



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA EM DESSALINIZAÇÃO

**SISTEMA COMPOSTO DE POLIESTIRENO: UMA ALTERNATIVA PARA
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS.**

NINIEDNA NIEDJA GOMES AMARO

Campina Grande – PB

2024

A485s

Amaro, Niniedna Niedja Gomes.

Sistema composto de poliestireno: uma alternativa para tratamento de águas residuárias / Niniedna Niedja Gomes Amaro. – Campina Grande, 2024.

85 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Kepler Borges França".

Referências.

1. Águas Residuárias – Reuso. 2. Poliestireno – Sistema Alternativo. 3. Desenvolvimento de Processos Químicos. 4. Tecnologias de Tratamento de Água. I. França, Kepler Borges. II. Título.

CDU 628.179.2(043)

NINIEDNA NIEDJA GOMES AMARO

**SISTEMA COMPOSTO DE POLIESTIRENO: UMA ALTERNATIVA PARA
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS.**

Dissertação apresentada a Coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. PhD Kepler Borges França

Campina Grande – PB

2024

NINIEDNA NIEDJA GOMES AMARO

**SISTEMA COMPOSTO DE POLIESTIRENO: UMA ALTERNATIVA PARA
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

Avaliado em: 23 de Fevereiro de 2024

**KEPLER BORGES
FRANÇA**

Assinado de forma digital por
KEPLER BORGES FRANÇA
Dados: 2024.03.15 15:28:26
-03'00'

Prof. PhD Kepler Borges França (UAEQ/CCT/UFCG) – Orientador



gov.br

Documento assinado digitalmente
GILMAR TRINDADE DE ARAUJO
Data: 15/03/2024 11:29:58-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Gilmar Trindade de Araújo (UAEQ/CCT/UFCG) – Avaliador



Pesq^a. Dr^a. Bruna da Silveira Guimarães, (UFCG/ Examinadora Interna).
Avaliador

“Dedico este trabalho, ao autor de toda minha vida, o princípio, meio e fim, o que sempre foi fiel e me sustentou durante esse tempo, meu querido e amado Senhor Deus. Estendo para minha amada e querida Mãe uma mulher que sempre acreditou e me incentivou mesmo quando não tinha mais forças ela me orientou a ser melhor que ontem com a graça do Pai”.

“Porque ainda que a figueira não floresça, nem haja fruto na vide; o produto da oliveira decepcione, Todavia eu me alegrarei no Senhor; regozijar-me-ei no Deus da minha salvação. O Senhor Deus é minha força, e fará os meus pés como os das cervas, e me fará andar sobre as minhas alturas.

Habacuque 3:17-19

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela sua maravilhosa graça, pela infinita misericórdia e bondade, em todos os momentos da minha vida.

Agradeço a minha mãe, por me inspirar todos os dias a ser forte, corajosa e guerreira, por nunca me abandonar, por ter me ensinado a ser responsável e não desistir dos meus objetivos, por todo suas orações e todo seu imensurável amor, você é o meu motivo pra seguir continuando, é tudo por NÓS!

Ao meu querido e amado Gilson por sempre me apoiar em qualquer decisão que eu tome e sempre esta presente para me estender a mão.

Ao meu orientador, Dr. Kepler Borges França, por ter contribuido de forma significativa com esse momento unico e por toda sua ajuda e orientação no desenvolvimento do presente trabalho.

Aos meus colegas de Laboratório que me ajudaram em troca de conhecimento e vários risos, João, Maiza, Osmar, Mayara, Iasmyn e Jullie. Obrigada por estarem comigo nos bons e maus momentos compartilhando risos e tristezas, vocês foram fundamentais para minha segurança.

Aos companheiros da oficina, Wellerson e Welber, por toda ajuda no desenvolvimento técnico do projeto de pesquisa, por sempre se fazerem presentes.

Agradeço a Carolina e Bruna por toda ajuda no desenvolvimento teorico e muitas vezes prático do meu dia a dia, por serem escuta e palavras de conforto, a empatia e humanidade de vocês é inigualavel.

A todos os membros do LABDES, em especial a Kelly por ser uma ponte direta para esse momento em minha vida, sinto seu cuidado e todo seu apoio sempre, por acreditar e sempre intervir por mim.

A todos que contribuíram diretamente ou indiretamente para este passo importante em minha realização pessoal. Minha eterna gratidão!

RESUMO

O acelerado crescimento populacional tem agravado a crise de escassez hídrica, impondo pressão substancial sobre os recursos hídricos disponíveis. Neste contexto desafiador, as tecnologias de tratamento de água surgem como soluções vitais para atenuar os impactos inerentes à insuficiência de recursos hídricos. Pesquisadores buscam soluções avançadas para enfrentar a crescente demanda hídrica, desenvolvendo tecnologias como osmose reversa, filtração por membrana e desinfecção eletroquímica. Esses métodos destacam-se pela eficácia na remoção de impurezas, patógenos e poluentes, garantindo água segura para consumo humano. Além de assegurar o fornecimento de água potável, essas tecnologias contribuem para a preservação dos recursos hídricos e a mitigação de impactos ambientais. A utilização do poliestireno como meio filtrante em águas poluídas desempenha um papel significativo, proporcionando uma superfície porosa para a retenção eficiente de impurezas e partículas indesejadas. O estudo teve como objetivo avaliar e aprimorar um sistema piloto para o tratamento de águas residuárias destinadas à agricultura. O sistema consiste em um reator tubular com leito de poliestireno de granulometria mista. Foram realizadas avaliações considerando diferentes granulometrias do leito filtrante, variando vazões e tempos. O reator operou no modo *dead-end* e, em um sistema em série, os tratamentos foram conduzidos sem recirculação, com tempos de residência teóricos entre 180 minutos e 360 minutos. O estudo consistiu em duas fases. Na primeira, otimizou-se o sistema e caracterizou-se o leito filtrante por meio da distribuição de esferas de granulometria mista. A lavagem e manutenção foram realizadas ao longo de 360 minutos, mantendo uma vazão de 0,5L/min. Na segunda fase, avaliou-se o desempenho do reator no tratamento de águas residuárias com diferentes concentrações, utilizando vazões de 0,5 L/min e 1 L/min durante 180 minutos. Nas melhores condições da fase I, alcançou-se cerca de 55% de inativação da *Escherichia coli* e 55% na turbidez, não atendendo aos padrões de potabilidade exigidos pela legislação. Na Fase II, observou-se eficiência na remoção de diversos parâmetros: 78,26% de DQO; 75% de Fosforo Total; 73,42% de Nitrato; 73,13% de Amônia; 69,33% de Nitrito; 70,83 de Potássio; 68,75% de Sódio e uma inativação de 98,32% de *Escherichia coli*, atendendo aos padrões estabelecidos para irrigação nas Classes 2 e 3 do CONAMA.

Palavras - Chave: Águas residuárias, Reuso; Poliestireno; Sistema alternativo

ABSTRACT

Accelerated population growth has worsened the water scarcity crisis, imposing substantial pressure on available water resources. In this challenging context, water treatment technologies emerge as problematic solutions to mitigate the impacts inherent to insufficient water resources. Researchers are seeking advanced solutions to meet growing water demand, developing technologies such as reverse osmosis, membrane filtration and electrochemical disinfection. These methods stand out for their effectiveness in removing impurities, pathogens and impurities, ensuring safe water for human consumption. In addition to ensuring the supply of drinking water, these modern technologies for the preservation of water resources and the mitigation of environmental impacts. The use of polystyrene as a filter medium in polluted water plays a significant role, providing a porous surface for the efficient retention of impurities and unwanted particles. The study aimed to evaluate and improve a pilot system for the treatment of wastewater destined for agriculture. The system consists of a tubular reactor with a polystyrene bed of mixed particle size. Evaluations were carried out considering different particle sizes of the filter bed, varying flow rates and times. The reactor operated in dead-end mode and, in a series system, treatments were timed without recirculation, with theoretical residence times between 180 minutes and 360 minutes. The study consisted of two phases. In the first, the system was optimized and the filter bed was characterized through the distribution of spheres of mixed particle size. Washing and maintenance were carried out over 360 minutes, maintaining a flow rate of 0.5L/min. In the second phase, the performance of the reactor in treating wastewater with different concentrations was evaluated, using flow rates of 0.5 L/min and 1 L/min for 180 minutes. Under the best conditions of phase I, around 55% inactivation of *Escherichia coli* and 55% turbidity were achieved, not meeting the potability standards required by legislation. In Phase II, efficiency in the removal of several parameters was observed: 78.26% of COD; 75% Total Phosphorus; 73.42% Nitrate; 73.13% Ammonia; 69.33% Nitrite; 70.83 of Potassium; 68.75% Sodium and 98.32% inactivation of *Escherichia coli*, meeting the standards defined for integrity in Classes 2 and 3 of CONAMA.

Keywords: Wastewater, Reuse; Polystyrene; Alternative System

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das fases que compõe o processo

Figura 2: Sistema de tratamento de águas residuária

Figura 3: Formato do poliestireno

Figura 4: Esferas com efluente antes e após o tempo de 1440min

Figura 5: Crepina para distribuição do efluente dentro do reator

Figura 6 - Taxa de remoção sob volume de 150m,180mL e 250mL

Figura 7 – Variação da turbidez da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

Figura 8 – Variação da amônia da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

Figura 9 – Variação de nitrito da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

Figura 10 – Variação de nitrato da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

Figura 11 – Variação de DQO da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

Figura 12 – Variação de *E-coli* da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

Figura 13 – Variação de pH e CE taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

Figura 14: Variação da cor na taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

Figura 15 – Variação da turbidez da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

Figura 16 – Variação de amônia da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

Figura 17 – Variação de nitrito da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

Figura 18 – Variação de nitrato da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

Figura 19 – Variação de Fósforo Total da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

Figura 20 – Variação de DQO da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

Figura 21 – Variação de *E-coli* da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

Figura 22: Variação da cor na taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

Figura 23: Variação da turbidez da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

Figura 24: Variação de amônia da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

Figura 25: Variação de nitrito da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

Figura 26: Variação de nitrato da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

Figura 27: Variação de Fósforo Total da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

Figura 28: Variação de Sódio da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

Figura 29: Variação de Potássio da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

Figura 30: Variação de DQO da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

Figura 31: Variação de *E-coli* da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

Figura 32: Variação da CE e pH na taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

Figura 33: Variação da cor na taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

Figura 34: Taxa de remoção de NTU e pH para todas as análises

Figura 35: Taxa de remoção de mgPt/L e pH para todas as análises

Figura 36: Taxa de remoção NH₄;NO₂ E NO₃ para todas as análises

Figura 37: Taxa de remoção DQO;PO₄⁻;K e NA⁺ para todas as análises

Figura 38: Taxa de remoção UFC/mL para todas as análises

Figura 39: Cinéticas da Fase 1 análises físico-químicas e bacteriológicas

Figura 40: Cinéticas da Fase 2 análises físico-químicas e bacteriológicas

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Propriedades das esferas de poliestireno.

Tabela 2 – Massa do poliestireno contida no reator antes e após tratamento com efluente

Tabela 3 – Características do poliestireno antes e após 1440 min

Tabela 4: Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos da caracterização do poliestireno

Tabela 5: Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos da fase 1

Tabela 6: Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos da fase 2

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

CE - Condutividade elétrica

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

EPS - O poliestireno expandido

ETA's - Estação de Tratamento de Água

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LABDES - Laboratório de Referência em Dessalinização

ONU - Organização das Nações Unidas

OMS – Organização Mundial da Saúde

pH - Potencial Hidrogeniônico

PS – Poliestireno

PT - Fósforo total.

PVC - Polyvinyl chloride (Policloreto de vinila)

UFMG - Universidade Federal de Campina Grande

WHO - World Health Organization (Organização Mundial de Saúde)

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	6
1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVOS.....	17
<i>Objetivo Geral:</i>	17
<i>Objetivos Específicos:</i>	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Águas residuárias e reuso de águas como viés no saneamento básico.....	18
2.2 Contaminação e tratamento das águas de abastecimento	20
2.3 Parâmetros de qualidade da água.....	24
2.4 Características do poliestireno e sua função no tratamento de efluentes.....	33
3. METODOLOGIA	36
3.1 Características do sistema de filtração.....	37
3.2 Caracterização e tratamento das esferas de poliestireno.....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5 CONCLUSÃO	66
6 SUGESTÕES	67
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
8 ANEXOS	72
8.1 Cinética dos experimentos realizados na Fase 1.....	72
Tabela 4: Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos da caracterização do poliestireno	72
8.2 Cinética dos experimentos realizados na Fase 1.....	72
Figura 39: Cinéticas da Fase 1 análises físico-químicas e bacteriológicas.....	73
8.3 Cinética dos experimentos realizados na Fase 2.....	77

1. INTRODUÇÃO

Conforme estudo divulgado em 2023 pela Agência Nacional de Águas (ANA), projeta-se um aumento de 24% no consumo e uso de água no Brasil até 2030. O órgão responsável pela gestão dos recursos hídricos informa que a média atual de consumo é de 283.000 mil litros de água por segundo, devendo ultrapassar 2,5 milhões de litros por segundo até 2030. Segundo a Agência, os principais usos da água no país abrangem abastecimento humano (urbano e rural), abastecimento animal, indústrias de transição, mineração, termelétricidade, irrigação e evaporação de líquidos de reservatórios artificiais.

Diante do crescimento populacional evidenciado, a população brasileira em 2019 ultrapassou 210 milhões de habitantes, gerando um notório aumento na demanda por água. Nesse contexto, torna-se imprescindível expandir a presença de reservatórios hídricos, como açudes e lagos, tanto em áreas urbanas quanto rurais, assegurando assim a viabilidade e maior segurança em relação aos recursos hídricos.

Contudo, a indisponibilidade da água, por meio de sua contaminação, ocasiona uma redução dos espaços propícios à vida, gerando custos nem sempre mensurados, tais como: o aumento de custos hospitalares, perda de produtividade na agricultura e na pecuária, a redução da pesca, a perda da biodiversidade e a perda de valores turísticos, culturais e paisagísticos bem como uma perda geral de produtividade humana e social. A água torna-se desse modo peça importante nas questões socioambientais e de saneamento básico, segundo as Nações Unidas, cerca de 80% das águas residuais dos países em desenvolvimento são eliminadas no meio ambiente sem qualquer tratamento prévio (UN-WATER, 2018).

As alterações na qualidade da água impactam negativamente os recursos hídricos, especialmente no abastecimento humano. Restrições significativas nesse uso resultam de danos causados por fatores naturais, ações humanas e a expansão de atividades agrícolas, industriais e urbanas. As principais fontes de poluição incluem o descarte inadequado de resíduos industriais, domésticos e esgoto não tratado, afetando a qualidade e quantidade de água disponível para consumo humano. Essas alterações geram desequilíbrios na biota aquática e aceleram o processo de eutrofização ambiental.

No entanto, a maioria das comunidades rurais, assim como pequenas cidades brasileiras periféricas, não possuem a coleta e o tratamento de seus efluentes, ferindo um direito fundamental à vida humana, no que tange a Lei nº 11.445/2007 da Política Nacional de Saneamento Básico, a universalização do acesso aos serviços abordados em lei, como por exemplo, a coleta e tratamento de esgoto deve se estender a toda população, logo, se faz necessário mais investimentos no setor sanitário.

Face a esse cenário, é de fundamental importância a adoção de tecnologias que propiciem a preservação ambiental, associada a uma abordagem sustentável para o reuso de águas potencialmente poluídas, com ênfase na eliminação de patógenos. Diversos parâmetros devem ser criteriosamente considerados, incluindo a área disponível, características do esgoto, qualidade almejada para o efluente, custos de implantação e manutenção, perfil do usuário, tempo de tratamento, consumo de energia e o volume de efluente tratado ao término do processo. Uma avaliação sob a ótica econômica torna-se pertinente, pois a correta utilização pode gerar renda mediante o reuso em larga escala na agricultura.

Tal prática viabiliza o aproveitamento de água que, de outra forma, seria descartada, contribuindo para a redução do consumo de água potável na irrigação de diversas culturas. Este método revela-se como uma fonte vantajosa de água e nutrientes para as plantas, disponível de forma constante ao longo do ano. Essas características conferem um valor expressivo a esse recurso, especialmente em regiões sujeitas a escassez hídrica, a exemplo do Nordeste do Brasil, e em culturas que demandam elevados índices nutricionais.

Diante da problemática do reuso de água e a importância de tecnologias avançadas e de baixo custo operacional bem como de fácil acesso, surge a hipótese da utilização do poliestireno de com granulometria de leito misto para o tratamento de águas residuárias potencialmente poluídas.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo Geral:

- Desenvolver e aprimorar o desempenho de um sistema piloto alternativo com elemento filtrante de poliestireno, para tratamento de águas residuárias.

Objetivos Específicos:

- Otimização de um sistema alternativo composto de poliestireno com esfericidade diversa, com um reator do tipo tubular, instrumentos de medidas: rotâmetros, tanques e operação do sistema em serie;
- Utilização de uma solução aquosa composta de água de abastecimento e água com bactérias tipo *Escherichia Coli*, a ser empregada na análise do desempenho do sistema de poliestireno com leito misto;
- Caracterização do leito misto de poliestireno em termos de sua esfericidade e capacidade adsortiva, utilizando água de reuso pura.
- Analisar a influência das variáveis: vazão, concentração e tempo de residência na eliminação da bactéria *Escherichia coli*;
- Estudar desempenho do sistema em função da produção e a qualidade do efluente tratado junto com a Resolução 357/2005 do CONAMA.
- Avaliar a conformidade do efluente com os parâmetros estabelecidos pela legislação referentes ao fornecimento e reutilização da água.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Águas residuárias e reuso de águas como viés no saneamento básico

Um dos desafios significativos enfrentados na contemporaneidade reside na provisão de água potável à população, especialmente em países subdesenvolvidos, onde o abastecimento de água limpa assume uma importância crítica. A poluição hídrica, derivada da descarga indiscriminada de águas residuais, é uma questão persistente, afetando rios, canais e outros corpos d'água. Diante desse contexto, surge a necessidade premente de desenvolver metodologias mais eficazes e economicamente acessíveis para o tratamento de águas residuais, superando as limitações inerentes às tecnologias tradicionais existentes.

“De acordo com a resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH, nº 54/2005, águas residuárias são os esgotos, a água descartada, os efluentes líquidos de edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuária, tratados ou não, essas águas podem transportar materiais poluentes como, microrganismos e metais pesados que prejudicam a qualidade das águas superficiais quando ocorre o lançamento.”

De acordo com (MOURA, et al, 2020), o reuso da água, até o momento, possui duas modalidades: água de reuso e água reciclada, a denominação “água de reuso” confunde-se, no popular, com o aproveitamento de águas pluviais (água reciclada), a água de reuso pode ser aplicada em diversas atividades não potáveis, dentre elas: na agricultura, na irrigação paisagística, na limpeza urbana, na lavagem de veículos e em sanitários nos shopping centers, demonstrando assim sua vasta extensão e sua grande viabilidade.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda um valor máximo de 103 UFC/100 mL⁻¹ de coliformes termotolerantes na água destinada à irrigação de produtos frescos. Portanto, é imperativo garantir um tratamento rigoroso dessas águas, dada a possibilidade de impactos negativos resultantes do excesso de sais, metais pesados, nutrientes e compostos orgânicos no solo.

Os constituintes frequentemente presentes em águas residuais domiciliares, como DBO, nitrogênio, fósforo, sólidos suspensos e coliformes, podem causar danos à saúde humana e aos cursos de água naturais. Sob uma perspectiva microbiológica, é crucial que as águas residuárias, durante e após o processo de preparação e colheita, possuam qualidade adequada para evitar a proliferação de microrganismos que possam introduzir patógenos em culturas de hortaliças, especialmente aquelas próximas ao solo.

Águas residuais, provenientes de atividades humanas diversas, contêm uma variedade de contaminantes. O tratamento adequado dessas águas é essencial para mitigar impactos ambientais e proteger a saúde pública, envolvendo processos físicos, químicos e biológicos.

A poluição decorrente de descargas inadequadas de águas residuais pode degradar a qualidade da água em rios, lagos e oceanos, prejudicando ecossistemas e a vida aquática. A gestão sustentável das águas residuais é crucial, envolvendo regulamentações eficazes, incentivos para tecnologias avançadas de tratamento e conscientização pública.

O investimento no tratamento de águas residuais não apenas beneficia o meio ambiente, a saúde pública e a sustentabilidade, mas também traz impactos positivos a nível econômico e social. A reutilização em larga escala dessas águas, especialmente em comunidades não atendidas por estações de tratamento de água (ETA) e em regiões com escassez hídrica, apresenta vantagens significativas. No entanto, é essencial que essa prática atenda às regulamentações ambientais para reuso agrícola, florestal, urbano e industrial

De acordo com (BEZERRA et al., 2021), o reuso de águas residuais deve ser incentivado especificamente no semiárido brasileiro, por suprir a escassez hídrica existente, embora, ainda gere desconfiança e não seja uma prática comumente utilizada pela população, principalmente na irrigação em hortaliças devido ao potencial de contaminação por organismos patogênicos.

“Atualmente estima-se que 10% da população mundial consuma alimentos irrigados com efluentes tratado e que mais de 20 milhões de hectares são irrigados com essas águas em todo o mundo (BOUGNOM et al., 2020).”

A melhoria na qualidade de vida e nas condições socioeconômicas da população rural, decorrente do aumento da produtividade agrícola e da recuperação de áreas degradadas, destaca-se positivamente pelo reuso de água. Esta prática evita o lançamento de esgoto bruto nos mananciais, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos. Cerca de 1% dos coloides suspensos e dissolvidos presentes no dejetos do esgoto sanitário contêm macronutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, indicando a viabilidade do reuso na irrigação e a redução do uso de fertilizantes minerais prejudiciais ao solo.

Os efluentes, ao serem utilizados na agricultura, representam uma alternativa para o saneamento ambiental, prevenindo a deposição inadequada de águas residuárias em corpos d'água, que pode causar doenças de veiculação hídrica. Assim, a prática do reuso desempenha um papel crucial na gestão sustentável dos recursos hídricos, na esfera econômica e ecológica.

Segundo dados do IBGE (2017), a cobertura insuficiente de saneamento básico é evidente no Brasil, com 34,1 milhões de domicílios (49,2% do total) sem o serviço de esgotamento sanitário. Na região Nordeste, 74,6% dos domicílios não possuem o serviço, sendo que apenas 15,2% da população rural a nível nacional tem acesso ao esgotamento sanitário. Essa deficiência afeta principalmente as populações mais carentes, constituindo um ônus para a sociedade.

Diante desse cenário, é claro que o saneamento básico, essencial para o bem-estar de uma comunidade, apresenta um déficit significativo, especialmente nos serviços de esgotamento e tratamento de esgotos. Esse desafio é mais evidente nas áreas periféricas e rurais, resultando em riscos para a qualidade de vida, meio ambiente e saúde, destacando a necessidade urgente de ações governamentais para a universalização do acesso a esses serviços em todo o país

2.2 Contaminação e tratamento das águas de abastecimento

Os impactos decorrentes do despejo indiscriminado de efluentes domésticos e industriais nos corpos d'água são indiscutíveis, pois, essas substâncias contaminadas alteram a natureza dos corpos d'água, causando poluição por organismos patogênicos e eutrofização do meio ambiente. Devido ao lançamento desses dejetos sem tratamento, diversas alterações ocorrem no equilíbrio da massa de água, dificultando sua autolimpeza. Além disso, temos a eutrofização, que é definida como o crescimento desproporcional de algas, que impede o uso da água. Tais eventos prevalecem em lagos, lagoas e represas devido ao seu alto teor de nutrientes, como fósforo e nitrogênio. Entre suas principais consequências temos um alto índice de crescimento da vegetação, fortes odores, problemas de toxicidade levando à morte dos organismos existentes, além do desaparecimento gradual das águas.

É notório que a zona rural em sua maioria não é provida do sistema de saneamento básico, ou seja, de tratamento de águas e esgotos, e em sua maioria é comum a utilização de fossa-poço, onde ocorre o aumento de proliferação de doenças e parasitas por meio da contaminação da água subterrânea. A irrigação e lavagem de verduras, hortaliças e frutas com água de mananciais contaminados com esgotos domésticos e o uso direto no solo de resíduos, como a cama-de-frango e resíduos de suínos e bovinos, são fontes de contaminação do produto agrícola e das águas subterrâneas (BERTONCINI, 2008).

Contudo, foi observado que a água é considerada um fator limitante quando aos insumos utilizados na agricultura e suas subdivisões produtivas para o desenvolvimento vegetal, entretanto o volume utilizado na atividade se contrapõe a ótica ambiental e torna-se necessário

a adoção de métodos e técnicas que visem à redução da exploração ou o reuso de águas oriundas de outras atividades, podendo servir de destino para efluentes diversos, contribuindo para solucionar problemas relacionados a tratamento e destinação dos mesmos (FRANCO et al., 2019).

A destinação proveniente da limpeza de baias é considerada um dos meios mais propícios a incidência de efluentes, tendo em vista que a água da lavagem é impregnada de fezes, urina, restos de ração, pelos, fármacos e hormônios utilizados na criação dos animais. O uso direto desta água em solos agrícolas tem causado problemas de contaminação do solo com metais pesados, como o cobre e zinco, além do sódio, que estão presentes na ração animal.

Diante disso, foi identificado que os principais contaminantes de água no meio rural consistem de argilas suspensas, matéria orgânica, patógenos originados de fossas sépticas, além de pesticidas e fertilizantes utilizados nas culturas agrícolas, os pesticidas, fármacos e hormônios dissolvidos na água raramente são eliminados, mesmo por processos de tratamentos de água utilizados pelas companhias de abastecimento público.

Além dos benefícios diretos para as pessoas, os sistemas de coleta e tratamento de esgoto também estimulam a construção civil, gerando empregos e renda. Os principais impactos causados pelo lançamento de esgoto sem tratamento são os seguintes:

- A atenuação do oxigênio dissolvido nos cursos d'água se deve à respiração das bactérias em decomposição utilizando o oxigênio do meio líquido para estabilizar a matéria orgânica. Essa atenuação pode ser analisada em campo com oxímetro digital ou em laboratório pelo método de Winkler. Ao mesmo tempo, deve ser realizada uma análise de DBO para verificar a presença de orgânicos nessas águas;
- Microrganismos transmissores de doenças como cólera, amebíase, giardíase e disenteria chegam aos cursos de água. Essa contaminação pode afetar alguns de seus principais usos, como abastecimento de água potável, irrigação e banho. A presença desses organismos na água de reuso constitui a maior barreira para a aceitação do consumo de produtos irrigados com essas águas. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) classifica a água de acordo com seu uso principal. Em todas as categorias, o parâmetro de controle microbiológico é a concentração de coliformes termotolerantes
- Enriquecimento do ambiente devido à eutrofização das águas superficiais devido às altas concentrações de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo. Esse fenômeno se repete nos

mais diversos corpos hídricos, principalmente aqueles pertencentes a áreas urbanas, uma vez que o esgoto é lançado sem nenhum tratamento.

- A alta salinidade desses corpos de água pode aumentar a salinidade do solo. Os efeitos da salinidade do solo influenciam a dinâmica da composição espacial das populações, levando ao declínio da produção agrícola e à migração populacional, reforçando a insegurança alimentar e a economia das comunidades locais (CASTRO e SANTOS, 2019).

A descarga de águas residuais na água e no solo também pode ser analisada sob uma perspectiva econômica, além dos inúmeros impactos já conhecidos. Porque o uso correto dos efluentes gera renda e insumos para os produtores rurais. Em geral, a falta desses serviços priva as pessoas de uma vida digna, do acesso à educação e ao trabalho, das substâncias básicas necessárias à sobrevivência e da impossibilidade de se higienizar adequadamente.

Em virtude disso, o sistema de coleta e tratamento de esgoto e o reúso dessas águas apresenta vantagens, do ponto de vista econômico, social e ambiental sendo imprescindível em regiões onde existe escassez hídrica, como na região semiárida. Desse modo as águas residuárias tratadas constitui uma fonte hídrica, possibilitando a redução da procura por novas retiradas dos corpos d'água (ANDRADE, 2018)

O tratamento de águas residuárias é um processo crítico para a preservação do meio ambiente e a prevenção da poluição hídrica. A gestão eficiente dessas águas é essencial para minimizar os impactos negativos nos corpos d'água receptores, a maioria dos métodos de tratamento de águas superficiais exige a remoção de partículas e patógenos, sendo os métodos de tratamento convencionais frequentemente eficazes. Esse processo inclui etapas como: O pré-tratamento que é uma fase crucial no tratamento de águas residuárias, visando a, filtração na borda da fonte e/ou ajuste de pH de partículas grosseiras, coagulação, floculação, decantação, filtração e esterilização. A coagulação envolve a desestabilização de partículas de matéria orgânica através da neutralização da carga superficial, utilizando coagulantes como o sulfato de alumínio. Durante a floculação, as partículas instáveis agregam-se em partículas maiores e são depositadas por gravidade. A filtração com meio granular é comum para remover pequenas partículas e patógenos. A desinfecção, em última análise, é essencial para inativar microrganismos patogênicos. Segundo a World Health Organization (WHO, 2017), tecnologias como a cloração, ozonização e radiação ultravioleta são eficazes na redução da carga microbiológica em águas residuárias tratadas.

Em resumo, o tratamento de águas residuárias é uma área dinâmica, onde avanços tecnológicos e estratégias sustentáveis são continuamente explorados para promover a eficiência e a conformidade com normas ambientais cada vez mais rigorosas. A literatura recente destaca a importância de abordagens integradas e soluções avançadas para enfrentar os desafios associados ao tratamento de águas residuárias.

Os tratamentos avançados de águas residuais englobam uma série de processos e tecnologias que vão além dos métodos convencionais, visando alcançar uma maior remoção de poluentes e a produção de efluentes de melhor qualidade. Essas abordagens são essenciais para lidar com desafios específicos, como a presença de poluentes emergentes e compostos persistentes. Abaixo estão algumas das tecnologias avançadas comumente utilizadas no tratamento de águas residuais:

- **Oxidação Avançada:**

A oxidação avançada envolve a aplicação de oxidantes poderosos, como ozônio, peróxido de hidrogênio e persulfato, para degradar contaminantes orgânicos persistentes. Esses processos geram radicais hidroxila altamente reativos, capazes de quebrar moléculas complexas em compostos mais simples e menos tóxicos.

- **Membranas de Filtração Avançada:**

Tecnologias de membranas, como ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa, são empregadas para a remoção de sólidos suspensos, patógenos, matéria orgânica e íons dissolvidos. Essas membranas têm poros extremamente pequenos que retêm seletivamente os contaminantes, produzindo água tratada de alta qualidade.

- **Adsorção com Carvão Ativado:**

O carvão ativado é amplamente utilizado como adsorvente em processos de tratamento de águas residuais avançados. Ele adsorve organicamente compostos, poluentes emergentes e substâncias químicas indesejadas, melhorando significativamente a qualidade da água tratada.

- **Fotocatálise Heterogênea:**

A fotocatalise heterogênea utiliza semicondutores fotocatalíticos, como dióxido de titânio (TiO₂), que, sob a ação da luz ultravioleta, produzem radicais livres capazes de oxidar e degradar contaminantes orgânicos presentes na água.

- Processos de Separação Avançada:

Técnicas como a eletrocoagulação, eletroflotação e flotação por ar dissolvido são aplicadas para remover partículas finas, coloides e metais pesados da água residual, proporcionando uma eficiente clarificação e remoção de sólidos suspensos.

Essas tecnologias avançadas são fundamentais para enfrentar os desafios crescentes associados ao tratamento de águas residuais, permitindo a produção de efluentes de alta qualidade que atendem aos rigorosos padrões ambientais e promovem a sustentabilidade dos recursos hídricos. O contínuo desenvolvimento e aprimoramento dessas tecnologias são essenciais para garantir a eficácia e a viabilidade econômica do tratamento de águas residuais no futuro.

2.3 Parâmetros de qualidade da água

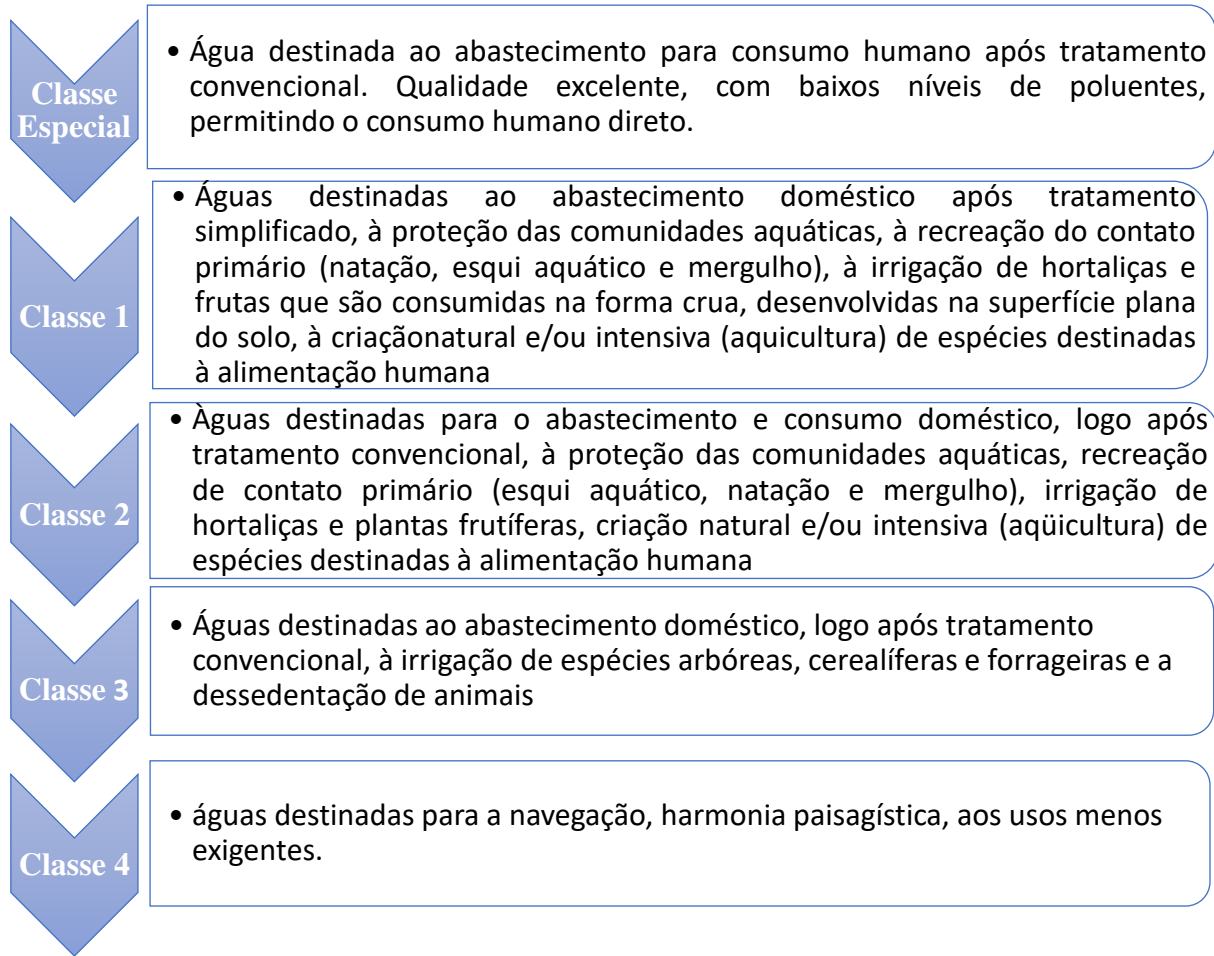
A água utilizada para consumo humano, tem a necessidade de possuir um grau elevado de qualidade, levando em consideração as substâncias presentes nela, nas quais irão determinar as características, físicas, químicas ou microbiológicas, logo é de suma importância uma avaliação previa do manancial ao qual a população é abastecida.

A utilização de padrões de potabilidade descreve a especificação da qualidade da água para consumo, logo seu principal objetivo consiste em um conjunto de valores máximos, permitidos pela legislação, para alguns parâmetros indicadores, presentes na água reservada ao consumo humano, sendo determinado levando em consideração o seu desdobramento em qualidade microbiológica, qualidade física e qualidade química.

A classificação da água é uma prática comum para avaliar sua qualidade e determinar a adequação para diferentes usos. Em muitos países, incluindo o Brasil, a classificação da água segue padrões estabelecidos por órgãos reguladores. No Brasil, por exemplo, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define classes de água conforme a Resolução CONAMA 357/2005.

A avaliação da qualidade da água envolve a consideração de diversos parâmetros que refletem suas características físicas, químicas e biológicas. Essa análise é essencial para embasar sua aplicação em diversos setores, incluindo a agricultura. É crucial observar que para cada finalidade da água, existem normativas legais que estabelecem padrões mínimos a serem atendidos. Abaixo estão as principais classes de água e suas características:

Quadro 1: Classificação das águas



Conseqüentemente, é imprescindível compreender qual legislação especifica os parâmetros e os valores permitidos para a água a ser utilizada. No contexto brasileiro, há um conjunto de instrumentos legais e normativos que estabelecem condições específicas para a qualidade das águas, incluindo:

- Legislação Federal

Leis e decretos federais, como a Lei Federal nº 9.433/1997 (Lei das Águas), que estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos, e a Resolução CONAMA nº 357/2005, que classifica as águas superficiais e estabelece os padrões de qualidade.

- Normas Estaduais e Municipais

Regulamentações específicas de cada estado e município, que podem complementar as normas federais e adequá-las às características regionais.

- Normas do Ministério da Saúde

Normativas relacionadas à potabilidade da água para consumo humano, garantindo a saúde da população.

Essas legislações definem parâmetros como pH, oxigênio dissolvido, turbidez, coliformes fecais, entre outros, estabelecendo limites aceitáveis para cada um deles. A conformidade com essas normas é essencial para garantir a segurança e a sustentabilidade no uso da água em diferentes contextos, promovendo a proteção dos recursos hídricos e a saúde pública.

2.3.1 Cor

A cor da água é um parâmetro crucial na avaliação da qualidade da água, impactando a percepção visual e as características estéticas dos corpos d'água. Sua presença está associada a materiais dissolvidos ou suspensos, como compostos orgânicos naturais, taninos, algas, e substâncias inorgânicas como ferro e manganês. A intensidade da cor é medida pela absorção de luz visível, classificada como aparente (visual) ou verdadeira (relacionada à absorção específica de certos compostos). A cor não é prejudicial à saúde, mas pode indicar a presença de poluentes, como matéria orgânica dissolvida proveniente de plantas em decomposição. A cor também influencia processos naturais em ecossistemas aquáticos, como a penetração da luz e a fotossíntese. Em águas para abastecimento público, a cor excessiva afeta a aceitação estética, embora não represente riscos diretos à saúde. A avaliação é feita por instrumentos como espectrofotômetros, comparando resultados com padrões para determinar a qualidade da água em relação à cor. O controle e monitoramento da cor são essenciais na gestão da qualidade da água, contribuindo para manter corpos d'água saudáveis e visualmente aceitáveis.

2.3.2 Turbidez

A turbidez refere-se à presença de matéria suspensa que absorve luz, originada de fontes naturais como partículas de rocha, argila e silte, e fontes antropogênicas como resíduos domésticos, industriais, microrganismos e erosão (BESSA, 2020). É um indicador crucial na avaliação da qualidade da água, representando a quantidade de partículas sólidas em suspensão, medida em unidades nefelométricas de turbidez (NTU) pela dispersão da luz na água. Altas concentrações de turbidez estão associadas a atividades humanas como construção civil, escoamento superficial e práticas agrícolas inadequadas, impactando negativamente a qualidade da água. Isso prejudica a penetração de luz na coluna d'água, afetando a fotossíntese em plantas aquáticas e elevando a temperatura da água. Os efeitos adversos incluem danos à

vida aquática, complexidade nos processos de tratamento, problemas estéticos e interferência na potabilidade da água. A gestão eficaz da turbidez é crucial para preservar corpos d'água, envolvendo estratégias como controle da erosão, práticas agrícolas sustentáveis e redução do escoamento superficial. A monitorização contínua é essencial para avaliar impactos ambientais, garantir conformidade com padrões regulatórios e assegurar a preservação da vida aquática, a segurança hídrica e a estética das águas superficiais.

2.3.3 Potencial hidrogeniônico (pH)

O controle desse parâmetro é um fator importante no tratamento de efluentes, pois reduz o uso de produtos químicos e aumenta a rentabilidade do processo, pois é um parâmetro que indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade de um meio qualquer, tendo seu valor de neutralidade indicado como 7, valores acima são classificados como alcalinos e abaixo como ácidos. Sua alteração está relacionada à dissolução de rochas, a fotossíntese e despejos domésticos e industriais são fontes que alteram o pH

Níveis extremos de pH, sejam ácidos ou básicos, podem ter efeitos profundos no desenvolvimento da biota aquática, como bactérias envolvidas em processos biológicos. O valor do pH é um parâmetro importante para controlar o crescimento microbiano, pois tem um impacto significativo nas reações bioquímicas entre águas residuais, solo e microrganismos (VENSKE, 2017). No tratamento de águas residuais, as bactérias funcionam de forma mais eficiente em valores de pH entre 6,8 e 7,2 (MARTINS e MARTINS, 2014).

O valor de pH ideal da água de irrigação está na faixa de 6,5 a 8,4, estando acima ou abaixo desses valores permitidos, indicam anomalias na qualidade da água ou a presença de íons tóxicos que podem afetar adversamente a comunidade microbiana do solo e danificar o sistema radicular. O método de tratamento desempenha um papel crucial na modificação dos níveis de pH, sendo a introdução de produtos químicos, como cloro, sulfato de alumínio e outros coagulantes, um fator determinante.

2.3.4 Condutividade elétrica (CE)

A condutividade elétrica (CE) é um parâmetro crucial na avaliação da qualidade da água, destacado na literatura recente. Ela serve como indicador da concentração de íons dissolvidos, fornecendo informações sobre a salinidade e composição química da água. A literatura enfatiza a CE como uma ferramenta valiosa na gestão da qualidade da água, proporcionando entendimento sobre a composição iônica e impactos humanos nos ecossistemas aquáticos. A

integração da CE com outros parâmetros contribui para uma compreensão mais completa, essencial para a preservação e sustentabilidade dos recursos hídricos.

A condutividade elétrica (CE) é um fator crucial nas águas de irrigação, pois níveis elevados de sais podem impactar negativamente as culturas e o solo. Apesar da ausência de limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357 para a CE, é essencial considerá-la em estudos com águas residuárias, dadas suas concentrações significativas de sais dissolvidos, águas com CE inferior a $700 \mu\text{S cm}^{-1}$ podem ser utilizadas para irrigação sem restrições. Essa avaliação é crucial para preservar a qualidade do solo e otimizar os benefícios da irrigação nas culturas agrícolas.

2.3.5 Série de Nitrogênio - (amônia, nitrato, nitrito)

Existem várias fontes de nitrogênio em corpos de água naturais, dessas o esgoto sanitário é a principal fonte de liberação na água devido à presença de proteínas, nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal produzido pela hidrólise da ureia em água. Algumas águas residuais industriais, também contribui para a liberação de nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal na água, por exemplo indústrias químicas, petroquímicas, siderúrgicas, farmacêuticas e de conservas, indústria alimentar, matadouros, matadouros, curtumes. Por esta razão, a atmosfera também é uma importante fonte de informação, devido a vários mecanismos: Fixação biológica por bactérias e algas incorporando este nitrogênio atmosférico nos tecidos contribui para a presença de nitrogênio orgânico nos tecidos.

O nitrogênio está presente na água na forma de nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato. As duas primeiras são chamadas de formas reduzidas e as duas últimas são chamadas de formas oxidadas. Pode-se relacionar a idade da poluição com a forma do nitrogênio. Ou seja, se uma amostra de água for retirada de um rio poluído e a análise mostrar que é principalmente a forma reduzida, significa que a fonte da poluição está próxima. Se o nitrito e o nitrato forem dominantes e vice-versa, isso significa que a distância de descarga de esgoto está longe. Na área de autodepuração natural do rio, existe azoto orgânico na área de degradação, existe amoníaco na área de decomposição ativa, existe nitrito na área de recuperação e existe nitrato na área de purificação de água.

Compostos de nitrogênio são nutrientes para processos biológicos. São considerados macronutrientes porque o nitrogênio é, depois do carbono, o elemento requerido em maior quantidade pelas células vivas. Quando são lançados em águas naturais junto com o fósforo e

outros nutrientes nas águas residuais, enriquecem o meio ambiente, tornando-o mais fértil e, em maior medida, promovendo o crescimento de organismos que os utilizam, principalmente algas, conhecido como Eutrofização. Quando as emissões de nutrientes eram muito fortes, os gêneros que dominavam em cada caso particular floresciam. Essas proliferações de algas podem prejudicar o uso dessas águas, interromper gravemente o abastecimento público ou causar poluição ao morrer e se decompor.

O controle da eutrofização pela redução da disponibilidade de nitrogênio é influenciado por diversas fontes, algumas das quais muito difíceis de controlar, como a fixação do nitrogênio atmosférico por certas algas. Portanto, o investimento no controle da fonte de fósforo deve ser priorizado. Também deve-se ter em mente que os processos de tratamento de efluentes atualmente utilizados no Brasil não são otimizados para a remoção de nutrientes e que o efluente final tratado libera uma grande quantidade de nutrientes, o que também leva ao processo de eutrofização.

A carência desse elemento faz com que as plantas fiquem com as folhas amareladas e tenham o crescimento inibido ou reduzido, já o excesso provoca o crescimento exagerado da parte aérea, tornando a planta fraca, com tecido mais mole e pouco resistente às doenças e frio (SANTOS, 2014).

De acordo com a legislação federal vigente CONAMA/86 nº20, o nitrogênio amoniacal é o padrão de classificação dos corpos d'água naturais e o padrão de lançamento de esgoto. A amônia é um veneno estritamente limitante para peixes, muitas espécies não toleram concentrações acima de 5 mg/l. Além disso, como mencionado anteriormente, a amônia consome oxigênio dissolvido na água natural durante a oxidação biológica, a chamada DBO de segundo estágio.

Portanto, a concentração de nitrogênio amoniacal é um parâmetro importante para a classificação de corpos d'água naturais, sendo normalmente utilizada na composição de indicadores de qualidade de água. Os nitratos são tóxicos e causam metahemoglobinemia em lactentes, que pode ser fatal em crianças (os nitratos se decompõem no sangue em nitrito, que compete com o oxigênio livre, tornando o sangue azul). Os nitratos são, portanto, um critério de potabilidade e 10 mg/L é o máximo permitido pelo Decreto 1.469.

2.3.6 Demanda química de oxigênio (DQO)

É a quantidade de oxigênio necessária por um reagente químico para oxidar a matéria orgânica. Os valores de DQO são geralmente superiores aos de DBO e os testes são realizados em um período de tempo menor. O aumento da concentração de DQO nos corpos d'água se deve principalmente às emissões de fontes industriais. A DQO é um parâmetro importante em estudos de caracterização de efluentes domésticos e industriais. Quando combinado com o DBO, o DQO é muito útil para observar a biodegradabilidade dos resíduos. Sabe-se que o poder oxidante do dicromato de potássio é maior que o dos microorganismos, exceto em casos raros como hidrocarbonetos aromáticos e piridina.

A poluição orgânica da água pode ser avaliada pela redução da concentração de oxigênio dissolvido e/ou pela avaliação da concentração de matéria orgânica em função da concentração de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica (VALENTE et al., 2007). Este parâmetro é utilizado como indicador do teor de matéria orgânica em efluentes, sendo amplamente utilizado no monitoramento de estações de tratamento de efluentes líquidos. Envolve a estabilização da matéria orgânica por meio de processos químicos.

Amostras contendo substâncias orgânicas e/ou inorgânicas suscetíveis à oxidação por dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido podem causar COD. No esgoto doméstico, onde a fração orgânica supera a fração inorgânica reduzida, a DQO pode ser utilizada para quantificar a presença de orgânicos oxidáveis (AQUINO et al., 2006).

O DQO provou ser um parâmetro muito eficaz para controlar sistemas de tratamento anaeróbio de águas residuais domésticas e industriais. Depois desses impulsos o sistema vem sendo desenvolvido desde a década de 70, quando novos modelos de reatores foram criados e muitos estudos foram realizados, observando o uso preferencial de DQO Controle as cargas aplicadas e ganho de eficiência. Nesses casos, o DBO é usado apenas como parâmetro secundário, mais para que seja verificado o cumprimento dos regulamentos.

2.3.7 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A DBO, é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica em formas inorgânicas estáveis pela representação microbiana aeróbica. A DBO_{5,20} é geralmente considerada a quantidade de oxigênio consumida em um determinado período de tempo em uma temperatura específica de cultura. Um período de 5 dias a uma temperatura de incubação de 20°C é comumente usada. Nesse processo, o oxigênio da água é consumido e a energia contida nas ligações químicas que quebram como a bandeira é liberada. Os microrganismos

desempenham um papel tão importante no tratamento de águas residuais porque, além de outros nutrientes que podem não estar presentes em quantidades suficientes nas águas residuais, eles forneceram a energia liberada para realizar suas funções celulares, como reprodução e locomoção, que muitas vezes são chamadas de síntese celular. Quando o meio fica sem nutrientes, os micróbios sobreviventes começam a se alimentar do material celular com membranas celulares rompidas.

Este parâmetro determina a concentração de matéria orgânica biodegradável pela demanda de oxigênio produzida pelos microrganismos através dos músculos. Em outras palavras, refere-se à matéria orgânica mineralizada pela atividade de microrganismos. A Resolução CONAMA 357/2005 recomenda o máximo de 10 mg/L para água doce classe 3, última categoria recomendada para irrigação. O aumento da DBO no corpo hídrico está relacionado ao lançamento de esgoto, que leva ao aumento do teor de matéria orgânica, que leva à redução do oxigênio extraído devido à apresentação, que leva à morte de animais; além de alterar o cheiro e o gosto da água. valores elevados desse parâmetro podem acarretar risco de contaminação microbiana do solo e das lavouras irrigadas, além do risco à saúde das pessoas envolvidas no processo agrícola.

2.3.8 Sódio (Na) e Potássio (K)

A presença de sódio (Na) e potássio (K) na qualidade da água é um aspecto significativo e multifacetado que impacta diversos setores e ecossistemas. A influência desses íons na qualidade da água é amplamente discutida na literatura, altas concentrações de sódio na água potável podem ter implicações na saúde humana, relacionadas principalmente à pressão arterial e doenças cardiovasculares.

A aplicação de sódio (Na) e potássio (K) no tratamento de águas residuais é uma prática relevante na gestão ambiental, visando à redução da poluição e à obtenção de água tratada conforme padrões ambientais. O sódio é empregado devido às suas propriedades de coagulação, utilizando compostos como o cloreto de sódio para facilitar a remoção de partículas suspensas. Os íons de sódio neutralizam cargas elétricas, formando flocos removíveis por sedimentação ou filtração. O potássio desempenha papel importante, precipitando fosfatos solúveis com compostos como o cloreto de potássio, evitando problemas como a eutrofização. A sinergia entre sódio e potássio otimiza a eficiência do tratamento, abordando diferentes aspectos, como a remoção de partículas coloidais e nutrientes. O monitoramento preciso das concentrações e

condições de reação é essencial para evitar problemas de dosagem. Além da eficiência, é crucial considerar os impactos ambientais e de saúde, buscando minimizar subprodutos indesejados e manter níveis seguros desses elementos nos efluentes tratados.

2.3.9 Fósforo total (PT)

O fósforo aparece nas águas naturais principalmente devido ao lançamento de efluentes sanitários. Nesse caso, a principal fonte é, além das próprias fezes ricas em proteínas, os detergentes superfosfatos, amplamente utilizados no país. Algumas águas residuais industriais, como fertilizantes, pesticidas, produtos químicos em geral, fábricas de conservas, matadouros, frigoríficos e produtos lácteos, contêm quantidades excessivas de fósforo. A drenagem em áreas agrícolas e urbanas também pode levar ao excesso de fósforo em águas naturais. O fósforo pode existir na água em três formas diferentes. Os organofosforados são formas nas quais o fósforo forma moléculas orgânicas, como detergentes. Os ortofosfatos, por outro lado, são representados por radicais que se combinam com cátions para formar sais inorgânicos em água. Polifosfato ou fosfato condensado é um polímero de ortofosfatos.

As águas residuárias sanitárias no Brasil geralmente apresentam uma concentração total de fósforo na faixa de 6 a 10 mgP/L, o que não tem efeito limitante no tratamento biológico. No entanto, alguns efluentes industriais não contêm fósforo em sua composição ou apresentam concentrações muito baixas. Nesse caso, deve-se adicionar artificialmente compostos contendo fósforo, como o fosfato de amônio (MAP), que, por ser utilizado em larga escala como fertilizante, tem um custo relativamente baixo. Embora seja um nutriente para processos biológicos, o excesso de fósforo em esgotos e efluentes industriais, por outro lado, leva a processos de eutrofização em águas naturais.

O lançamento de esgoto em corpos d'água, bem como o uso de fertilizantes e defensivos agrícolas, são fatores que proporcionam maiores teores de fósforo nesses ambientes. Ressalta-se que a presença de detergentes nas águas residuárias é outro fator que amplifica o aumento dos teores de fósforo nessas águas (BEZERRA et al., 2021).

2.3.10 *Escherichia coli*

A diversidade de microrganismos presentes nas águas residuárias dificulta o isolamento e a identificação de patógenos. Como resultado, existem indicadores de contaminação fecal, como substâncias termotolerantes e *Escherichia coli*. A sua identificação em águas destinadas à irrigação relaciona-se com o perigo higiênico que representam para a saúde de quem consome

produtos irrigados com essas águas. Vale ressaltar que a grande relutância das pessoas em consumir produtos irrigados com esse tipo de água é justamente o medo de contrair uma doença de veiculação hídrica. Como resultado, o sistema de limpeza deve incluir não apenas parâmetros físico-químicos, mas também garantir a segurança higiênica dessas águas.

Portanto, compreende-se pelas conceituações acima que as análises físico-químicas e microbiológicas são de suma importância na avaliação da água ofertada, pois funciona como uma ferramenta principal de acompanhamento da qualidade dentro dos padrões estabelecidos.

Segundo a Portaria nº5 de 2017, para que a água seja considerada potável para o consumo humano, deve atender a alguns parâmetros microbiológicos, dentre os quais nas análises desenvolvidas deve salientar a ausência de *Escherichia coli* ou coliforme termotolerantes em um volume de 100mL nos reservatórios e redes de armazenamento.

A microbiota intestinal humana tem a presença de coliformes fecais com a bactéria específica do tipo E-coli, que por sua vez, ao serem detectados, em uma análise de água evidencia diretamente a presença de contaminação fecal recente, e por sua vez podem indicar a presença de patógenos entéricos. Contudo a detecção dessas bactérias é rápida e com uma grande quantidade de métodos disponíveis (SILVA, 2019).

2.4 Características do poliestireno e sua função no tratamento de efluentes

O poliestireno possui um material extremamente leve composto quase em sua totalidade de ar, sua massa específica intermede entre $1,046 \pm 0,0005 \text{ g/cm}^3$, possui uma densidade inferior a 300 kg/m^3 , após serem expandidas as pérolas podem apresentar em seu volume até 98% de ar e 2% de poliestireno, por exemplo, em 1 m^3 de isopor pode existir de 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar (OLIVEIRA, 2013).

O Poliestireno Expandido (EPS), assim como outros plásticos, é derivado do petróleo. Após a extração do petróleo, essa matéria-prima passa por refinarias para a remoção de impurezas por meio da destilação fracionada, resultando na obtenção de nafta. Essa fração de nafta é então direcionada para a Indústria Petroquímica, onde é utilizada para quebrar as ligações químicas entre moléculas e obter os monômeros, sendo o estireno o monômero utilizado no caso do EPS. A Indústria Química adquire esse monômero na forma de esferas minúsculas e o submete ao processo de pré-expansão. Nessa fase, água em altas temperaturas é adicionada para permitir que o vapor penetre nas esferas mais rapidamente do que o pentano, que extravasa. O resultado desse processo de polimerização do estireno é o Poliestireno Expandido.

Após um período de repouso de aproximadamente 6 horas nos silos, o EPS é injetado em seus respectivos moldes por meio de ar comprimido. Por fim, as peças são novamente expostas ao vapor para fundir e adquirir o acabamento desejado antes de serem disponibilizadas ao consumidor final. Vale ressaltar que este não é o fim do ciclo do EPS, pois ele pode ser reciclado após o uso, contribuindo para a sustentabilidade, uma vez que seu tempo de decomposição é indeterminado.

De acordo com as suas diversas aplicações e características pode ser encontrado de forma comercializada de três formas distintas como apresentado no Quadro 2:

Quadro 2: Características e diversidades do Poliestireno (PS)

Tipo	Característica
Cristal	Utilizados com materia prima para a fabricação do corpo constituinte da caneta esforagráfica, embalagens descartáveis, brinquedos etc, é de material transparente, com alto brilho e de fácil coloração.
Poliestireno Expandido (EPS)	Sua estrutura celular é constituída com paredes de 1,00mm, sua forma mais comum é o isopor assumindo diversas formas e tamanhos, é considerado um polímero celular rígido.
Poliestireno de Alto Impacto (HIPS):	Utilizado como peça interna ou externa de aparelhos eletrônicos, tem uma maior resistência ao impacto e alongamento, na produção de utensílios, como brinquedos, e utilidades domésticas.

Abiquim (2020) destaca as principais vantagens do uso do EPS, que incluem uma excelente relação custo/volume útil, uma boa relação resistência/massa, características de deformabilidade notáveis (resiliência elevada) e estabilidade dimensional. Sua durabilidade e adaptabilidade a diversos métodos e processos utilizados na construção civil são aspectos ressaltados. Além disso, o EPS é reconhecido por sua sustentabilidade, uma vez que é 100% reciclável.

A utilização desse material como elemento filtrante está diretamente relacionada à sua capacidade de adsorção de partículas presentes no efluente e aos processos biológicos decorrentes da formação de biofilmes na superfície do leito filtrante. Os processos biológicos consistem na remoção de matéria orgânica pela ação de microrganismos que promovem a oxidação de materiais biodegradáveis.

Os materiais sorventes podem ser categorizados como sintéticos ou naturais. Os sintéticos têm origem polimérica, como poliuretano, poliestireno, polietileno, polipropileno e poliamida. Em contrapartida, os adsorventes naturais são extraídos da natureza, podendo ser de fontes inorgânicas (origem mineral) ou orgânicas (matrizes complexas constituídas de celulose).

Os sorventes orgânicos naturais provêm de fontes lignocelulósicas, como fibras de palha, milho, algodão, entre outros. Possuem baixo custo de produção e são incinerados após o uso como sorventes. Entretanto, apresentam como desvantagens a necessidade de maior mão-de-obra para utilização e maior volume em comparação aos sorventes sintéticos. Os primeiros processos de adsorção predominavam o uso de carvão ativado e sílica gel. Contudo, o desenvolvimento dessa técnica como um processo de separação foi viabilizado pelo aprimoramento de adsorventes conhecidos como peneiras moleculares, destacando-se as zeólitas sintéticas.

Em estudos sobre o desenvolvimento de sorventes, enfatizou características desejáveis para esses materiais, tais como facilidade de aplicação, altas taxas de sorção, baixas densidades ($< 1 \text{ g.cm}^{-3}$), boa capacidade de retenção e possibilidade de reuso.

Polímeros como polipropileno, espumas de poliuretano e poliestireno são investigados como sorventes sintéticos, destacando-se por propriedades hidrofóbicas e oleofílicas. A área de superfície do material sorvente é um parâmetro crucial que influencia a afinidade de sorção, sendo que adsorventes fibrosos com diâmetros submicrométrico a nanométrico são vistos como potenciais para a remoção de derramamentos de óleo (ALNAQBI et al., 2016).

Os métodos de adsorção e filtração para a remoção de metais pesados e compostos orgânicos são alvo de estudo, impulsionados pela preocupação ambiental em relação aos corpos aquáticos. As esferas de poliestireno destacam-se por apresentar alta capacidade de adsorção e filtração, além da seletividade para remover micropartículas, sólidos suspensos, as esferas de poliestireno surgem como uma solução promissora para a remoção de compostos orgânicos da água.

Fatores que afetam o processo de adsorção de compostos na superfície do leito filtrante incluem pH da solução, propriedades do solvente e do adsorvato, estrutura dos poros e área da superfície

do adsorvente, além de diferenças nas propriedades químicas. Propriedades superficiais de adsorvato e solvente (CARVALHO, 2016).

Por exemplo, o poliestireno é usado em vários segmentos de mercado, como refrigeração, eletrônicos e indústria de embalagens de alimentos etc, com tantos usos no mercado, o descarte inadequado pode causar muitos danos ambientais. A destinação final desse material é um aterro sanitário ou em locais impróprios a destinação, ocupa muito espaço e demora muito para se decompor. O EPS leva mais de 150 anos para se degradar. Portanto, apesar da baixa densidade desse material, o EPS ocupa um grande volume, resultando em altos custos de transporte e reciclagem.

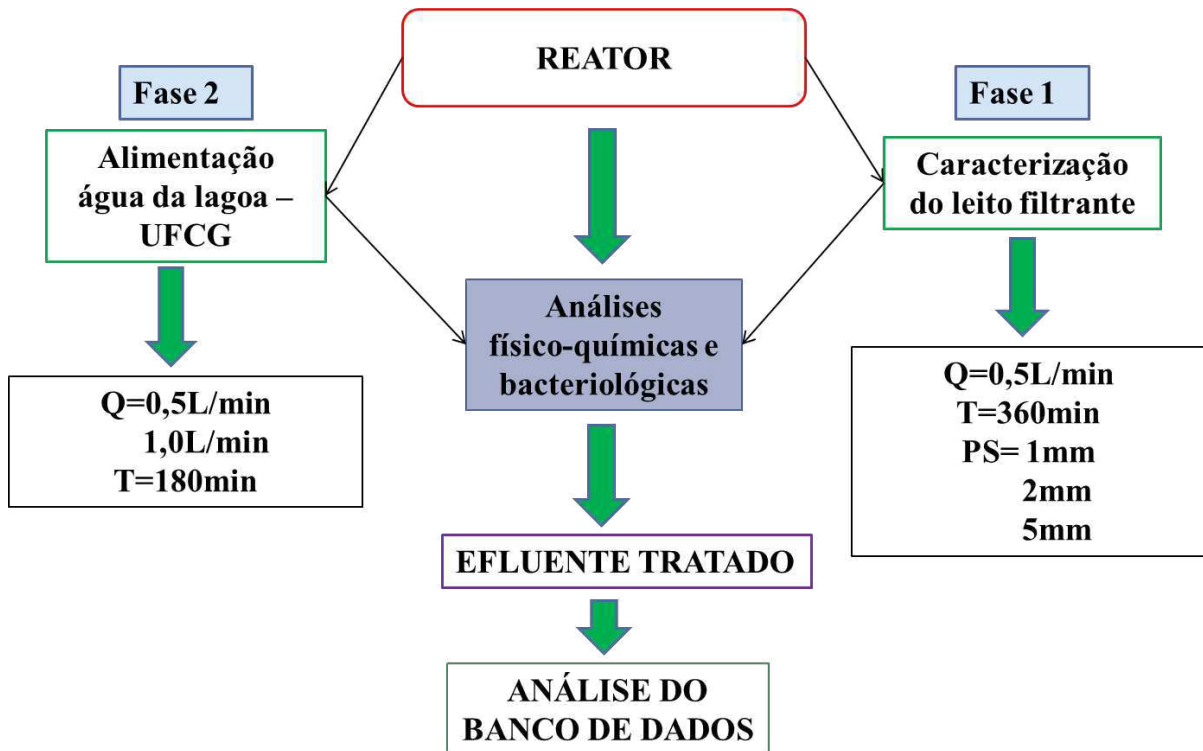
Outra preocupação ao considerar o descarte no meio ambiente é a sua inflamabilidade, que quando derretida libera uma fumaça preta contendo dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. No entanto, o material pode ser devolvido ao seu estado original, como componentes de concreto leve, argamassa, laje e bloco, que são usados principalmente na construção civil e podem ser totalmente reciclados.

Diante de todos os conceitos e características desse material e da necessidade de um sistema alternado para reutilização de água, é notório que a utilização desse material traz benefícios a curto e longo prazo tendo suas propriedades inalteradas no tempo de vida do material com potencial baixo para apodrecimento, relacionados a economia, acessibilidade (com facilidade no manuseio transporte e lavagem) e sustentável (garantindo sua reutilização após a lavagem, por ser um elemento filtrante com um grande poder de adsorção das partículas presentes no esgoto), bem como ao processo biológico proveniente da formação do biofilme na superfície do leito filtrante, além de não ser higroscópico, mantendo assim suas características térmicas estando presente sob ação da umidade, sendo inodoros o solo, água e ar, são reaproveitados, é imprescindível que seja realizado esse trabalho.

3. METODOLOGIA

O estudo foi realizado no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde foi realizado a otimização de um sistema de reator tubular em serie através de granulometria variada de esferas de poliestireno. Sua configuração foi estudada a fim de proporcionar a filtração de água contaminadas, o fluxograma da figura 1 um evidencia a metodologia desenvolvida:

Figura 1 – Fluxograma das fases que compõe o processo



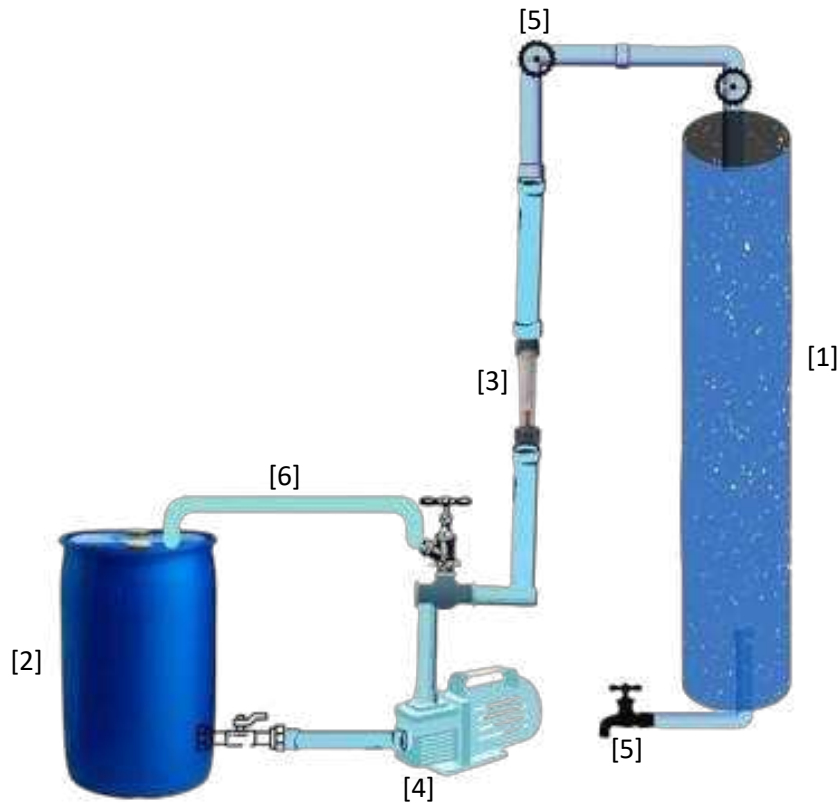
3.1 Características do sistema de filtração

A Figura 2 mostra uma representação esquemática do sistema tubular, assim como segue:

- 1- Um reator tubular de PVC com altura de 1,5m e diâmetro de 20,0 cm, cada um deles fechado com tampa de PVC de 20,0cm em ambas as extremidades, para impedir vazamento de água, no fim de sua extremidade inferior apresenta uma torneira para coleta de amostra de água; possui um volume de 40,0 L sem meio filtrante e um volume de 2,8 L com meio filtrante, considerando o trabalho realizado no LABDES em 2020 (ANDRADE,2021)
- 2- Um reservatório de 250L para abastecimento da água de reuso recebida durante o processo.
- 3- Um rotâmetro com escala de 0,4 L a 4,0 L é colocado na entrada do sistema para controlar a vazão dentro do reator;
- 4- Bomba (centrífuga) motor $\frac{1}{4}$ Cv para dispensar água para o sistema e realizar a retro lavagem;
- 5- Possui um conjunto de válvulas esfera (1/2 polegada) e torneiras, ambas de PVC, instaladas na entrada e saída de cada reator para controlar o fluxo e a vazão da água;

- 6- O sistema possui um by-pass: utilizado para controlar a vazão de entrada de água no sistema, retornando à água para o tanque de abastecimento;

Figura 2: Sistema de tratamento de águas residuária



3.2 Caracterização e tratamento das esferas de poliestireno

Compreendo a vasta utilização do poliestireno, a pesquisa propôs a utilização de diferentes granulometrias esféricas de poliestireno como evidenciado na Tabela 1, como meio de tratamento do efluente de reuso em estudo. Sabemos que o poliestireno expansível é a matéria-prima para a produção do "isopor", amplamente utilizado comercialmente para embalagens de materiais frágeis e isolantes térmicos, logo as diversas esferas em diferentes tamanhos foram escolhidas porque exibiram propriedades granulométricas semelhantes à areia. As vantagens de usar este meio de tratamento são as seguintes: Não é um meio pesado, inerte, não pigmentado e disponível comercialmente (SCHÖNTAG, 2015).

Na Tabela 1 estão representadas as granulometrias e propriedades do poliestireno utilizado no processo de tratamento.

Tabela 1 –Propriedades das esferas de poliestireno.

Características das esferas de poliestireno utilizadas		
Granulometria	1mm	20%
Granulometria	2mm	45,79%
Granulometria	5mm	34,21%
Quantidade utilizada	605g	

A caracterização das esferas de poliestireno foi realizada, antes e depois do processo de filtração em função da granulometria e peso. Devido à sua baixa densidade (0,95 g/cm³) o meio filtrante ficou preso em um tecido para evitar seu refluxo durante o processo, conforme Figura 03.

Figura 3: Formato do poliestireno



Vale salientar que antes do leito filtrante ser acondicionado dentro do reator, o mesmo foi pesado seco e com o material molhado, conforme apresentado na Tabela 2, obedecendo o pressuposto da literatura onde classifica o poliestireno como sorvente.

Tabela 2 – Massa do poliestireno contida no reator antes e após tratamento com efluente

Massa do poliestireno	
Seco	605g
Molhado	1174g

Para a realização das características do poliestireno em termos de capacidade adsortiva do poliestireno em relação a massa foi realizado o seguinte experimento, em um tubo de vidro contendo os volumes de: 150mL, 180mL e 250mL, foram adicionados respectivamente as seguintes massas: 2,028g, 3,0497g e 4,000g respectivamente, após um período de (1440min) como evidenciado na Tabela 3, com poliestireno misto de 1,00mm;2,00mm e 5mm, foi feita a pesagem do poliestireno, assim como as demais análises físico-químicas e bacteriológicas; pH; Turbidez; Cor, Condutividade Elétrica; DQO; Amônia; Nitrito; Nitrato e E-coli, a priori identificado a mudança na coloração da água residuária, como mostra a Figura 04.

Figura 4: Esferas com efluente antes e após o tempo de 1440min

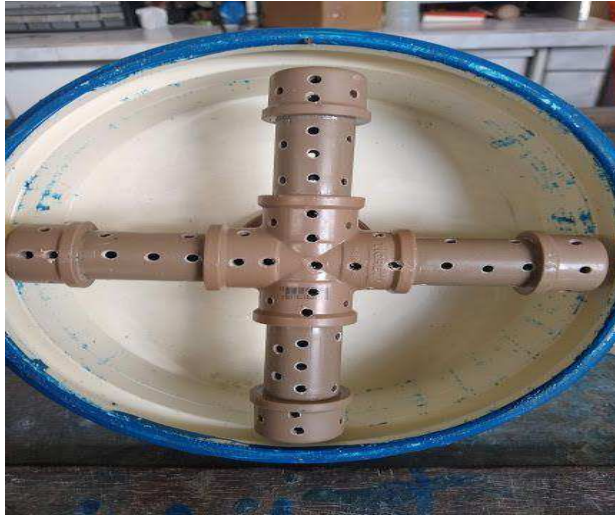


Tabela 3 – Características do poliestireno antes e após 1440 min

Características do poliestireno após o tempo de 1440 min			
VOLUME INICIAL	VOLUME FINAL	MASSA INICIAL	MASSA FINAL
150mL	75mL	2,028g	12g
180mL	100mL	3,0497g	10g
250mL	250mL	4,000g	20g

Após os experimentos iniciais, os reatores foram alimentados com uma vazão de 0,5 L/min. Para garantir a homogeneidade do fluxo de água entre o leito filtrante, foi construída uma crepina conforme evidenciado na Figura 7 e conectada na entrada do reator para fazer a distribuição uniforme do efluente.

Figura 5: Crepina para distribuição do efluente dentro do reator



Fonte: (ANDRADE,2021)

Para assegurar o controle preciso das vazões de 0,5L/min e 1,0L/min no reator, foi implementado um sistema de *bypass* na entrada, regulado por uma válvula que ajusta o fluxo de água no sistema. É fundamental destacar que, à medida que o efluente passa pelo processo de filtração, ocorre uma resistência proporcionada pelo poliestireno, resultando na redução da vazão. Esse mecanismo é de importância crucial, uma vez que a quantidade de água que flui pelo reator deve estar em conformidade com suas características, como tamanho e volume ocupado pelo leito filtrante. Ressalta-se que uma vazão elevada pode comprometer a eficácia da adsorção de impurezas no poliestireno.

A prática de lavagem do poliestireno ao final do dia foi imprescindível para as análises de alterações nas propriedades físico-químicas e microbiológicas da água de alimentação de um dia para o outro. Assim, a água utilizada para alimentar o sistema nos dias subsequentes apresenta características distintas em comparação à água empregada no dia anterior, simulando uma renovação periódica desse líquido no tanque de alimentação. Este procedimento contribui para a consistência dos resultados experimentais ao longo do tempo, permitindo uma análise mais precisa das variáveis envolvidas no tratamento da água no reator.

3.3 Alimentação e avaliação dos parâmetros de qualidade de água do sistema

Para a condução dos experimentos, procedeu-se ao transporte diário de 10 litros, inicialmente, e posteriormente, um volume final de 20 litros de água proveniente da lagoa até o Laboratório

de Referência em Dessalinização (LABDES), local onde está implantado o sistema de tratamento. Os experimentos foram realizados seguindo uma metodologia sequencial que abrangeu o tempo de entrada e o volume utilizado no sistema. Três tamanhos distintos de partículas de poliestireno (PS) - 1,0 mm, 2,0 mm e 5,0 mm - foram empregados para avaliar a adsorção de impurezas presentes na água. Essas granulometrias foram selecionadas por representarem as mais prevalentes no mercado. A escolha específica da granulometria do meio filtrante baseou-se em dados obtidos por Andrade (2021), que conduziu análises de leito fixo, evidenciando a influência da capacidade adsorptiva. Diante desse cenário, optou-se pelo leito misto composto pelas partículas mencionadas.

✓ **Alimentação do sistema com tempo de (180min) e vazão de 0,5 L/min e 1,0L/min;**

✓ **Alimentação do sistema com tempo de (360min) e vazão de 0,5 L/min;**

Para avaliar a eficiência dos tratamentos de águas residuárias, procedeu-se à análise em triplicata dos parâmetros "Cor" (método colorimétrico) e "Turbidez" (método nefelométrico) antes e após os tratamentos. As análises de NH_4 ; NO_2 ; NH_3 ; PO_4 ; K; Na; DQO e bacteriológicas E-coli, foram analisadas conforme os procedimentos do "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (APHA; AWWA; WEF, 2023).

O cronograma de coleta de água consistiu em operar o reator por 6 horas diárias, configurado em série. Inicialmente, a coleta de água ocorreu a cada 30 minutos de operação para a vazão de 0,5 L/min, considerando a operação de um único reator com granulometria mista (1,0 mm; 2,0 mm e 5,0 mm). Posteriormente, foram conduzidos experimentos em intervalos de 15 minutos ao longo de 3 horas, mantendo a mesma vazão. Os resultados das análises físico-químicas e microbiológicas foram utilizados para calcular as taxas de remoção inicial e final, fundamentando a construção dos gráficos.

A análise estatística possíveis diferenças significativas na remoção dos parâmetros: cor, turbidez, DQO; E. coli, além dos parâmetros Fosforo Total, Sódio e Potássio quando o reator estava preenchido com poliestireno misto, variando a vazão de 0,5 L/min a 1,0 L/min, com coleta a cada 15 minutos e 10 minutos. Essa etapa foi crucial para determinar o tempo médio necessário para o tratamento da água pelo reator e avaliar a necessidade de realizar limpeza do sistema. Importante mencionar que, ao término de cada experimento, foi adicionada água limpa ao reator para a lavagem das esferas de poliestireno, e quando necessário, NaOH foi adicionado para ajustar a quantidade de matéria orgânica e controle do pH.

Ao término, foram realizados dezoito experimentos. A avaliação da eficiência na remoção ou redução de parâmetros específicos, como a *Escherichia coli*, assume extrema relevância nesta pesquisa. Tais indicadores desempenham um papel fundamental na certificação da adequação do sistema proposto em relação à qualidade exigida para reuso no contexto agrícola.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do presente trabalho concernem dos dados obtidos com o sistema de tratamento com poliestireno para diferentes níveis de concentrações de matéria orgânica, vazões e tempo.

Na primeira etapa, foi realizado o experimento para caracterização das esferas de PS em função da granulometria em função do tempo e volume de operação, para isso foi verificado a taxa de remoção dos parâmetros físico-químicos e bacteriológico. Conforme demonstrado na figura 6, as taxas de remoção de turbidez ultrapassaram 80% em todos os volumes de (150mL, 180mL e 250mL) respectivamente, contudo ao analisarmos nitrato e cor, apenas obtemos valores acima de 50% nos volumes de 180 e 250mL, para condutividade elétrica apenas os volumes de 250mL conseguiu remover cor condutividade elétrica, e nitrato ultrapassam os valores acima de 50%, os valores de concentrações iniciais e finais, assim como a média de cada parâmetro relatado encontra-se em Anexo 8.1.

Um dado relevante é que a diminuição de *E-coli* nos volumes estudados, ocorreu apenas no volume de 250mL, que conseguiu reduzir 30% um valor a ser desconsiderado tendo em vista que não se enquadram nos padrões exigidos pelo Conama. Influência evidenciada pela quantidade de massa de poliestireno, devido à maior agregação e aproximação entre elas, por terem uma quantidade de esferas de diâmetro misto, maior será sua compactação, tendo como consequência maior percolação da água entre as pérolas de poliestireno.

Na primeira fase, foram realizados quatro experimentos com o tempo de 360min sob uma vazão de 0,5L/min, com coleta a cada 00:30 minutos visando estudar a taxa de remoção dos parâmetros físicos químicos e índice de eliminação dos contaminantes presentes no meio aquoso. As figuras 7,8,9,10,11 e 12 evidenciam os valores de turbidez, nitrato, nitrito, amônia, DQO e E-coli em função dos quatro experimentos.

Figura 6 - Taxa de remoção sob volume de 150m,180mL e 250mL

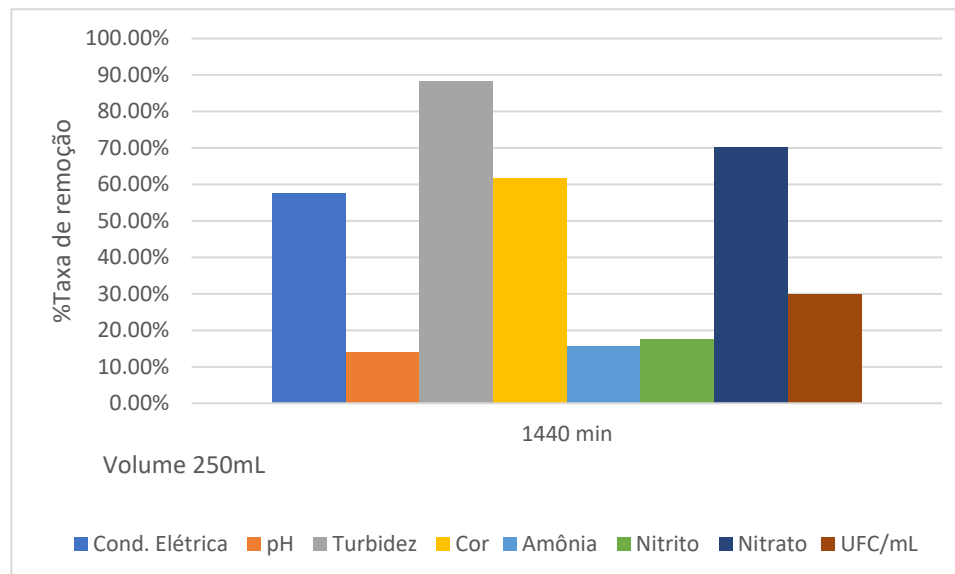
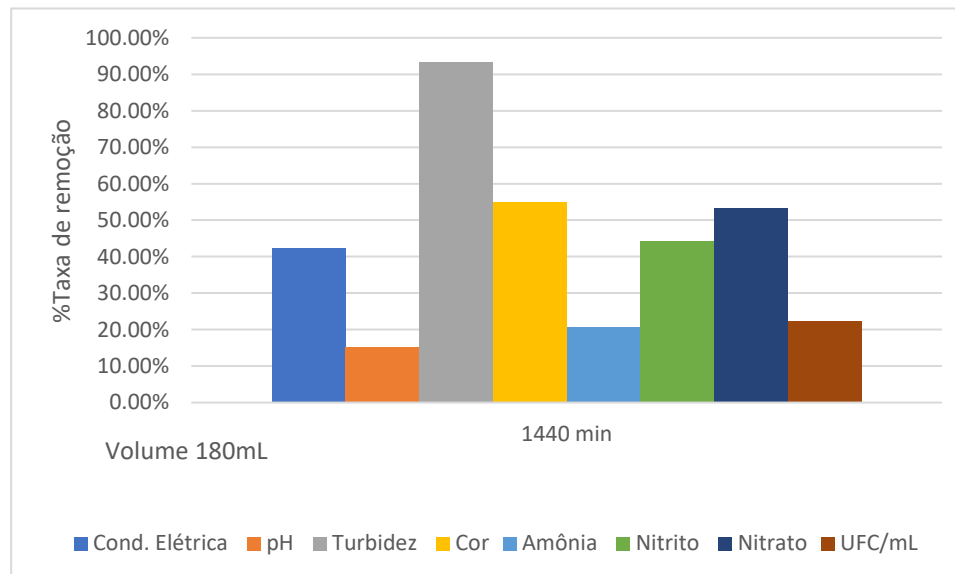
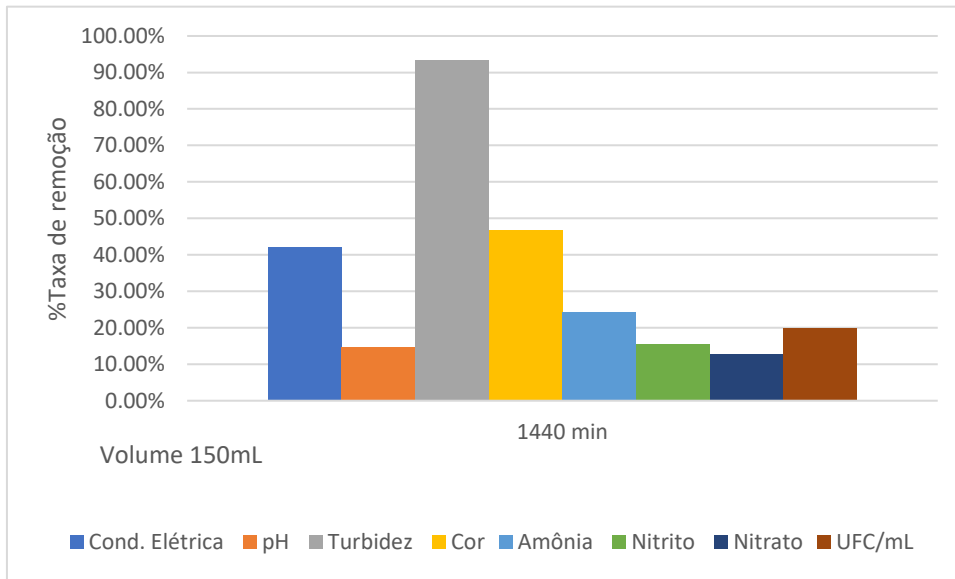


Figura 7 – Variação da turbidez da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

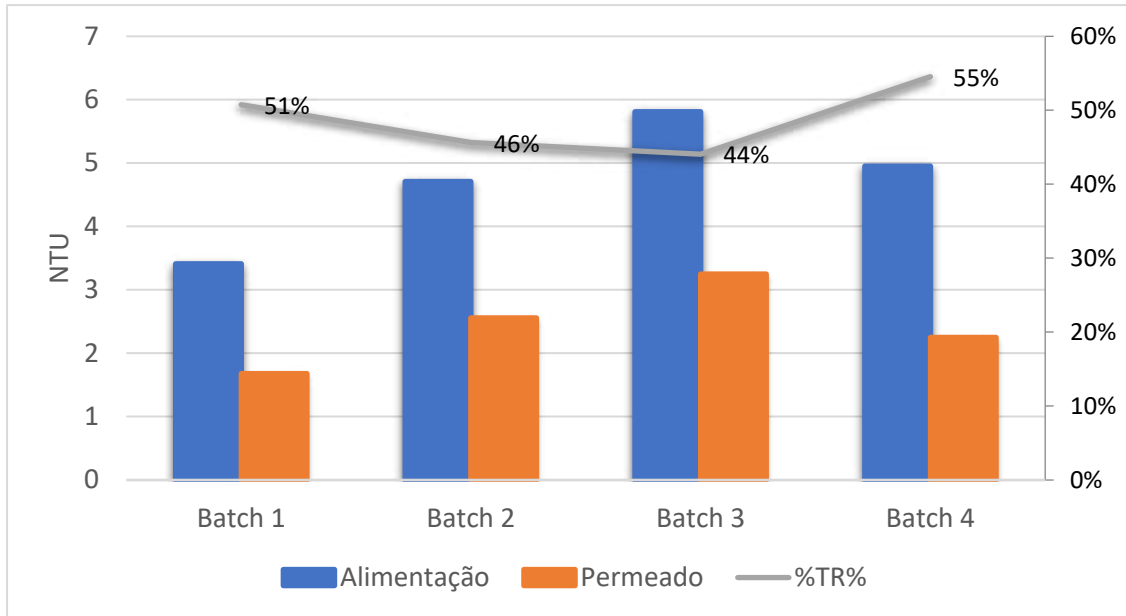


Figura 8 – Variação da amônia da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

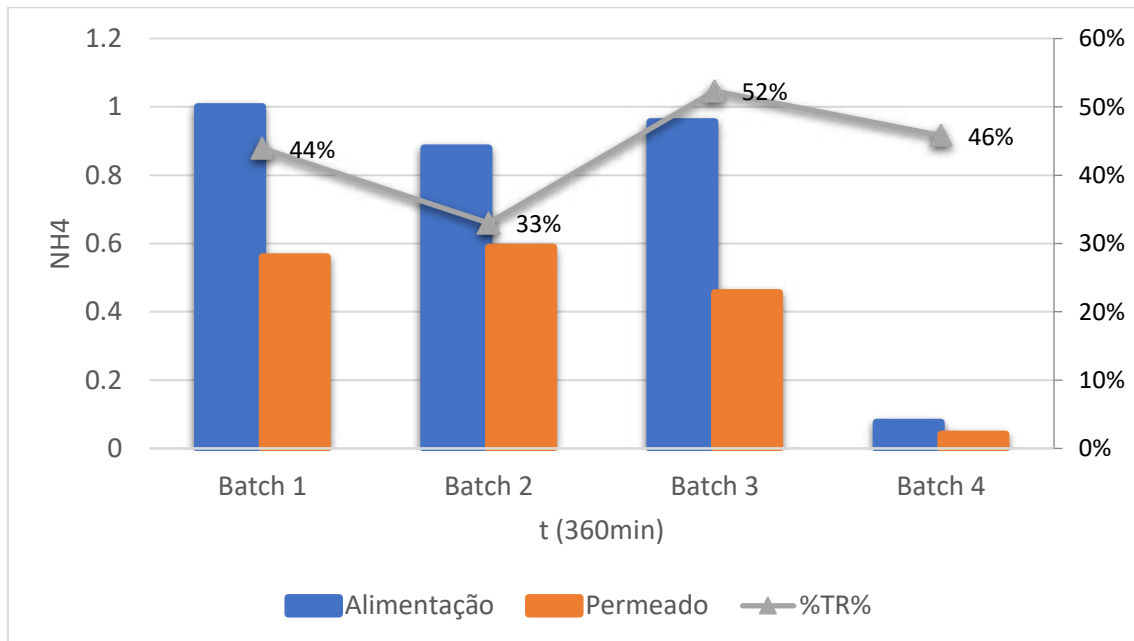


Figura 9 – Variação de nitrito da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

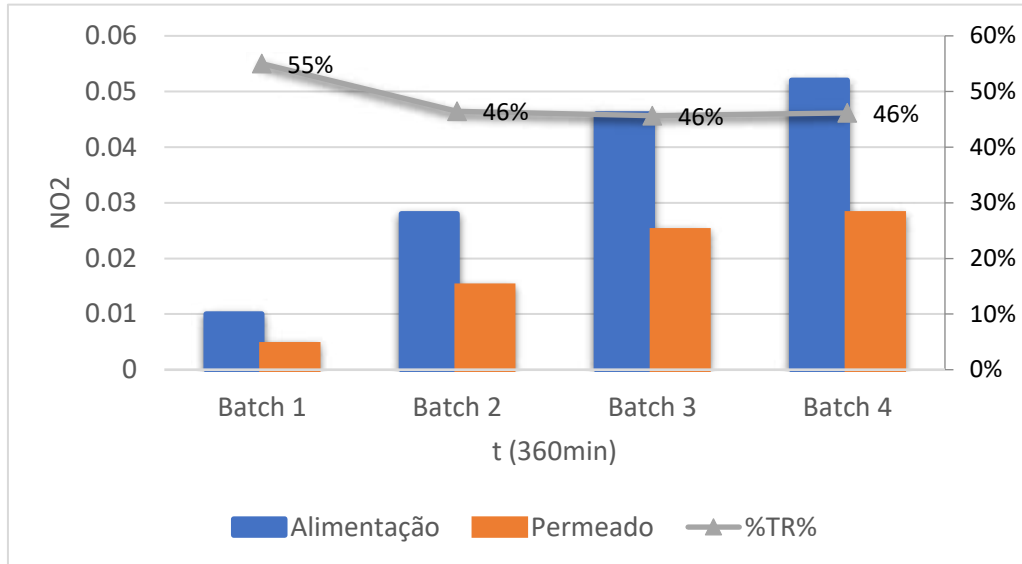


Figura 10 – Variação de nitrato da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

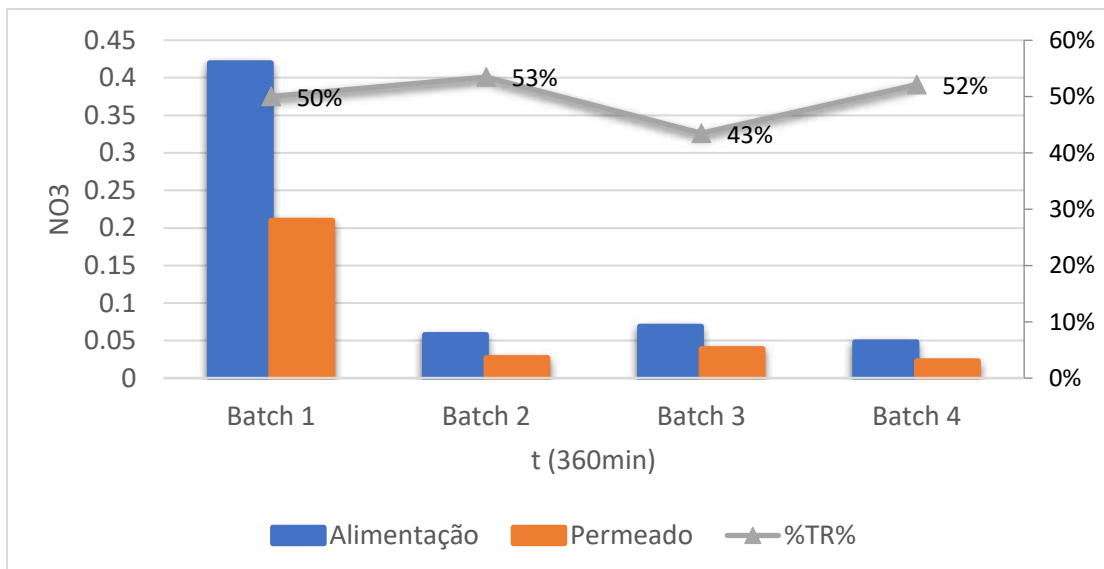


Figura 11 – Variação de DQO da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

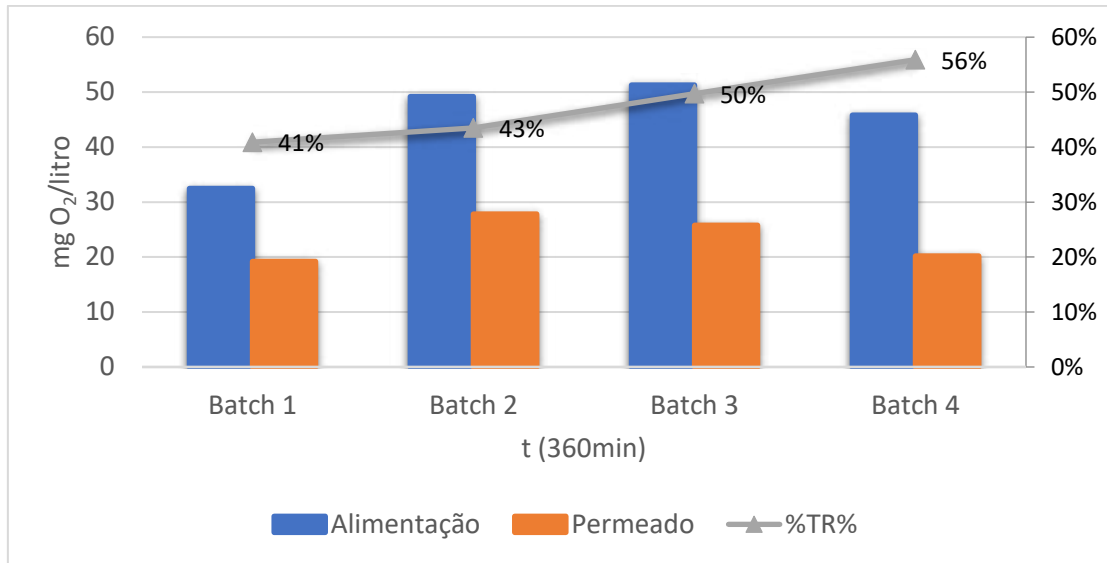
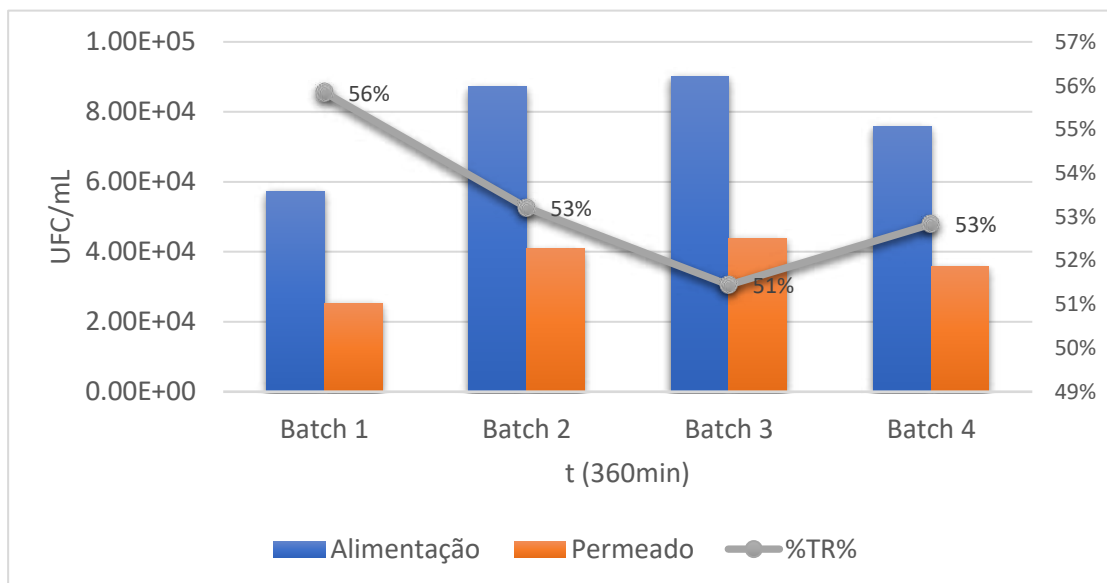


Figura 12 – Variação de *E-coli* da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

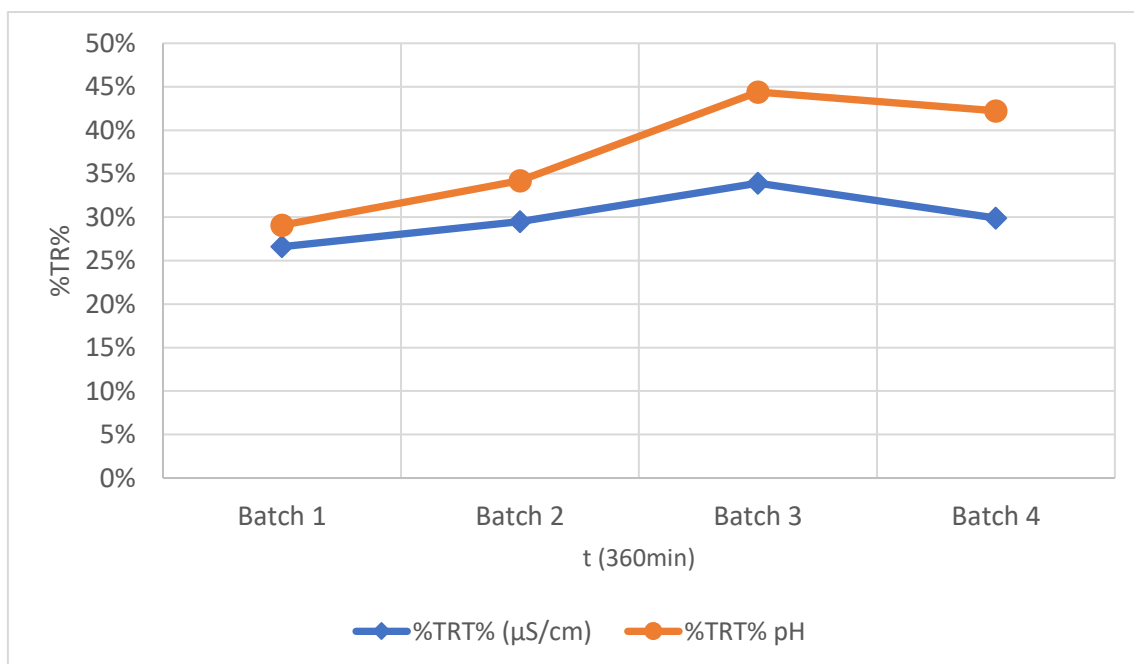


Observa-se que sob condições de operação acima citadas a inativação de *E. coli* manteve-se em uma faixa de 50% a 56% de remoção, observou-se que a mesma proporção foi indicada para turbidez, amônia, nitrato, nitrito, DQO (Demanda Química de Oxigênio) o que indica a eficácia do processo de tratamento na redução desses parâmetros, a significativa remoção de turbidez, representando metade ou mais das partículas suspensas na água, é positiva para melhorar a transparência. Além disso, a eficaz redução de amônia, nitrato, nitrito e DQO sugere que o tratamento está atenuando a carga de compostos nitrogenados e orgânicos, essenciais para proteger a saúde humana e ecossistemas aquáticos. A taxa de remoção de *E. coli* destaca a

eficiência na redução da carga bacteriana fecal, em metade do valor inicial empregados nos quatro experimentos desenvolvidos.

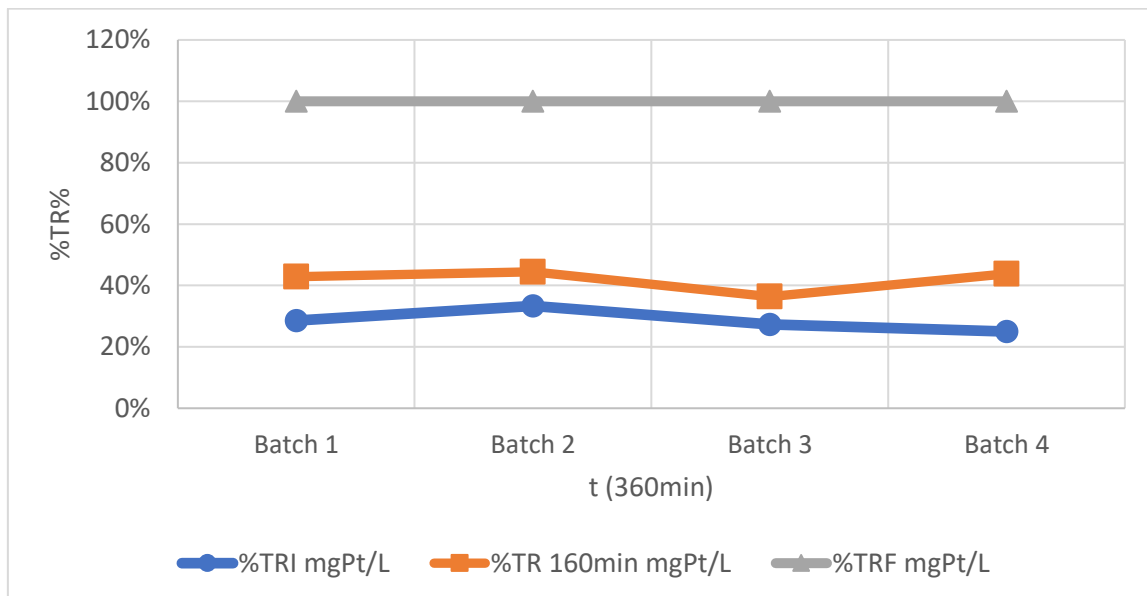
Contudo foi evidenciado que aumento do tempo de residência influencia negativamente o desempenho do leito misto de poliestireno na remoção de matéria orgânica. A extensão operacional resulta em uma menor extração de matéria orgânica devido à tendência de aumento do tamanho das partículas de poliestireno, causando um aumento de volume em três vezes, como observado no primeiro experimento de caracterização. Isso leva à saturação do leito filtrante devido à acumulação de materiais retidos, resultando na diminuição da capacidade de retenção. A compactação do leito reduz a porosidade, dificultando a passagem eficiente da água. O desgaste contínuo das partículas de poliestireno gera partículas menores, menos eficazes na filtração. A formação de biofilmes e crescimento biológico obstrui poros, comprometendo a eficiência da filtração. Mudanças nas propriedades físicas ou químicas do poliestireno, devido à exposição prolongada, podem afetar sua capacidade de filtração, resultando em uma redução menos significativa de matéria orgânica. Na figura 13 é observado a variação de pH e CE em relação ao tempo de 360min com a vazão de 0,5L/min.

Figura 13 – Variação de pH e CE taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.



Observa-se que os percentuais de remoção dos dois parâmetros acima abordados (CE e pH) chegam ao valor máximo de 35% e 45% respectivamente, o que nos sugere que os processos de tratamento, sejam químicos ou biológicos, têm um impacto direto na composição química da água, provocando alterações em condutividade e pH devido à remoção seletiva de contaminantes. Reações químicas, como precipitação de íons e neutralização de ácidos, desempenham um papel significativo, afetando tanto a condutividade quanto o equilíbrio iônico. Variações na temperatura não apenas influenciam a solubilidade de compostos, afetando condutividade e equilíbrio ácido-base, mas também podem modular a atividade microbiana em processos biológicos. A exposição direta ao sol, além de impactar a temperatura da água, pode desencadear processos fotocatalíticos, alterando a composição química da água. Reações fotoquímicas resultantes da luz solar podem gerar radicais livres, participando ativamente em processos de oxidação ou redução. É crucial reconhecer a interferência potencial da luz solar direta nas medições de parâmetros como temperatura e pH. Em termos de cor na figura 14 é observado a taxa de remoção inicial no tempo 40min, no tempo 160min e taxa de remoção final, ou seja, no tempo 360min, com vazão de 0,5L/min.

Figura 14: Variação da cor na taxa de remoção para 4 experimentos realizados durante 360min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.



A diminuição da cor inicial em 30%, 40% no tempo 160min e a redução para 100% no final, após o tratamento com águas residuais utilizando poliestireno como leito filtrante, podem ser atribuídas a diversos mecanismos operacionais e características do material empregado. A

adsorção de substâncias cromóforas destaca-se como um processo primordial, onde o poliestireno atua como adsorvente, retendo eficientemente componentes responsáveis pela cor na água. Além disso, os processos de filtração física desempenham um papel significativo, removendo partículas e matéria orgânica suspensa que contribuem para a coloração da água. A interação química entre o poliestireno e compostos orgânicos na água é um fator adicional, conduzindo à remoção ou transformação dessas substâncias e contribuindo para a diminuição da cor. A eficiência do tratamento, sujeita a variações ao longo do tempo devido à saturação do leito filtrante e mudanças nas condições operacionais, influencia diretamente a redução da cor. Destaca-se a adsorção seletiva do poliestireno por corantes específicos ou substâncias orgânicas, explicando a diminuição inicial de 30%. O desgaste gradual do material de poliestireno, resultado da exposição contínua à água e contaminantes, também é um fator relevante. Esse desgaste pode aumentar a capacidade de adsorção ao longo do tempo, contribuindo para a redução mais pronunciada na cor durante o tratamento. Esses mecanismos combinados ilustram a eficácia do poliestireno como leito filtrante na remoção de cor em águas residuais e ressaltam a complexidade dos processos envolvidos.

Todos as análises cinéticas e tabelas estatísticas da fase 1 dos experimentos encontram-se no Anexo 8.2.

Na segunda fase, foram realizados 7 experimentos com vazão de 0,5L/min á 180min e tempo de coleta a cada 00:15 avaliando o tempo de residência para remoção de matéria orgânica e aumento na redução dos parâmetros físico-químicos, adicionando o parâmetro, fósforo total. Na figura 15,16,17,18,19, 20 e 21 os valores de taxa de redução de turbidez, nitrato, nitrito, amônia, DQO, fosforo total e E-coli em função dos quatro experimentos.

Figura 15 – Variação da turbidez da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

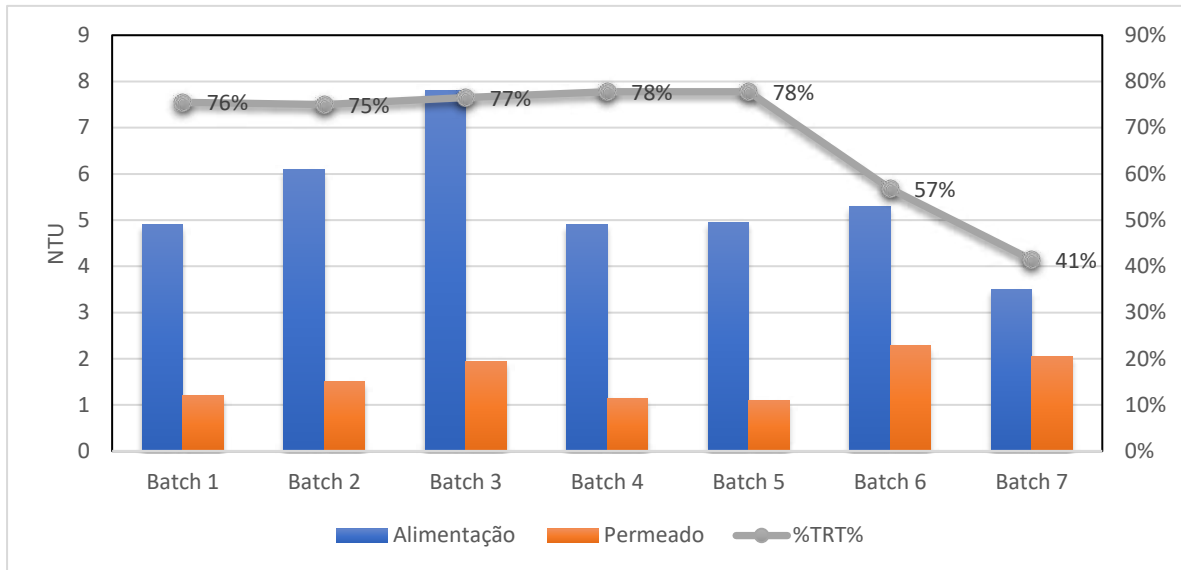


Figura 16 – Variação de amônia da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

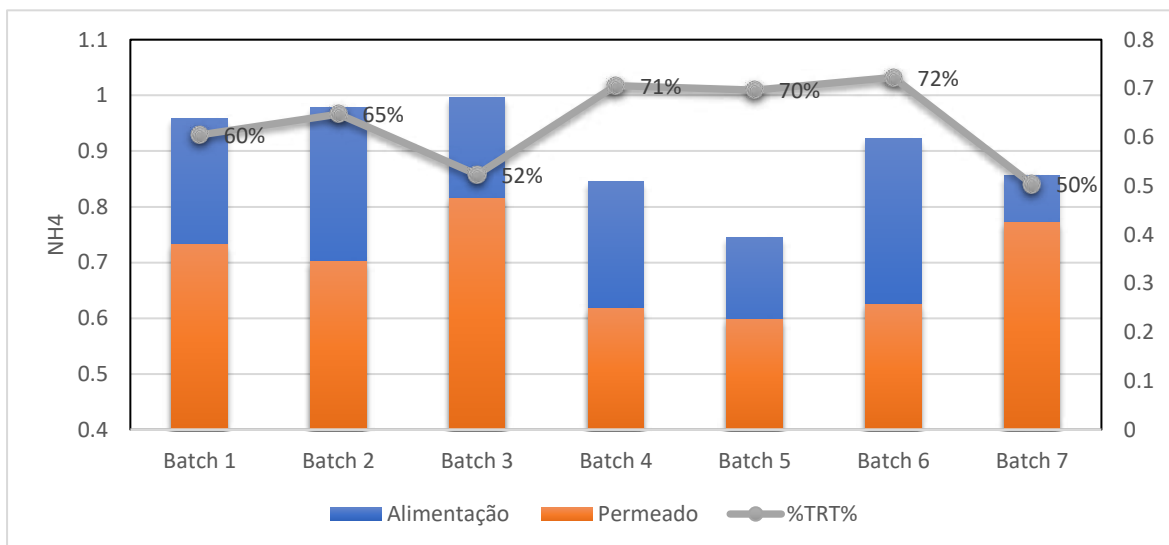


Figura 17 – Variação de nitrito da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

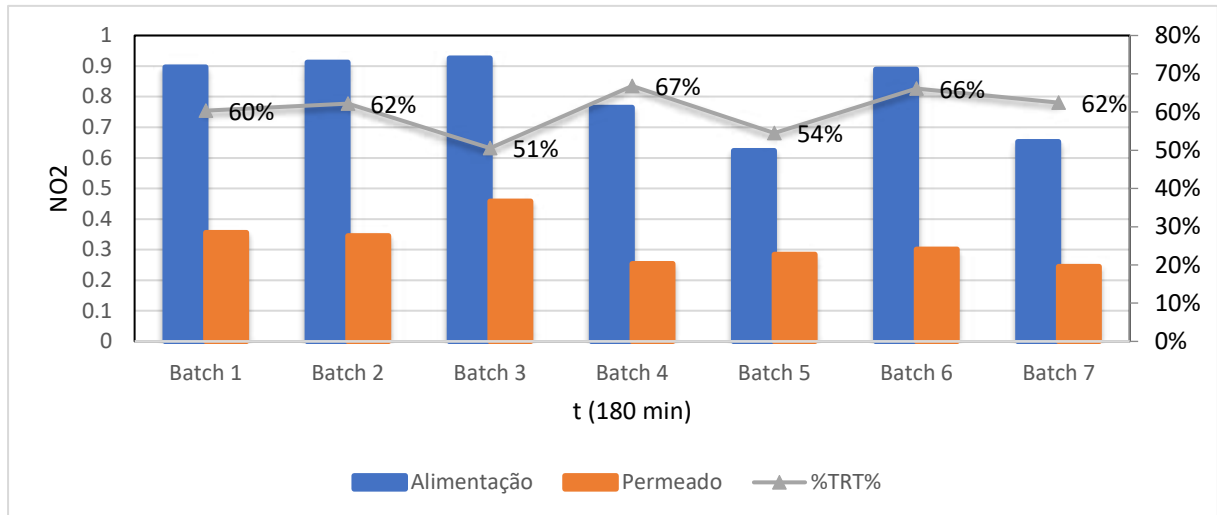


Figura 18 – Variação de nitrato da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

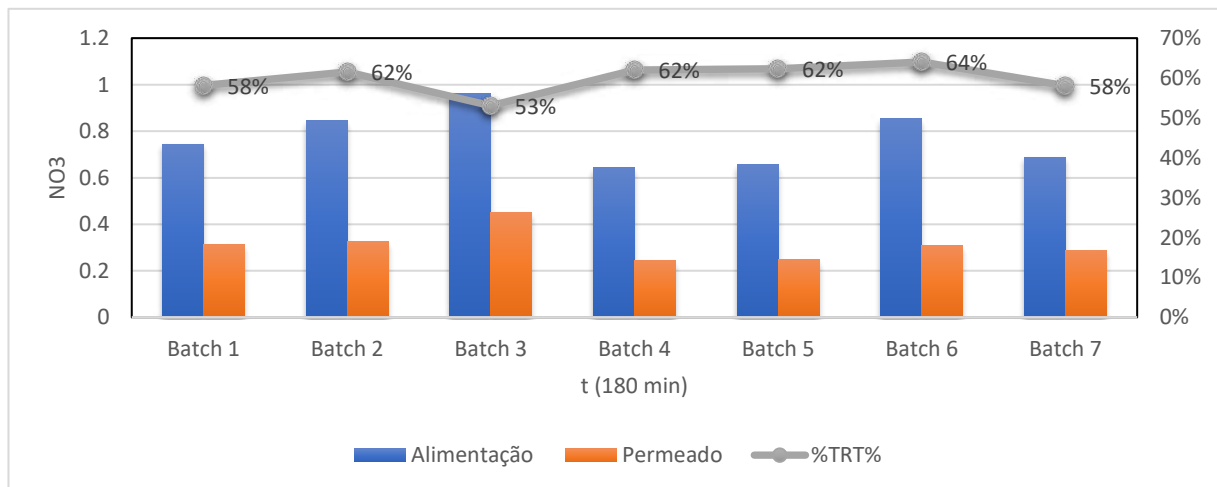


Figura 19 – Variação de Fósforo Total da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min

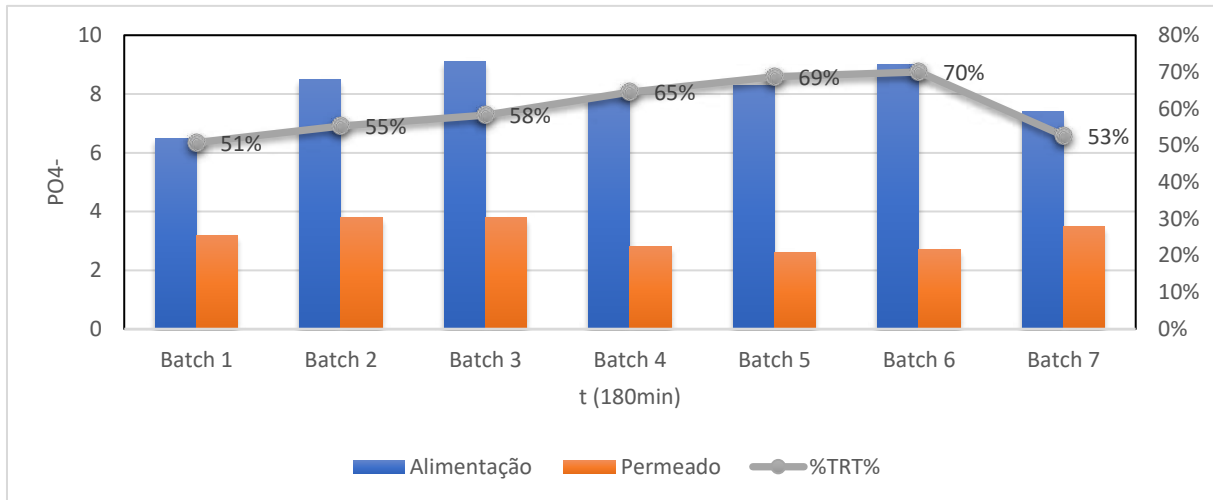


Figura 20 – Variação de DQO da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.

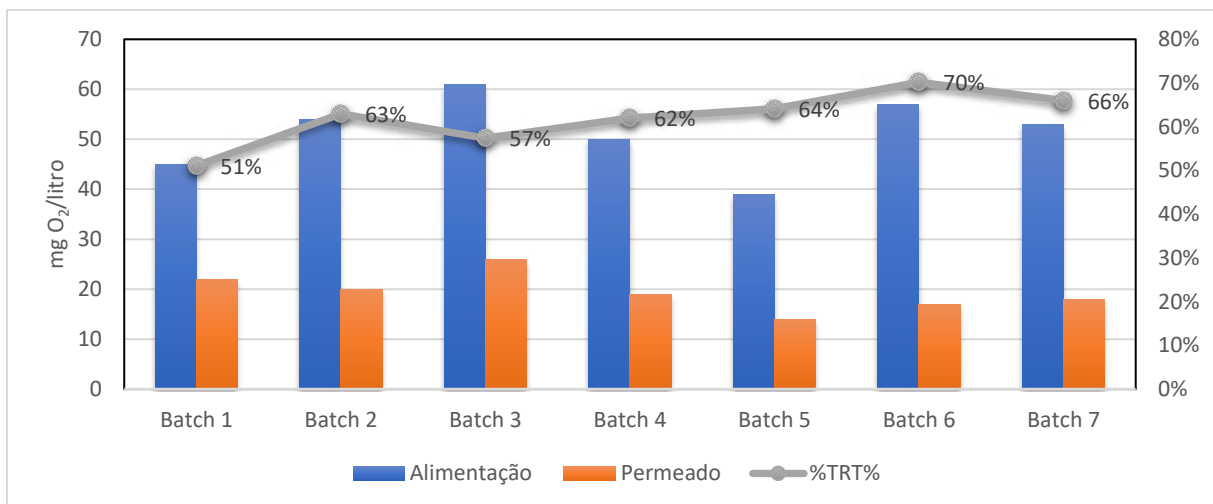
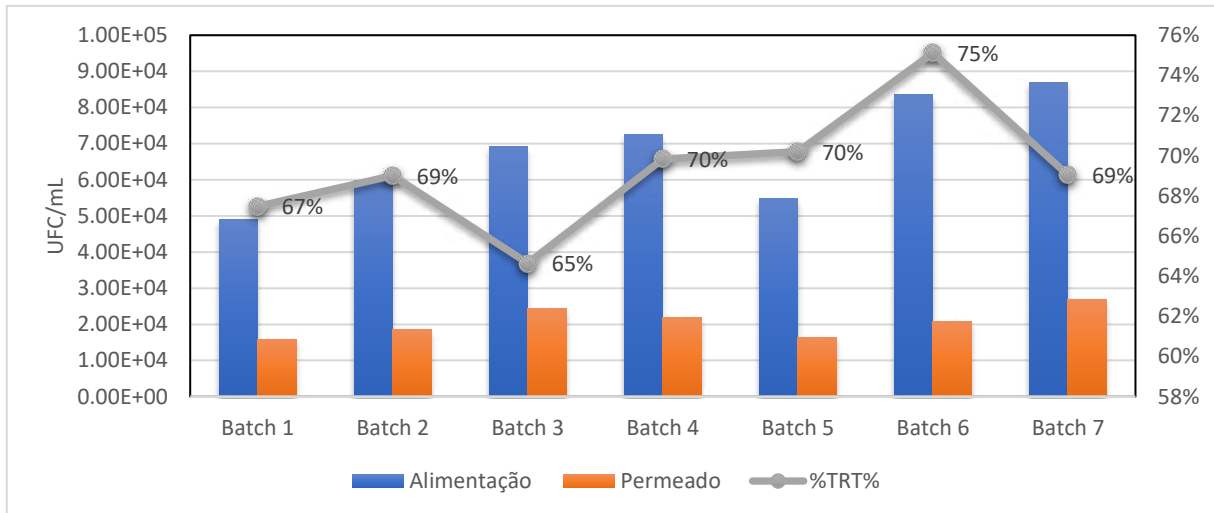


Figura 21 – Variação de *E-coli* da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.



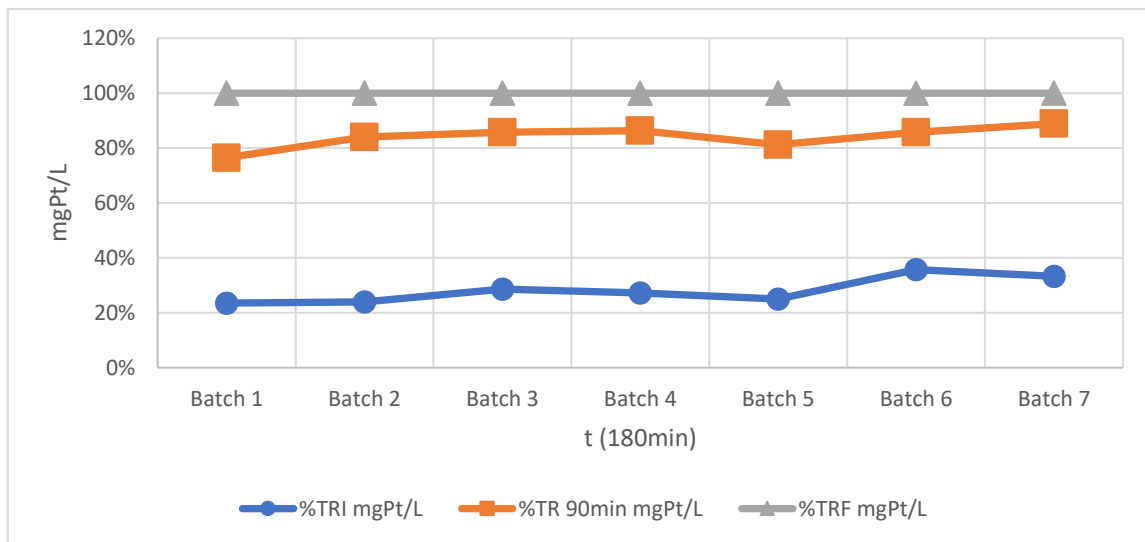
Sob as condições operacionais mencionadas, a inativação de *E. coli* e a redução da turbidez foram relevantes, alcançando uma remoção máxima de 75% em 180 minutos. Esse resultado é atribuído aos vários mecanismos do poliestireno no tratamento. O poliestireno age como agente adsorvente, atraindo e retendo partículas suspensas causadoras de turbidez. Sua filtração física impede a passagem de partículas maiores, contribuindo para a significativa redução da turbidez. Também atua como leito filtrante eficaz na interceptação e retenção de microrganismos, incluindo *E. coli*, resultando em uma notável diminuição na concentração bacteriana. Possíveis interações químicas entre o poliestireno e constituintes da água residual, como adsorção seletiva e processos químicos que inativam ou removem bactérias, desempenham papel crucial. Em condições específicas, o poliestireno pode contribuir para a desinfecção da água, inativando *E. coli*. A combinação desses mecanismos resulta em eficiente remoção de partículas, microrganismos e agentes patogênicos, melhorando notavelmente a qualidade da água residual tratada. No entanto, é crucial monitorar continuamente o desempenho do sistema para garantir consistência e conformidade com padrões regulatórios.

A proporção máxima de 70% para amônia, nitrato, nitrito, DQO (Demanda Química de Oxigênio) e FT (Fósforo Total) é notável no contexto do tratamento com poliestireno (PS). O PS atrai e retém íons de amônia, nitrato e nitrito por meio de adsorção em sua camada externa, removendo eficientemente partículas sólidas e compostos dissolvidos. A remoção de matéria orgânica, representada pela DQO, ocorre por interações químicas e adsorção. A adsorção e precipitação de íons fosfato pelo poliestireno, juntamente com sua capacidade de interagir quimicamente com diversos contaminantes, contribuem para a eficaz remoção de FT. A superfície adsorvente do poliestireno serve como substrato para microrganismos benéficos,

desempenhando um papel ativo nos processos biológicos de remoção de contaminantes, como a amônia. A eficiência global do processo de filtração, aliada ao controle preciso de parâmetros operacionais como taxa de fluxo e tempo de residência, resulta em uma notável taxa de redução.

Em termos de CE e pH não se houve mudança significativa nos percentuais de remoção, permaneceram os mesmos já estudados antes. No que concerne a cor na figura 22 é observado a taxa de remoção inicial no tempo 15min, no tempo 90min e taxa de remoção final, ou seja, no tempo 180min, com vazão de 0,5L/min.

Figura 22: Variação da cor na taxa de remoção para 7 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 10L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 0,5L/min.



A remoção da cor inicial em 41%, 89% em 90 minutos e, eventualmente, 100% no final do tratamento de águas residuais, foi evidente que a otimização do tempo de residência mais curto teve papel primordial, pois foi notório ser suficiente para atingir uma remoção eficaz da cor, especialmente se o agente de tratamento tiver uma alta capacidade de adsorção como o poliestireno e for capaz de agir rapidamente conjunto com esses fatores para alcançar os melhores resultados no tratamento de águas residuárias.

Tendo em vista que foi notório que o tempo de residência menor implicou em taxas de remoção menores dos parâmetros analisados de águas residuais para o tratamento e sua utilização, fez o estudo com 5 experimentos de vazão 1,0L/min, tempo de residência de 180min e coleta das amostras a cada 00:10minutos, e com uma concentração de 20L de água residuária coletada, contudo ao observar-se que esse efluente tratado poderia ser utilizado para o processo de irrigação, fez-se análises complementares de Potássio e Sódio. Como evidenciado nas figuras

23,24,25,26,27,28,29,30 e 31, obtemos os resultados das análises acima mencionadas com seus respectivos teores de remoção utilizando o PS.

Figura 23: Variação da turbidez da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min.

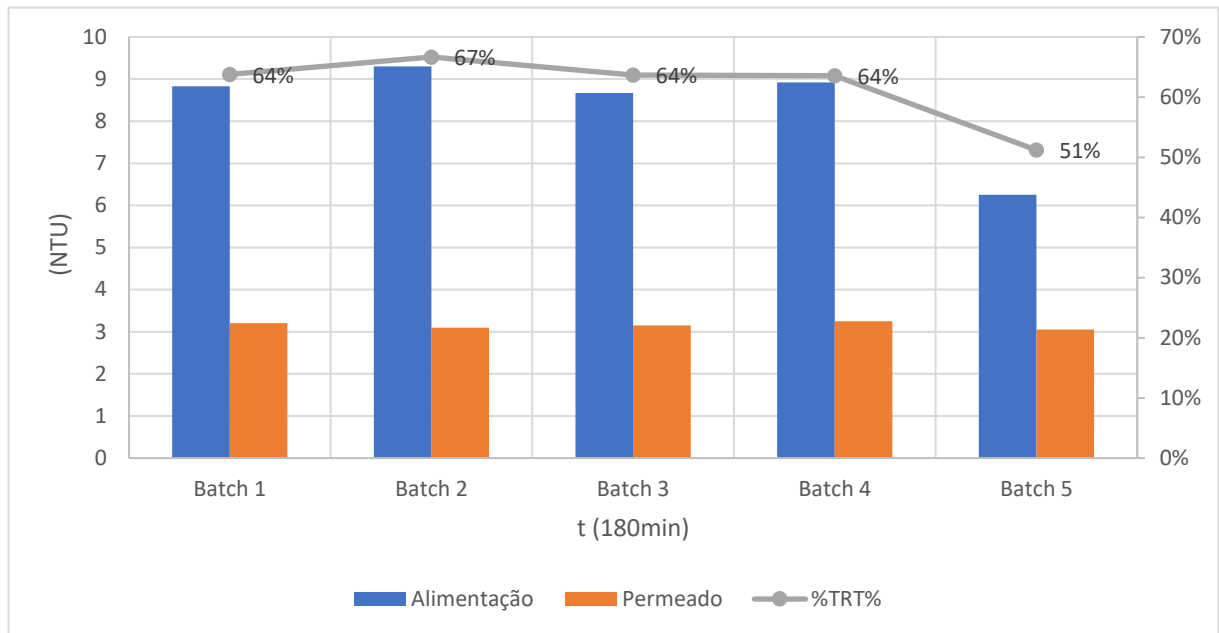


Figura 24: Variação de amônia da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

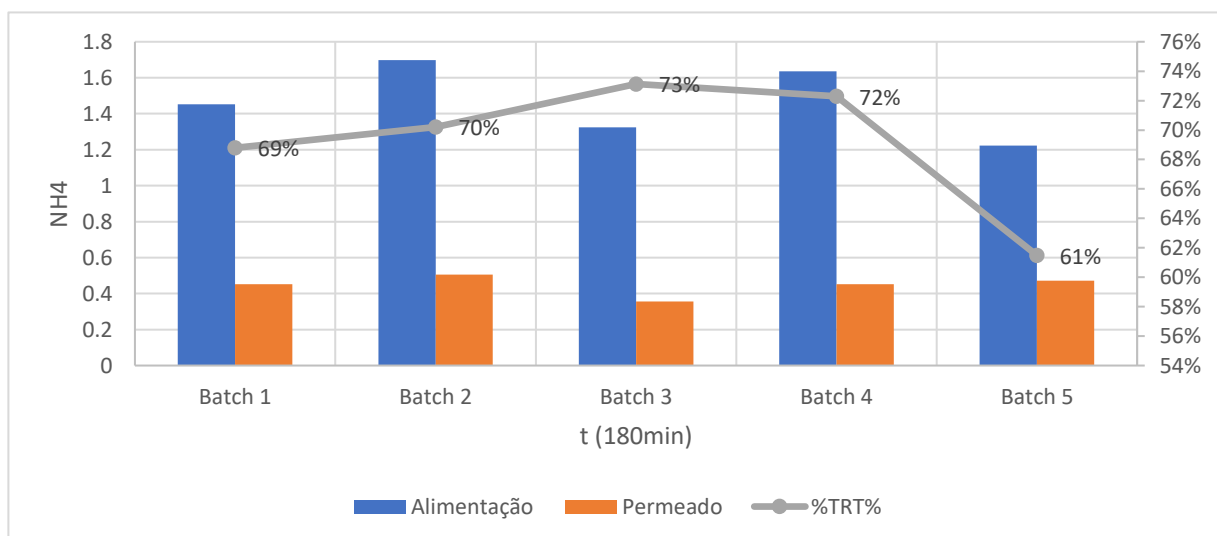


Figura 25: Variação de nitrito da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

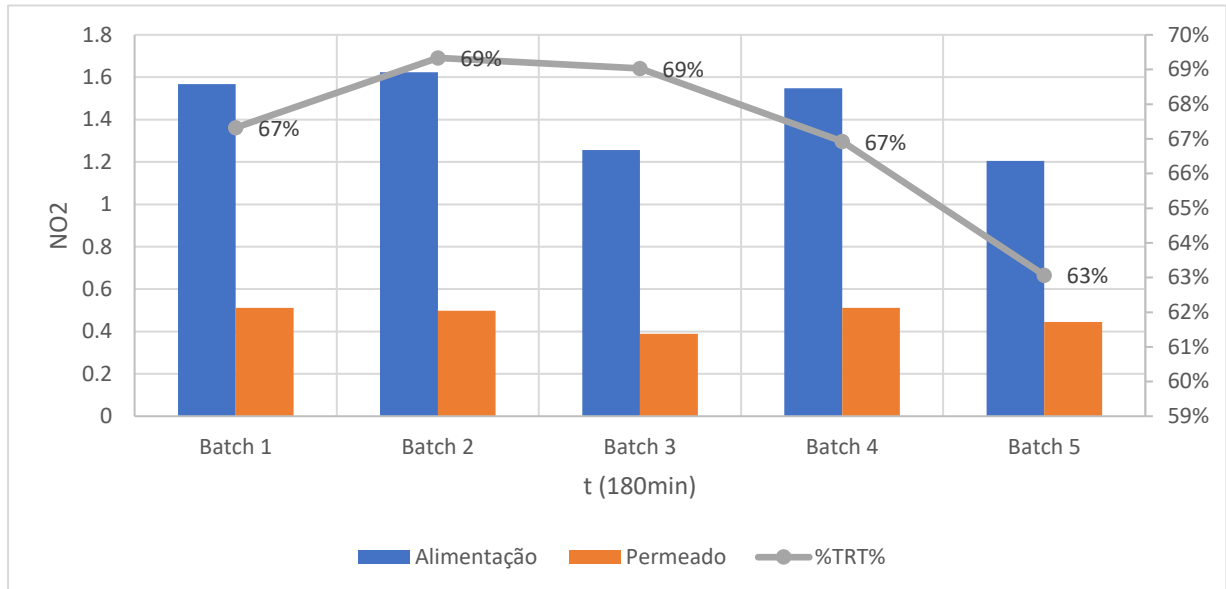


Figura 26: Variação de nitrato da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

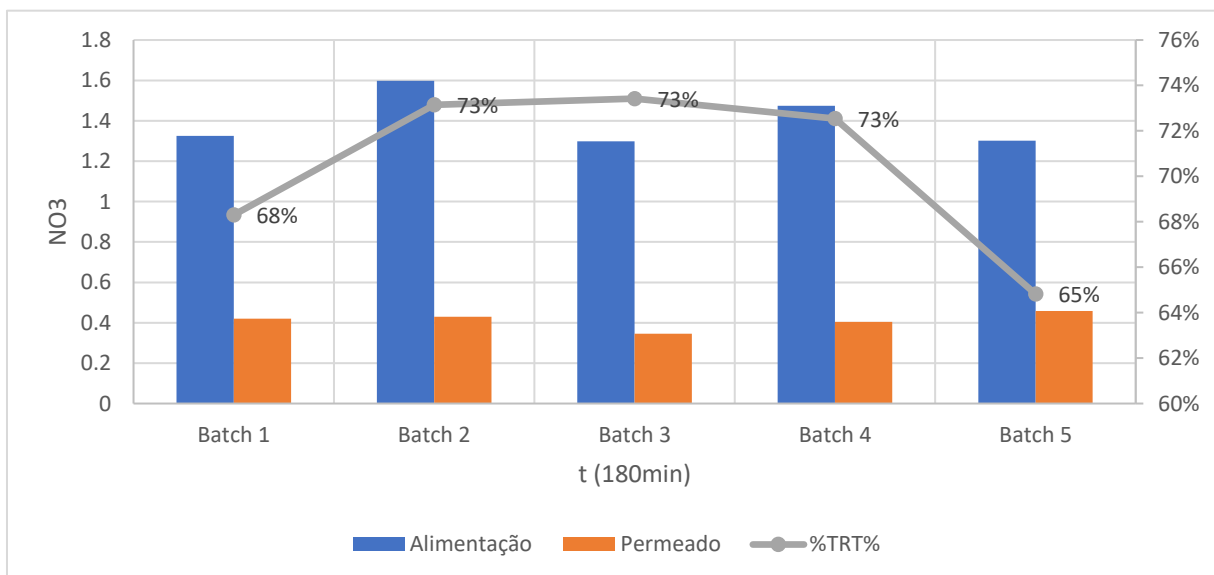


Figura 27: Variação de Fósforo Total da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

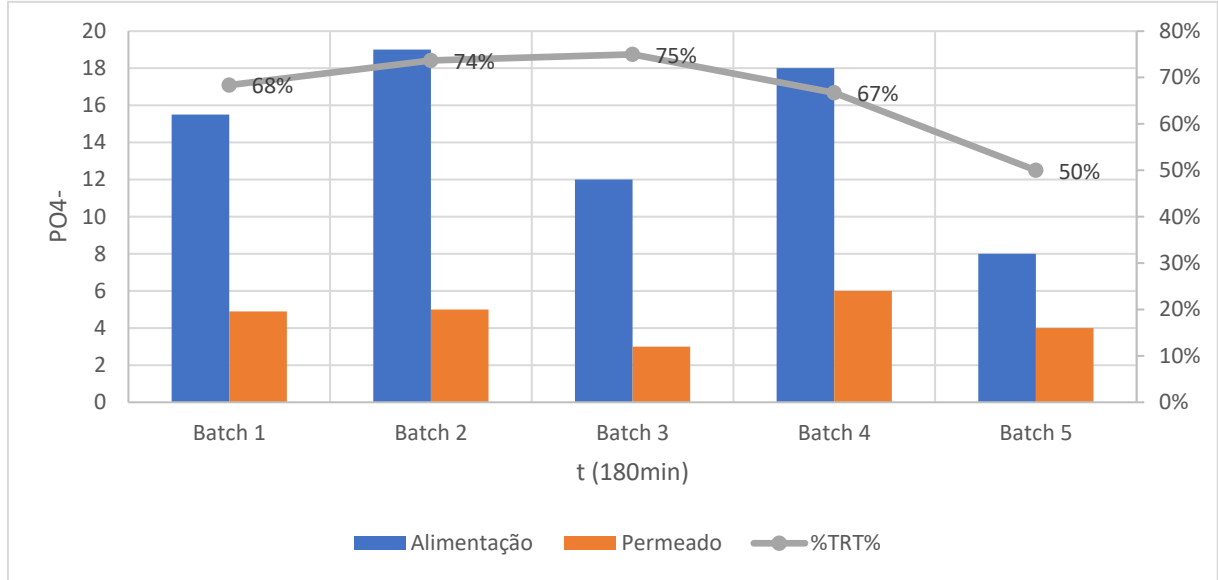


Figura 28: Variação de Sódio da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

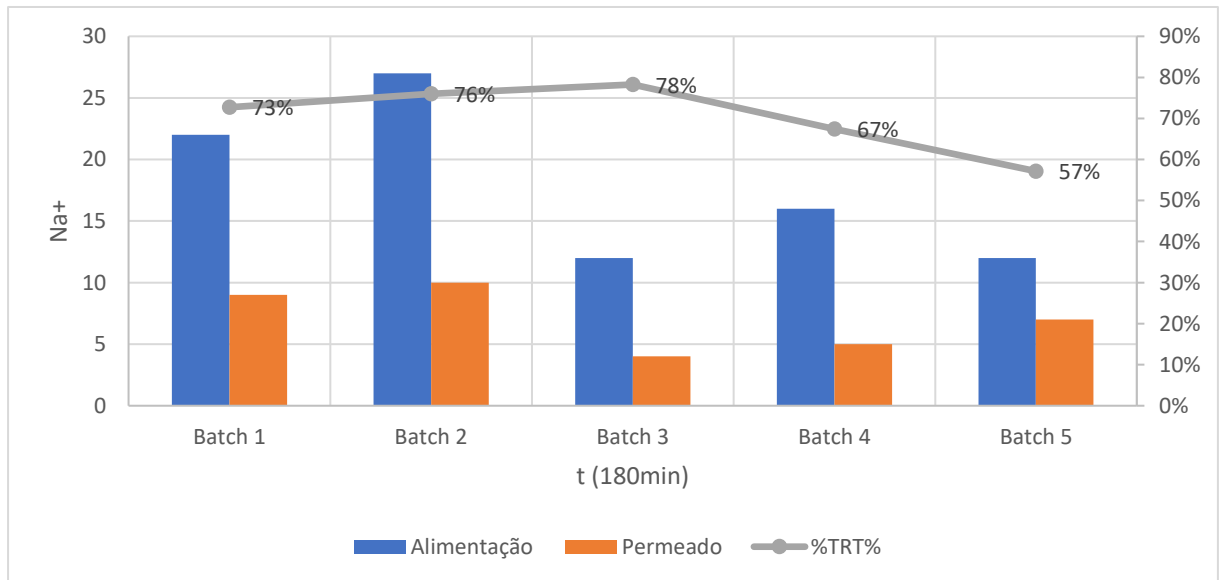


Figura 29: Variação de Potássio da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

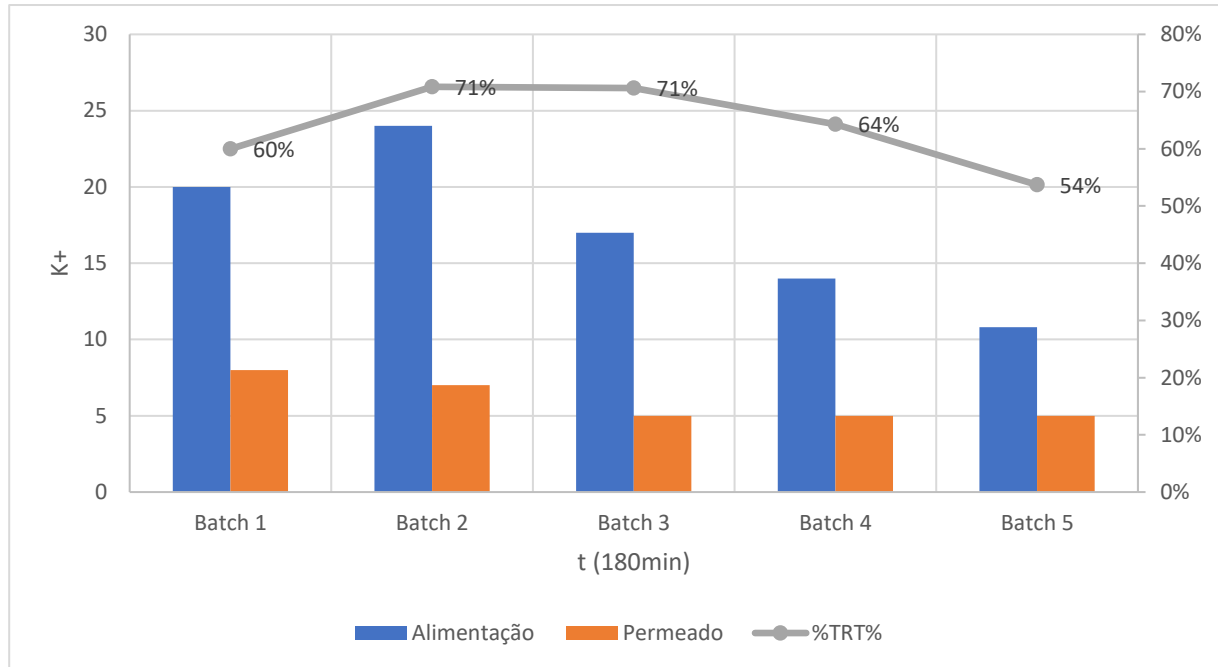


Figura 30: Variação de DQO da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min

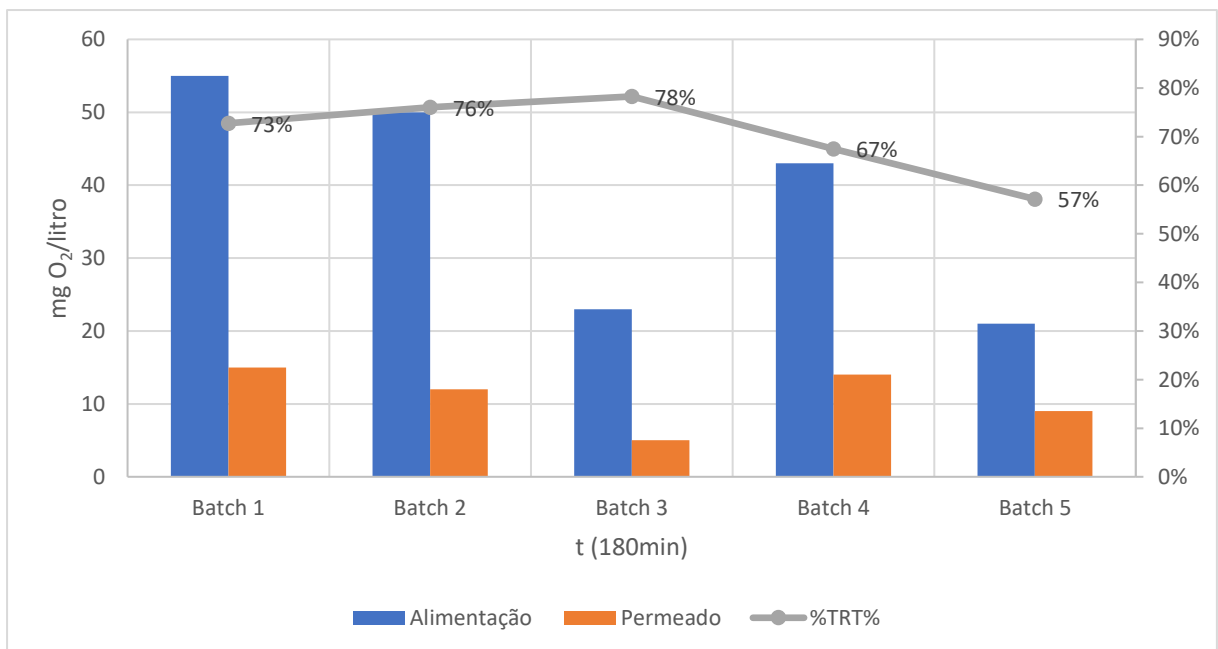
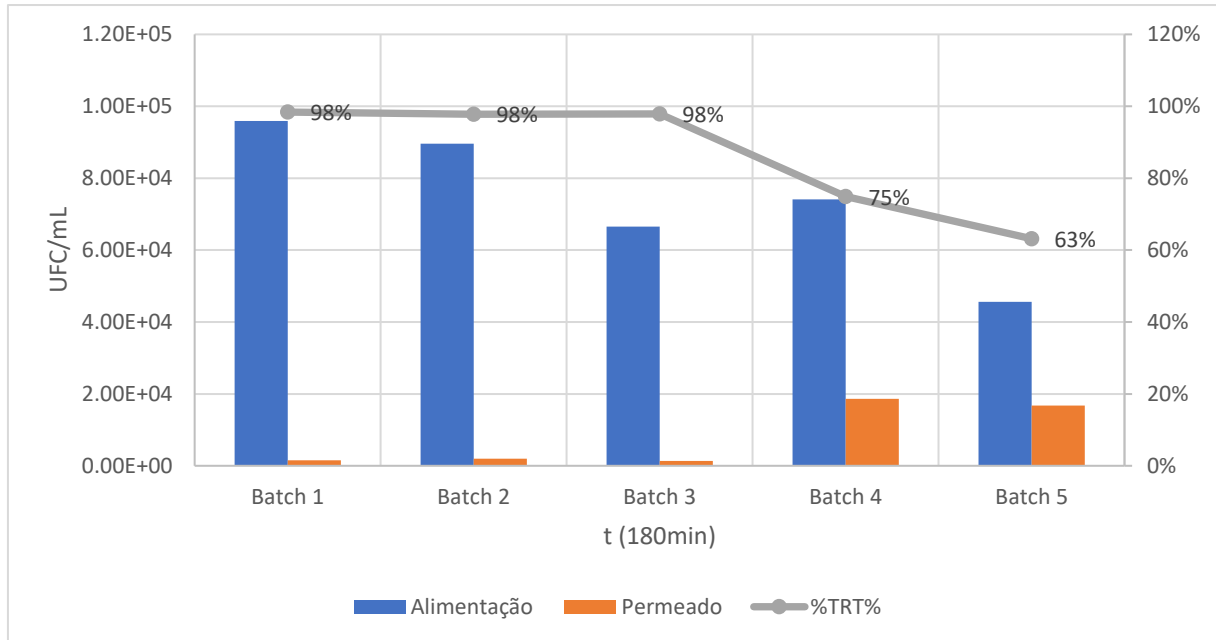


Figura 31: Variação de *E-coli* da água de alimentação, permeado e a taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min



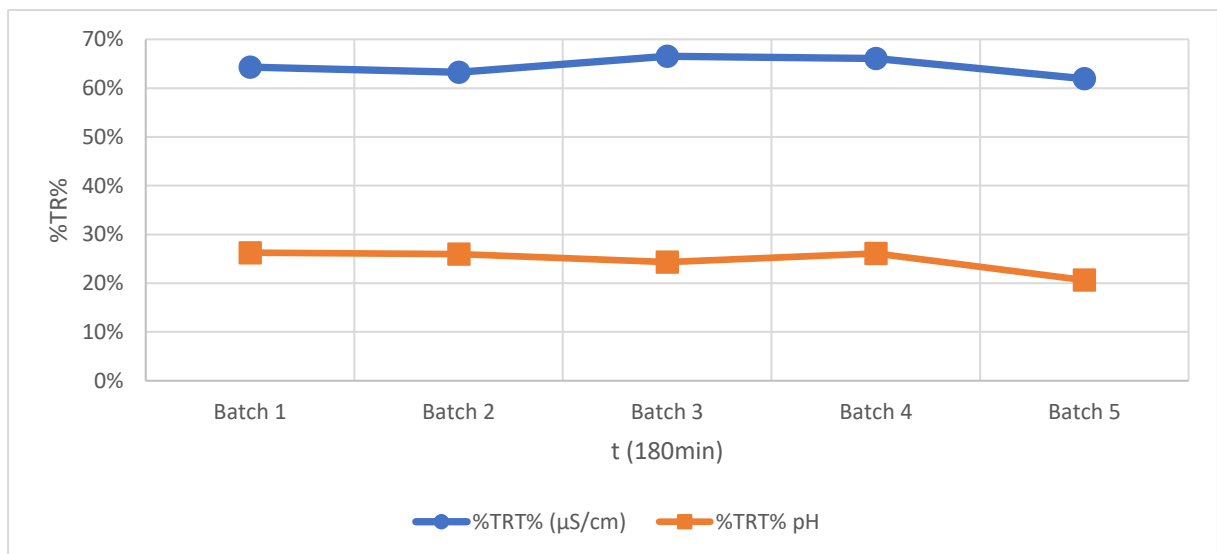
Sob as condições operacionais mencionadas, a inativação de *E-coli* foi significativa, alcançando uma remoção máxima de 98,32% em 180 minutos, sob vazão de 1,0L/min, o resultado destaca a capacidade do poliestireno em inativar significativamente a *E. coli* no contexto de tratamento de água, evidenciando a eficiência do sistema em um tempo de exposição menor. A alta taxa de remoção sugere uma interação eficaz entre as propriedades do poliestireno e as características da *E. coli*, indicando o potencial promissor desse material como agente de filtração em processos de purificação de água.

A remoção de potássio e sódio em água residuária atingiu uma significativa taxa de 70% ao longo de 180 minutos, sob uma vazão constante de 1,0 L/min. Estes resultados indicam a eficácia do processo de remoção desses íons, sugerindo uma interação substancial entre o meio filtrante e os compostos solúveis presentes na água. O reduzido tempo de exposição permitiu uma efetiva adsorção desses íons pelo material do leito filtrante, evidenciando a viabilidade do sistema para o tratamento de águas residuárias contendo potássio e sódio.

A remoção de condutividade e pH em água residuária atingiu taxas significativas conforme evidenciado na figura 32, registrando uma remoção de 66% para condutividade e 30% para o pH ao longo de 180 minutos, sob uma vazão constante de 1,0 L/min. Estes resultados

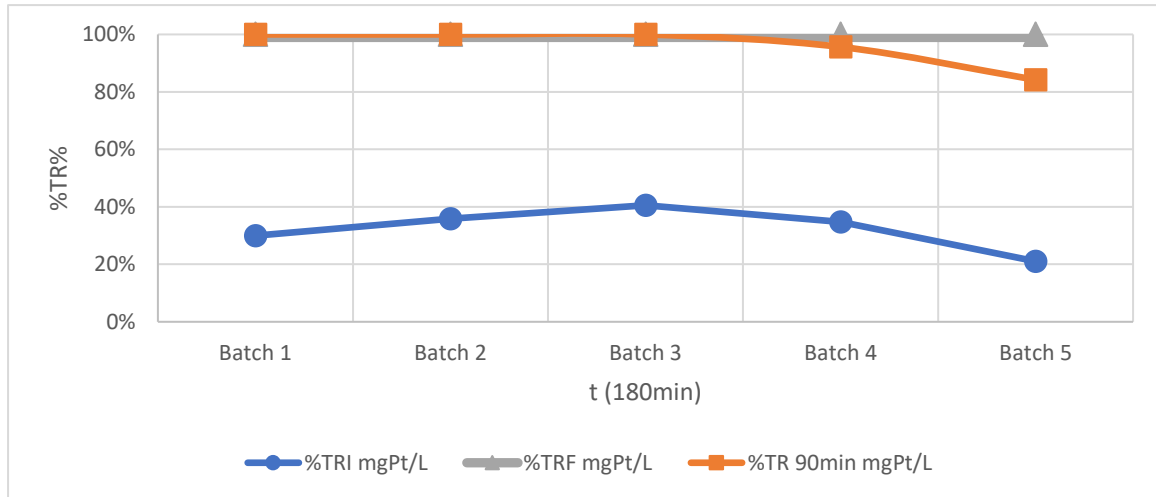
evidenciam a eficácia do sistema em modular as propriedades químicas da água, indicando uma notável capacidade de redução da condutividade e ajuste do pH. O prolongado tempo de exposição permitiu uma interação mais completa entre o meio filtrante e os constituintes da água, resultando em uma remoção substancial desses parâmetros. Esses achados destacam a aplicabilidade do método no tratamento de águas residuárias, sugerindo a viabilidade do sistema para a purificação de água, especialmente em contextos onde a redução da condutividade e a estabilização do pH são requisitos essenciais.

Figura 32: Variação da CE e pH na taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min.



A remoção de cor em água residuária demonstrou resultados notáveis, como evidenciado na figura 33, alcançando uma taxa inicial de 40%, que posteriormente atingiu 100% ao longo de 90 minutos, sob uma vazão de 1,0 L/min. Este aumento substancial na eficiência de remoção ao longo do tempo sugere uma interação dinâmica entre o meio filtrante e os componentes responsáveis pela coloração na água. A variação na taxa de remoção em comparação com um experimento de vazão diferente, onde a taxa atingiu 80% aos 90 minutos com uma vazão de 0,5 L/min, destaca a influência da taxa de fluxo na eficácia do processo. Estes resultados evidenciam a sensibilidade do sistema às condições operacionais, sugerindo a necessidade de considerações específicas de vazão ao otimizar a remoção de cor em águas residuárias, com implicações importantes para a aplicação prática desse método em processos de tratamento de água.

Figura 33: Variação da cor na taxa de remoção para 5 experimentos realizados durante 180min com água da torneira contaminada com 20L de água residuária para um volume de 250L sob uma vazão de 1,0L/min.



Observou-se que após quatro experimentos com o reator funcionando o sistema começou a diminuir sua eficiência e sempre era necessário realizar a lavagem do meio filtrante, devido à acumulação de materiais retidos no leito filtrante ao longo do tempo de operação, a tendência ao aumento do tamanho das partículas de poliestireno, resultando em um aumento de volume e eventual saturação do leito, compromete a capacidade de retenção. A compactação do leito reduz a porosidade, dificultando a passagem eficiente da água. A retro lavagem visa reverter esses efeitos, promovendo a remoção de materiais retidos, melhorando a porosidade e restaurando a eficiência do leito filtrante. Nesse contexto utilizou-se NaOH no sentido ascensional com água tratada, com vazão de entrada de 1,0L/min, para promover a fluidificação parcial do meio granular, com liberação das impurezas. As taxas de remoção para os 18 experimentos estão dispostas na Figura 34,35,36,37 e 38 com os respectivos dados acima citados e a cinética química representada.

Figura 34: Taxa de remoção de NTU e pH para todas as análises

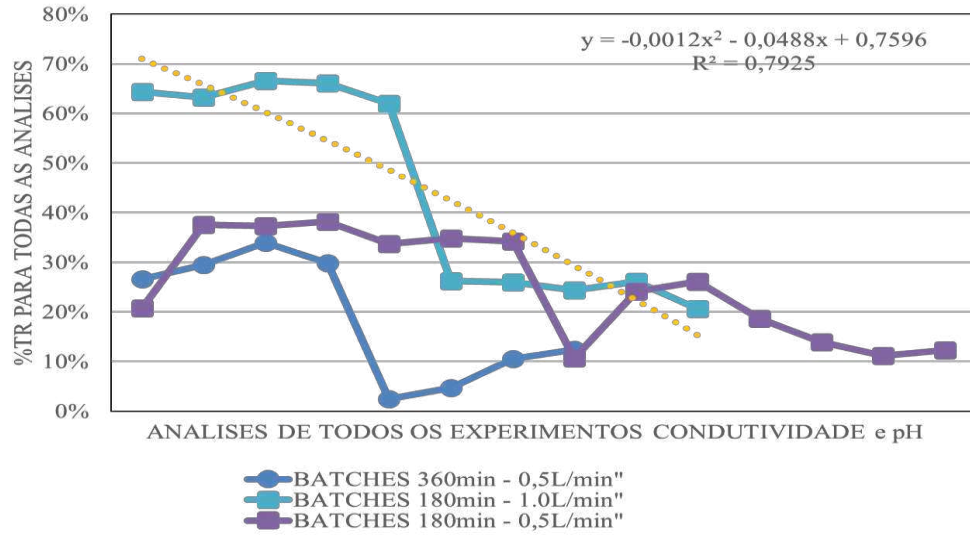


Figura 35: Taxa de remoção de mgPt/Le pH para todas as análises

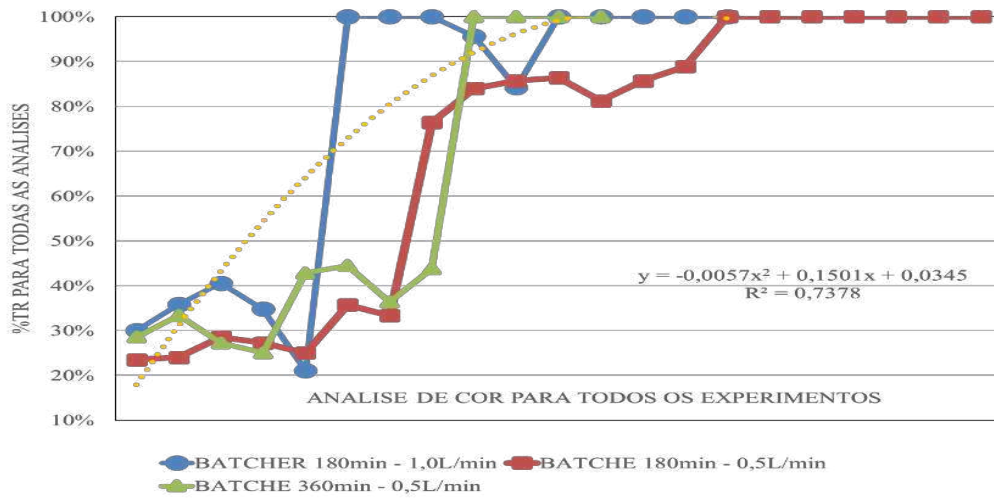


Figura 36: Taxa de remoção NH₄;NO₂ E NO₃ para todas as análises

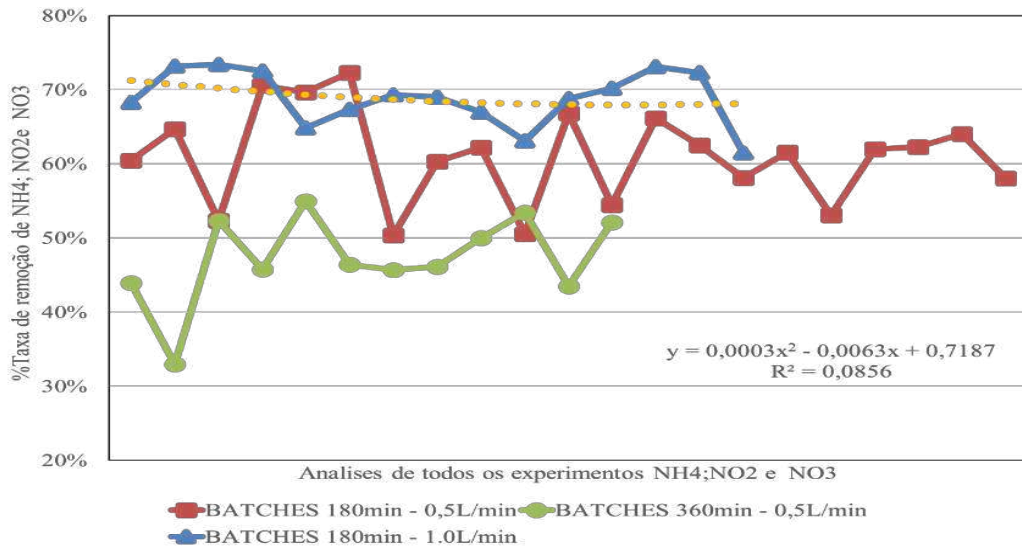
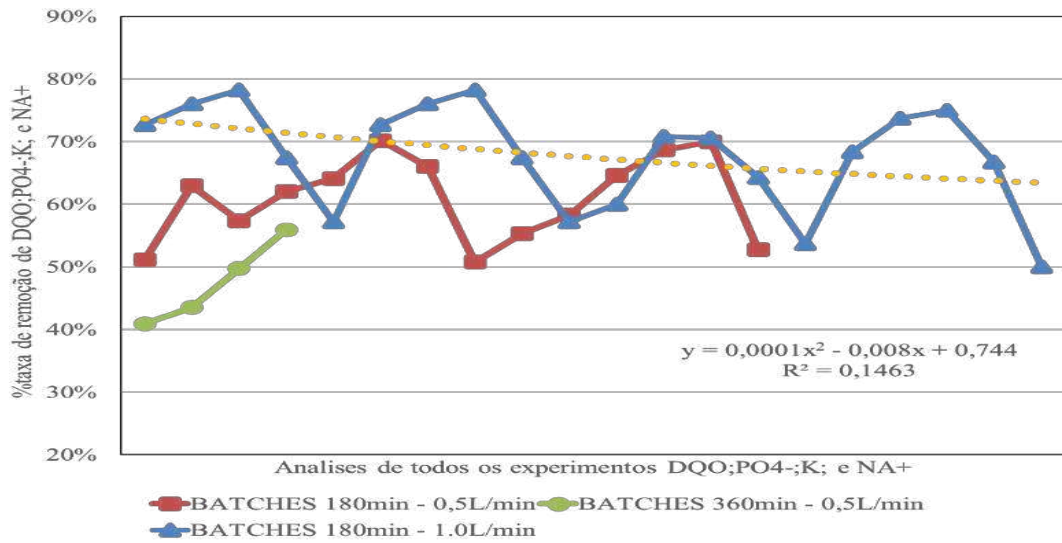
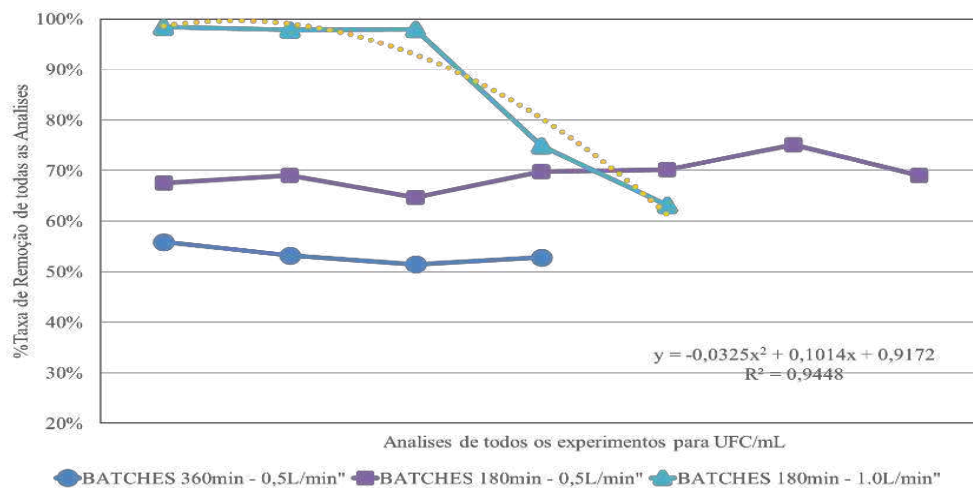


Figura 37: Taxa de remoção DQO;PO4⁻;K e NA⁺ para todas as análises**Figura 38:** Taxa de remoção UFC/mL para todas as análises

A geometria esférica do poliestireno desempenha um papel crucial na eficácia do processo de retro lavagem. Conforme observado por Schöntag (2015), partículas leves, como o poliestireno, requerem velocidades mais baixas durante a retro lavagem. Além disso, destaca-se que o poliestireno tem a capacidade de se recuperar mais rapidamente após a limpeza em comparação com filtros de areia. Isso contrasta com a areia, que demanda mais tempo para o desenvolvimento do consórcio microbiano, limitando assim a eficiência do sistema (Silva, 2020). Esses atributos evidenciam a vantagem do poliestireno esférico na otimização do processo de limpeza e na restauração mais eficaz do meio filtrante, contribuindo para a eficiência global do sistema de filtração. A cinética das análises da Fase 2 encontram-se no Anexo 8.3.

5 CONCLUSÃO

- Este estudo proporcionou diversas conclusões em relação aos seus objetivos específicos. Observou-se que, em relação aos diâmetros das esferas de poliestireno as esferas em formatação mista possuem, maior eficiência de remoção observada em esferas de poliestireno misto em comparação com as esferas separadas pode ser atribuída a diversos fatores, variando conforme o contexto específico do sistema em análise.
- A sinergia de tamanho e propriedades das esferas mistas, que abrangem uma distribuição mais ampla de tamanhos e características físicas, facilita a captura de partículas variadas, resultando em uma eficiência global aprimorada. Além disso, a complementaridade na filtração, as interações químicas e físicas entre esferas de diferentes composições, a resistência ao entupimento mais eficaz, a capacidade de adaptação a variações nas características da água e a otimização em processos dinâmicos de filtração contribuem para a eficácia superior das esferas de poliestireno misto.
- A análise do planejamento experimental destacou que a configuração com a vazão de 0,1 L/min á um tempo de 180min obteve um desempenho evidente ao comparado com 360min, demonstrando uma redução até 98% de E-coli e 70% nos valores de turbidez, cor, DQO, E. coli e amônia potássio, sódio e fosforo total.
- O processo de retrolavagem do sistema se mostrou essencial para manter a qualidade do permeado. As esferas de poliestireno, após testes e resultados, demonstraram ser eficazes como elemento filtrante para o tratamento de efluentes destinados ao reúso agrícola, apresentando boa resistência ao envelhecimento, o sistema atendeu aos padrões estabelecidos para Classes 2 e 3 do CONAMA em relação a pH, turbidez, nitrato e E. coli, permitindo o reúso em diversas aplicações, desde irrigação de áreas verdes até lavagem de veículos.
- Dessa forma, o sistema de tratamento de águas residuárias estudado demonstra potencial para transformar poluentes ambientais em recursos econômicos, apresentando-se como uma solução sanitariamente segura, economicamente viável e ambientalmente sustentável.

6 SUGESTÕES

- Utilizar o poliestireno descartado como lixo de aparelhos eletrônicos e embalagens descartáveis nos reatores;
- Utilizar o efluente tratado no cultivo de algumas culturas como grama e algumas plantas frutíferas.
- Aprimorar o sistema para uso em larga escala que permita o reuso de água a nível industrial.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIQUIM (São Paulo). O que é EPS? 2020. Disponível em: <http://www.epsbrasil.eco.br/eps/index.html>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2024.
- ALNAQBI, M. A.; GREISH, Y. E.; MOSHIN, M. A.; ELUMALAI, E. J.; BLOOSHI, A. A. Morphological variations of micro-nanofibrous sorbents prepared by electrospinning and their effects on the sorption of crude oil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores**. Brasília: ANA, 2019.
- ANDRADE, L. R. S.; ARAÚJO, S. M. S.; FRANÇA, K. B.; PEARSON, H. W. Qualidade das águas superficiais da universidade federal de campina grande: riscos e benefícios para reúso. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.9, n.2, p.170-184, 2018.
- ANDRADE, L. R. S.; ARAÚJO, S. M. S.; FRANÇA, K. B. Sistema alternativo de tratamento de águas residuárias destinadas ao reúso agrícola. 151f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/21593>.
- AQUINO, S. F.; SILVA, S. Q.; CHERNICHARO, C. A. L. Considerações práticas sobre o teste de demanda química de oxigênio (DQO) aplicado a análise de efluentes anaeróbios. *Rev. Engenharia Sanitária e Ambiental*. Vol.11 - Nº 4 - out/dez 2006
- BERGMANN, M. E. H.; ROLLIN, J.; KOPARAL, A. S. Chlorate and perchlorate – new criterions for environmentally-friendly processes in Advanced Oxidation. **Water Practice and Technology**, v. 5, n. 2, 2010.
- BERTONCINI, E. I. Tratamento de efluentes e reúso da água no meio agrícola. *Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária*, 2008.
- BESSA, I. M. Filtração lenta domiciliar como proposta para o tratamento de água em uma comunidade rural: estudo de caso no acampamento do MST Edson Nogueira em Macaé/RJ. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Macaé-RJ. 2020

BEZERRA, V. G. S.; TAVARES, M. G.; DOMBROSKI, S. A. G.; CAVALCANTE, F.L. SOUZA, L. D.; MARTINS, R. C. G. Desempenho de estação de tratamento de esgoto doméstico no semiárido brasileiro e potencial de seu efluente para fins de irrigação. *Brazilian Journal of Development*. Curitiba, v.7, n.4, p. 36159-36174 apr 2021

BOUGNOM, B. P.; THIELE-BRUHN, S.; RICCI, V.; ZONGO, C.; PIDDOCK, L. J. V. Raw wastewater irrigation for urban agriculture in three African cities increases the abundance of transferable antibiotic resistance genes in soil, including those encoding extended spectrum β lactamases (ESBLs). *Science of The Total Environment*, v. 698, p. 134201, 2020.

BRASIL, Ministério do Desenvolvimento Regional e Secretaria Nacional de Saneamento. 2019.

BRASIL. Lei 11.445, de 05 janeiro de 2007: estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde - FUNASA. Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS. Brasília. 112 p. 2014.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria 2914 de 12 de dezembro de 2011. Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Ministério do meio ambiente. Resolução No 54, DE 28 DE NOVEMBRO. Brasília, 2005.

BRASIL. Resolução CONAMA 274. Brasília- DF. 29 de novembro de 2000.

BRASIL. Resolução CONAMA 357. Brasília- DF. 17 de março de 2005. BRASIL. Resolução CONAMA 430. Brasília- DF. 13 de maio de 2011

CARVALHO, P. C. A. P. Tratamento combinado de águas produzidas de petróleo:

filtração, adsorção e foto – fenton. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2016.

CASTRO, F, C.; SANTOS, A. M. Salinidade do solo e risco de desertificação na região semiárida. *Mercator*, Fortaleza, v.19 , e19002, 2020. ISSN:1984-2201

FRANCO, H.A; FILHO, S.T; PEREZ, D.V; MARQUES, C, R, M. Aspectos Associados à Degradação Ambiental e ao Uso de Efluentes na Agricultura do Brasil. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science* v.8, n.2, mai.-ago. 2019, p. 245-263. DOI: /10.21664/2238-8869.2019v8i1.p245-263

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico 2010. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/default_zip.shtm. Acessado: Fevereiro de 2024.

MARTINS, S. C. S.; MARTINS, C. M. Potencial de reúso da água residuária de uma estação de tratamento de esgoto: evolução e caracterização da população bacteriana. *ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.10, n.18; p. 2014.

MOURA,P.G;ARANHA,N.F;HANDAM,B.N;MARTIN,E.L;SALES,J.M;CARVAJAL,E;JARDIM,R;MARTI,S.A. Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil. *SciELO - Scientific Electronic Library Online- São Paulo, SP, Vol. 6, Nov-DeZ 2020,.* DOI: 10.1590/S1413-4152202020180201.

OLIVEIRA, L. S. Reaproveitamento de resíduos de poliestireno expandido (isopor) em compósitos cimentícios. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São João del-Rei. Departamento de Engenharia Mecânica. São João Del Rei, 2013.

ONU. **Acesso ao meio ambiente saudável é declarado um direito humano**. *ONU News Perspectiva - Global Reportagens Humanas*, [S. l.], p. 1, 8 nov. 2021. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2021/10/1766002>. Acesso em: 8 setembro de 2022.

SANTOS, E. A. Reúso de efluentes de filtros intermitentes tratando águas residuárias para produzir tomate cerveja. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia sanitária e ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba. 2014

VALENTE, J. P. S.; PEDILHA, P. M.; SILVA, A. M. M. Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu – SP. *Eclét. Quím.* vol.22 São Paulo 2007.

VENSKE, F. Alagados construídos para tratamento de águas cinzas com meio suporte de resíduos de construção e demolição. 2017. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa. 2017.

UN-WATER. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature- Based Solutions for Water. Paris: UNESCO, 2018.

WHO - World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. 4. ed. Geneva.

8 ANEXOS

8.1 Cinética dos experimentos realizados na Fase 1.

Tabela 4: Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos da caracterização do poliestireno

PARÂMETROS TESTE (ÁGUA DA LAGOA VOLUME 150mL)								
Tempo (min)	Cond. Elétrica V-150 mL	pH - V-150mL	Turbidez V-150mL	Cor V-150mL	Amônia V-150mL	Nitrito V-150mL	Nitrato - V-150 mL	UFC/mL
0	854,2	8,81	35,4	60	28,29	0,359	1,41	90,3
1440	493,5	7,52	2,33	32	21,41	0,303	1,23	72,3
Média	673,85	8,165	18,865	46	24,85	0,331	1,32	81,3
%TR	42,23%	14,64%	93,42%	46,67%	24,32%	15,60%	12,77%	19,93%
PARÂMETROS TESTE (ÁGUA DA LAGOA VOLUME 180mL)								
Tempo (min)	Cond. Elétrica V-180 mL	pH - V-180mL	Turbidez V-180mL	Cor V-180mL	Amônia V-180mL	Nitrito V-180mL	Nitrato V-180mL	UFC/mL
0	854,2	8,81	35,4	60	14,18	0,179	1,41	90,3
1440	492,7	7,46	2,35	27	14,14	0,175	0,66	70
Média	673,45	8,135	18,875	43,5	14,16	0,177	1,035	80,15
%TR	42,32%	15,32%	93,36%	55,00%	0,28%	2,23%	53,19%	22,48%
PARÂMETROS TESTE (ÁGUA DA LAGOA VOLUME 250mL)								
Tempo (min)	Cond. Elétrica V-250 mL	pH - V-250mL	Turbidez V-250mL	Cor V-250mL	Amônia V-250mL	Nitrito V-250mL	Nitrato - V-250 mL	UFC/mL
0	854,2	8,81	35,4	60	28,29	0,109	1,41	90,3
1440	362,2	7,58	4,18	23	23,86	0,09	0,42	63,2
Média	608,2	8,195	19,79	41,5	26,075	0,0995	0,915	76,75
%TR	57,60%	13,96%	88,19%	61,67%	15,66%	17,43%	70,21%	30,01%

8.2 Cinética dos experimentos realizados na Fase 1.

Figura 39: Cinéticas da Fase 1 análises físico-químicas e bacteriológicas

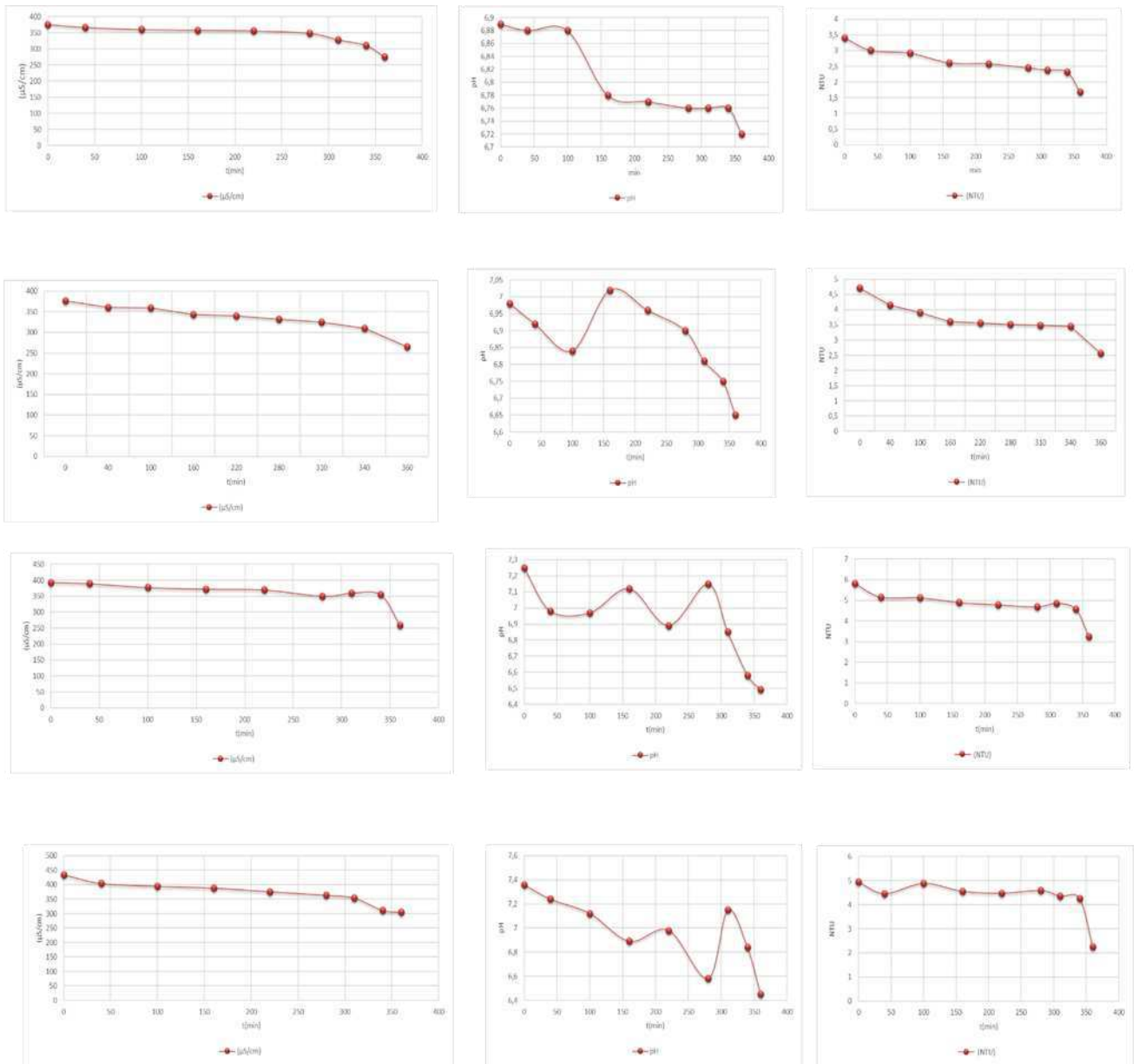


Tabela 5: Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos da fase 1

PARÂMETROS TESTE (ÁGUA DA LAGOA + ÁGUA DA TORNEIRA)									
t (min)	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	(NTU)	Cor	Amônia	Nitrito	Nitrato	DQO	UFC/mL
0	375,5	6,89	3,41	7	1	0,01	0,42	32,48	5,73E+04
40	366,5	6,88	3,01	5	0,65	0,007	0,33	25,2	4,13E+04
100	360,1	6,88	2,92	4					
160	358,1	6,78	2,61	4					
220	355,9	6,77	2,58	0					
280	348,5	6,76	2,45	0					
310	328,4	6,76	2,38	0					
340	310,8	6,76	2,32	0					
360	275,6	6,72	1,68	0	0,561	0,0045	0,21	19,2	2,53E+04
MÉDIA	355,9	6,77	2,58	0	0,65	0,007	0,33	25,2	4,13E+04
DESVIO PADRAO	30,02	0,06	0,46	2,62	0,19	0,00	0,09	5,43	1,31E+04
%TR (TI)	2,40%	0,15%	11,73%	28,57%	35,00%	30,00%	21,43%	22,41%	27,92%
%TR (160)				42,86%					
%TR (TF)	26,60%	2,47%	50,73%	100,00%	43,90%	55,00%	50,00%	40,89%	55,85%

PARÂMETROS TESTE (ÁGUA DA LAGOA + ÁGUA DA TORNEIRA)									
t (min)	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	(NTU)	Cor	Amônia	Nitrito	Nitrato	DQO	UFC/mL
0	376,8	6,98	4,71	9	0,879	0,028	0,058	49,2	8,72E+04

40	360,5	6,92	4,15	6	0,618	0,019	0,046	35,8	6,52E+04
100	359,3	6,84	3,91	5					
160	343,2	7,02	3,61	5					
220	339,5	6,96	3,56	0					
280	332,5	6,9	3,52	0					
310	325,7	6,81	3,49	0					
340	310,2	6,75	3,45	0					
360	265,7	6,65	2,56	0	0,589	0,015	0,027	27,8	4,08E+04
MÉDIA	339,5	6,9	3,56	0	0,618	0,019	0,046	35,8	6,52E+04
DESVIO PADRAO	30,89	0,11	0,55	3,29	0,13	0,01	0,01	8,83	1,90E+04
% TR (TI)	4,33%	0,86%	11,89%	33,33%	29,69%	32,14%	20,69%	27,24%	25,23%
				44,44%					
% TR (TF)	29,49%	4,73%	45,65%	100,00%	32,99%	46,43%	53,45%	43,50%	53,21%

PARÂMETROS TESTE (ÁGUA DA LAGOA + ÁGUA DA TORNEIRA)

t (min)	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	(NTU)	Cor	Amônia	Nitrito	Nitrato	DQO	UFC/mL
0	393,1	7,25	5,81	11	0,956	0,046	0,069	51,3	9,02E+04
40	389,3	6,98	5,15	8	0,625	0,03	0,051	40,8	6,72E+04
100	377,3	6,97	5,12	7					
160	372,3	7,12	4,89	7					
220	369,8	6,89	4,78	0					
280	350,2	7,15	4,68	0					

310	359,8	6,85	4,85	0					
340	355,3	6,58	4,58	0					
360	259,8	6,49	3,25	0	0,456	0,025	0,039	25,8	4,38E+04
MÉDIA	369,8	6,97	4,85	0	0,625	0,03	0,051	40,8	6,72E+04
DESVIO PADRAO	37,48	0,24	0,64	4,24	0,21	0,01	0,01	10,46	1,89E+04
% TR (TI)	0,97%	3,72%	11,36%	27,27%	34,62%	34,78%	26,09%	20,47%	25,50%
				36,36%					
% TR (TF)	33,91%	10,48%	44,06%	100,00%	52,30%	45,65%	43,48%	49,71%	51,44%

PARÂMETROS TESTE (ÁGUA DA LAGOA + ÁGUA DA TORNEIRA)									
t (min)	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	(NTU)	Cor	Amônia	Nitrito	Nitrato	DQO	UFC/mL
0	435	7,36	4,95	16	0,076	0,052	0,048	45,8	7,59E+04
40	405	7,24	4,46	12	0,049	0,036	0,031	32,2	5,43E+04
100	395	7,12	4,89	9					
160	389	6,89	4,56	9					
220	376	6,98	4,48	0					
280	364	6,58	4,59	0					
310	354	7,15	4,36	0					
340	312	6,84	4,26	0					
360	305	6,45	2,25	0	0,041	0,028	0,023	20,2	3,58E+04
MÉDIA	376	6,98	4,48	0	0,049	0,036	0,031	32,2	5,43E+04
DESVIO PADRAO	39,93	0,28	0,76	6,03	0,01	0,01	0,01	10,46	1,64E+04
% TR (TI)	6,90%	1,63%	9,90%	25,00%	35,19%	30,77%	35,42%	29,69%	28,46%
				43,75%					

% TR (TF)	29,89 %	12,36 %	54,55 %	100,00 %	45,77 %	46,15 %	52,08 %	55,90 %	52,83%
------------------	------------	------------	------------	-------------	------------	------------	------------	------------	--------

8.3 Cinética dos experimentos realizados na Fase 2.

Figura 40: Cinéticas da Fase 2 análises físico-químicas e bacteriológicas

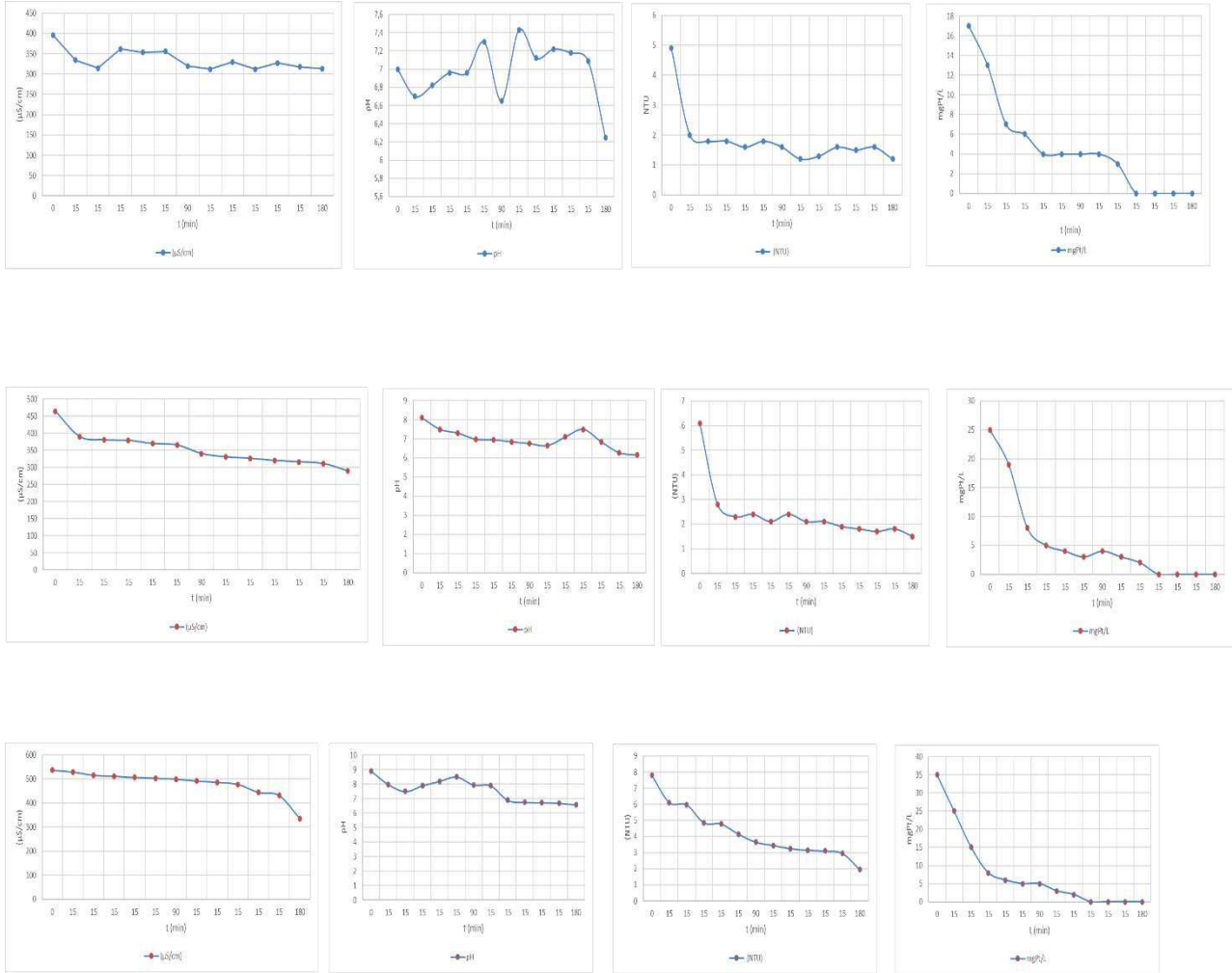


Tabela 6: Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos da fase 2

PARÂMETROS TESTE (ÁGUA DA LAGOA + ÁGUA DA TORNEIRA)												
t (min)	(µS/cm)	pH	(NT U)	Cor	Amônia	Nitrito	Nitro	F.To tal	Potasio	Sódio	DQO	UFC/mL
0	605	8,34	8,83	40	1,45 2	1,56 7	1,32 5	15,5	20	22	55	9,59E +04

%TR (TF)	63,2 8%	25,9 5%	66,6 7%	100,0 0%	70,2 0%	69,3 3%	73,1 5%	73,6 8%	70,8 3%	62,9 6%	76,0 0%	97,82 %
-----------------	------------	------------	------------	-------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

PARÂMETROS TESTE (ÁGUA DA LAGOA + ÁGUA DA TORNEIRA)												
t (min)	(µS/cm)	pH	(NTU)	Cor	Amônia	Nitrito	Nitrato	F.Total	Potássio	Sódio	DQO	UFC/mL
0	585	8,26	8,67	37	1,325	1,256	1,298	12	17	12	23	6,65E+04
10	565	8,11	8,12	22								
10	500	7,90	7,95	20								
10	495,3	7,70	7,95	15								
10	490,8	7,58	7,85	13								
10	509,3	7,43	7,65	9								
10	485,8	7,42	7,15	0								
10	465,7	7,40	7,05	0								
10	475,5	7,29	6,98	0								
90	365,7	7,17	6,85	0								
10	347,8	7,04	6,75	0								
10	326,8	7,02	6,43	0								
10	318,9	6,85	6,39	0								
10	305,6	6,76	5,98	0								
10	295,2	6,73	5,86	0								
10	285,8	6,64	5,24	0								
10	275,5	6,55	4,98	0								
10	244,8	6,52	4,15	0								
10	229,2	6,25	3,98	0								
180	195,8	6,25	3,15	0	0,356	0,389	0,345	3	5	4	5	1,39E+03
MÉDIA	500	7,17	6,8	0	0,8405	0,8225	0,8215	7,5	11	8	14	3,39E+04
DESVIO PADRAO	145,17	0,87	1,47	10,14	0,48	0,43	0,48	4,50	6,00	4,00	9,00	3,26E+04

% TR (TI)	3,42 %	1,82 %	6,34 %	40,54 %								
% TR (T90)	37,4 9%	13,2 0%	20,9 9%	100,0 0%								
%TR (TF)	66,5 3%	24,3 3%	63,6 7%	100,0 0%	73,1 3%	69,0 3%	73,4 2%	75,0 0%	70,5 9%	66,6 7%	78,2 6%	97,91 %

PARÂMETROS TESTE (ÁGUA DA LAGOA + ÁGUA DA TORNEIRA)

t (min)	(μ S/cm)	pH	(NT U)	Cor	Amônia	Nitrito	Nitrato	F.Total	Potasio	Sódio	DQO	UFC/mL
0	627	8,4	8,92	46	1,635	1,548	1,475	18	14	16	43	7,41E+04
10	607	8,25	8,34	30								
10	542	8.04	8.38	19								
10	537.3	7.84	7.23	2								
10	532.8	7.72	7.98	8								
10	551.3	7.57	7.34	6								
10	527.8	7.56	7.24	4								
10	507.7	7.54	6.35	3								
10	517.5	7.43	6,05	2								
90	407,7	7,31	5,35	2								
10	389.8	7.18	5.50	0								
10	368.8	7.16	5.46	0								
10	360.9	6.99	5.34	0								
10	347.6	6.90	5.33	0								
10	337.2	6.87	5.30	0								
10	327.8	6.78	5.26	0								
10	317.5	6.69	5.17	0								
10	286.8	6.66	5,13	0								
10	271.2	6.25	4,95	0								
180	212,5	6,21	3,25	0	0,453	0,512	0,405	6	5	5	14	1,86E+04

10	237,2	6,35	3,15	0								
180	225,8	6,35	3,05	0	0,471	0,445	0,458	4	5	7	9	1,68E+04
MÉDIA	508	7,05	4,8	1,5	0,847	0,825	0,88	6	7,9	9,5	15	3,12E+04
DESVIO PADRAO	137,78	0,73	0,96	5,17	0,38	0,38	0,42	2,00	2,90	2,50	6,00	1,44E+04
% TR (TI)	3,37%	0,62%	1,60%	21,05%								
% TR (T90)	36,98%	11,88%	22,40%	84,21%								
% TR (TF)	61,92%	20,63%	51,20%	100,00%	61,49%	63,07%	64,82%	50,00%	53,70%	41,67%	57,14%	63,16%