (COV), demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), bem como a relação (DQO/DBO), foram analisados por meio de testes de normalidade

e de hipóteses usando o software BIOESTAT 5.3.

Aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk ($\alpha=0,05$) para analisar a normalidade dos dados, devido o número de amostras realizadas ser menor que cinquenta ($n<50$). Após verificar que os dados apresentavam distribuição não normal, foi usado o teste de hipóteses de Kruskal-Wallis (não paramétrico), a fim de verificar a existência de diferença estatística entre os parâmetros. Ambos os testes adotaram nível de significância de 5%. (CALEGARI-JAQUES, 2003).

3 RESULTADOS

Os resultados apresentados nesta seção referem-se ao monitoramento da estabilidade e da eficiência de tratamento dos reatores UASB avaliados nesta pesquisa.

Na Tabela 4 constam os resultados da estatística descritiva aplicada aos dados de todos os parâmetros determinados em amostras dos afluentes e efluentes dos reatores R1 e R2.

Ao se analisar, na Tabela 4, a variabilidade dos dados em relação a média (coeficiente de variação - CV), verifica-se que, de acordo com a classificação de Pimentel Gomes (1985), os valores de temperatura e de pH apresentaram baixa dispersão ($CV < 10\%$). Já os dados dos parâmetros demanda química de oxigênio e demanda bioquímica de oxigênio apresentaram média dispersão ($10 \leq CV < 20$).

Tabela 4 – Estatística descritiva dos dados dos parâmetros físico-químicos determinados em amostras dos afluentes e dos efluente dos reatores UASB

| <i>PARÂMETROS</i> | | Temperatura (°C) | pH | Demanda bioquímica de oxigênio (DBO: mgO ₂ /L) | Demanda química de oxigênio (DQO: mgO ₂ /L) |
|---|-------------|---------------------|------------|--|--|
| <i>Faixa de variação (mínimo- máximo)</i> | <i>AF</i> | 28,7 – 31 | 7,2 - 7,8 | 320,4 - 1537,6 | 742,7 - 2556,8 |
| | <i>EFR1</i> | 28,4 - 30,3 | 7 - 7,8 | 95,5 - 373,1 | 250 - 717,4 |
| | <i>EFR2</i> | 28,3 - 30,2 | 7,06 - 7,9 | 91,9 - 392,5 | 202,2 - 677,5 |
| <i>MEDIANA</i> | <i>AF</i> | 29,7 | 7,4 | 1045,1 | 1939,3 |
| | <i>EFR1</i> | 29,6 | 7,3 | 270,7 | 508,4 |
| | <i>EFR2</i> | 29,7 | 7,3 | 281,3 | 527,5 |
| <i>CV (%)</i> | <i>AF</i> | 2,0 | 2,1 | 26,5 | 21,4 |
| | <i>EFR1</i> | 1,9 | 3,1 | 24,8 | 19,9 |
| | <i>EFR2</i> | 1,9 | 3,3 | 23,8 | 19,6 |

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Legenda: AF (esgoto afluente), EFR1 (efluente do reator 1), EFR2 (efluente do reator 2), CV (coeficiente de variação). N° de dados: 17

3.1. TEMPERATURA

Na Tabela 4 observa-se que as temperaturas afluentes aos reatores UASB variaram entre 28,7 e 31°C, com média de 29,7°C. No efluente do R1 a variação foi de 28,4 a 30,3°C, com média de 29,6°C, e no efluente do R2 foi de 28,3 a 30,3°C, com média de 29,7°C. A partir destes valores depreende-se que as temperaturas dos esgotos afluentes aos reatores se mantiveram próximas a faixa considerada ótima para a digestão anaeróbia, que é de 30 a 35°C. (CHERNICHARO, 2016; VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

3.2 pH

Os valores de pH nos efluentes dos reatores R1 e R2 variaram na faixa de 7,0 a 7,8 e 7,06 a 7,9, respectivamente, não tendo sido verificado, por meio do teste de Kruskal-Wallis, variação significativa entre os reatores R1 e R2 durante o período operacional (estatística com nível de significância de 0,05). Estes resultados indicam que a alcalinidade estabelecida nos reatores manteve a capacidade de tamponamento dos meios. De acordo Chernicharo (2016), em reatores UASB, valores de pH entre 6,6 e 7,4 são ótimos para o desenvolvimento dos microrganismos envolvidos no processo, valores de pH abaixo de 6,0 e acima de 8,3 inibem à produção de metano. Em estudo mais recente realizado por Antwi *et al.* (2017), a faixa de pH ótima para o metabolismo das bactérias metanogênicas foi de 7,19 a 8,78.

3.3 MATÉRIA ORGÂNICA

Observa-se, na Tabela 4, que o afluente aos reatores apresentou concentrações médias da demanda química de oxigênio (DQO) de 1939,3 mgO₂/L, enquanto que nos efluentes de R1 e de R2 foram de 508,4 e 527,5 mgO₂/L, respectivamente. Já as concentrações médias da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) no afluente foram de 1045,1 mgO₂/L e de 270,7 e 281,3 mgO₂/L nos reatores R1 e R2, respectivamente.

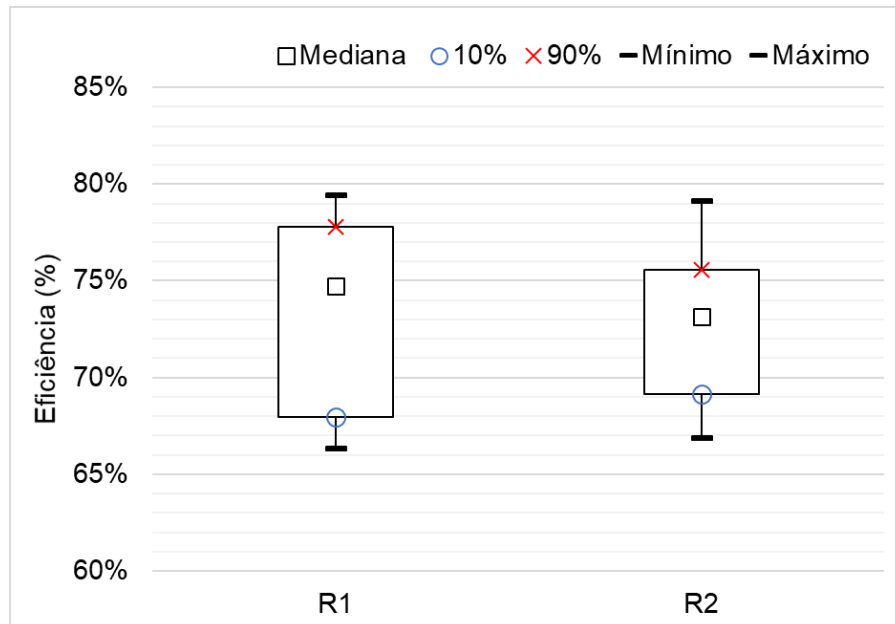
Para nível de comparação entre as concentrações de DQO e DBO de ambos os reatores, aplicou-se o teste Kruskal-Wallis. As concentrações dos reatores não apresentaram diferenças significativas. Desta forma, infere-se que para as condições de operação desta pesquisa, o elemento de separação de fases não afetou o desempenho dos reatores UASB em termos de remoção de matéria orgânica.

Ao se analisar a relação DBO/DQO do esgoto afluente aos reatores obteve-se o valor médio de 0,54, o que o caracteriza, de acordo com a literatura especializada, como de fácil

biodegradabilidade (METCALF; EDDY, 2016).

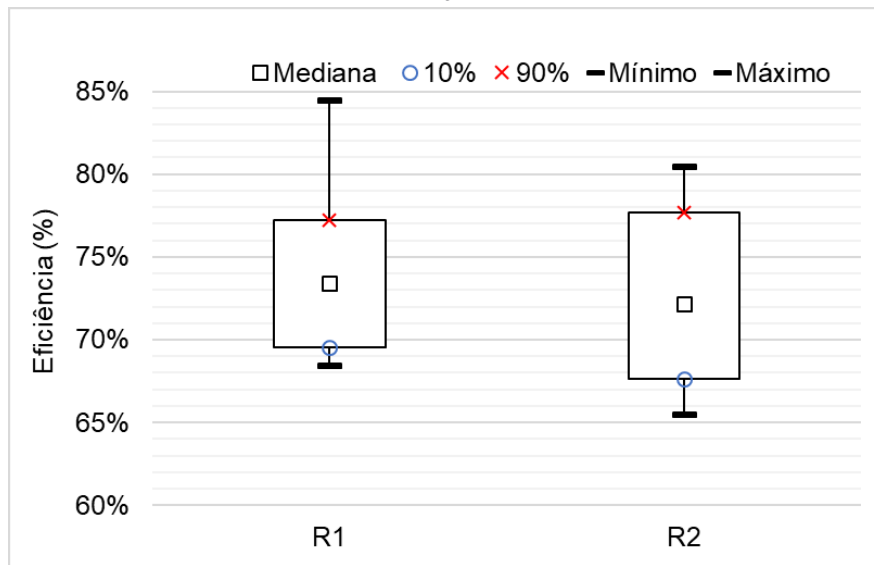
Da análise das Figuras 07 e 08, verifica-se que as eficiências médias de remoção de DQO foram obtidos valores médios de 75% e de 73% para o R1 e para o R2, respectivamente. No R1 foi obtida uma eficiência mínima de 66% e máxima de 79%, enquanto que no R2 a mínima foi de 67% e a máxima de 79%. Com relação as eficiências médias de remoção de DBO, foram obtidos os percentuais de 73 e 72% para o R1 e R2, respectivamente. No R1, o valor mínimo da eficiência foi de 68% e o máximo foi de 84%, já no R2 o mínimo foi 66% e o máximo de 80%. Os valores mínimos de eficiência de remoção de DQO, obtidos nos dois reatores, podem estar relacionados as variações de concentração na elevação da carga orgânica volumétrica.

Figura 7 – Gráfico (*box-plot*) da distribuição de dados da eficiência de remoção de DQO no R1 e R2



Fonte: Autor (2021).

Figura 8 – Gráfico (*box-plot*) da distribuição de dados da eficiência de remoção de DBO no R1 e R2



Fonte: Autor (2021).

Estes percentuais aproximam-se dos valores obtidos por Batstone *et al.* (2000), que ao modelarem a digestão anaeróbia em um reator anaeróbico híbrido de dois estágios, em grande escala, para tratamento de efluentes de matadouros de suínos, obtiveram eficiências de remoção de DQO variando na faixa de 70 a 85%.

Os valores também estão próximos dos reportados por Rajakumar *et al.* (2012) que investigou o desempenho de um reator anaeróbio de lodo híbrido (HUASB) tratando águas residuais de matadouros de aves sob condições mesofílicas. A uma carga orgânica volumétrica de 19 kgDQO/m³.d, o reator alcançou eficiências de remoção de DQO variando de 70 a 86%.

Loganath e Mazumder (2018), ao estudarem o desempenho de reatores UASB híbridos na remoção de carbono orgânico tratando águas residuais de matadouros mostraram uma concentração inicial de DQO que variou de 1750 a 5920 mgO₂/L, o que se refletiu na concentração final de DQO na faixa de (950 - 720) mgO₂/L, mostrando uma eficiência de remoção de DQO variando entre 44 e 89%.

3.4 CONCENTRAÇÕES DE DQO EM DIFERENTES CARGAS ORGÂNICAS

Os dados das concentrações de DQO obtidas nas amostras dos efluentes tratados pelo R1 e R2 monitorados durante toda a fase de investigação experimental estão apresentados na Tabela 4. Nesta tabela constam os resultados da estatística descritiva (média, máximo, mínimo e coeficiente de variação) dos dados obtidos para ambos os reatores.

Tabela 5 – Estatística descritiva das concentrações de DQO obtidas nos efluentes tratados dos reatores R1 e R2

| <i>Vazão volumétrica (m³/d)</i> | <i>R1</i> | | <i>R2</i> | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | COV: 6,5 kgDQO/m ³ .d | COV: 8,4 kgDQO/m ³ .d | COV: 5,6 kgDQO/m ³ .d | COV: 7,2 kgDQO/m ³ .d |
| Nº de dados | 9 | 9 | 8 | 8 |
| Mediana | 471,1 | 549,8 | 496,7 | 585,0 |
| Máximo | 581,0 | 717,4 | 612,7 | 677,5 |
| Mínimo | 425,0 | 470,6 | 452,2 | 525,7 |
| Coefficiente de variação (%) | 13% | 14% | 11% | 8% |

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

A análise dos dados da Tabelas 5 mostra que, em média, foram, obtidas concentrações de DQO, no R1, de 471,1 mgO₂/L, para a carga orgânica de 6,5 kgDQO/m³.d, e de 549,8 mgO₂/L para a carga orgânica de 8,4 kgDQO/m³.d. No R2, foram obtidas vazões de biogás de 496,7 e 585,0 mgO₂/L, para as cargas orgânicas de 5,6 e 7,3 kgDQO/m³.d, respectivamente.

De acordo com o teste de Kruskal-Wallis, ocorreram diferenças significativas entre os valores das medianas das concentrações de DQO, obtidas para as COV de 6,5 e os valores obtidos para as COV de 8,4 kgDQO/m³.d, no R1. Resultado semelhante foi obtido no R2, uma vez que as concentrações de DQO obtidas com o reator operando com a COV de 5,6 foram significativamente diferentes das obtidas para a COV de 7,2 kgDQO/m³.d. Essa variabilidade é influenciada pela variação gradual e crescente da matéria orgânica nas entradas nos reatores.

Ao se comparar os valores das concentrações de matéria orgânica no efluente tratado no R1 com os valores de matéria orgânica obtidos no efluente tratado do R2, verificou-se, por meio do teste de Kruskal-Wallis, que não existiram diferenças significativas, com nível de significância de 5%. Assim, este resultado sugere que a substituição do reator convencional pelo reator tipo Y não contribui para uma maior eficiência de tratamento de efluente de frigorífico industrial no tocante ao parâmetro matéria orgânica. Portanto, a escolha do tipo de separador de fases de reatores UASB, modelo convencional ou modelo Y, pode ser definida com base em aspectos relacionados a complexidade de sua instalação, que terá reflexo nos custos de implementação.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados do estudo sobre a influência da configuração do elemento de separação de fases sobre a eficiência de remoção de material orgânico em reatores UASB

tratando águas residuárias de frigorífico industrial, operados nas mesmas condições operacionais, após ter atingido as condições de equilíbrio dinâmico, são enunciadas as seguintes considerações finais:

- As estabilidades das condições anaeróbias dos reatores UASB apresentaram resultados satisfatórios, uma vez os valores de pH se mantiveram na faixa neutra.

- Com relação aos percentuais de remoção de DQO, foram obtidos valores médios de 75% e de 73% para o R1 e para o R2, respectivamente. Para a DBO, os valores médios foram de 73% (R1) e de 72% (R2). Estes percentuais de remoção, apesar de não serem suficientes para produzirem efluentes com características compatíveis com a legislação pertinente a esta matéria, estão na faixa dos valores relatados na literatura especializada.

- De acordo com o teste de Kruskal-Wallis, ocorreram diferenças significativas entre os valores das medianas das concentrações de DQO no efluente tratado, obtidas para as COV de 6,5 e os valores obtidos para as COV de 8,4 kgDQO/m³.d, no R1. Resultado semelhante foi obtido no R2, uma vez que as concentrações de DQO obtidas com o reator operando com a COV de 5,6 foram significativamente diferentes das obtidas para a COV de 7,2 kgDQO/m³.d. Essa variabilidade é influenciada pela variação gradual e crescente da matéria orgânica nas entradas nos reatores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Saneamento da Universidade Federal do Cariri (UFCA) pelo fornecimento dos reatores UASB e da estrutura do laboratório para realização desta pesquisa, e às agências de fomento CAPES e UFCA pela concessão de bolsas e apoio.

REFERÊNCIAS

- ANTWI, Philip; LI, J.; BOADI, P. O.; MENG, J.; KOBLAH, Q. F.; WANG X.; REN N.; BUELNA G. Efficiency of an upflow anaerobic sludge blanket reactor treating potato starch processing wastewater and related process kinetics, functional microbial community and sludge morphology. **Bioresource Technology**, v. 239, p.105-116, 2017.
- BATSTONE, D. J.; KELLER, J.; NEWELL, R. B.; NEWLAND, M. Modelling anaerobic degradation of complex wastewater. II: parameter estimation and validation using slaughterhouse effluent. **Bioresource Technology**, v. 75, n. 1, p.75-85, 2000.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019**. Brasília: SNS/MDR, 2020.
- BUSTILLO-LECOMPTE, Ciro Fernando; MEHRVAR, Mehrab. Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. **Journal Of Environmental Management**, v. 161, p.287-302, 2015.
- CALEGARI-JAQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Artmed Editora S.A, Porto Alegre, 2003. 255 p.
- CHERNICHARO, C. A. L.; STUETZ, R. M. Improving the design and operation of UASB reactors for treating domestic wastewater: management of gaseous emissions. In.: IX Latin American Workshop and Symposium on Anaerobic Digestion. 2008, Isla de Pascua. **Proceedings of the IX Latin American Workshop and Symposium on Anaerobic Digestion**. 2008, p. 1-8.
- CHERNICHARO, C. A. L.; VAN LIER, J. B.; NOYOLA, A.; RIBEIRO, T. Bressani. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. **Reviews In Environmental Science And Bio/technology**, v. 14, n. 4, p.649-679, 2015.
- CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DE MINAS GERAIS (CREA-MG). **Crea-Minas sedia o 1º Fórum Técnico - ETEs Sustentáveis**. Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <<http://www.crea-mg.org.br/index.php/comunicacao/noticias/2018/127-dezembro/891-crea-minas-sedia-o-1-forum-tecnico-etes-sustentaveis>> Acesso em: 15 de novembro de 2020.
- HEFFERNAN, B.; VAN LIER, J. B.; VAN DER LUBBE, J. Performance review of large scale up-flow anaerobic sludge blanket sewage treatment plants. **Water Science and Technology**. v. 63, n. 1, p. 100-107, 2011.
- HERNANDEZ, L. C.; SZIGETHY, L. **Tecnologia e inovação para a redução do risco de crises hídricas**. Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade do IPEA. 2020. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/104-tecnologia-e-inovacao-para-a-reducao-do-risco-de-criSES-hidricas>> Acesso em: 02 de dezembro de 2020.
- LEITÃO, R. C.; SILVA FILHO, J. A.; SANDERS, W.; VAN HAANDEL, A.C.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. The effect of operational conditions on the performance of UASB reactors for domestic wastewater treatment. **Water Science and Technology**, v.52, n.1/2, p. 299-305, 2005.
- LOGANATH, R.; MAZUMDER, D. Performance study on organic carbon, total nitrogen, suspended solids removal and biogas production in hybrid UASB reactor treating real slaughterhouse wastewater. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 2, p.3474-3484, 2018.

- MARQUES, L. C.; NUNES, A. B. A. Análise da eficiência do tratamento em reatores UASB em Fortaleza-CE. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017, São Paulo. Anais [...].* São Paulo, 2017. p.01-09.
- METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos.** 5ª edição. Tradução: Ivanildo Hespanhol, Jose Carlos Mierzwa. Bookman. 2016.
- MIKI, M. K. Dilemas do UASB. **Revista DAE.** n. 183, p. 25-37, 2010.
- POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; COSTA, F.J.O.G. DA; WAGNER, L. G.; LOBATO, L.C. DA S.; RIBEIRO, T. B.; MELO, D. F.; REIS, J. A.; CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 5: Biogás e emissões fugitivas de metano. **Revista DAE,** v. 66, n. 214, p.73-89, 2018.
- PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental.** São Paulo: Nobel, 467p. 1985.
- PUYOL D.; MOHEDANO A. F., SANZ J. L.; RODRÍGUEZ J. J. Comparison of UASB and EGSB performance on the anaerobic biodegradation of 2,4-dichlorophenol. **Chemosphere,** v. 76, p.1192 - 1198, 2009.
- RAJAKUMAR, R.; MEENAMBAL, T.; SARAVANAN, P. M.; ANANTHANARAYANAN, P. Treatment of poultry slaughterhouse wastewater in hybrid upflow anaerobic sludge blanket reactor packed with pleated poly vinyl chloride rings. **Bioresource Technology,** v. 103, n. 1, p.116-122, jan. 2012.
- REN, Ting-ting; MU, Y.; NI, B.; YU, H. Hydrodynamics of upflow anaerobic sludge blanket reactors. **Aiche Journal,** v. 55, n. 2, p.516-528, 2009.
- ROCHA, Jozielle Marques da; FALEIRO, G. G. V.; MAGALHÃES, J. S. F.; PEREIRA, J. O. Avaliação da retenção de sólidos em inovadora configuração de reator UASB tratando esgoto doméstico. **Revista DAE,** v. 65, n. 205, p.29-44, 2017.
- SANTOS, Silvânia Lucas dos; CHAVES, Sílvia Raphaele Morais; VAN HAANDEL, Adrianus. Influence of phase separator design on the performance of UASB reactors treating municipal wastewater. **Water Sa,** v. 42, n. 2, p.176-182, 2016.
- SANTOS, Silvânia Lucas dos; CHAVES, Sílvia Raphaele Morais; VAN HAANDEL, Adrianus. Influence of temperature on the performance of anaerobic treatment systems of municipal wastewater. **Water Sa,** v. 44, n. 2, p.211-222, 2018.
- UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND; WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017.** Special focus on inequalities. New York: United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization (WHO), 2019.
- VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente.** Campina Grande: Epgraf, 1994.
- VAN HAANDEL, A.; KATO, M. T.; CAVALCANTI, P. F. F.; FLORENCIO, F. Anaerobic reactor design concepts for the treatment of domestic wastewater. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology.** v.5, n. 1. p. 21-38, 2006.