



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS**

**LAZARO RAMOM DOS SANTOS ANDRADE**

**SISTEMA ALTERNATIVO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS  
RESIDUÁRIAS DESTINADAS AO REÚSO AGRÍCOLA**

**CAMPINA GRANDE**

**2021**

**LAZARO RAMOM DOS SANTOS ANDRADE**

**SISTEMA ALTERNATIVO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS  
RESIDUÁRIAS DESTINADAS AO REÚSO AGRÍCOLA**

Tese apresentada em cumprimento às exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, da Universidade Federal de Campina Grande, para obtenção do grau de Doutor em Recursos Naturais. Área de concentração: Sociedade e Recursos Naturais.

**Orientador:** Prof. Dr Sérgio Murilo Santos de Araújo.  
**Coorientador** Prof. Dr. Kepler Borges França

**CAMPINA GRANDE**

**2021**

A553s      Andrade, Lazaro Ramom dos Santos.  
              Sistema alternativo de tratamento de águas residuárias destinadas ao  
              reúso agrícola / Lazaro Ramom dos Santos Andrade. – Campina Grande,  
              2021.  
              151 f. : il. color.

              Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de  
              Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.  
              "Orientação: Prof. Dr. Sergio Murilo Santos de Araujo, Prof. Dr.  
              Kepler Borges França”.  
              Referências.

              1. Águas Residuárias – Reúso Agrícola. 2. Sociedade e Recursos  
              Naturais. 3. Poliestireno. 4. Irrigação. I. Araujo, Sergio Murilo Santos de.  
              II. França, Kepler Borges. III. Título.

CDU 628.381(043)

# LAZARO RAMOM DOS SANTOS ANDRADE

## SISTEMA ALTERNATIVO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DESTINADAS AO REÚSO AGRÍCOLA

Tese apresentada em cumprimento às exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, da Universidade Federal de Campina Grande, para obtenção do grau de Doutor em Recursos Naturais. Área de concentração: Sociedade e Recursos Naturais.

Tese apresentada em 09/08/2021.

### **Banca Examinadora**

---

Prof. Sérgio Murilo Santos de Araújo.  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Kepler Borges França.  
(Coorientador)

---

Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos  
(Examinador Interno)

---

Prof. Dr. José Dantas Neto  
(Examinador Interno)

---

Prof. Dr. Hugo Morais de Alcântara  
(Examinador Externo)

---

Dra. Carolina Pereira Dantas  
(Examinadora Externa)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
POS-GRADUACAO EM RECURSOS NATURAIS  
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

## REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

### ATA DE DEFESA TESE

Ata da sétima sessão pública de Defesa de “Tese” do atual Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais – PPGEGRN do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Ao nono dia do mês de julho de 2021, às **14:30 horas por meio de videoconferência** reuniu-se na forma e Termos do Art. 62 do Regulamento Geral dos Cursos e Programas de Pós-Graduação “Stricto Sensu” da UFCG e do Regulamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, Resolução 02/2019 do Colegiado Pleno do Conselho Superior de Ensino, Pesquisa e Extensão – CONSEPE/UFCG, a Banca Examinadora composta pelos professores/pesquisadores Prof. Dr. **Sérgio Murilo Santos de Araújo/UFCG**, como orientador principal; Prof. Dr. **Kepler Borges França/UFCG** como co-orientador; Prof. Dr. **José Dantas Neto/UFCG** como membro interno; Prof. Dr. **Carlos Antônio Costa dos Santos/UFCG**, como membro interno; Profa. Dra. **Carolina Pereira Dantas/UFCG**, como membro externo; Prof. Dr. **Hugo Morais de Alcântara/UFCG**, como membro externo; tendo como suplentes Profa. Dra. **Maria de Fátima Nóbrega**

Processo:

23096.033489/2021-12

Documento:

1617977



Documento assinado eletronicamente por **SERGIO MURILO SANTOS DE ARAUJO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/07/2021, às 12:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE DANTAS NETO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/07/2021, às 17:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS, PROFESSOR**, em 04/08/2021, às 15:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARIA DE FATIMA MARTINS, COORDENADORA DE PÓS GRADUAÇÃO**, em 24/08/2021, às 00:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **HUGO MORAIS DE ALCANTARA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/08/2021, às 18:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **KEPLER BORGES FRANCA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/08/2021, às 19:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LAZARO RAMOM DOS SANTOS ANDRADE, Usuário Externo**, em 26/08/2021, às 09:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carolina Pereira Dantas, Usuário Externo**, em 30/08/2021, às 14:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



*Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha mãe, meu pai, minha esposa e minha filha Luna. Vocês são parte integrante dos meus sonhos e das conquistas!*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me conceder a graça de estar concluindo mais uma etapa de minha vida.

A minha amada e querida mãe, Maria de Fátima, pelo amor e dedicação em todos os momentos de minha vida, e por sempre me encorajar a ir em busca dos meus sonhos.

Ao meu pai, Francisco Pereira, por todo amor e apoio durante toda minha vida.  
A minha amada esposa, Marília, pelo companheirismo, compreensão e apoio durante esta caminhada.

Ao amor da minha vida, minha esposa Marília! Fica aqui registrado meu sincero agradecimento por todo amor e dedicação que tem por nossa família e por todo apoio durante essa minha jornada acadêmica.

A minha querida e amada filha Luna Mariah, que mesmo sendo tão pequena por muitas vezes acalmou meu coração e me deu forças para sempre continuar seguindo em frente.

A meu orientador, Prof. Sergio Murilo por toda compreensão, paciência e acolhimento durante esses quatro anos de pesquisa.

Ao Laboratório de Referência em Dessalinização, local muito especial onde tive a honra de conviver por mais de dez anos com pessoas maravilhosas que nunca serão esquecidas.

A meu querido professor Kepler por todo apoio e incentivo a minha pesquisa. Muito obrigado de todo coração, o senhor se tornou um grande amigo ao longo desses dez anos de convivência. Serei eternamente grato ao senhor por todos os ensinamentos e por todo apoio que recebi, **MUITO OBRIGADO MESTRE!**

A meu querido professor Howard por acompanhar minha vida acadêmica desde a graduação e por me ajudar na minha trajetória na Pós Graduação, MUITO OBRIGADO  
MESTRE!

À Universidade Federal de Campina Grande e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, por todo suporte disponível para o meu aperfeiçoamento profissional, como também aos docentes, secretários e coordenadores do PPGRN-UFCG, os quais colaboraram de forma significativa com a realização dessa jornada!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo.

MUITO OBRIGADO!

# **Sistema alternativo de tratamento de águas residuárias destinadas ao reúso agrícola**

**Lázaro Ramom dos Santos Andrade**

**Universidade Federal de Campina Grande**

## **RESUMO**

O crescimento populacional, atrelado ao avanço da industrialização nas cidades, acarretou inúmeros problemas ambientais, como por exemplo a produção de águas residuárias. Nas áreas urbanas e rurais das microrregiões dos estados, este problema apresenta um cenário ainda mais preocupante em virtude da falta de incentivos governamentais, no que concerne às tecnologias de tratamento para essas águas. Esta pesquisa, desenvolvida no âmbito do Laboratório de Referência em Dessalinização da Universidade Federal de Campina Grande (LABDES/UFCG), visou estudar e avaliar o desempenho de um sistema piloto de tratamento de águas residuárias para fins agrícolas composto por três reatores do tipo tubular, com leito de poliestireno. A avaliação do sistema foi realizada em função dos arranjos dos reatores, em série e/ou paralelo, utilizando-se diferentes granulometrias de poliestireno e vazões. A partir dos resultados experimentais, observou-se que as esferas de poliestireno de 2,0 mm foram as que mais alteraram seu peso e diâmetro, porém, após a secagem voltaram às características iniciais. Comparando-se a eficiência das duas configurações estudadas, observou-se que o sistema com reatores em série, e leito de poliestireno de 2,0 mm de diâmetro, apresentou a maior taxa de remoção da demanda química de oxigênio, cor, turbidez, *E. coli*, fósforo total, e nitrificação, quando operou a 0,5L/min. Em termos de manutenção do sistema, a retrolavagem dos meios filtrantes foi uma etapa fundamental para recuperar a produção e a qualidade do permeado. Os resultados das análises físico-químicas e microbiológicas das amostras de águas, após o processo com o sistema de reatores em série a 0,5L/min, se mostraram dentro dos padrões estabelecidos para as Classes 2 e 3 do CONAMA, possibilitando assim seu uso na irrigação.

**Palavras - Chave:** Reúso; poliestireno; irrigação.

# **Alternative wastewater treatment system for agricultural reuse**

**Lázaro Ramom dos Santos Andrade**

**Universidade Federal de Campina Grande**

## **ABSTRACT**

Population growth, linked to the advance of industrialization in cities, caused numerous environmental problems, such as the production of wastewater. In urban and rural areas of the micro-regions of the states, this problem presents an even more worrying scenario due to the lack of government incentives regarding treatment technologies for these waters. This research, developed in the scope of the Reference Laboratory in Desalination of the Federal University of Campina Grande, aims to study and evaluate the performance of a pilot wastewater treatment system for agricultural purposes, composed of three tubular type reactors, with polystyrene bed. The evaluation of the system was carried out as a function of the reactors arrangements, in series and/or parallel, using different polystyrene particle sizes and flow rates. From the experimental results, it was observed that the 2.0 mm polystyrene spheres were the ones that most changed their weight and diameter, however, after drying, they returned to their initial characteristics. Comparing the efficiency of the two studied configurations, it was observed that the system with series reactors, and a 2.0 mm diameter polystyrene bed, presented the highest removal rate of chemical oxygen demand, color, turbidity, *E coli*, total phosphorus, and nitrification, when operated at 0.5L/min. In terms of system maintenance, backwashing the filter media was a fundamental step in recovering the production and quality of the permeate. The results of the physical, chemical and microbiological analyzes of the water samples, after the process with the reactor system in series at 0.5 L/min, were within the standards established for Classes 2 and 3 of CONAMA, thus enabling its use in irrigation.

**Keywords:** Reuse; polystyrene; irrigation.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: MODELO DE LAGOA DE ESTABILIZAÇÃO. ....	39
FIGURA 2: MODELO DE FILTRO MULTIMEIO PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES. ....	40
FIGURA 3: MODELO DE FOSSAS BIODIGESTORAS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES. ....	42
FIGURA 4: FILTRO DE AREIA INTERMITENTE. ....	43
FIGURA 5: ESTRUTURA PARCIAL DA CADEIA DO POLIESTIRENO. ....	45
FIGURA 6: DEPOSIÇÃO DE ISOPOR EM TERRENOS. ....	47
FIGURA 7: LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO. ....	51
FIGURA 8: LAGOA DA UFCG. ....	52
FIGURA 9: FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES. ....	53
FIGURA 10: MODELO DO SISTEMA DE TRATAMENTO UTILIZANDO NA PESQUISA. ....	55
FIGURA 11: REATOR EM OPERAÇÃO. ....	56
FIGURA 12: POLIESTIRENO ENVELOPADO. ....	57
FIGURA 13: POLIESTIRENO NO REATOR. ....	57
FIGURA 14: MEDIDA DO DIÂMETRO DAS ESFERAS. ....	58
FIGURA 15: ESFERAS COM EFLUENTE. ....	59
FIGURA 16: PESO SECO ANTES DA FILTRAÇÃO. ....	59
FIGURA 17: PESO MOLHADO APÓS A FILTRAÇÃO. ....	60
FIGURA 18: VISUALIZAÇÃO DE UMA ESFERA DE POLIESTIRENO NO MEV. ....	60
FIGURA 19: CONTAINER UTILIZADO PARA TRANSPORTAR A ÁGUA DO SISTEMA. ....	62
FIGURA 20: CREPINA PARA DISTRIBUIÇÃO DO EFLUENTE DENTRO DO REATOR. ....	63
FIGURA 21: BYPASS NA ENTRADA DO SISTEMA. ....	64
FIGURA 22: FLUXOGRAMA DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA PARA OTIMIZAR O REATOR. ....	65
FIGURA 23: MEDIDAS DOS PESOS E DIÂMETROS DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO APÓS A FILTRAÇÃO. ....	74
FIGURA 24: MEDIDAS DOS PESOS E DIÂMETROS DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO APÓS SECAGEM AO SOL. ....	74
FIGURA 25: GRÁFICO DE PARETO SOBRE REMOÇÃO DE COR. ....	76
FIGURA 26: GRÁFICO DE PARETO, REMOÇÃO DE TURBIDEZ. ....	77
FIGURA 27: REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ EM FUNÇÃO DA VAZÃO E TAMANHO DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO. ....	78
FIGURA 28: IMAGENS DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO LIMPA, AMPLIADAS 20 E 100 VEZES. ....	81
FIGURA 29: IMAGENS DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO LIMPA, AMPLIADA 1000 VEZES. ....	82
FIGURA 30: IMAGENS DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO SUJAS, AMPLIADAS 20 E 100 VEZES. ....	82
FIGURA 31: IMAGENS DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO SUJAS, AMPLIADA 500 VEZES. ....	83
FIGURA 32: IMAGENS DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO SUJAS, AMPLIADA 1000 VEZES. ....	83

FIGURA 33: IMAGENS DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO DEPOIS DA RETROLAVAGEM, AMPLIADA 20 E 100 VEZES.....	84
FIGURA 34: IMAGENS DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO DEPOIS DA RETROLAVAGEM, AMPLIADA 1000 VEZES.....	84
FIGURA 35: MÉDIA DAS VAZÕES DA ALIMENTAÇÃO E DAS SAÍDAS DOS TRÊS REATORES.....	86
FIGURA 36: REMOÇÃO DA COR DO EFLUENTE TRATADO QUANDO O REATOR TRABALHOU EM SÉRIE E PARALELO.....	88
FIGURA 37: REMOÇÃO DA TURBIDEZ DO EFLUENTE TRATADO QUANDO O REATOR TRABALHOU EM SÉRIE E PARALELO.....	89
FIGURA 38: REMOÇÃO DE DQO DO EFLUENTE TRATADO QUANDO O REATOR TRABALHOU EM SÉRIE E PARALELO.....	91
FIGURA 39: REMOÇÃO DE E. COLI DO EFLUENTE TRATADO QUANDO O REATOR TRABALHOU EM SÉRIE E PARALELO.....	92
FIGURA 40: PERCENTUAL DE REMOÇÃO DE COR, TURBIDEZ, DQO E NÚMERO DE LOG DE E. COLI.....	94
FIGURA 41: CORRELAÇÃO ENTRE A VAZÃO DE ENTRADA VERSUS REMOÇÃO DE COR.....	95
FIGURA 42: CORRELAÇÃO ENTRE A VAZÃO DE ENTRADA VERSUS REMOÇÃO DE TURBIDEZ.....	95
FIGURA 43: CORRELAÇÃO ENTRE A VAZÃO DE ENTRADA VERSUS REMOÇÃO DE DQO.....	96
FIGURA 44: CORRELAÇÃO ENTRE A VAZÃO DE ENTRADA VERSUS REMOÇÃO DE E. COLI.....	96
FIGURA 45: VARIAÇÃO DE PH POR HORA TRABALHADA NOS REATORES.....	97
FIGURA 46: VARIAÇÃO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA POR HORA TRABALHADA NOS REATORES.....	99
FIGURA 47: VARIAÇÃO DE AMÔNIA POR HORA TRABALHADA NOS REATORES.....	101
FIGURA 48: VARIAÇÃO DE NITRITO POR HORA TRABALHADA NOS REATORES.....	103
FIGURA 49: VARIAÇÃO DE NITRATO POR HORA TRABALHADA NOS REATORES.....	105
FIGURA 50: VARIAÇÃO DE FÓSFORO POR HORA TRABALHADA NOS REATORES.....	106
FIGURA 51: COMPARAÇÃO ENTRE O PERCENTUAL DE REMOÇÃO DE COR, TURBIDEZ, E. COLI E DQO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA VAZÃO E TAMANHO DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO.....	108
FIGURA 52: COMPARAÇÃO ÁGUA DA ALIMENTAÇÃO E TRATADA COM ESFERAS DE PS DE 5 MM.....	109
FIGURA 53: COMPARAÇÃO ÁGUA DA ALIMENTAÇÃO E TRATADA COM ESFERAS DE PS DE 2 MM.....	109
FIGURA 54: PERCENTUAL DE REMOÇÃO DE COR A CADA HORA DE OPERAÇÃO DO REATOR.....	110
FIGURA 55: PERCENTUAL DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ A CADA HORA DE OPERAÇÃO DO REATOR.....	111
FIGURA 56: PERCENTUAL DE REMOÇÃO DE E. COLI A CADA HORA DE OPERAÇÃO DO REATOR.....	112
FIGURA 57: PERCENTUAL DE REMOÇÃO DE DQO A CADA HORA DE OPERAÇÃO DO REATOR.....	114
FIGURA 58: VARIAÇÃO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA A CADA HORA DE OPERAÇÃO DO REATOR.....	115
FIGURA 59: VARIAÇÃO DE PH A CADA HORA DE OPERAÇÃO DO REATOR.....	116
FIGURA 60: VARIAÇÃO DE AMÔNIA, NITRITO E NITRATO A CADA HORA DE OPERAÇÃO DO REATOR.....	117
FIGURA 61: VARIAÇÃO DE FÓSFORO TOTAL A CADA HORA DE OPERAÇÃO DO REATOR.....	119
FIGURA 62: VARIAÇÃO DO PH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA NO MOMENTO DA RETROLAVAGEM.....	120

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: MATRIZ DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	66
TABELA 2: PARÂMETROS E MÉTODOS USADOS NAS ANÁLISES DOS EFLUENTES. ....	69
TABELA 3: ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS PESOS E DIÂMETROS DAS ESFERAS APÓS O PROCESSO DE FILTRAÇÃO.....	75
TABELA 4: VALORES DOS PESOS DAS ESFERAS DE PS USADAS NOS TRÊS REATORES. ....	75
TABELA 5: ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS VARIÁVEIS VAZÃO E TAMANHO DA ESFERA NA REMOÇÃO DE COR.....	79
TABELA 6: ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS VARIÁVEIS VAZÃO E TAMANHO DA ESFERA NA REMOÇÃO DE TURBIDEZ.....	79
TABELA 7: COMPARAÇÃO ENTRE O PERCENTUAL DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ NOS TRÊS REATORES QUANDO OPERAVAM EM PARALELO.....	80
TABELA 8: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PERSON ENTRE AMÔNIA, NITRITO E NITRATO. ....	118
TABELA 9: TEMPO MÉDIO PARA ESTABILIZAÇÃO DO PH, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E VOLUME DE ÁGUA UTILIZADO PARA A RETROLAVAGEM. ....	121

## **LISTA DE QUADRO**

QUADRO 1: TIPOS DE POLIESTIRENO ENCONTRADO COMERCIALMENTE. ....	46
QUADRO 2: CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS E SUAS FINALIDADES. ....	72

## **LISTA DE SIGLAS**

**CE** – Condutividade elétrica

**CONAMA** – Conselho Nacional de Meio Ambiente

**DBO** - Demanda Bioquímica de Oxigênio

**DQO** – Demanda química de Oxigênio

**EMBRAPA** - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

**EPI** - Equipamento de Proteção Individual

**ETE** - Estações de Tratamento de Esgoto

**FUNASA** - Fundação Nacional da Saúde.

**LABDES** – Laboratório de Referência em Dessalinização

**MEV** - Microscopia de Varredura

**NAT** – Nitrogênio Amoniacal Total

**pH** - Potencial Hidrogeniônico.

**PS** - Poliestireno

**EPS** - O poliestireno expandido

**OMS** – Organização Mundial da Saúde

**PT** - Fósforo total.

**SABESP** - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

**SNIS** - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

**UFMG** – Universidade Federal de Campina Grande

# SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO .....	16
2.0 JUSTIFICATIVA .....	19
3.0 OBJETIVOS .....	22
3.1 Objetivo geral.....	22
3.2 Objetivos específicos.....	22
4.0 REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
4.1 Saneamento básico.....	23
4.2 Águas residuárias .....	25
4.3 Reúso de águas .....	26
4.4 Impactos causados pelo lançamento de esgoto sanitário.....	29
4.5 Parâmetros de qualidade da água para irrigação.....	30
4.5.1 Potencial hidrogeniônico (pH).....	31
4.5.2 Condutividade elétrica (CE).....	32
4.5.3 Cor .....	33
4.5.4 Turbidez.....	33
4.5.5 Fósforo total (PT) .....	34
4.5.6 Nitrogênio.....	35
4.5.7 Escherichia coli .....	36
4.5.8 Demanda química de oxigênio (DQO).....	37
4.5.9 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	37
4.6 Técnicas de tratamento de efluentes.....	38
4.7 Tratamento biológico de águas residuárias .....	43
4.8 Poliestireno e suas características .....	44
4.9 Tratamento de efluente usando esfera de Poliestireno .....	48
4.10 Destino final do poliestireno .....	49
5.0 METODOLOGIA.....	51
5.1 Tipo da pesquisa .....	51
5.2 Área de estudo.....	51
5.3 Etapas da pesquisa.....	53
5.4 Construção e funcionamento do sistema de tratamento de águas.....	53
5.5 Caracterização do leito filtrante .....	56
5.6 Tratamento das esferas de poliestireno.....	58
5.7 Alimentação do sistema.....	61
5.8 Otimização do sistema.....	64
5.9 Avaliação dos parâmetros de qualidade de água .....	68
5.10 Retrolavagem do sistema .....	70
5.11 Avaliação da qualidade das águas tratadas para fins de irrigação.....	71
6.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	73
6.1 Caracterização do poliestireno.....	73
6.2 Otimização das variáveis de entrada .....	76
6.3 Remoção de cor e turbidez nos reatores em paralelo .....	79
6.4 Análise qualitativa das esferas de poliestireno .....	81
6.5 Vazão na saída dos reatores.....	85
6.6 Bateladas para análise da configuração e vazão do reator .....	87
6.6.1 Cor .....	87
6.6.2 Turbidez.....	89
6.6.3 Demanda Química de Oxigênio.....	90

6.6.4 <i>Escherichia coli</i> .....	91
6.6.5 Potencial hidrogeniônico .....	97
6.6.6 Condutividade elétrica .....	98
6.6.7 Amônia .....	100
6.6.8 Nítrito.....	102
6.6.9 Nitrato.....	104
6.6.10 Fósforo total.....	106
6.6.11 Batelada para teste de tamanho das esferas e vazão de entrada.....	108
6.6.12 Bateladas com reator otimizado.....	110
6.6.13 Análise qualitativa da retrolavagem .....	119
7.0 CONCLUSÕES.....	122
8.0 PERSPECTIVAS.....	124
9.0 REFERÊNCIAS.....	125

## 1.0 INTRODUÇÃO

Em 2019, a população mundial era de 7,7 bilhões de pessoas, com tendência a aumentar em mais 2 bilhões, nas próximas quatro décadas. O Brasil apresentou uma população de pouco mais de 210 milhões, no mesmo ano (MARTINS e ARAÚJO, 2021). Este cenário contempla uma maior demanda por água nos setores industriais, comerciais, agrícolas e residenciais.

Nas últimas décadas, o volume de águas residuais aumentou drasticamente com a rápida urbanização no mundo. Diante disto, a falta de tratamento de esgoto pode ser considerada um dos maiores problemas ambientais, principalmente em países subdesenvolvidos. O saneamento básico e o acesso à água de qualidade são apontados, segundo Barboni e Rochetto (2014), como os principais desafios para se vencer a crise sanitária em que vive a humanidade.

A deterioração dos recursos hídricos é influenciada pelo grande avanço das atividades agrícolas, industriais bem como pelo crescimento de áreas urbanas, de modo que, as principais fontes de poluição dessas águas estão atreladas ao lançamento de lixo industrial, doméstico e esgotos sem o devido tratamento. Esse cenário possibilita o desequilíbrio da biota aquática acelerando o processo de eutrofização do meio.

A presença de reservatórios hídricos, como açudes e lagos, corresponde à maneira mais eficaz para armazenar água nas pequenas e grandes cidades. Muitas cidades se desenvolveram graças à presença dessas águas, como por exemplo, a cidade de Campina Grande-PB, que cresceu em volta das margens do açude Velho. Com o passar dos anos, o desenvolvimento dessas cidades trouxe problemas de ordem sanitária principalmente para as comunidades mais carentes, bem como para as mais afastadas dos centros urbanos, como as comunidades rurais.

O aumento no volume dos resíduos gerados, bem como a falta de coleta e destino adequado, a coleta e tratamento dos efluentes são alguns dos muitos problemas vivenciados por essas áreas. A falta de políticas públicas voltadas para essas ações comprometem todos os anos a saúde de inúmeras pessoas que dependem desses serviços.

O Brasil ainda caminha a passos lentos no que concerne aos serviços de saneamento básico. Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento comprovam isto, uma vez que apenas 41,1% de todo o esgoto gerado no país recebe

algum tipo de tratamento. Esses indicadores são ainda mais drástico na região Nordeste (SNIS, 2019). 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).

A Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB), Lei nº 11.445/2007(atualizada pela Lei 14.026 de 15/07/2020) tem como princípio a universalização do acesso aos serviços, como por exemplo, a coleta e tratamento de esgoto de toda população. No entanto, a maioria das comunidades rurais, assim como pequenas cidades brasileiras, não possuem a coleta e o tratamento de seus efluentes, ferindo um direito fundamental à vida humana.

Os impactos ambientais e sociais da degradação da qualidade das águas têm reflexos econômicos, 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 (FUNASA, 2014). Dessa forma, se faz necessário mais investimentos no setor sanitário, principalmente em regiões menos favorecidas como áreas rurais e periféricas.

A situação socioeconômica brasileira faz com que sejam imprescindíveis os investimentos no desenvolvimento de tecnologias alternativas de baixo custo e boa eficiência para o tratamento das águas residuárias (SABEI e BASSETTI, 2013). O uso dessas tecnologias possibilita a preservação ambiental e cuidado com a saúde das famílias, uma alternativa sustentável para reúso de águas potencialmente poluidoras no cultivo de suas lavouras.

Não existe um sistema padrão de tratamento para ser utilizado. Vários fatores influenciarão na escolha da tecnologia, como por exemplo: área disponível, características do esgoto, qualidade desejada para o efluente, além do custo de implantação e manutenção. Além desses fatores deve-se levar em consideração a necessidade do usuário, o tempo de tratamento, o consumo de energia e o volume de efluente tratado ao final do processo.

Considerando que os recursos hídricos são escassos principalmente em regiões semiáridas, torna-se fundamental a adoção de alternativas simples de tratamento que possibilitem o reúso de águas, o que por sua vez, impliquem em benefícios sociais, econômicos e ambientais. Essa prática proporciona a reutilização de uma água que seria

descartada, além de diminuir o consumo de água potável na irrigação de diversas culturas.

Essas águas correspondem a uma boa fonte hídrica e nutricional para as plantas, estando disponíveis durante todo o ano. Suas características as tornam um recurso valioso, principalmente em regiões com baixa disponibilidade hídrica, como no Nordeste do Brasil, e em cultivos com alta exigência nutricional (REIS, 2020).

Tecnologias especializadas na eliminação de patógenos podem proporcionar a utilização dessas águas no reúso agrícola, diminuindo a utilização de fertilizantes e água potável. O lançamento de efluentes em corpos hídricos e no solo, além de provocar os impactos já conhecidos, também pode ser analisado pelo viés econômico, uma vez que sua correta utilização irá gerar renda por meio do reúso na agricultura.

Sendo assim, **a questão problema envolvendo a pesquisa é:** as águas residuárias que comumente contaminam os corpos hídricos das cidades podem ser utilizadas no meio agrícola após tratamento utilizando um sistema de filtros contendo poliestireno?

Diante da questão problema explicitada, **parte-se da premissa** que o tratamento desses efluentes utilizando essa tecnologia de baixo custo e fácil operação pode proporcionar o reúso dessas águas, culminando em uma produção agrícola mais sustentável, minimizando a poluição dos solos e lençol freático, bem como garantindo maior segurança sanitária local.

## 2.0 JUSTIFICATIVA

O estudo se justifica diante da falta de tratamento dos efluentes que contaminam os mais diversos corpos de água, principalmente em pequenas cidades onde a coleta e tratamento de efluentes são precárias ou inexistentes. Esses corpos hídricos na maioria das vezes compreendem uma fonte hídrica com potencial para abastecimento público após passar por um tratamento avançado, ou mesmo, para o reúso de diversos fins, como por exemplo, na irrigação de múltiplas culturas.

A escolha do tema se deu a partir da sugestão de lançar um olhar criterioso sobre a área de estudo, tendo em vista que se mostra como um caso emblemático de regiões que sofrem com a falta de tratamento de seus efluentes.

Segundo Andrade (2017), os corpos d'água superficiais constituem a maneira mais acessível de conseguir água para abastecer uma determinada região. Porém, muitos desses mananciais estão sujeitos às ações antrópicas, como lançamento inadequado de efluentes, causando desequilíbrio na biota aquática e acelerando o processo de eutrofização do meio.

A crise hídrica que a região Nordeste do Brasil vem sofrendo nos últimos anos tem intensificado a busca por fontes alternativas de água, sendo que o reúso de águas residuárias vem ganhando cada vez mais espaço como ferramenta mitigadora para as áreas agrícolas. Essas águas possuem nutrientes necessários ao solo e às diversas culturas, além disso, sua utilização possibilita a diminuição do uso de água potável favorecendo a redução da demanda sobre os mananciais. No entanto, a utilização do esgoto *in natura* acarreta diversos problemas tanto de ordem ambiental como de saúde pública.

O esgoto doméstico é constituído por aproximadamente 99,9% de água, de modo que a fração restante inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos ou dissolvidos, e microrganismos (NETO et al., 2015). Apesar de pequeno, esse número (0,1%) corresponde à causa de inúmeros problemas ambientais. A utilização de tecnologia de tratamento para esses efluentes é de vital importância para a saúde pública, bem como para combater a poluição das águas superficiais e subterrâneas.

Nas áreas rurais, o problema da disposição inadequada do esgoto doméstico é ainda mais grave, pois estas localidades não dispõem de infraestrutura adequada para tratamento dessas águas. Diante do afastamento das áreas rurais dos grandes centros urbanos onde se encontram as estações de tratamento de esgoto, faz-se necessária a

utilização de métodos alternativos para a realização desse tratamento. Um dos grandes problemas da má destinação desses esgotos é a contaminação dos lençóis freáticos existentes na propriedade e que, muitas vezes, é a principal fonte de água para diversas famílias da região.

Segundo Silva et al. (2014), 64,1% dos domicílios brasileiros localizados na área urbana, possuem acesso à rede de esgotamento, entretanto, 75% dos localizados na área rural adotam sistemas inadequados, pois as tecnologias convencionais de coleta, transporte e tratamento de efluentes domésticos da área urbana, são inviáveis. Tratamentos alternativos podem trazer soluções para comunidades que não apresentam condições financeiras para instalação de um sistema de tratamento de esgoto convencional (SILVA et al., 2021).

O emprego de tecnologias simples e de baixo custo para tratar efluentes viabiliza o reúso dessas águas, minimizando os impactos sobre os recursos hídricos. Tecnologias simples como filtros multimeios, filtros orgânicos e processos por separação com membranas vêm sendo utilizadas para tratar efluentes, principalmente os advindos da indústria. A filtração pode ser considerada um processo rápido e barato, quando utilizado materiais acessíveis e de fácil manipulação.

Os materiais comumente utilizados como elemento filtrante são: areia, antracito e carvão. Eles são utilizados devido ao custo relativamente baixo, bem como a disponibilidade em grande escala. Além desses materiais, existem outros que podem ser utilizados com alternativa de leito filtrante, como, por exemplo: pedra pomes, esferas de vidro, casca de arroz e milho, cortes de bambu, além de polímeros como plástico.

A utilização de polímeros vem sendo estudado como alternativa, pois são leves e fácil de serem encontrados no comércio como, o poliestireno, conhecido no Brasil por isopor. Segundo Sokolovic (2009), partículas de baixa densidade produzem uma baixa perda de carga e um longo ciclo de filtração.

Alguns trabalhos que utilizaram o poliestireno como meio filtrante obtiveram resultados significativos quanto aos seus objetivos, como HARWANTO et al. (2011), que observaram a eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal total (NAT) em filtros de areia, poliestireno e *Kaldnes*. As taxas de remoção de NAT aumentaram com o aumento do carregamento de NAT para todos os filtros. O poliestireno foi o meio filtrante mais econômico para uma eficiente remoção de NAT.

Já SCHÖNTAG (2015), comparou a eficiência de um filtro rápido descendente utilizando esferas de poliestireno, com um de areia e antracito. O filtro de areia/antracito atingiu maiores carreiras de filtração, porém a qualidade da água do filtro de poliestireno apresentou qualidade similar ao de areia e antracito. Além disso, o filtro contendo poliestireno apresentou maior economia na retrolavagem.

Oliveira et al., (2006), realizaram um experimento para investigar a influência da macrófita *Typha spp* em alagados construídos. O estudo utilizou biorreatores, obtendo resultados comparativos entre dois tipos de meio suporte: pedrisco e poliestireno expandido (isopor) reciclado e biorreator sem a macrófita.

Como resultados obtiveram-se, remoção de DBO e amônia no biorreator com isopor e planta de 94,01% e 97,80%, respectivamente, e para o biorreator com isopor, mas sem planta, a redução foi de 85,74% e 81,47%. Sendo assim, o poliestireno é substrato viável e eficaz para remoção de carga orgânica e amônia (AVELINO, 2012).

Nessa perspectiva, um material com baixa massa específica e baixo custo, como as esferas de poliestireno, pode ser utilizado como leito filtrante para produzir água de boa qualidade em áreas rurais. Por se tratar de um material leve, ele exige menor velocidade da água durante o processo de retrolavagem, representando assim uma economia de água no processo (SCHÖNTAG, 2015). Segundo Nikoonahad et al. (2017), o poliestireno possui elevada capacidade de filtração além de não precisar de grandes áreas de terras para construção de estações de tratamento.

Como vantagens da utilização desse sistema alternativo de tratamento de efluentes tem:

- Não são utilizados componentes químicos (como coagulação/floculação), o que barateia o processo;
- Baixo custo, pois é composto basicamente de tubulações de PVC, caixa de água e poliestireno como elemento filtrante;
- Facilidade de manuseio;
- Baixo peso, o que facilita a limpeza durante a retrolavagem;
- Não necessita de grandes espaços para instalação, como as estações de tratamento de esgoto (ETE) convencionais,
- Utilização de bombas de menor potência, proporcionando assim economia de energia elétrica.

## **3.0 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo geral**

Desenvolver um sistema para tratamento de águas residuárias composto por um leito de poliestireno e avaliar o seu desempenho para fins agrícola.

### **3.2 Objetivos específicos**

- ❖ Caracterizar o leito de poliestireno em função dos diâmetros e pesos das esferas de poliestireno, antes e após os testes em meio aquoso;
- ❖ Avaliar o desempenho da configuração do sistema de reatores em série e em paralelo para diferentes granulometrias de poliestireno no tratamento de amostras de águas da lagoa da Universidade Federal de Campina Grande;
- ❖ Avaliar os parâmetros físicos-químicos e microbiológicos dos filtrados coletados sob diferentes condições de operações, em termos de vazão, tamanho das esferas de poliestireno e configurações dos sistemas;
- ❖ Avaliar o efeito da retrolavagem do sistema de reatores em função do volume de água consumida, tempo de operação em função do pH e condutividade elétrica;
- ❖ Averiguar o nível da qualidade das águas tratadas pelo sistema para fins de irrigação agrícola em função da Resolução 357/2005 do CONAMA.

## **4.0 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **4.1 Saneamento básico**

O saneamento básico é fundamental para a qualidade de vida, sua falta ocasiona poluição dos recursos hídricos, solo e ar, prejudica a saúde da população, principalmente de idosos e crianças. Os riscos para a saúde gerados pela precariedade dos serviços de saneamento estão relacionados principalmente com a ingestão de água e alimentos contaminados (SILVA et al., 2021). A garantia do acesso universal dos serviços de saneamento básico no Brasil ainda é um grande desafio.

O déficit nesse setor é elevado, principalmente no que se refere aos serviços de esgotamento e tratamento de esgotos, com carência mais evidente nas áreas periféricas dos centros urbanos e nas zonas rurais, onde está concentrada a população mais pobre (BRAGA et al., 2018). Esse cenário de desigualdade de acesso tem recortes relacionados à classe social, ao gênero e à condição étnico-racial (COELHO et al., 2019).

Segundo o Censo de 2010, metade da população brasileira que vive em condições de extrema pobreza moram nas áreas rurais, correspondendo a 7,6 milhões. O saneamento em áreas rurais tem como objetivo promover a salubridade ambiental nessas áreas, revertendo à degradação do meio ambiente, em especial o comprometimento dos mananciais de água doce, decorrente da disposição inadequada de esgotos sanitários (LARSEN, 2010).

Segundo Luna 2013, a incidência de doenças de veiculação hídrica em área rural está associada à má qualidade da água consumida por grande parte da população bem como a precariedade ou inexistência de estruturas de tratamento de esgoto. Além do viés ambiental, a garantia dos serviços de saneamento garante melhores condições de saúde para as pessoas, evitando a contaminação e proliferação de doenças. O saneamento básico tem como finalidade proteger e melhorar as condições de vida da população (SILVA et al., 2021).

Devido à precariedade das condições sanitárias a população fica susceptível a inúmeras doenças oriundas da ingestão de alimentos e de água contaminada pelo esgoto doméstico. Além do controle das águas e alimentos ingeridos, o controle sanitário das

águas reaproveitadas para irrigação também é de suma importância para as condições de saúde dessas comunidades.

O Brasil ainda se encontra distante da universalização dos serviços de saneamento e atrasado quando comparado com o cenário internacional (FERREIRA e GARCIA, 2017). Com relação aos serviços de esgotamento sanitário, menos da metade das capitais apresentava cobertura superior a 90%, havendo, em todas as regiões, capitais com cobertura inferior a 75% do serviço, como Boa Vista (56,7%), Fortaleza (49,7%), Vitória (71,1%), Florianópolis (60,2%) e Cuiabá (51,4%) segundo Oliveira et al., 2018.

Em 2017, 16,5% de brasileiros ainda não tinham acesso à rede de abastecimento de água, 47,6% não contavam com rede de coleta de esgotos (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, 2019a) e 8,3% não dispunham de qualquer tipo de coleta domiciliar de resíduos sólidos (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, 2019b).

O Plano Nacional de Saneamento Básico previa universalizar o saneamento até o ano de 2033. Porém, haverá dificuldade para atingir essa universalização até o ano estimulado, devendo atrasar por no mínimo 20 anos (RESENDE et al., 2018) mesmo diante dos altos investimentos no setor. Prova disto são os altos recursos empregados em Saneamento Rural, entre os anos de 2007 e 2014, valores estes que chegaram à ordem de R\$ 794,5 milhões, em média R\$ 99,32 milhões/ano (FUNASA, 2016).

No Brasil, a distribuição adequada do saneamento perpassa entraves políticos e governamentais a fim de atender toda a população (BRITTO e REZENDE, 2017). Infelizmente esses entraves políticos acabam gerando ônus para a população, principalmente as mais carentes. Paiva e Souza (2018) associam às condições precárias de saneamento as interações por doenças de veiculação hídrica no Brasil.

Diante do exposto, se faz necessário o incentivo e ampliação dos serviços de saneamento básicos no Brasil que estão previstos na Política Nacional de Saneamento Básico, Lei nº 11.445/2007. O cumprimento do princípio da universalização garante uma melhor qualidade de vida para a população, além de reduzir a mortalidade infantil. Porém, as ações de saneamento precisam se adequar ao lugar onde serão realizadas, levando em consideração as características socioculturais, econômicas e ambientais do local, buscando tecnologias alternativas que sejam apropriadas a cada tipo de comunidade (SILVA, et al., 2021).

## 4.2 Águas residuárias

Segundo a Resolução 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.

O aumento no volume de águas residuárias está diretamente relacionado ao crescimento populacional devido à crescente demanda por água que essas pessoas utilizam no dia a dia. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística demonstram que a população brasileira aumentou em aproximadamente 7,8% nos últimos 19 anos, esse cenário proporciona aumento no consumo de água pela população, bem como intensifica o desenvolvimento de atividades industriais e agrícolas (SATANI et al., 2019).

O consumo de água tem aumentado nas últimas décadas, seja para os consumos humanos, industriais ou para os agrícolas, decorrentes do crescimento populacional. Devido a esse cenário de escassez principalmente em regiões áridas, técnicas de reúso de águas vem ganhando destaque como alternativa para mitigar esse panorama.

O Brasil ainda apresenta muitas localidades com precariedade nos serviços de saneamento básico, ferindo assim um princípio fundamental presente na Lei n.11.445/2007. Segundo esse princípio da universalização do saneamento básico, o qual inclui o tratamento de efluente, deve ser contínuo e suficiente para atender as necessidades individuais e coletivas de toda população independente de classe social, ou região do país.

A reutilização dessas águas é uma alternativa viável para a preservação e manutenção dos recursos hídricos, que após passar por um tratamento, pode ser utilizada em atividades específicas. Essas águas podem ser usadas no: Reúso indireto não planejado da água, reúso indireto planejado da água e reúso direto (BRASIL, 2005).

Porém, o tratamento dessas águas deve ser rigorosamente efetuado uma vez que podem causar problemas às culturas irrigadas e ao solo devido à sua qualidade química como excesso de sais, metais pesados, nutrientes e compostos orgânicos tóxicos (REIS,

2020). A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda um valor de máximo de  $10^3$  UFC/100 mL<sup>-1</sup> de coliformes termotolerantes para água destinada à irrigação de produtos frescos, garantindo assim a segurança do alimento (WHO, 2006).

Os materiais mais comuns encontrados em águas residuais domiciliares, que podem causar danos para os cursos de águas naturais ou criar problemas para a saúde humana são: DBO; nitrogênio (N); fósforo (P); sólidos suspensos e coliformes. Além desses parâmetros, elevadas concentrações de íons podem elevar a condutividade elétrica dessas águas a ponto de provocar danos ao solo e no desenvolvimento das culturas irrigadas.

A qualidade microbiana da água usada na irrigação é de suma importância visto que a proliferação de microrganismos nessas águas pode favorecer a introdução desses patógenos em produtos durante a pré e pós-colheita, como hortaliças, plantas que emitem ramos rastejantes ou que os frutos se desenvolvam próximo ao solo.

O tratamento de águas residuárias tem assumido papel importante no que se refere aos aspectos de saúde pública uma vez que grande parte das doenças que assolam os países em desenvolvimento é proveniente da água de má qualidade. Muitas dessas doenças são causadas por agentes patogênicos comuns nessas águas como bactérias, parasitas e vírus.

Investir no tratamento de águas residuais é justificado não apenas pelos benefícios ambientais e de saúde, mas também devido a seus impactos positivos no desenvolvimento socioeconômico. A reutilização dessas águas vem crescendo a cada ano, principalmente devido ao potencial econômico gerado. Reutilizar uma água que até então seria descartada por falta de qualidade sem dúvida é um diferencial para indústrias que gastam muita água em sua produção.

### **4.3 Reúso de águas**

A irrigação com águas residuárias ainda é uma prática que gera desconfiança latente por boa parte da população, principalmente em hortaliças devido ao potencial de contaminação por organismos patogênicos. O reúso de águas residuárias deve ser incentivado, pois representa uma fonte de suprimento de água principalmente no semiárido brasileiro. No entanto, essas águas devem atender as legislações ambientais para fins de reúso agrícola, florestal, urbano e industrial (BEZERRA et al., 2021).

No mundo o reúso de efluentes vem crescendo contribuindo para a sustentabilidade ambiental. Atualmente estima-se que 10% da população mundial consoma 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).

No entanto o reúso dessas águas no Brasil ainda não possui um arcabouço legislativo que assegure a sua aplicação (JESUS et al., 2020). Devido à falta de uma diretriz específica que contemple todas as classes de reúso isso pode limitar o desenvolvimento das práticas de reutilização dessas águas (HESPANHOL e MACHADO, 2018). Diante disso, ainda existe a concepção de que a irrigação feita com efluentes tratada seja nocivo tanto ao meio ambiente como as culturas irrigadas.

Como consequências positivas dessa prática destacam-se: melhoria da qualidade de vida e das condições socioeconômicas das populações do meio rural, aumento da produtividade agrícola e recuperação de áreas degradadas ou improdutivas, conservação e preservação dos recursos hídricos, evitando a descarga de esgoto bruto nos mananciais (XAVIER et al., 2014).

O esgoto doméstico é constituído de 1% de coloides suspensos e dissolvidos, orgânicos e inorgânicos, incluindo macronutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio. Sendo assim a utilização dessas águas na irrigação possibilita uma redução na utilização de fertilizantes minerais que muitas vezes acabam prejudicando o solo.

Com a redução da oferta hídrica para os mais diversos fins, advindos tanto da escassez como do elevado consumo proveniente da prática da irrigação e o consumo humano direto, o estudo de técnicas mais racionais de uso da água tem sido fato cada dia mais constante. Segundo a RESOLUÇÃO Nº. 54/ 2005, o reúso direto não potável de água abrange as seguintes modalidades:

I - reúso para fins urbanos: utilização de água de reúso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações, combate a incêndio, dentro da área urbana;

II - reúso para fins agrícolas e florestais: aplicação de água de reúso para produção agrícola e cultivo de florestas plantadas;

III - reúso para fins ambientais: utilização de água de reúso para implantação de projetos de recuperação do meio ambiente;

IV - reúso para fins industriais: utilização de água de reúso em processos, atividades e operações industriais; e,

V - reúso na aquicultura: utilização de água de reúso para a criação de animais ou cultivo de vegetais aquáticos.

O reúso planejado de águas residuárias na agricultura busca atenuar o problema da escassez hídrica principalmente no semiárido. Essa prática surge como uma alternativa para os agricultores que não contam com uma fonte hídrica que supra as necessidades da sua produção. No entanto, as águas residuárias tratadas e destinadas ao uso agrícola devem ser avaliadas sob os aspectos físico-químicos, bem como os aspectos sanitários que criam graves problemas de saúde pública.

A qualidade dos efluentes está relacionada às impurezas incorporadas à água em decorrência do uso à qual a água foi submetida. Essa qualidade também varia com base no clima, a situação social, econômica e os hábitos da população (VON SPERLING, 2017). O uso agrícola de efluente contribui para o saneamento ambiental, pois a deposição de águas residuárias de forma inadequada em corpos d'água propicia uma série de doenças de veiculação hídrica (ALVES et al., 2018).

O aumento da população mundial exigiu a modernização das técnicas agrícolas, provocando um grande aumento no consumo de água e um crescente desequilíbrio ecológico (BEZERRA et al., 2019). Dados da UNESCO 2016 (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura) apontam que aproximadamente 70% de toda a água potável disponível no mundo são utilizadas para irrigação.

As baixas precipitações pluviométricas e a elevada evapotranspiração são características da região semiárida do Nordeste Brasileiro, essas variáveis fazem da água um fator limitante para várias atividades, dentre elas, a agricultura irrigada. Para minimizar este cenário o uso de fontes alternativas de água, bem como o reúso de águas residuárias vem sendo utilizada na produção agrícola de diversas culturas como frutíferas e forrageiras como nos trabalhos de PINHEIRO et al., 2017; SOUZA et al., 2018 e ARAÚJO et al., 2018; Azevedo et al., 2019 e Bezerra et al., 2019.

Os efluentes podem ser vistos como alternativa para uso na agricultura, uma vez que sua utilização libera mais água de melhor qualidade para fins mais nobres, como o consumo humano e/ou dessedentação de animais (NASCIMENTO e FILHO, 2015). A utilização de efluente tratado na irrigação provoca diversos efeitos nas culturas

irrigadas, como alteração nas concentrações de nutrientes, no rendimento e na qualidade dessas culturas (FLORENCIO et al., 2006).

Sendo assim, essa prática tem papel fundamental no planejamento e na gestão sustentável dos recursos hídricos, uma vez que lança mão de efluentes potencialmente poluidores, que poderiam contaminar o ambiente, que serão utilizados nas mais diversas esferas, desde a econômica até a ecológica.

#### **4.4 Impactos causados pelo lançamento de esgoto sanitário**

Segundo Conceição et al. (2020), o principal fator antrópico que influi na alteração da qualidade da água é o esgotamento sanitário inadequado, atrelado ao crescimento populacional exacerbado, a carência de saneamento básico e o uso e ocupação desordenado do solo.

O Brasil tem adotado práticas de reúso cada vez mais constante, principalmente na agricultura, piscicultura e uso animal (FERREIRA et al., 2020). A falta de saneamento básico, especialmente os baixos índices de tratamento de esgoto, é um dos maiores problemas ambientais atualmente. O despejo de efluentes sem o devido tratamento, seja ele no solo ou corpos hídricos, implica à população a perda de qualidade de vida, problemas de saúde e a dificuldade em usufruir de um espaço comum de qualidade.

O sistema de coleta e tratamento de esgoto além de trazer benefícios diretos para a população, também estimula o setor da construção civil, através da geração de emprego e renda. Dentre os principais impactos causados pelo lançamento de esgotos sem tratamento, podem ser citados:

- O decaimento do oxigênio dissolvido nos cursos d'água, devido à estabilização da matéria orgânica realizada pelas bactérias decompositoras, as quais utilizam o oxigênio no meio líquido para a sua respiração. Esse decaimento pode ser analisado em campo por meio de um oxímetro digital ou em laboratório por meio do método de Winkler. Concomitantemente a Análise de DBO deve ser realizada para verificar a matéria orgânica presente nessas águas;
- Incorporação no curso d'água de microrganismos transmissores de doenças com cólera, amebíase, giardíase e disenteria. Essa contaminação pode afetar alguns dos usos preponderantes a ele destinados, tais como abastecimento de água potável, irrigação e balneabilidade. A presença desses organismos na água de

reúso compreende o maior obstáculo para a aceitação da população no que tange o consumo de produtos irrigados com essas águas. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), classifica as águas segundo seus usos preponderantes. Em todas as classes o parâmetro de controle microbiológico é a concentração de bactérias coliformes termotolerantes;

- Eutrofização das águas superficiais devido às altas concentrações, de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, provocando o enriquecimento do meio. Esse fenômeno vem sendo recorrente nos mais diversos corpos hídricos, principalmente os pertencentes nas áreas urbanas devido ao lançamento de efluentes sem nenhum tipo de tratamento;
- Potencialidade de salinidade do solo por meio do elevado teor de sais contidos nessas águas. Os impactos da salinização dos solos afetam a dinâmica de organização espacial das populações, promovendo redução das produções agrícola, deslocamentos populacionais, colocando em evidência a segurança alimentar e a economia das comunidades (CASTRO e SANTOS, 2019).

O lançamento de efluentes em corpos hídricos e no solo, além dos inúmeros impactos já conhecidos, também pode ser analisado pelo viés econômico, uma vez que sua correta utilização irá gerar renda e insumos para o produtor rural. De modo geral, a carência desses serviços priva as pessoas de uma vida digna, com acesso à educação e ao trabalho, à obtenção de bens materiais básicos para a manutenção da vida e da higiene adequada.

Em virtude disso, o reúso dessas águas apresenta vantagens, do ponto de vista econômico, social e ambiental (ANDRADE, 2018), 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 (SANTOS, 2014).

#### **4.5 Parâmetros de qualidade da água para irrigação**

Segundo Ayers & Westcot (1976), a qualidade da água para irrigação está relacionada aos seus efeitos prejudiciais aos solos e às culturas irrigadas, necessitando muitas vezes de técnicas de manejo para controlar ou compensar os problemas associados à sua utilização.

A qualidade da água pode ser representada através de diversos parâmetros, que traduzem as suas principais características físicas, químicas e biológicas. A análise desses parâmetros dá subsídio para sua utilização nos mais diversos setores, entre eles o agrícola. Vale salientar que para cada destinação dessas águas, existe uma legislação que define os padrões mínimos exigidos.

Em virtude disso se faz necessário conhecer qual legislação estabelece os parâmetros e os valores permissíveis para a água a ser utilizada. No Brasil existe um conjunto de instrumentos legais e normativos que estabelece determinadas condições para a qualidade das águas como:

- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), com sua Resolução N° 357 de 2005 dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento;
- Resolução N° 54 de 2005 critérios gerais para reúso de água potável;
- Resolução CONAMA N° 430 de 2011 estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências, complementa e altera a Resolução N° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA;
- *Resolução* CONAMA N° 274 estabelece os padrões de qualidade da água para balneabilidade;
- Portaria do Ministério da Saúde N° 2914 DE 12/12/2011 que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Segundo Almeida 2010, os parâmetros a serem considerados na avaliação da qualidade da água para irrigação devem contemplar o conjunto de características físicas, químicas e biológicas que definem sua adequação ou não para o uso. Obedecer aos parâmetros de qualidade de água para irrigação garante o desenvolvimento das culturas, além da conservação do solo e da qualidade de vida da população. Sendo assim podemos elencar os seguintes parâmetros como indicadores de qualidade da água para irrigação.

#### ***4.5.1 Potencial hidrogeniônico (pH)***

Parâmetro que indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade de um meio qualquer. Sendo atribuída ao valor sete a neutralidade e aos valores abaixo a acidez e a

cima a alcalinidade. Sua alteração está relacionada à dissolução de rochas, a fotossíntese e despejos domésticos e industriais são fontes que alteram o pH.

O controle desse parâmetro é um fator crítico no tratamento de águas residuárias, pois reduz o uso de produtos químicos, aumentando a rentabilidade do processo (MARTINS e MARTINS, 2014). Valores extremos de pH, seja ele ácido ou base, podem comprometer significativamente o desenvolvimento da biota aquática como por exemplo as bactérias que participam de processos biológicos.

O pH é um parâmetro importante para o controle do crescimento de microrganismos pois tem grande influência nas reações bioquímicas ocasionadas entre esgoto, solo e microrganismos (VENSKE, 2017). No tratamento de esgotos, as bactérias operam de forma mais eficiente em valores de pH entre 6,8-7,2 (MARTINS & MARTINS, 2014).

O tipo de tratamento utilizado é outro fator primordial que pode alterar os valores de pH como por exemplo a adição produtos químicos como cloro, sulfato de alumínio e demais coagulantes. Como exemplo desse comportamento podemos citar o trabalho de Souza e Chagas (2020) que estudou diferentes tipos de coagulantes no tratamento de efluentes, modo que o sulfato de alumínio reduziu o pH do efluente para 4,12, estando esse valor fora do recomendado pela Resolução CONAMA 357.

Almeida (2010) confirma que um pH ideal para águas de irrigação está na faixa entre 6,5 e 8,4, valores acima ou abaixo indicam anormalidade na qualidade da água ou de presença de íons tóxicos podendo incidir negativamente na população microbiana do solo e danos ao sistema radicular.

#### ***4.5.2 Condutividade elétrica (CE)***

Indica a capacidade da água em conduzir corrente elétrica sendo, estando relacionado com a presença de íons dissolvidos na água. Quanto maior a quantidade de íons dissolvidos, maior será a condutividade elétrica. Altos níveis de sais nas águas de irrigação prejudicam o desenvolvimento das culturas e causam a obstrução dos sistemas de irrigação.

Almeida (2010) relata que se este parâmetro for elevado pode provocar alterações na concentração de sais no solo, o que prejudica o desenvolvimento das hortaliças, e conseqüentemente a produtividade. Águas que apresentam alta CE,

provavelmente contém grande quantidade de nutrientes dissolvidos, esses sendo oriundos de fontes antrópicas como, por exemplo, o lançamento de efluentes. Sendo assim, a CE é um fator determinante para o reúso, devido à sua potencialidade de salinizar o solo.

Esse parâmetro é de suma importância para as águas de irrigação, pois valores elevados de sais nessas águas podem causar danos às culturas irrigadas, bem como ao solo. Apesar da resolução CONAMA 357 não estabelecer limites para a CE, a mesma deve ser levada em consideração em estudos contendo águas residuárias uma vez que essas apresentam uma concentração significativa de sais dissolvidos. Segundo Ayers e Westcot (1976), as águas que apresentam condutividade elétrica menor que  $700 \mu\text{S cm}^{-1}$  podem ser utilizadas para irrigação sem nenhuma restrição de uso.

#### **4.5.3 Cor**

A cor da água pode ser classificada em cor verdadeira e cor aparente. A primeira é constituída por sólidos dissolvidos que permitem a passagem da luz. A segunda além da cor causada pelos sólidos dissolvidos, há a contribuição de cor causada pelos sólidos suspensos, que conferem turbidez (VON SPERLING, 1996).

Parâmetro que trata da aparência da água devido aos sólidos dissolvidos, podendo ser oriunda da decomposição da matéria orgânica e presença de ferro e manganês. Ações antrópicas como lançamento de resíduos industriais ou esgotos domésticos também contribuem para a alteração desse parâmetro.

A avaliação desse parâmetro no processo de filtração constitui um indicador rápido desse processo, uma vez que a taxa de remoção da cor do efluente tratado possibilita avaliar se o sistema está funcionando de forma eficaz, bem como se o leito filtrante está saturado, precisando assim ser lavado.

#### **4.5.4 Turbidez**

A forma mais comum de determinar se uma água contém particulados é através desse parâmetro. O mesmo consiste em uma característica física da água que reduz a sua transparência, ou seja, medida do grau de interferência à passagem da luz através do líquido. A alteração à penetração da luz na água decorre da presença de material em suspensão.

A turbidez é constituída por sólidos em suspensão que causam a absorção da luz. A origem natural da turbidez é relacionada à presença de partículas de rocha, argila e silte e a origem antropogênica é relacionada aos despejos domésticos, industriais, microrganismos e a erosão (BESSA, 2020).

Dessa forma esse parâmetro isoladamente não acarretaria danos para irrigação, porém valores elevados podem estar associados à presença de partículas suspensas ou a proliferação de microrganismos como algas e cianobactérias que elevam a turbidez devido ao aumento da clorofila *a* durante o processo de fotossíntese (ANDRADE, 2017).

A alteração desse parâmetro no efluente tratado pode ser utilizado como indicador do desempenho final do filtro. Além disso, a turbidez pode servir de suporte para microrganismos causadores de doenças (vírus, bactérias e protozoários) e, assim, diminuir a eficácia da desinfecção (LIMA e ABREU, 2018).

#### **4.5.5 Fósforo total (PT)**

Elemento crucial no metabolismo das plantas, desempenhando papel importante na transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese, além de ser imprescindível para o desenvolvimento do sistema radicular. Está relacionado ao desenvolvimento e ativação de raízes, formação de sementes e transferência de características hereditárias (TIBAU, 1984).

Sendo assim, a utilização de efluente contendo esse elemento químico além de mitigar os impactos ambientais no meio ambiente, proporciona benefícios para as culturas irrigadas uma vez que juntamente com o nitrogênio e o potássio, o fósforo presente nessas águas representa um fertilizante natural para as plantas.

O fósforo é encontrado em meio aquático na forma de ortofosfatos, polifosfatos e fósforo orgânico, sendo suas concentrações nos esgotos urbanos influenciada pela presença de despejos industriais e cargas não pontuais. A descarga de efluentes em corpos d'água, bem como o uso de fertilizantes e pesticidas, são fatores que proporcionam maiores níveis de fósforo nesses ambientes. Deve-se ressaltar que à presença de detergentes no esgoto é outro fator para que intensifica a elevação do nível de fósforo nessas águas (BEZERRA et al., 2021).

Esse parâmetro é um fator limitante da produtividade primária dos ecossistemas aquáticos, podendo ter origem natural, das rochas e antrópica, de efluentes domésticos e

industriais e lixiviação do solo, sendo um dos principais responsáveis pela eutrofização dos mananciais (DUTTA et al., 2018).

Esse parâmetro é indispensável para o crescimento de algas, quando em elevadas concentrações pode conduzir a um crescimento exagerado desses organismos provocando a eutrofização. O excessivo crescimento de algas pode causar o entupimento do sistema de irrigação.

A remoção de fósforo pode ocorrer por processos físico, químico ou biológico. Os processos físicos têm alto custo e nem sempre são eficientes. Os biológicos podem sofrer variação na eficiência de remoção de fósforo. Nos processos químicos utilizam-se sais como Ca, Fe e Al, que são seguros e bem estabelecidos (CLARK et al., 1997).

#### **4.5.6 Nitrogênio**

Elemento relacionado fisiologicamente ao metabolismo vegetal das plantas, tais como, fotossíntese, respiração, crescimento, produção de folhas, flores e frutos, mesmo que seu teor se expresse em forma de nitrato ( $N^-NO_3^-$ ) e amônio ( $N^-NH_4^+$ ), sendo estas as formas mais facilmente assimiláveis pelas plantas. (AYERS e WSETCOT, 1999).

No entanto, deve-se mensurar as concentrações desses parâmetros no que concerne o uso de efluentes tratados na irrigação ou mesmo quando lançado em corpos de água uma vez que valores elevados podem causar desequilíbrio nas biotas terrestre e aquática. Como exemplo, podemos citar altas concentrações de amônia que são altamente tóxicas para os peixes e outras espécies de vida aquática. Com relação à concentração de nitrogênio amoniacal em águas superficiais, essa concentração indica uma poluição por uma descarga de esgoto próxima segundo Queiroz 2017.

O nitrogênio presente nos alimentos na forma de proteínas é eliminado para o ambiente na forma de urina e fezes, de modo que os efluentes são ricos em compostos nitrogenados, estando em maior quantidade sob forma amoniacal, porém também é encontrado como nitrogênio orgânico, nitrito e nitrato (DUTTA e SARKAR, 2015).

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).

Nitrogênio e fósforo são fatores limitantes do crescimento de vegetais e, por isso, tornaram-se alguns dos principais fertilizantes na agricultura. O nitrogênio é parte

constituente dos aminoácidos e proteínas. No entanto, em excesso é carregado para os rios, lagos e lençóis de águas subterrâneas, e tem provocado a eutrofização, comprometendo a qualidade das águas.

Para a agricultura esse parâmetro é fundamental para o desenvolvimento das culturas. O uso de efluentes tratados apresenta concentrações de nitrato que são absorvidos pela sistema radicular da planta, porém valores acima de 10,0 mg/L são considerados excessivos de acordo com Ayers & Westcot (1976).

#### **4.5.7 *Escherichia coli***

Esses microrganismos estão presentes em fezes humanas e de animais homeotérmicos. Usados como indicadores de contaminação fecal, por se apresentar em grande quantidade nas fezes humanas, ter resistência similar à maioria das bactérias patogênicas intestinais, e pela técnica de identificação e contagem serem rápida e econômica (KHAMKURE et al., 2013).

A grande concentração desses microrganismos presentes em águas superficiais está ligada diretamente ao lançamento de efluentes, muitas vezes clandestinos que contaminam esses corpos hídricos, prejudicando significativamente o desenvolvimento das comunidades biológicas. Diversos açudes urbanos são acometidos por essa problemática que descaracteriza a paisagem natural desses ecossistemas.

A variedade de microrganismos presentes nas águas residuárias dificulta o isolamento e a identificação dos patogênicos. Em virtude disso existem os indicadores de contaminação fecal, como os termotolerantes e *Escherichia coli*. Sua identificação em águas destinadas a irrigação está relacionada ao perigo sanitário que eles trazem a saúde de quem consome os produtos irrigados com essas águas.

Vale salientar que a grande resistência por parte das pessoas em consumir produtos irrigados com esse tipo de água está justamente no medo de contrair alguma doença de veiculação hídrica. Em virtude disso o sistema de tratamento deve contemplar não apenas os parâmetros físico-químicos, mas também garantir a segurança sanitária dessas águas.

#### **4.5. 8 Demanda química de oxigênio (DQO)**

Parâmetro utilizado como indicador do conteúdo orgânico de águas residuárias e bastante utilizado no monitoramento de estações de tratamento de efluentes líquido. Engloba a estabilização da matéria orgânica ocorrida por processos químicos.

Causará aumento da DQO nas águas que tenham substâncias orgânicas e/ou inorgânicas passíveis de oxidação pelo dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ) em meio ácido. Em esgotos domésticos a fração orgânica supera a inorgânica reduzida, e a DQO pode ser utilizada para quantificar a matéria orgânica oxidável presente (AQUINO et al., 2006).

A poluição orgânica de água pode ser avaliada pelo decréscimo da concentração de oxigênio dissolvido e/ou pela concentração de matéria orgânica em termos de concentração de oxigênio necessário para oxidá-la (VALENTE et al., 2007).

#### **4.5.9 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)**

Esse parâmetro determina a concentração de matéria orgânica biodegradável através da demanda de oxigênio exercida por microrganismos através da respiração. Em outras palavras refere-se à matéria orgânica mineralizada por atividade dos microrganismos. A Resolução CONAMA nº 357/2005 recomenda valor máximo de 10 mg/L para água doce classe 3, sendo essa a última classe recomendada para a irrigação.

O aumento da DBO nos corpos de água está relacionado ao despejo de esgoto, provocando um aumento no teor de matéria orgânica, tendo como consequência a diminuição do oxigênio dissolvido por oxidação, o que causa a morte de animais; além de alterar tanto o cheiro quanto o sabor da água.

Valores elevados deste parâmetro possibilitam risco de contaminação microbiológica ao solo, bem como as culturas irrigadas, além do risco à saúde dos envolvidos no processo agrícola. A redução da DBO deve ser relevante principalmente quando o efluente tratado for destinado a um corpo hídrico. A Resolução CONAMA nº 430, recomenda valor máximo de lançamento de efluente 120 mg/L de DBO em corpos de água.

#### 4.6 Técnicas de tratamento de efluentes

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), o Brasil coletava e tratava, até 2018, apenas 46% dos seus efluentes, o restante em sua maioria era destinado de forma inadequada nos rios, fossas e valas a céu aberto, de modo que as áreas rurais apresentavam um cenário ainda mais crítico (BRASIL, 2019).

O tratamento de efluente consiste na utilização de processos físicos, químicos e biológicos, que resultam na remoção dos sólidos e matéria orgânica (CAVALCANTE, 2015). As tecnologias de tratamento de efluente são desenvolvidas tendo como principal finalidade enquadrar os parâmetros físicos, químicos e microbiológicos para serem lançados em corpos d'água.

A exigência para atender a esses padrões se dá em decorrência da fragilidade desses corpos hídricos onde muitas vezes se encontram já poluídos. Os critérios de qualidade para reúso são baseados em requisitos de usos específicos, levando em consideração aspectos estéticos, ambientais e econômicos e na proteção a saúde pública (CAVALCANTE et al., 2020).

Diversas técnicas de tratamento de esgotos foram e vem sendo desenvolvidas, cada uma apresentando vantagens e desvantagens do ponto de vista de espaço físico utilizado, eficiência de tratamento, e custo-benefício. Essas características precisam ser observadas para que não seja feita a escolha por um sistema de tratamento muito maior, ou menor, da situação real a que se pretende atender, oferecendo solução economicamente viável garantindo segurança e qualidade para os usuários e baixo impacto ao meio ambiente (BARROS et al., 2017).

Sendo assim, um sistema de tratamento de água para reúso agrícola agrega inúmeras vantagens uma vez que proporciona melhorias ambientais, econômicas bem como reduz os riscos de doenças de veiculação hídrica. Técnicas alternativas e simplificadas de tratamento de esgoto podem mitigar os diversos problemas acarretados pela falta de saneamento nas áreas rurais, uma vez que eventualmente exigem pouca manutenção e baixo custo de instalação e operação. Segundo Timmons, et al (2006), o custo de operação de filtros que usam esse material tem uma economia de 50% em relação aos que utilizam areia como elemento filtrante.

A escolha do tratamento é baseada nas características dos esgotos e de cada sistema de tratamento, como: a eficiência de remoção de carga orgânica, a remoção de

patógenos, o possível odor gerado, custo de instalação, a área necessária, a complexidade de operação, a manutenção e nos subprodutos resultantes, (BARBONI e ROCHETTO 2014). Como técnica para tratamento dessas águas pode citar as, lagoas de estabilização, os filtros multimeios e as fossas biodigestoras e fossas sépticas.

As lagoas de estabilização (Figura 1) são os sistemas de tratamento de esgotos sanitários e de efluentes mais eficientes, em termos de remoção de microrganismos patogênicos, e de matéria orgânica. Porém essa técnica geralmente necessita de grandes áreas para sua implementação.

Sendo assim essa tecnologia se torna inviável em pequenas comunidades, uma vez que a terra que poderia ser utilizada apenas para o cultivo, teria que ser dividido para a construção de uma ou mais lagoas de estabilização. Existem vários tipos de lagoas utilizadas para o tratamento de esgotos.

- Lagoas anaeróbias e facultativas são utilizadas para remoção da matéria orgânica carbonácea, enquanto que lagoas de maturação possuem a finalidade de reduzir o número de organismos patogênicos;
- Lagoas anaeróbia, facultativa e de maturação utilizam processos naturais para redução da carga orgânica e patogênicos.
- Lagoa aerada, usa equipamento de aeração para fornecer oxigênio ao meio e manter os sólidos em suspensão.



**Figura 1: Modelo de lagoa de estabilização.**

**Fonte:** Sabesp, 2018.

Filtro multimeios (Figura 2) também é uma opção para o tratamento desses efluentes, geralmente composto por materiais como areia, brita, antracito. O processo de filtração é responsável pela remoção de sólidos suspensos e da turbidez, ou seja, materiais particulados. Esses filtros apresentam grande capacidade para redução de sólidos suspensos, com a vantagem de fácil manutenção e baixo custo. A construção desses filtros podem ser realizados contendo resíduos como por exemplo, materiais de construção civil: cerâmicas, tijolos, brita, etc.

A utilização de filtros orgânicos proporciona a retenção de sólidos, em razão de sua capacidade em reter sólidos em suspensão (OLIVEIRA et al., 2017). Esse tipo de sistema consiste em uma opção barata, pois nele se utilizam subprodutos de atividades agroindustriais, tais como serragem de madeira, bagaço de cana de açúcar e casca de arroz.

A utilização de resíduos orgânicos tem a vantagem de apresentar grande disponibilidade e, por serem descartados em abundância na propriedade rural, apresenta um baixo custo de aquisição para o produtor, além de possibilitar a sua utilização como adubo orgânico, após a estabilização (MARQUES et al., 2020).



**Figura 2: Modelo de filtro multimeio para tratamento de efluentes.**

**Fonte:** Portal tratamento de água.

A principal desvantagem é a decomposição do material, que em virtude disso precisa ser trocado com maior frequência quando comparado com outros materiais como carvão e areia. A seleção do material para o enchimento dos filtros biológicos é de

fundamental importância no desempenho do processo, de modo que segundo Chericaro et al., (1997), o material deve apresentar algumas características como:

- Possuir elevado volume de vazios, para evitar obstruções pelo crescimento do volume de sólidos, garantindo assim um adequado suprimento de oxigênio;
- Apresentar elevada área superficial, para aumentar a quantidade de microrganismos presentes e aumentar, conseqüentemente, a capacidade de remoção de matéria orgânica;
- Ser estruturalmente forte, para suportar o seu próprio peso e o peso do biofilme que cresce aderido às suas paredes;
- Ser leve, para permitir reduções significativas nos custos de obras civis e para permitir construções mais altas que conseqüentemente ocupem menos área;
- Ser biológica e quimicamente inerte;
- Apresentar o menor custo possível por unidade de DBO removida.

A utilização de fossas biodigestoras (Figura 3) compreende uma alternativa principalmente nas comunidades rurais, visto que seu uso ofereceu melhoria na qualidade de vida das pessoas, possibilitando a geração de energia elétrica, o uso de aquecedores a gás, e principalmente utilização do efluente gerado, para melhorar a fertilidade do solo, substituindo a tradicional adubação química em algumas culturas. Sua instalação compreende um custo relativamente baixo e de fácil manutenção, substitui o esgoto a céu aberto possibilitando melhorias das condições rurais.



**Figura 3: Modelo de fossas biodigestoras para tratamento de efluentes.**  
Fonte: Embrapa, 2017.

A fossa séptica foi à primeira unidade idealizada para tratamento de esgoto sanitário e até os dias atuais ainda é a técnica mais empregada, principalmente em locais com baixos índices de cobertura de rede coletora de esgotos (LUNA, 2014). Fossas ou tanques sépticos são considerados um tratamento efetivo de esgoto doméstico em áreas rurais (WITHERS et al., 2011).

Sua utilização possui algumas vantagens, tais como: tecnologia simples de baixo custo, poucos requisitos para operação e manutenção, possibilidade de reaproveitamento do efluente e de retorno dos nutrientes ao solo. Outros pontos favoráveis a este tipo de sistema é o pequeno espaço requerido para sua instalação e a pouca energia consumida.

No entanto, quando ocorrem problemas que levam a infiltração dos dejetos no solo, os danos ao ambiente são significativos, uma vez que o chorume formado pode contaminar o lençol freático, que em determinadas comunidades significa a única fonte de água para o abastecimento local. Além disso, pode haver a proliferação de vetores e odor desagradável (COSTA e GUILHOTO 2014).

O sistema composto por filtros de areia intermitentes (Figura 4) também podem ser utilizados para tratar esses efluentes. Apresenta vantagens como, pouca perda de água via evaporação, baixos custos de implantação, baixos custos operacionais e simplicidade de manutenção. São flexíveis uma vez que podem ser dimensionados de acordo com a necessidade de cada local.



**Figura 4: Filtro de areia intermitente.**

Fonte: Luna, 2014.

Os filtros de areia de fluxo intermitente são reatores aeróbios de leito fixo que proporcionam a decomposição do material orgânico contido nos esgotos sanitários, permitindo um contato direto entre a massa bacteriana aderida à superfície do meio filtrante (LUNA, 2014).

Apesar das vantagens mencionadas, esses filtros funcionam como pós-tratamento de esgotos, ou seja, para se obter máxima eficiência precisam de outro tratamento anterior como decantados ou efluentes de tanques sépticos. Segundo Luna (2014), podem ser utilizados quando se deseja um sistema de pós-tratamento simplificado, podendo atender a pequenas comunidades, onde, geralmente, os moradores possuem pouco conhecimento técnico.

#### **4.7 Tratamento biológico de águas residuárias**

O tratamento biológico é um processo de degradação da matéria orgânica de efluentes biodegradáveis. Ocorre pela ação de agentes biológicos como bactérias, protozoários e algas, por meio aeróbio e anaeróbio. Essa população biológica forma a “camada de sujeira” conhecida como schmutzdecke, que contribui para interação desses organismos com as partículas presentes na água (ALVES, 2020).

Assim, o *schmutzdecke* decompõe parte da matéria orgânica da água residuária que se deseja tratar, sendo responsável principalmente pela remoção do material particulado (ELLIS, 1985).

Os principais processos biológicos utilizados para o tratamento de águas residuárias segundo CAO (2018) são divididos em: crescimento suspenso e crescimento aderido. Nos primeiros os micro-organismos responsáveis pelo tratamento das águas residuárias são mantidos livres na fase líquida, como por exemplo, o processo de lodos ativados, concebido para remoção de matéria orgânica e nitrogênio além de também poder proporcionar a remoção de nitrogênio e fósforo.

Nos processos de crescimento aderido, os microrganismos responsáveis pela conversão dos substratos (matéria orgânica, nutrientes e outros) estão imobilizados em um material suporte inerte, crescendo na forma de biofilmes como, por exemplo, na superfície das esferas de PS utilizadas nesta tese.

O material suporte comumente utilizado nesse processo são: pedra brita, cascalho, areia, tubos corrugados (VON SPERLING, 2013). Segundo Wolff et al., (2010), cada material suporte apresenta características diferentes que influencia na colonização dos microrganismos e formação de biofilme como por exemplo a forma, área superficial, porosidade e rugosidade diferentes.

Segundo Machado (2005), as etapas de formação de biofilme são:

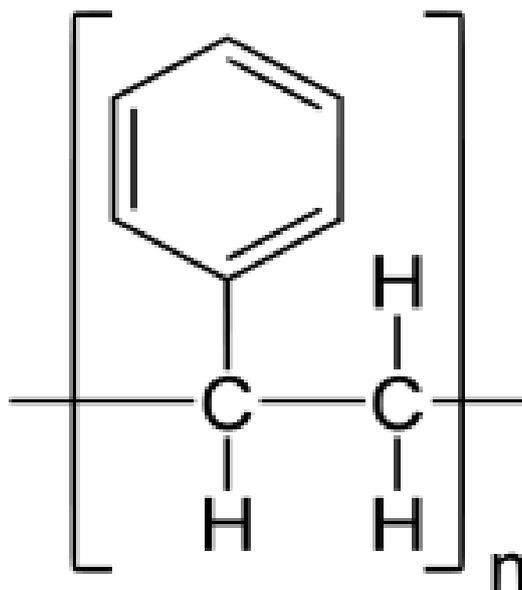
- Etapa 1- Transporte de células livres do meio líquido para o meio suporte (sólida) e sua fixação;
- Etapa 2- Crescimento e divisão de células fixas devido aos nutrientes provenientes do líquido circundante;
- Etapa 3- Fixação de células bacterianas flutuantes (e outras partículas), auxiliando na acumulação do biofilme;
- Etapa 4- Liberação de material celular por vários tipos de mecanismos: erosão superficial (perda de células individuais), descolamento (“sloughingoff”), abrasão e ataque por predadores.

#### **4.8 Poliestireno e suas características**

O poliestireno (PS) pertence ao grupo das resinas termoplásticas, que inclui, entre outros, os polietilenos, o polipropileno (PP), o policloreto de vinila (PVC) e o poli(tereftalato de etileno) (PET) (AMIANTI, 2005). Quimicamente, o PS consiste em dois

elementos, o carbono e o hidrogênio é representado pela fórmula  $(C_8H_8)_n$ . No Brasil, é mais conhecido como "Isopor", foi descoberto em 1839, porém passou a ser comercializado em 1930 (BUSSOLO, 2020).

A estrutura parcial da cadeia do poliestireno está representada na Figuras 5. Sua matéria-prima é originada a partir da polimerização do estireno (vinil benzeno), oriundo do petróleo e presente em algumas plantas e frutas, nas quais confere um odor adocicado (LATTMANN, 2018).



**Figura 5: Estrutura parcial da cadeia do poliestireno.**  
Fonte: Amianti, 2005.

Seu material é extremamente leve, considerando que é composto de 98% de ar (MORAIS e BRASIL 2015). A massa específica do poliestireno comercial fica entre  $1,046 \pm 0,0005 \text{ g/cm}^3$  (SCHÖNTAG, 2015), com densidade inferior a  $300 \text{ kg/m}^3$ . Após serem expandidas as pérolas podem apresentar em seu volume até 98% de ar e 2% de poliestireno, por exemplo, em  $1\text{m}^3$  de isopor pode existir de 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar (OLIVEIRA, 2013).

Segundo Amianti (2005), esse material pode ser utilizado em diversas aplicações, de modo que é encontrado e comercializado de três formas conforme o Quadro 1:

**Quadro 1: Tipos de poliestireno encontrado comercialmente.**

<b>Tipo</b>	<b>Característica</b>
Cristal	Material transparente, com alto brilho e a fácil coloração. São utilizadas como matéria prima para a fabricação de corpo de caneta esferográfica, embalagens descartáveis, brinquedos e demais utensílios domésticos.
Poliestireno Expandido (EPS)	Polímero celular rígido, que pode apresentar numa variedade de formas e aplicações. A estrutura celular é constituída por células fechadas com diâmetros de alguns décimos de milímetro e com paredes de 1,0 mm. Sua forma mais comum é o isopor, que pode tomar infinitas formas e tamanhos.
Poliestireno de Alto Impacto (HIPS):	É um polímero obtido através do monômero de estireno em solução de polibutadieno. As partículas microscópicas de borracha que se formam ao longo do processo químico alteram as propriedades do poliestireno, aumentando sua resistência ao impacto e alongamento. É usado como peças internas e externas de aparelhos eletrônicos, peças de máquinas e veículos, caixas para rádio, televisão, microcomputadores; nas indústrias de calçados e de embalagens de proteção contra choques. Na produção de utensílios, como brinquedos, e utilidades domésticas.

**Fonte:** Modificado de Amianti, 2005.

Com relação a sua utilização como elemento filtrante esse material apresenta melhores resultados durante a limpeza e perda de carga final entre 20% e 30% (SCHÖNTAG, 2015). Esse fator é de suma importância principalmente no que concerne a economia de água potável para lavagem do filtro.

Segundo Oliveira (2013), o uso do poliestireno expandido possui as seguintes vantagens:

- Baixa condutividade térmica: A estrutura das células fechadas, cheias de ar, dificulta a passagem do calor conferindo um grande poder isolante;
- Baixa absorção de água: O isopor não é higroscópico, ou seja, não absorve água. Tal propriedade garante que o isopor mantenha as suas características térmicas e mesmo sob a ação da umidade;

- O baixo peso: Facilita o manuseamento, transporte e lavagem depois da sua utilização. Essa propriedade é essencial para sua utilização como leito filtrante em reatores que possibilitam o tratamento de água;
- Resistência ao envelhecimento: As propriedades do isopor mantêm-se inalteradas ao longo da vida do material, possui baixa potencial de apodrecimento;
- Os produtos finais deste material são inodoros, não contaminam o solo, água e ar, são reaproveitados, reciclados, podendo até voltar às condições de matéria-prima.

Em 2019 a produção de polímeros alcançou cerca de 8,9 milhões de toneladas (BUSSOLO, 2020). Com relação ao meio ambiente, o isopor é 100% reciclável e reaproveitável, pode ser totalmente reciclado para voltar à condição de matéria-prima para ser utilizado principalmente em construção civil (ABRAPEX, 2010).

Sua queima gera apenas gás carbônico e vapor de água, e quando depositado em aterros sanitários permanece inerte e não contamina o solo ou lençóis freáticos (AMIANTI, 2005). Porém por apresentarem baixo peso específico, possuem a desvantagem de ocupar muito espaço quando depositado em aterros sanitários e terrenos (Figura 6).



**Figura 6: Deposição de isopor em terrenos.**  
**Fonte:** Lázaro Ramom Andrade, janeiro de 2021.

A coleta desse material para venda é complicada devido ao baixo valor bem como ao seu peso que dificulta bastante essa comercialização quando comparado a outros materiais como metal e vidro. Quando pensamos em coleta seletiva para esse material, o mesmo deve ser descartado em lixeiras vermelhas destinadas aos plásticos.

#### **4.9 Tratamento de efluente usando esfera de Poliestireno**

A utilização desse material como elemento filtrante está diretamente relacionado ao seu poder de adsorção das partículas presentes no esgoto, bem como ao processo biológico proveniente da formação do biofilme na superfície do leito filtrante. O processo biológico consiste na remoção da matéria orgânica por meio da ação de microrganismos que promovem a oxidação dos materiais biodegradáveis.

O processo de tratamento dos efluentes usando filtro contendo PS está ligado a fatores como a adsorção das impurezas na superfície dos grãos. A adsorção de contaminantes pode ser classificada como físico ou químico. A primeira é reversível e ocorre quando forças de atração molecular entre o soluto e o adsorvente são maiores do que as forças de atração entre soluto e solvente.

Assim, as partículas dissolvidas no efluente serão adsorvidas pela superfície do leito filtrante, como o poliestireno, através das forças de atração de van der Waals. Na adsorção química, a reação ocorre entre a superfície do leito filtrante e o soluto adsorvido, sendo a reação geralmente irreversível (GUERRA et al., 2015).

Entre os fatores que influenciam no processo de adsorção de um composto sobre a superfície do leito filtrante temos: pH da solução, a natureza do solvente e do adsorvato, a estrutura do poro e a área superficial do adsorvente, além das diferenças entre as propriedades químicas superficiais do adsorvato e solvente (CARVALHO, 2016).

Outro fator importante para o tratamento das águas residuárias usando PS, é a produção do biofilme na superfície dos grãos durante o processo de percolação do líquido dentro do reator. O desenvolvimento de biofilmes em superfícies é caracterizado pelo desenvolvimento bacteriano de adsorção, crescimento, adesão e aderência, onde os mecanismos de fixação e estabelecimento do biofilme dependem da comunidade microbiana, das atividades metabólicas, assim como o tipo de material suporte para o desenvolvimento do biofilme (THORN et al., 1996).

A diversidade de microrganismos que podem formar os biofilmes é grande, podendo ser constituída por microalgas, fungos, bactérias, protozoários e vírus. No entanto há predomínio de células bacterianas, devido sua versatilidade e resistência genética que permitem sua sobrevivência em ambientes que mudem rapidamente suas condições (AZEVEDO et al., 2008).

O sistema de tratamento de efluente estudado neste trabalho de tese apresentou formação de biofilme responsável por remover compostos biodegradáveis através da ação dos microrganismos. Uma grande variedade de microrganismos está presente no biofilme, e à medida que a biomassa cresce aderida à superfície do meio suporte, o tamanho dos poros tende a diminuir (MARTINS et al., 2019).

O tratamento dessas águas por meio de processos biológicos ocorre através do seu consumo como substratos para os micro-organismos a fim de produzir novas células e energia (NOGUEIRA, 2013). O crescimento dos microrganismos responsáveis pela formação do biofilme depende de fatores, como: pH, temperatura, tipo e concentração de substrato, concentração de nutrientes essenciais e toxicidade do meio.

#### **4.10 Destino final do poliestireno**

Diversos setores do mercado utilizam o poliestireno como, por exemplo: Os setores de refrigeração, eletroeletrônicos, e embalagens de alimento. Vale salientar o grande número de pessoas que passaram a utilizar produtos derivados desse material entre os anos de 2020 e 2021 devido aos transtornos da pandemia. O crescimento no número de entrega de comida por delivery é um exemplo de como esse material passou a ser muito utilizado e descartado nesse período.

Diante das inúmeras aplicações no mercado seu descarte inadequado pode proporcionar inúmeros transtornos ao meio ambiente. Os aterros sanitários acabam sendo o destino desse material, ocupando grandes espaços além de necessitarem de longo período para decomposição. Segundo Schicoski (2008), o EPS leva mais de 150 anos para decompor. Sendo assim, apesar da baixa densidade desse material, o EPS ocupa grande volume o que onera o transporte e sua reciclagem.

Outro fator preocupante quando pensamos em seu descarte no meio ambiente é sua facilidade de combustão, fato esse que acarreta em seu derretendo liberando uma fumaça preta para atmosfera com gás carbônico (CO<sub>2</sub>).

No entanto, esse material pode ser totalmente reciclado para voltar à condição de matéria-prima para ser utilizado principalmente em construção civil como concreto leve, argamassa, peças para lajes e blocos. O mesmo pode ser utilizado em elementos da edificação quando não há exigência de resistência a grandes esforços, proporcionando redução de peso na construção (FERRAZ, 2014).

A fabricação de concreto leve é outra forma de reutilizar esse material, de modo que segundo Tessari (2006), o concreto leve de EPS consiste na substituição total ou parcial dos agregados tradicionais por grânulos de EPS. Os agregados de isopor podem substituir em parte ou completamente os agregados miúdos comumente usados no concreto ou a areia no caso de massas cimentícias (OLIVEIRA, 2013).

A reutilização desse material foi relatado em diversos trabalhos como por exemplo: Helena (2009) utilizou o poliestireno expandido na produção de concreto leve e argamassa e analisou o comportamento físico e químico dos mesmos em comparação aos produtos convencionais; OLIVEIRA (2013), utilizou o isopor em compósitos cimentícios, de modo que a incorporação progressiva da quantidade de isopor, como também na granulométrica do isopor, conferiu reduções na densidade volumétrica e na densidade aparente, devido à baixa densidade do isopor utilizado no experimento; FERRAZ (2014), estudou a utilização desse material como agregado no composto de concreto leve produzido para aplicação de contrapiso; BOITA E BELLEI (2019) estudaram a implantação do PS em materiais cimentícios.

Com base nos relatos citados, o poliestireno utilizado na filtração de efluentes, como proposto neste trabalho, pode ser incorporado na fabricação de tijolos ou argamassa na construção civil. É importante frisar que o poliestireno assim como outros elementos filtrantes, chegará a um limiar de filtração, ou seja, seu poder de adsorção e retenção das impurezas diminuirá ao ponto que será necessário a troca por um novo volume de poliestireno.

## 5.0 METODOLOGIA

### 5.1 Tipo da pesquisa

A sistemática utilizada se baseia na pesquisa descritiva e exploratória, posto que o embasamento da tese busca: a observação, registros, análises, correlacionando os fatos e fenômenos, além da realização de descrições da situação e descoberta das relações existentes entre os elementos da pesquisa (CERVO et al., 2007).

A metodologia utilizada caracteriza-se por um trabalho de natureza aplicada, conforme apontam Prodanov & Freitas (2013): objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos.

Quanto aos fins esta pesquisa se caracteriza como explicativa, pois a mesma tem o objetivo de explicar os porquês das coisas e suas causas, por meio do registro e da interpretação dos fenômenos observados. (PRODANOV & FREITAS, 2013).

### 5.2 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Universidade Federal de Campina Grande (Figura 7), campus I, localizado na cidade de Campina Grande-PB, com coordenadas  $7^{\circ} 12' 58.7'' S$  e  $35^{\circ} 54' 35.7'' W$ , possui uma área física de 62,6 ha (ANDRADE, 2017).

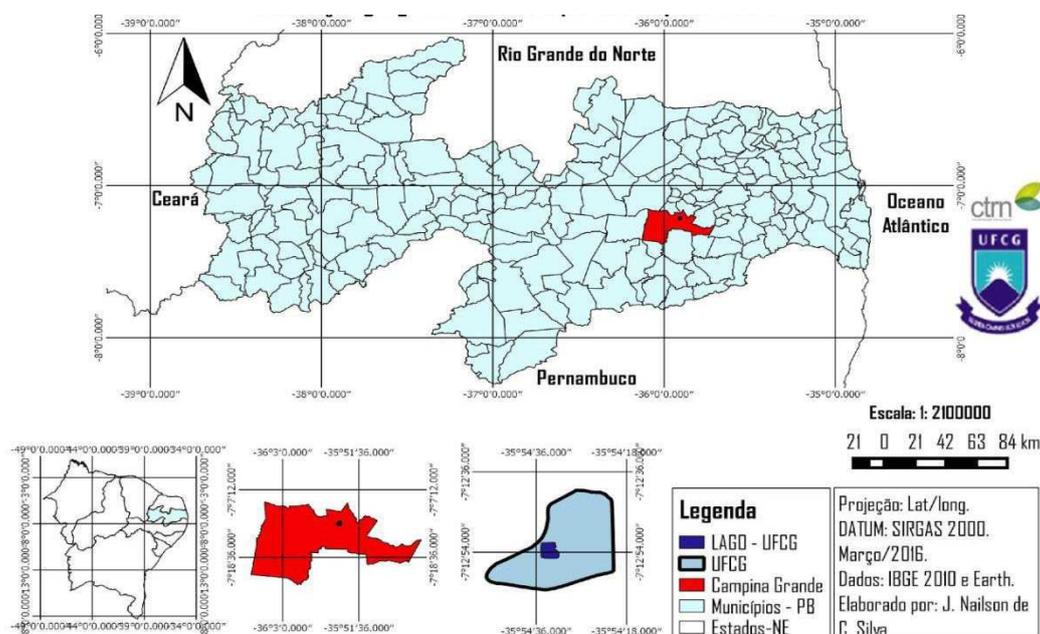


Figura 7: Localização geográfica da área de estudo.

Os procedimentos experimentais foram realizados entre março de 2018 até outubro de 2020 no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) pertencente ao departamento de Engenharia Química.

Esse campus possui uma lagoa (Figura 8) que atualmente é utilizada para irrigação das áreas verdes do campus, como jardins e campo de futebol. A recarga de água é realizada por meio da precipitação e drenagem de efluentes do campus, bem como de bairros vizinhos como Monte Santo e Bela Vista.

Esse cenário é muito similar ao encontrado em muitas cidades que utilizam as águas de seus açudes poluídos para irrigação sem nenhum tipo de tratamento. Como exemplo, temos o Açude Velho localizado no centro de Campina Grande, que é utilizado para irrigar as plantas do seu entorno, bem como o Parque da Criança localizado em suas adjacências.



**Figura 8: Lagoa da UFCEG.**

**Fonte:** Lázaro Ramom Andrade, agosto de 2020.

Estudo realizado por Andrade (2017), classifica as águas da lagoa da UFCEG como classe 4, segundo os parâmetros prescritos na Resolução nº 357 do CONAMA. Sendo assim essas águas podem ser utilizadas apenas para navegação e harmonia paisagística.

Sendo assim, a implantação de um sistema de tratamento propicia a segurança hídrica necessária para a irrigação das áreas verdes, bem como para os trabalhadores que manuseiam diariamente essas águas.

### 5.3 Etapas da pesquisa

O desenvolvimento da pesquisa se deu por meio dos seguintes procedimentos metodológicos abordados, conforme mostra a Figura 09.

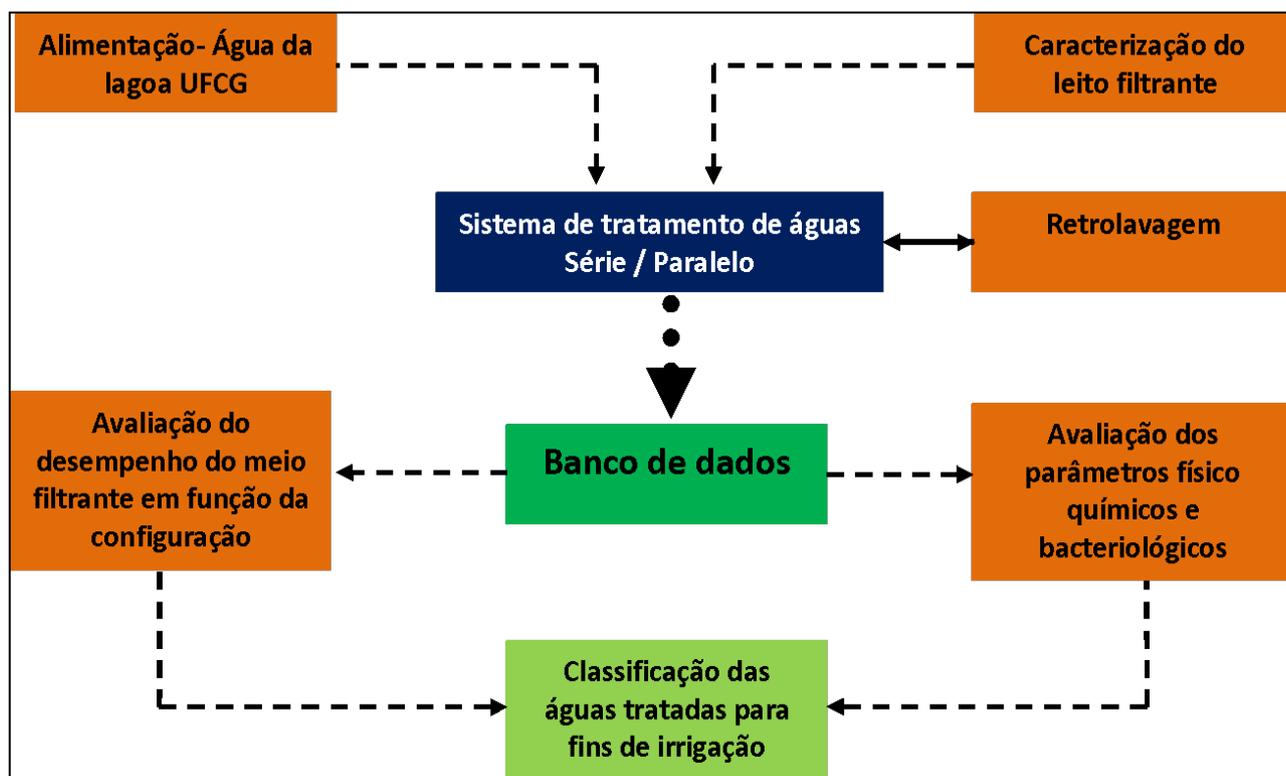


Figura 9: Fluxograma do processo de tratamento de efluentes.

### 5.4 Construção e funcionamento do sistema de tratamento de águas

Na Figura 10 pode-se observar a distribuição de três reatores (do tipo tubular) conectados em série e/ou paralelo. Cada reator apresentou uma granulometria de poliestireno, assim como outras informações pertinentes às características do sistema.

Características dos componentes do sistema de tratamento de água:

- Três reatores tubulares de PVC de 1,5 m de altura por 20,0 cm de diâmetro, cada reator foi fechado em suas extremidades com capes de 20,0 cm de diâmetro de PVC;
- Capacidade volumétrica de cada reator sem recheio é de 40,0 L e com recheio 2,8 L;

- Cada reator foi preenchido com 490 gramas de poliestireno perolado de diferentes diâmetros (2,0 mm e 5,0 mm);
- Cada reator apresenta uma torneira para coleta de amostra de água;
- Os reatores foram interconectados para trabalharem em duas configurações: Paralelo de forma independente, ou em série, uma vez que possuem conexões que possibilitem alterar a forma de operação.
- O sistema conta com dois reservatórios, um para armazenar água da alimentação e outro a água tratada durante o processo;
- O sistema apresenta um bypass: Utilizado para controlar a vazão de entrada no sistema, por meio do retorno da água para o tanque de alimentação;
- A vazão produzida durante a operação foi obtida através de um rotâmetro (0,4 L/h a 4,0 L/h):
- O motor bomba (centrífuga) foi de ¼ de CV para distribuir a água para o sistema, bem como para realizar a retrolavagem;
- Cada reator conta com uma válvula de gás para aliviar a pressão interna dentro dos reatores;
- O sistema conta com um conjunto de válvulas de esfera (1/2 polegada) e torneiras ambos de PVC, instalados nas entradas e saídas de cada reator para controlar os dois tipos de alimentação (série e/ou paralelo), as vazões e coleta de amostras de águas;

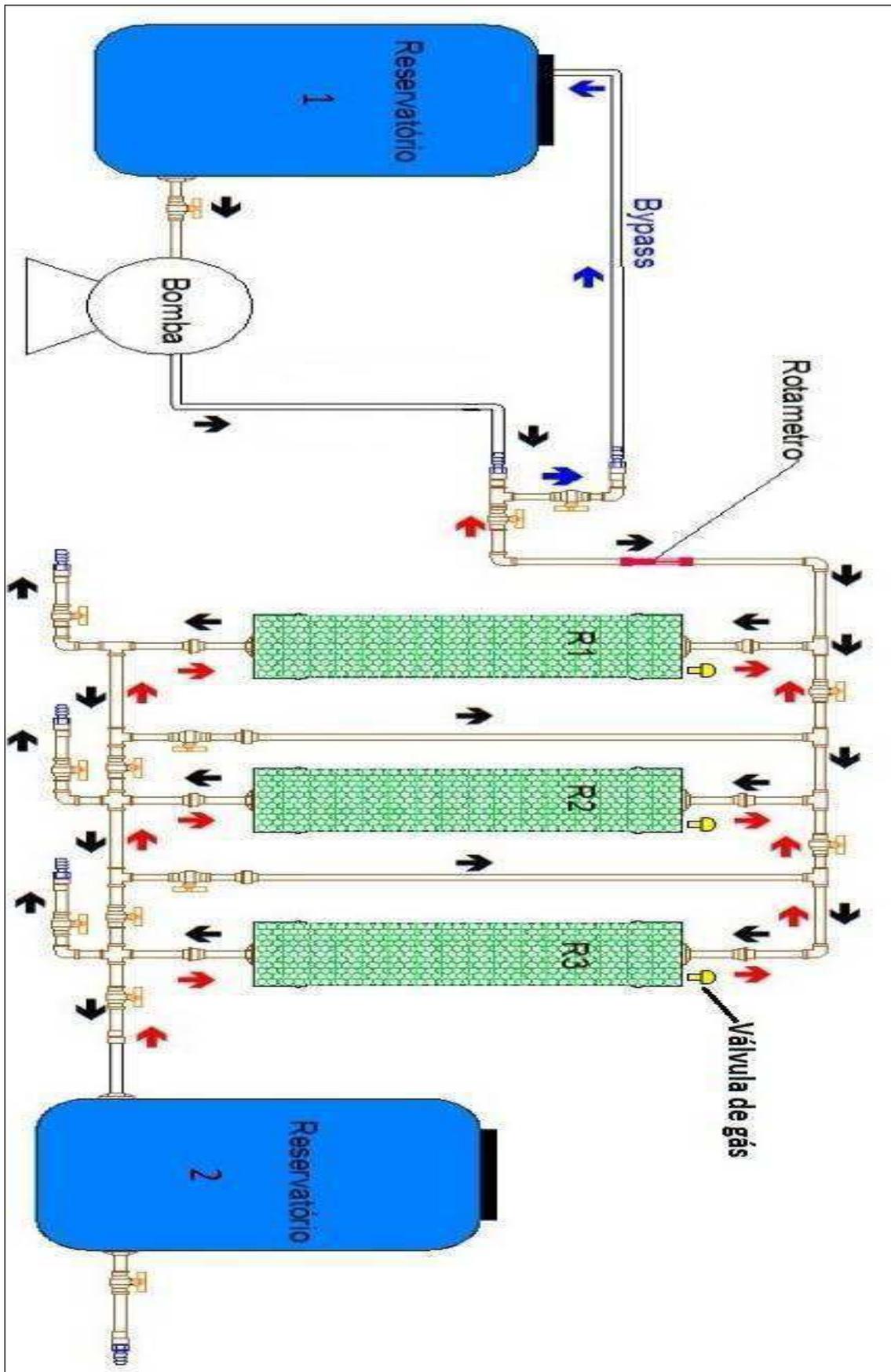


Figura 10: Modelo do Sistema de tratamento utilizando na pesquisa.



**Figura 11: Reator em operação.**

### **5.5 Caracterização do leito filtrante**

Essa pesquisa propõe a aplicação de esferas de poliestireno como meio de tratamento para o efluente em estudo. É de nosso conhecimento que o poliestireno expansível é a matéria prima para fabricação do “*isopor*”, muito utilizado comercialmente para embalagem de material frágil e isolante térmico.

As esferas de poliestireno foram selecionadas porque apresentaram características granulométricas semelhantes à da areia. A vantagem de se utilizar esse meio de tratamento são as seguintes: Ser leve, inertes, sem pigmentação e disponível comercialmente. Além disso, este meio exige menor velocidade da água durante o processo de retrolavagem, representando assim, economia de água no processo (SCHÖNTAG, 2015).

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 ( $0.895 \text{ g/cm}^3$ ), o meio filtrante, foi aprisionado em um tecido para evitar o seu refluxo durante o processo, conforme pode-se observar nas Figura 12 (meio filtrante

envelopado) e Figura 13 (vista superior do meio filtrante antes do envelopamento dentro do reator).



**Figura 12: Poliestireno envelopado.**



**Figura 13: Poliestireno no reator.**

## 5.6 Tratamento das esferas de poliestireno

As características físicas do poliestireno, em termos de tamanho e peso das esferas, foram estudadas da seguinte forma;

- Para a realização dessa etapa foi pesado 1,0 grama do poliestireno para as granulometrias de 2,0 mm e 5,0 mm;
- Foram separadas 100 esferas a parte, e medido seus diâmetros com auxílio de um paquímetro conforme apresentado na Figura 14;
- Essas 100 esferas foram acondicionadas em um tubo (amostra 1) para serem pesadas e verificadas o diâmetro após 24 horas;
- As demais esferas foram acondicionadas em outro tubo de vidro de 100 ml (amostra 2) por 24 horas como pode-se observar na figura 15;
- Após esse período foi verificado o diâmetro das 100 esferas molhadas (amostra 1) e o peso das esferas presentes na amostra 2
- Em seguida foram secadas sob a luz do sol e mais uma vez tomou-se os valores dos diâmetros e pesos.



**Figura 14: Medida do diâmetro das esferas.**

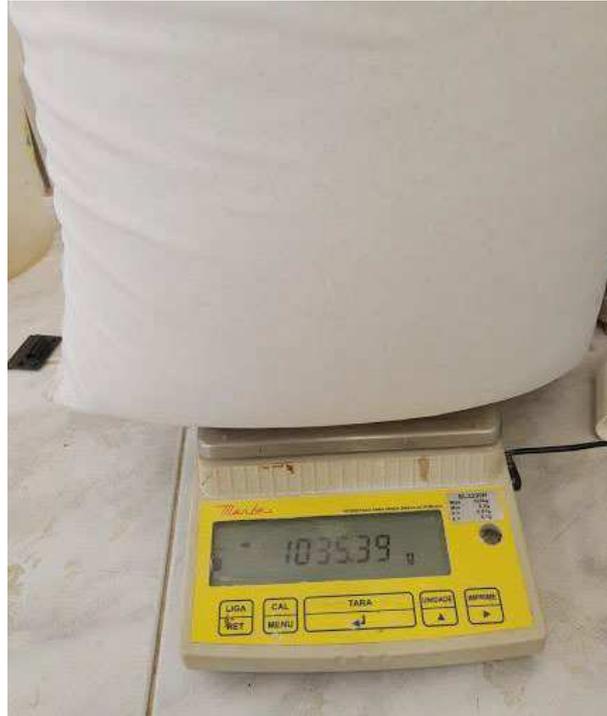


**Figura 15: Esferas com efluente.**

Vale salientar que antes do leito filtrante ser acondicionado dentro do reator, o mesmo foi pesado conforme pode-se observar na Figura 16. O mesmo procedimento também foi realizado após três meses de experimento com o material molhado, conforme apresentado na Figura 17. A pesagem desse material foi realizada durante três meses, totalizando seis repetições.

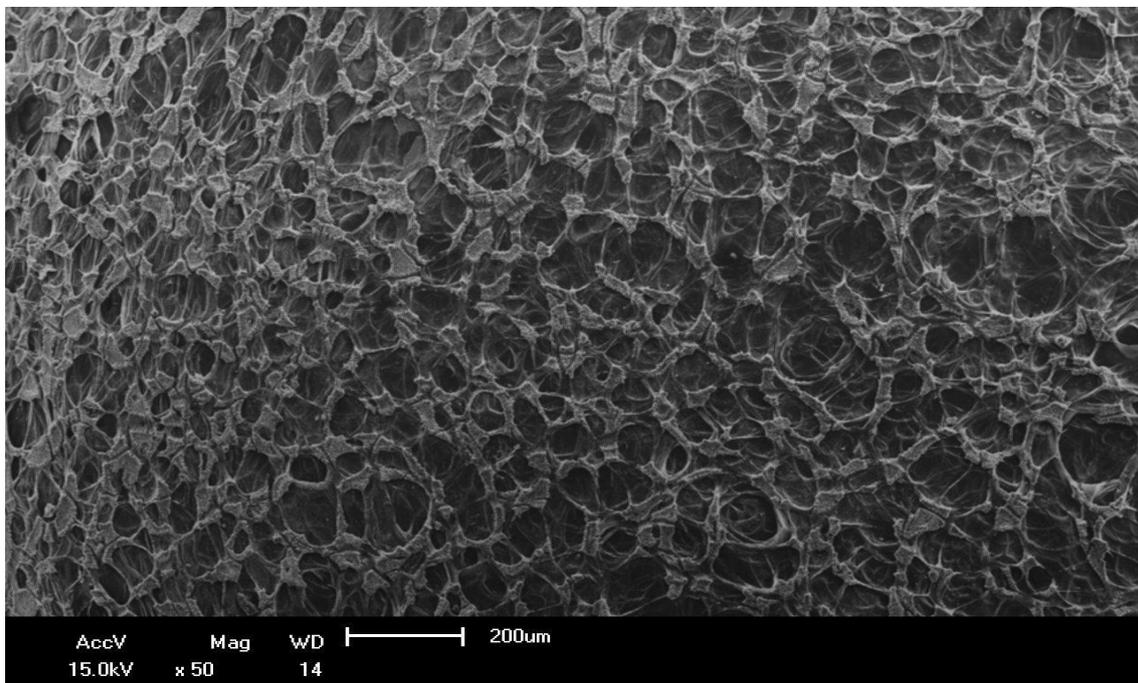


**Figura 16: Peso seco antes da filtração.**



**Figura 17: Peso molhado após a filtração.**

Complementado o processo, o poliestireno foi analisado em microscopia de varredura (MEV) para identificar a presença de partículas e água retida na superfície do meio conforme apresentado na Figura 18.



**Figura 18: Visualização de uma esfera de poliestireno no MEV.**

Esse procedimento foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Materiais pertencente ao departamento de Engenharia de Materiais da UFCG. As esferas utilizadas foram coletadas antes do processo de tratamento de efluente, depois de serem utilizadas no processo e depois da retrolavagem. As esferas virgens foram analisadas no mês de abril de 2019, e as demais foram analisadas em dezembro do mesmo ano.

Esse intervalo de oito meses foi importante para verificar se o material apresentava incrustações ou deformações em sua estrutura que compromettesse seu potencial de filtração.

### **5.7 Alimentação do sistema**

Os filtros foram operados simultaneamente, com a mesma água. Para a alimentação dos reatores foram utilizadas as águas da lagoa que fica alocada na UFCG, a mesma recebe efluentes do campus, bem como de bairros vizinhos como Monte Santo e Bela Vista, conforme abordado por Andrade (2017).

Sendo assim, as características físico-químicas e microbiológicas dessas águas são similares às águas residuárias em diversos açudes ou lagos presentes em cidades brasileiras que não possuem tratamento de seus esgotos e depositam os mesmos nos corpos hídricos.

Para a realização dos experimentos foram transportados mil litros de água da lagoa para o Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES), a cada quinze dias em média, onde se encontrava o sistema. Para o transporte foi utilizado um container de polietireno (Figura 19) para armazenamento de líquidos.



**Figura 19: Container utilizado para transportar a água do sistema.**

Para realização dos testes envolvendo a vazão de entrada com a configuração de alimentação do sistema, seguiu-se a seguinte sequência metodológica:

- Primeira semana
  - ✓ **Primeiro dia:** Alimentação do sistema em série com vazão 0,5 L/min;
  - ✓ **Segundo dia:** Alimentação do sistema em série com vazão 1,0 L/min;
  - ✓ **Terceiro dia:** Alimentação do sistema em série com vazão 2,0 L/min;
  - ✓ **Quarto dia:** Alimentação do sistema em série com vazão 3,0 L/min;
  
- Segunda semana
  - ✓ **Primeiro dia:** Alimentação do sistema em paralelo com vazão 0,5 L/min;
  - ✓ **Segundo dia:** Alimentação do sistema em paralelo com vazão 1,0 L/min;
  - ✓ **Terceiro dia:** Alimentação do sistema em paralelo com vazão 2,0 L/min;
  - ✓ **Quarto dia:** Alimentação do sistema em paralelo com vazão 3,0 L/min;

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 (Figura 20) e conectada na entrada de cada reator para fazer essa distribuição do efluente.



**Figura 20: Crepina para distribuição do efluente dentro do reator.**

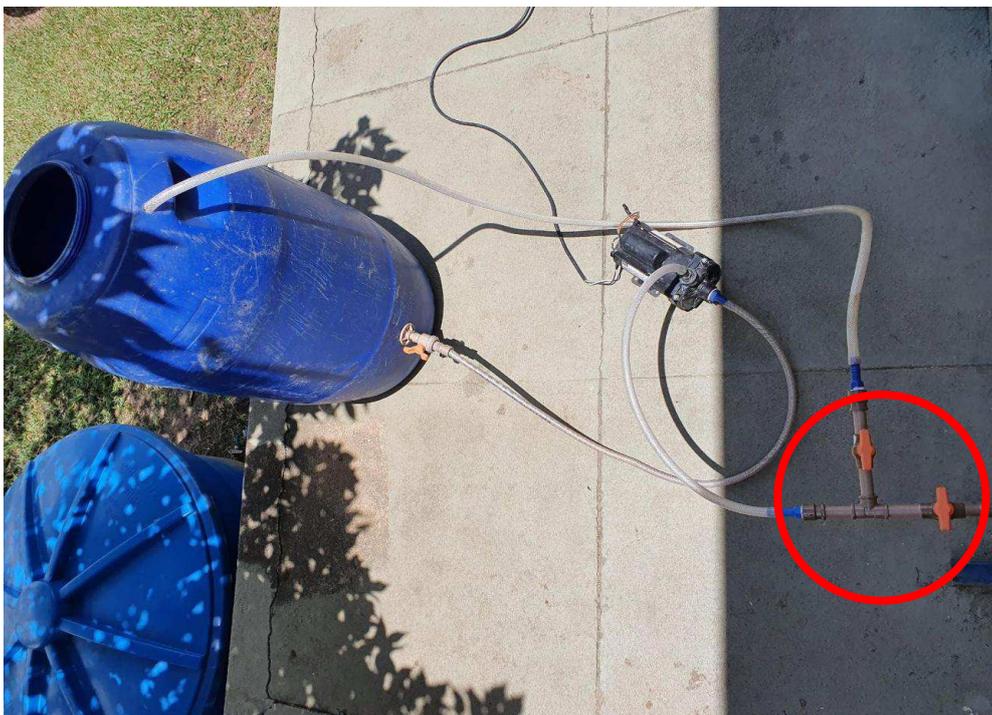
É sabido que essa vazão de entrada é diferente para os três reatores, uma vez que à medida que o efluente vai sendo filtrado há uma resistência por parte do poliestireno que reduz essa vazão ao passar de um reator para outro, sendo assim esse valor de 0,5 L/min corresponde ao valor controlado pela válvula de entrada e medido no rotâmetro.

Para garantir essa vazão, o reator conta com um bypass (Figura 21) na entrada do sistema para controlar a vazão por meio de uma válvula que diminui ou aumenta o fluxo de água dentro do sistema. Esse mecanismo é fundamental, pois o volume de água que escoar dentro do reator deve ser proporcional às suas características como tamanho e volume ocupado pelo leito filtrante. Sendo assim, uma vazão alta pode dificultar a adsorção das impurezas no poliestireno.

Esse mecanismo de retorno da água para dentro do tanque da alimentação, mais a retrolavagem realizado ao final do dia, acarreta em mudanças nas características físico-químicas e microbiológicas da água da alimentação de um dia para o outro. Sendo assim, a água usada para alimentar o sistema nos dias subsequentes apresentam

características diferentes em relação à água usada no dia anterior, simulando assim uma troca periódica desse líquido no tanque de alimentação.

As vazões de saída foram aferidas volumetricamente nos três reatores com auxílio de cronômetro e proveta graduada. Esse procedimento foi realizado sempre no início e no final da operação do reator.



**Figura 21: Bypass na entrada do sistema.**

## **5.8 Otimização do sistema**

Nessa etapa foram analisadas as variáveis de entrada: Vazão, granulometria das pérolas de PS e configuração de operação (série ou paralelo), conforme apresentado na Figura 22.

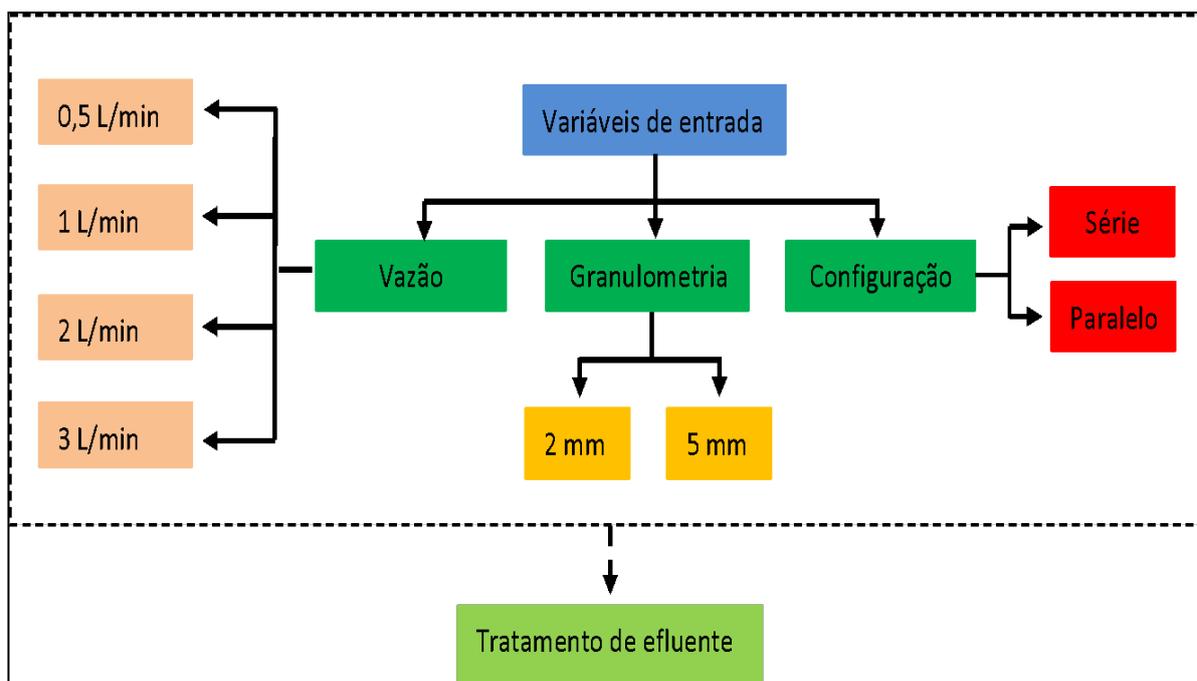


Figura 22: Fluxograma das variáveis de entrada para otimizar o reator.

Na entrada do sistema de tratamento existe um rotâmetro de escala 0,4 L/min a 4,0 L/min para controlar a velocidade do efluente dentro do reator. Foram testadas quatro vazões para alimentação do sistema: 0,5L/min, 1,0 L/min, 2,0 L/min e 3,0 L/min. Não foram testadas vazões acima de 4,0 L/min devido à queda de rendimento do reator quando operado com a vazão de 3,0 L/min.

Para o leito filtrante foram testadas duas granulometrias de PS (2,0 e 5,0 mm) para avaliar qual apresentava melhor adsorção das impurezas presentes na água. Essas granulometrias foram testadas por serem as mais encontradas no mercado. A escolha da granulometria de um meio filtrante depende de diversas variáveis, qualidade desejável do efluente, sistema de lavagem e espessura da camada filtrante (MELO, 2014).

A adsorção é um processo de atração e acumulação de uma substância em um fluido (adsorvato) na superfície sólida de outra (adsorvente). Os compostos orgânicos permanecem na superfície do adsorvente devido a ligações de hidrogênio, interações dipolo-dipolo e forças de Van der Waals (LIMA, 2019).

Estas forças são fracas e reversíveis, de modo que possibilita a reutilização do material por um período maior. Os principais fatores que influenciam na capacidade adsorptiva do material são: temperatura, a área superficial, a concentração inicial, pH e força iônica.

Inicialmente os três reatores receberam as esferas de 2,0 mm, e depois as de 5,0 mm de modo que tanto a vazão como a configuração foram variadas. Como o *software* utilizado trabalha com intervalos definidos, foi adotada a vazão mínima de 0,5 L/min e máximas de 3,0 L/min para rodar o planejamento experimental.

Como o sistema tem a possibilidade de trabalhar em série ou paralelo, foram realizados oito experimentos em triplicata, intercalando a configuração do reator, a vazão de entrada e a granulometria das esferas de poliestireno, conforme um planejamento fatorial com três fatores ( $2^3$ ), afim de se investigar os efeitos destas variáveis de entrada sobre as variáveis de saída (parâmetros cor e turbidez) ao mesmo tempo. A Tabela 1 apresenta a matriz do planejamento experimental. Esses dados foram tratados no *software* Minitab 17.

**Tabela 1: Matriz do planejamento experimental.**

<b>Experimentos</b>	<b>Tipo de configuração</b>	<b>Diâmetro das esferas de poliestireno</b>	<b>Vazão de entrada</b>
Experimento 1	Série	2 mm	0,5 L/min
Experimento 2	Série	2 mm	3,0 L/min
Experimento 3	Série	5 mm	0,5 L/min
Experimento 4	Série	5 mm	3,0 L/min
Experimento 5	Paralelo	2 mm	0,5 L/min
Experimento 6	Paralelo	2 mm	3,0 L/min
Experimento 7	Paralelo	5 mm	0,5 L/min
Experimento 8	Paralelo	5 mm	3,0 L/min

Para avaliar qual experimento apresentaria maior eficiência no tratamento das águas residuárias, foram analisados em triplicata, os parâmetros “Cor”, pelo método colorimétrico, e “Turbidez”, pelo método nefolométrico, antes e depois dos tratamentos.

Essa etapa foi realizada duas vezes por semana, durante seis horas, avaliando-se a eficiência de remoção desses parâmetros, bem como o tempo de saturação do poliestireno, comparando a taxa de remoção inicial quando o material filtrante estava virgem, com o filtrado final.

Após o levantamento desses dados foram testadas as vazões de 0,5 L/min, 1,0 L/min, 2,0 L/min e 3,0 L/min para confirmar os resultados do planejamento experimental, bem como para avaliar qual a melhor vazão de operação do reator. Sendo

assim foram realizados seis experimentos variando as vazões, o tamanho das esferas de poliestireno e a configuração do reator. Esses dados proporcionam um maior grau de confiança principalmente no que tange as variáveis de entrada testadas no planejamento experimental.

Também foi analisado o potencial de remoção de cor e turbidez de cada reator individualmente quando trabalhado em paralelo, para isso foi coletado três amostras de água em cada ponto de saída. Para a realização desses experimentos levou-se em consideração a vazão de entrada bem como o tamanho das esferas usadas, sendo coletada água no reator com as seguintes especificações:

- Vazão de entrada 0,5 L/min com esferas de poliestireno de 2,0 mm;
- Vazão de entrada 0,5 L/min com esferas de poliestireno de 5,0 mm;
- Vazão de entrada 1 L/min com esferas de poliestireno de 2,0 mm;
- Vazão de entrada 1 L/min com esferas de poliestireno de 5,0 mm;
- Vazão de entrada 2 L/min com esferas de poliestireno de 2,0 mm;
- Vazão de entrada 2 L/min com esferas de poliestireno de 5,0 mm;
- Vazão de entrada 3 L/min com esferas de poliestireno de 2,0 mm;
- Vazão de entrada 3 L/min com esferas de poliestireno de 5,0 mm;

Esse estudo foi importante para avaliar se o filtrado produzido por cada coluna individualmente seria suficiente para remover esses parâmetros. Devido aos resultados iniciais não serem satisfatórios, não foram analisados outros parâmetros como, por exemplo, fósforo e DQQ.

Após a avaliação da melhor granulometria, esta foi usada nos três reatores simultaneamente como elemento filtrante. Sendo assim, foi comparado o percentual de remoção da cor, turbidez, E. Coli, DQO, pH, CE, nitrato, nitrito, amônia e fósforo total com esferas de 2,0 mm variando o tipo de configuração e vazão de entrada. Esse teste foi importante para avaliar qual configuração e vazão seria mais eficiente para remover esses parâmetros.

Sendo assim, foi seguido o seguinte cronograma para coleta de água: O reator foi operado 6 horas por dia com a configuração em série, de modo que no primeiro dia foi coletado água a cada hora para a vazão 0,5 L/min, no segundo dia foi realizado o mesmo procedimento para vazão 1,0 L/min, no terceiro dia 2,0 L/min e no quarto dia 3,0 L/min.

O mesmo procedimento foi realizado para a configuração paralelo do quinto dia em diante. Para a realização desses experimentos as coletas de água foram realizadas em na saída dos três reatores simultaneamente. Sendo assim, após a obtenção dos resultados das análises físico-químicas e microbiológicas foram calculadas as médias para a construção dos gráficos. Esse cronograma foi realizado para todos os parâmetros de qualidade de água mencionados.

A água utilizada no sistema quando operado em série foi à mesma durante toda a semana, uma vez que durante a alimentação dos reatores, parte do efluente voltava para a caixa da alimentação. Para a realização dos experimentos utilizando à configuração em paralelo a água da alimentação foi trocada por outra da mesma fonte. Esse procedimento foi adotado devido à diluição sofrida pela água usada na alimentação ao final do sexto dia de batelada proporcionado pelo processo de retrolavagem. Vale ressaltar que ao final de cada experimento (tanto com a configuração em série como paralelo) o sistema recebeu água limpa proveniente da retrolavagem que acabava diluindo a água do tanque da alimentação.

Por fim foi analisado se há diferença significativa na remoção de cor, turbidez, DQO e E. coli quando o reator está recheado com poliestireno de 2,0 mm ou 5,0 mm. Sendo assim, foram realizados 6 experimentos em série variando as vazões em 0,5 L/min, 1,0 L/min, 2,0 L/min e 3,0 L/min afim de diagnosticar qual granulometria é a mais eficaz, uma vez que as demais variáveis de entrada como vazão e configuração foram otimizadas nos experimentos anteriores.

## **5.9 Avaliação dos parâmetros de qualidade de água**

Após otimizar as variáveis de entrada, essas foram utilizadas para tratar as águas da Lagoa da UFCG, no tocante aos parâmetros citados na Tabela 2. As análises desses parâmetros foram feitas em triplicada seguindo as metodologias aplicadas por APHA, 1999.

A qualidade das águas foi avaliada antes e depois do tratamento. Para isso foram coletadas amostras no final do terceiro filtro quando operado em série, visto que essa configuração se mostrou a mais significativa para o processo.

**Tabela 2: Parâmetros e métodos usados nas análises dos efluentes.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Método de análise</b>	<b>Referência</b>
pH	Método Instrumental	APHA, 1999.
DQO	Espectrofotométrico	APHA, 1999.
Condutividade elétrica	Método Instrumental	APHA, 1999.
Escherichia coli	Membrana filtrante	APHA, 1999.
Fósforo total	Colorimétrico	APHA, 1999.
Turbidez	Método Instrumental	APHA, 1999.
Cor aparente	Método Instrumental	APHA, 1999.
Amônia	Colorimétrico	APHA, 1999.
Nitrato	Colorimétrico	APHA, 1999.
Nitrito	Colorimétrico	APHA, 1999.

Essa fase da pesquisa foi importante para avaliar o tempo médio que o reator precisou para tratar essas águas, assim como para avaliar a necessidade de fazer uso da retrolavagem. Para realização dessa etapa, o reator trabalhou seis horas por dia, em um intervalo de quinze dias durante oito meses.

Ao final teve-se um total de dezesseis experimentos. A eficiência de remoção e/ou redução de determinados parâmetros como, por exemplo, a Escherichia coli, são de extrema importância neste estudo uma vez que esses indicadores possibilitarão certificar se o sistema proposto é condizente, ou não com a qualidade exigida para reúso no meio agrícola.

Cada amostra foi analisada em triplicata, de modo que os resultados físico-químicos são apresentados em forma de média aritmética, e as bacteriológicas por médias geométricas. Os resultados desses parâmetros foram analisados estatisticamente por meio da correlação linear de Pearson para evidenciar a proporcionalidade entre a qualidade da água nos pontos de coleta, a fim de investigar a relação entre elas.

Para verificar o efeito das fontes de variação (vazão de entrada, tamanho das esferas de poliestireno e configuração) sobre os parâmetros de qualidade da água foi realizada a análise de variância (ANOVA) considerando o nível de significância de 5%. Os testes foram realizados por meio do programa computacional Microsoft Excel 2011, de modo que a variância é significativa quando  $p < 0,05$ .

Também foi analisada a correlação de Person para verificar a influência da variação da vazão na remoção de cor e turbidez nos testes iniciais. Esse teste estatístico

apresenta valor de ( $r$ ) entre -1 a 1, sendo uma relação forte quando mais próximo de -1 ou 1 e fraca quanto mais próximo de 0. Essa análise também foi realizada por meio do programa computacional Microsoft Excel 2011

### **5.10 Retrolavagem do sistema**

O PS apresenta uma esfericidade de  $0,96 \pm 0,086$ mm e baixa rugosidade que possibilitam ótimas condições para o processo de retrolavagem. Em virtude dessas características o material apresenta baixo custo na construção de sistema de limpeza e utilização de bomba de menor potência acarretando em economia de energia durante o processo.

A separação dos sólidos se efetua com a passagem da água pelos poros da camada filtrante, onde as partículas se aderem aos grãos do poliestireno. Após determinado período de funcionamento, ocorrerá a obstrução dos poros da camada filtrante, sendo necessário realizar a limpeza desse material.

Ao final do processo, foi realizada a retrolavagem do equipamento, utilizando água tratada com pH e condutividade elétrica (CE) controlada. Esta retrolavagem foi efetuada ao final de cada batelada, injetando-se água na parte inferior do reator (saída), drenando-se na parte superior, juntamente com as partículas que ficaram presas durante a filtração.

A retrolavagem tem como função desprender toda impureza agregada na superfície do material, sendo assim se fez necessário aplicar uma vazão de 4,0 L/min na saída do reator para causar uma turbulência entre as pérolas de poliestireno. Essa agitação e o atrito gerado entre a água e o material, bem como entre as próprias pérolas de isopor foram suficientes para limpar esse elemento filtrante.

Segundo SCHÖNTAG (2015), para alcançar uma velocidade de lavagem ótima, é essencial conhecer a água bruta a ser tratada, pois o arraste depende das características destas impurezas retidas durante a filtração.

A frequência da retrolavagem tem impacto direto na quantidade de água produzida, no entanto é importante analisar o período correto para realizar esse procedimento. Para isso foi lançado mão de alguns procedimentos operacionais.

Para a retrolavagem, utilizou-se água da torneira (controle), medindo-se os valores de pH e CE simultaneamente, a cada minuto, até que atingissem os valores da água controle. Estas medidas foram efetuadas nas saídas dos três reatores. Para

realização desse procedimento os reatores foram operados em paralelo, para garantir que as impurezas do primeiro reator não entrassem no segundo e terceiro reator. O tempo de lavagem, bem como a quantidade de água utilizada, também foi analisado durante o procedimento.

Esse procedimento possibilitou o aumento na vida útil do reator, reduzindo o acúmulo de sedimentos e matéria orgânica nas esferas de poliestireno. Essa retrolavagem foi realizada ao final de cada batelada, sendo injetada água na parte inferior do reator, de modo que a mesma saia na parte superior juntamente com as partículas que ficaram presas durante a filtração. Toda a água usada na limpeza dos filtros volta para a caixa de alimentação onde será utilizada para diluir o próximo efluente a ser tratado.

Esse procedimento compreende uma medida preventiva para minimizar entupimento do sistema, bem como minimizar a degradação do poliestireno, maximizado assim a vida útil do sistema.

### **5.11 Avaliação da qualidade das águas tratadas para fins de irrigação**

Os parâmetros foram analisados segundo as recomendações da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357 de 2005. Essa lei classifica os corpos de água, e estabelece os padrões a serem seguidos no que concerne os múltiplos usos, conforme apresentado no Quadro 2.

Sendo assim, após a realização do tratamento a qualidade dessas águas foi comparada com os valores de referência estabelecidos em lei, elencando os possíveis usos.

**Quadro 2: Classificação das águas e suas finalidades.**

<b>Tipo de água</b>	<b>Finalidade</b>
Doce: classe especial	- Abastecimento para consumo humano, com desinfecção; - Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação.
Doce: classe 1	- Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; - Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película.
Doce: classe 2	- Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; - Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto.
Doce: classe 3	- Abastecimento para consumo, após tratamento convencional ou avançado; - Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; - Dessedentação animal.
Doce: classe 4	- Navegação e harmonia paisagística.

**Fonte:** Adaptado da Resolução CONAMA nº 357/2005.

Andrade 2017, classificou as águas da lagoa da UFCG como sendo do tipo classe 4. Esse tipo de água não é propícia para irrigação de áreas verdes do campus, nem tão pouco se adéqua para dessedentação animal, conforme mostra o Quadro 2. O propósito do presente trabalho visa, através do sistema de tratamento contendo PS como elemento filtrante, transformar a referida água em classe 2 e/ou 3 para assim poder ser utilizada.

Ao final de cada experimento o filtrado foi classificado entre essas classes de água recomendado pela resolução vigente e assim elencado os possíveis usos na agricultura. Alguns parâmetros como condutividade elétrica e DQO, não são contemplados nesta resolução, porém foi utilizada bibliografia especializada para nortear esses resultados.

## 6.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Caracterização do poliestireno

A caracterização das esferas de PS foi realizada em função do diâmetro das seguintes formas:

- (1) As esferas secas;
- (2) Molhadas;
- (3) Secas após molhadas, conforme mencionado na metodologia.

Para realização dessa etapa foi verificado o diâmetro e o peso das esferas de PS, antes e depois do tratamento de efluente. Sendo assim, foram pesadas e medidas 100 esferas com diâmetros de 2,0 mm e 5,0 mm, antes e após serem colocadas em contato com efluente, o valor das médias (diâmetro e peso) estão representados na Figuras 23 e 24. Os dados utilizados para construção desses gráficos estão em apêndice na Tabela 10.

Observou-se que as esferas com diâmetro de 2,0 mm aumentaram 1,0 mm , no entanto essa diferença não é significativa pois a ANOVA apresenta  $p=3,75$ . Com relação ao peso da esfera a mesma apresentou um aumento de 1,5 vezes, apresentando valor de  $p=2,18$ , sendo assim não apresentou variação significativa.

Esta variação foi maior para este tipo de esfera devido à maior agregação e aproximação entre elas, por terem um diâmetro menor favorecendo uma maior compactação, tendo como consequência maior percolação da água entre as pérolas de poliestireno.

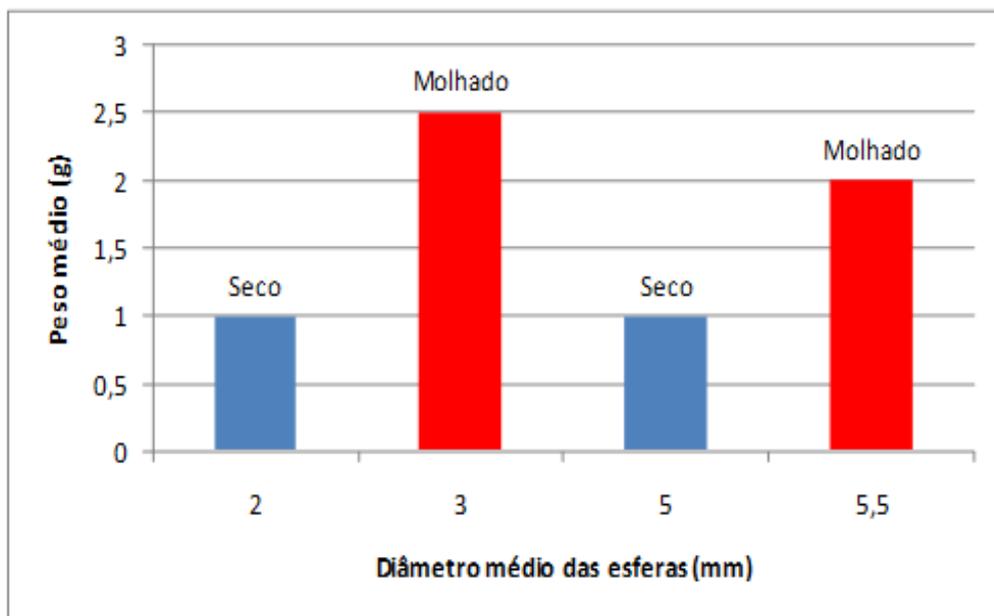


Figura 23: Medidas dos pesos e diâmetros das esferas de poliestireno após a filtração.

Na Figura 24 estão apresentados os resultados do peso e diâmetro das esferas, após a secagem ao sol, sendo observado que ambas as características iniciais foram praticamente restabelecidas. Este resultado é justificado pelo fato de o isopor não ser higroscópico.

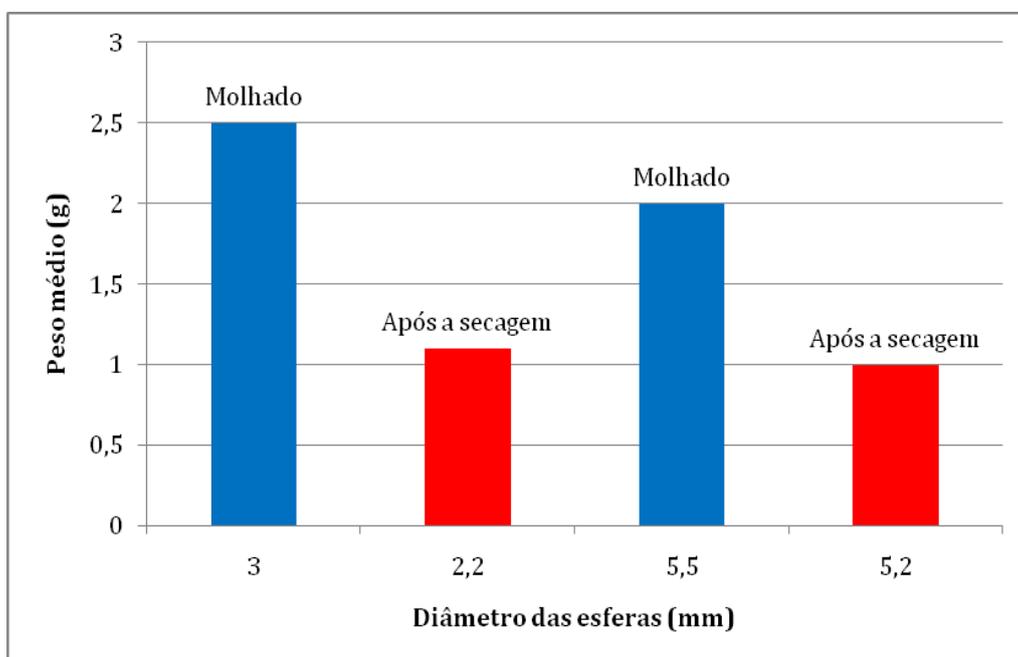


Figura 24: Medidas dos pesos e diâmetros das esferas de poliestireno após secagem ao sol.

Segundo Oliveira (2013), este material possui baixa absorção de água, fato esse que contribui para a manutenção de sua característica térmica e resistência ao envelhecimento. Na Tabela 3 pode-se observar a estatística descritiva dos resultados dos pesos e diâmetro das esferas de poliestireno.

**Tabela 3: Estatística descritiva dos pesos e diâmetros das esferas após o processo de filtração.**

<i>Peso molhado 2 mm</i>		<i>Peso molhado 5 mm</i>		<i>Diâmetro molhado 2 mm</i>		<i>Diâmetro molhado 5 mm</i>	
Média	2,508	Média	2,005	Média	3,001	Média	5,502
Erro padrão	0,039	Erro padrão	0,10957	Erro padrão	0,0979	Erro padrão	0,033
Mediana	2,4	Mediana	1,5	Mediana	2,7	Mediana	5,5
D. padrão	0,397	Desvio padrão	1,09575	D. padrão	0,9791	D. padrão	0,335
Variância	0,158	Variância	1,20068	Variância	0,9586	Variância	0,112
Mínimo	2	Mínimo	1	Mínimo	2	Mínimo	5
Máximo	4,2	Máximo	4,8	Máximo	5,7	Máximo	6,7
Contagem	100	Contagem	100	Contagem	100	Contagem	100

A Tabela 4 apresenta os valores dos pesos das esferas de PS usadas no decorrer da pesquisa, de modo que houve um aumento de 1,11 vezes na primeira amostra, na segunda amostra 1,13 vezes, na terceira amostra 1,09 vezes, na quarta amostra 1,10 vezes, na quinta amostra 1,13 vezes e na sexta amostra 1,16 vezes.

**Tabela 4: Valores dos pesos das esferas de PS usadas nos três reatores.**

Amostras	Peso inicial	Pesos molhado	Peso Seco (1)	Peso Seco (2)	Peso Seco (3)	Média
1	490 mm	1035 mm	492 mm	491 mm	495 mm	492 mm
2	490 mm	1045 mm	496 mm	496 mm	493 mm	495 mm
3	490 mm	1026 mm	491 mm	494 mm	492 mm	492 mm
4	490 mm	1033 mm	497 mm	499 mm	496 mm	497 mm
5	490 mm	1044 mm	493 mm	496 mm	494 mm	494 mm
6	490 mm	1059 mm	496 mm	498 mm	500 mm	498 mm

Após a secagem desse material foi observado que as esferas da amostra um aumentaram o peso em 0,4% em relação ao peso inicial, as da amostra dois aumentaram em 1,02%, a da amostra três aumentaram em 0,4%, as da amostra quatro aumentaram em 1,41%, as da amostra cinco aumentaram em 0,8% e as da amostra seis aumentaram em 1,6%. Esses resultados elucidam os dados presentes nas Figuras 23 e 24 onde o PS apresenta baixa absorção de água durante o processo de tratamento de efluente.

## 6.2 Otimização das variáveis de entrada

As variáveis de entrada (tipo de configuração, tamanho da esfera e vazão) foram analisadas para verificar qual delas apresentava maior significância para remoção de cor e turbidez. Por meio das Figuras 25 e 26 podemos constatar que a configuração é a variável mais significativa para o processo de remoção de cor e turbidez do efluente, seguido da vazão de entrada. Os dados utilizados para construção desses gráficos estão presentes no apêndice da Tabela 11.

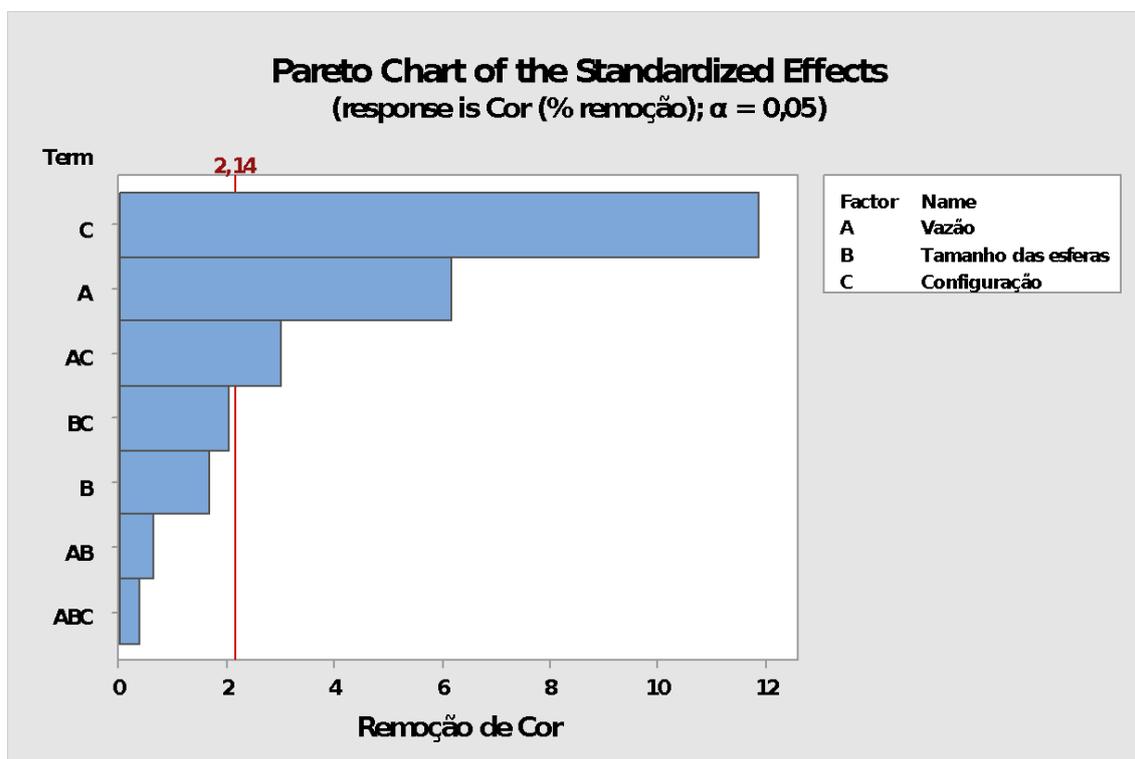


Figura 25: Gráfico de Pareto sobre remoção de cor.

A configuração em série apresentou os melhores resultados para remoção tanto de cor como turbidez, conforme presente nas Figuras 25 e 26. Esses resultados são justificados devido à maior carreira de filtração realizada pelo efluente dentro dos três

reatores, bem como o maior tempo de contato com as esferas de PS, fato esse que proporciona maior adsorção das partículas dissolvidas na água.

A associação da configuração com a vazão também foi significativa nesse processo conforme apresentada na Figura 25. Com relação ao tamanho da esfera, essa variável não foi significativa para remoção tanto de cor como de turbidez, sendo assim existe a possibilidade de se usar tanto as esferas de 2,0mm como as de 5,0 mm.

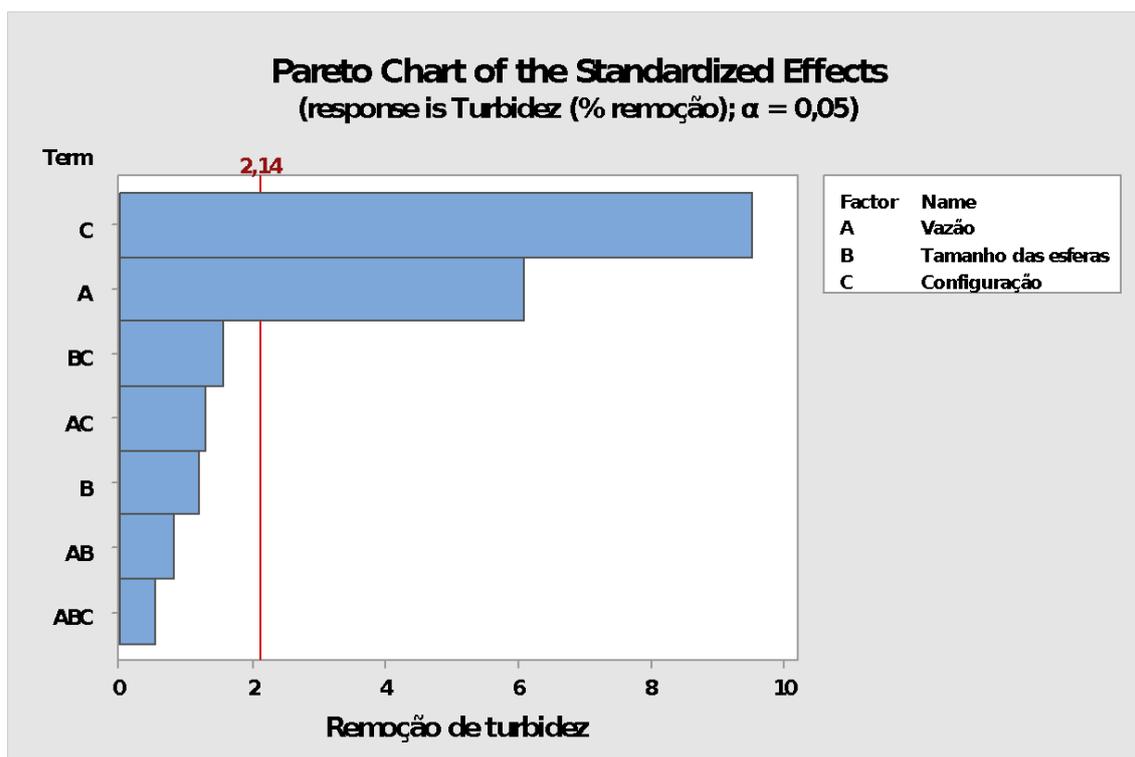
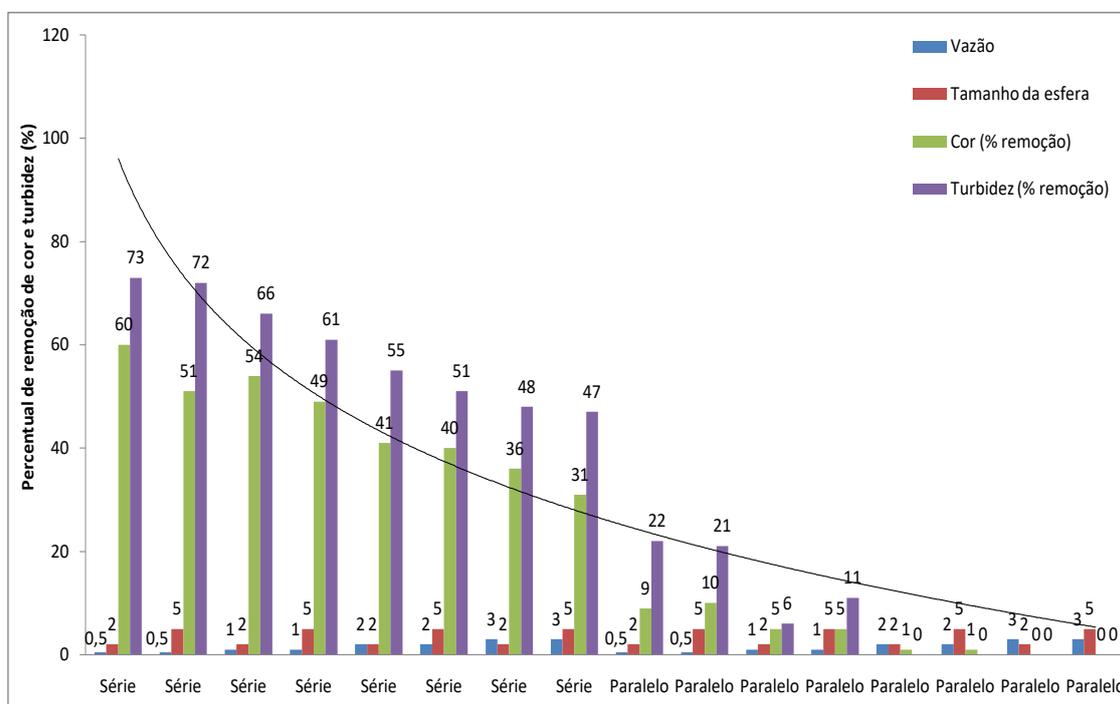


Figura 26: Gráfico de Pareto, remoção de turbidez.

A variável configuração foi essencial para otimizar o sistema, pois de acordo com a qualidade da água, esta pode ser alterada, ou seja, caso a água apresente valores baixos de cor e turbidez, o reator pode trabalhar em paralelo, diminuindo-se assim o tempo de tratamento, bem como o consumo de energia elétrica. Após a análise desses dados foram testadas as vazões de 0,5 L/min, 1,0 L/min, 2,0 L/min e 3,0 L/min para comparar com os resultados do planejamento experimental.

A Figura 27 mostra que a configuração em série proporcionou maior remoção de cor e turbidez, de modo que, associada à vazão mais baixa (0,5 L/min), bem como a esfera de menor diâmetro, obteve o resultado mais significativo. Segundo estudo de SOKOLOVIC et al. (2009), quanto maior o diâmetro do elemento filtrante menor será o ciclo de filtração. Estes resultados elucidam a simulação feita pelo gráfico de Pareto

(Figura 25 e 26), onde a variável configuração foi a mais significativa para a remoção desses parâmetros.



**Figura 27: Remoção de cor e turbidez em função da vazão e tamanho das esferas de poliestireno.**

Analisando os resultados apresentados na Figura 27, podemos observar que quando o reator operava em série, com o aumento da vazão e do tamanho das esferas, a taxa de remoção dos parâmetros cor e turbidez diminuíram de forma significativa, uma vez que o valor de  $p=0,016$ .

Quando se utilizou a configuração em paralelo a eficiência cai ainda mais, chegando ao ponto de não haver remoção nas vazões maiores. A configuração em paralelo não apresentou variação significativa entre os resultados, dados confirmados por meio do elevado valor de  $p=0,509$ .

Estudo realizado por Schöntag (2015) apresentou remoção de 70% turbidez e cor entre 50% a 70 % utilizando o mesmo material como leito filtrante. Esses resultados de turbidez e cor são similares aos apresentados pela Figura 27 quando o reator operava em série com vazão de 0,5 L/min.

A utilização desse material apresentou elevada capacidade de filtração, conforme também descrito por Nikoonahad et al. (2017). Foi realizado o teste Anova fator duplo

com repetição, entre as variáveis vazão e tamanho da esfera, com base na remoção da cor (Tabela 5) e turbidez (Tabela 6).

**Tabela 5: Análise de variância das variáveis vazão e tamanho da esfera na remoção de cor.**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
T. esfera	26,33	1	261,333	3,5285	0,069	4,14909
Vazão	20875	7	2982,14	40,2652	4,225E-14	2,31274
Interações	247,3333	7	35,3333	0,47707	0,84	2,31274
Dentro		32	74,0625			
Total	23753,666	47				

**Tabela 6: Análise de variância das variáveis vazão e tamanho da esfera na remoção de turbidez.**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
T. esfera	40,3333	1	40,3333	0,55536	0,4615	4,14909
Vazão	3436,63	7	4909,47	67,6003	2,295E-17	2,31274
Interações	199	7	28,4285	0,39144	0,900	2,31274
Dentro	2324	32	72,625			
Total	36929,66	47				

Sendo assim, observa-se que há diferença significativa entre a remoção dos parâmetros cor e turbidez, uma vez que o valor de P é menor que 0,05. Essa análise estatística apresenta destaque significativo para a vazão, sendo que o tamanho da esfera não apresentou relevância, tão pouco a interação entre essas duas variáveis, confirmando assim os dados apresentados nas Figuras 25 e 26.

### 6.3 Remoção de cor e turbidez nos reatores em paralelo

Concomitante aos resultados presentes na Figura 27 foi analisado os efluentes produzidos por cada reator individualmente para avaliar o percentual de remoção de cor e turbidez conforme apresentado na Tabela 7.

A remoção de cor e turbidez apresentaram remoção máxima de 10% e 18% respectivamente. Quando comparados os dados de cada reator, percebe-se que os resultados não sofreram variação significativa uma vez que a análise de variância apresentou valor de  $p=0,779$  para o parâmetro cor e  $p=0,98$  para o parâmetro turbidez.

**Tabela 7: Comparação entre o percentual de remoção de cor e turbidez nos três reatores quando operavam em paralelo.**

Vazão L/min	Tamanho da esfera	R1		R2		R3	
		Cor (% remoção)	Turbidez (% remoção)	Cor (% remoção)	Turbidez (% remoção)	Cor (% remoção)	Turbidez (% remoção)
0,5	2	9	18	7	16	8	12
0,5	2	5	16	9	15	5	16
0,5	2	4	11	5	11	6	10
0,5	5	10	15	9	13	9	14
0,5	5	6	13	8	12	9	11
0,5	5	5	16	6	9	6	10
1	2	5	6	4	8	4	9
1	2	3	2	4	6	3	6
1	2	2	3	3	3	3	5
1	5	4	5	5	6	5	7
1	5	4	6	4	6	3	6
1	5	2	3	3	5	3	5
2	2	1	1	1	1	1	1
2	2	1	0	0	1	0	0
2	2	1	0	0	0	1	0
2	5	1	0	0	0	0	0
2	5	0	0	0	1	0	0
2	5	0	0	0	0	0	1
3	2	1	0	0	0	0	0
3	2	0	0	1	1	0	0
3	2	0	0	1	0	0	0
3	5	0	0	0	0	0	0
3	5	0	0	0	0	0	0
3	5	0	0	0	0	0	0

Vale destacar também a deficiência dos reatores quando operam em paralelo com vazões acima de 2,0 L/min. Comparando esses resultados com os presentes na Figura 26, nota-se que a configuração em série tem alta relevância para o tratamento dessas águas uma vez que mesmo operando em vazões consideradas deficientes, 2,0 L/min e 3,0 L/min, o reator conseguem remover mais de 30% de cor e 46% de turbidez.

O tempo de percolação do líquido dentro do reator quando operado em paralelo não é suficiente para remover as partículas dissolvidas. Sendo assim, a utilização do reator nessas condições de operação só seria necessária quando o efluente a ser tratado apresentasse valores de cor e turbidez baixo.

Levando em consideração as recomendações da Resolução CONAMA nº 357/2005, o valor máximo de turbidez para água usada na irrigação é de 100 NTU, considerando que o sistema de reatores em paralelo, apresentou um valor máximo na remoção da turbidez de 18%, o sistema de reatores em série, para turbidez acima de 120

NTU se mostrou mais recomendado considerando que a remoção da turbidez foi mais considerada, 73% para o valor máximo de remoção e 47% seu valor mínimo.

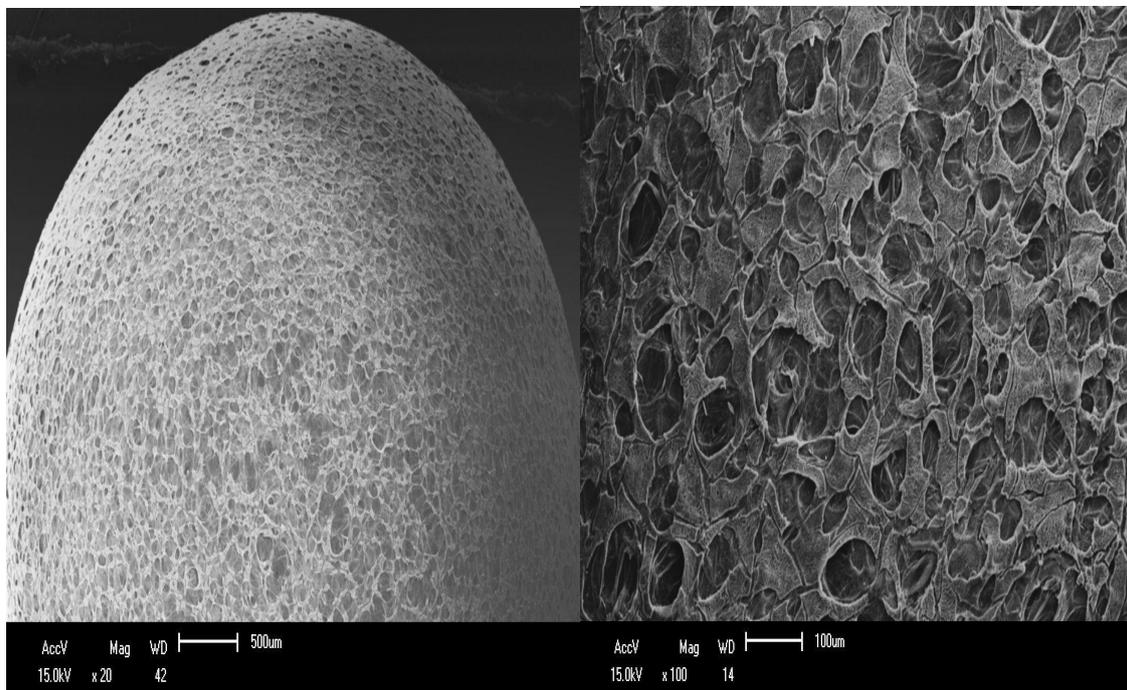
#### 6.4 Análise qualitativa das esferas de poliestireno

As esferas de poliestireno foram analisadas de forma qualitativa através da microscopia eletrônica de varredura. A análise do material foi de suma importância para verificar seu aspecto físico antes, durante e depois do processo de adsorção das impurezas do efluente.

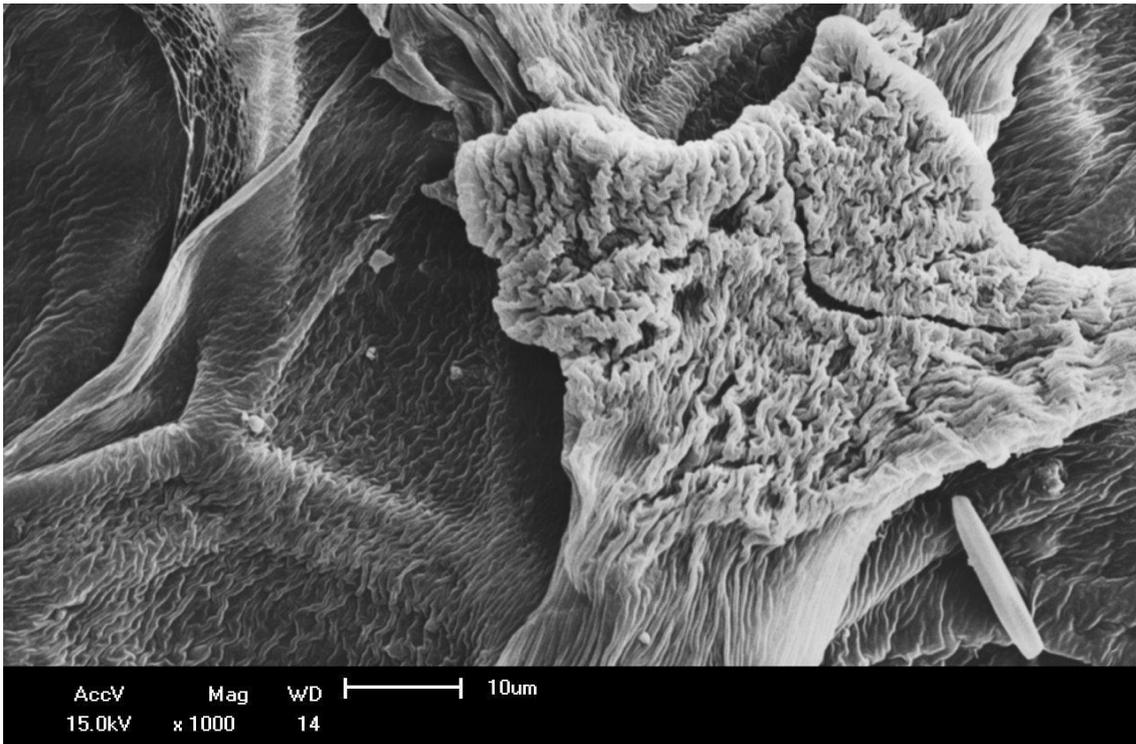
Sendo assim, foram registradas imagens ampliadas dos grãos filtrantes em três diferentes momentos (figuras 29 a 34):

- Antes do uso (limpa);
- Depois do processo de filtração (sujo);
- Depois da retrolavagem.

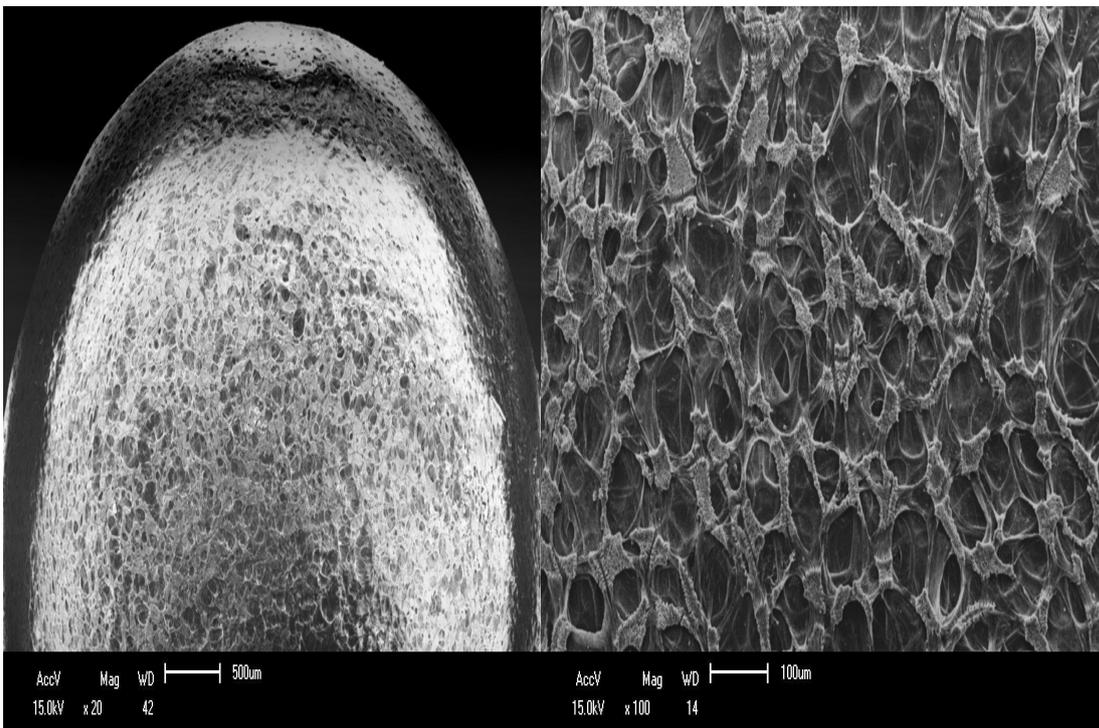
Essa análise possibilitou mensurar o grau de aderência das partículas nas paredes do material filtrante durante o tratamento do efluente, bem como sua capacidade de desprender essas partículas após a retrolavagem.



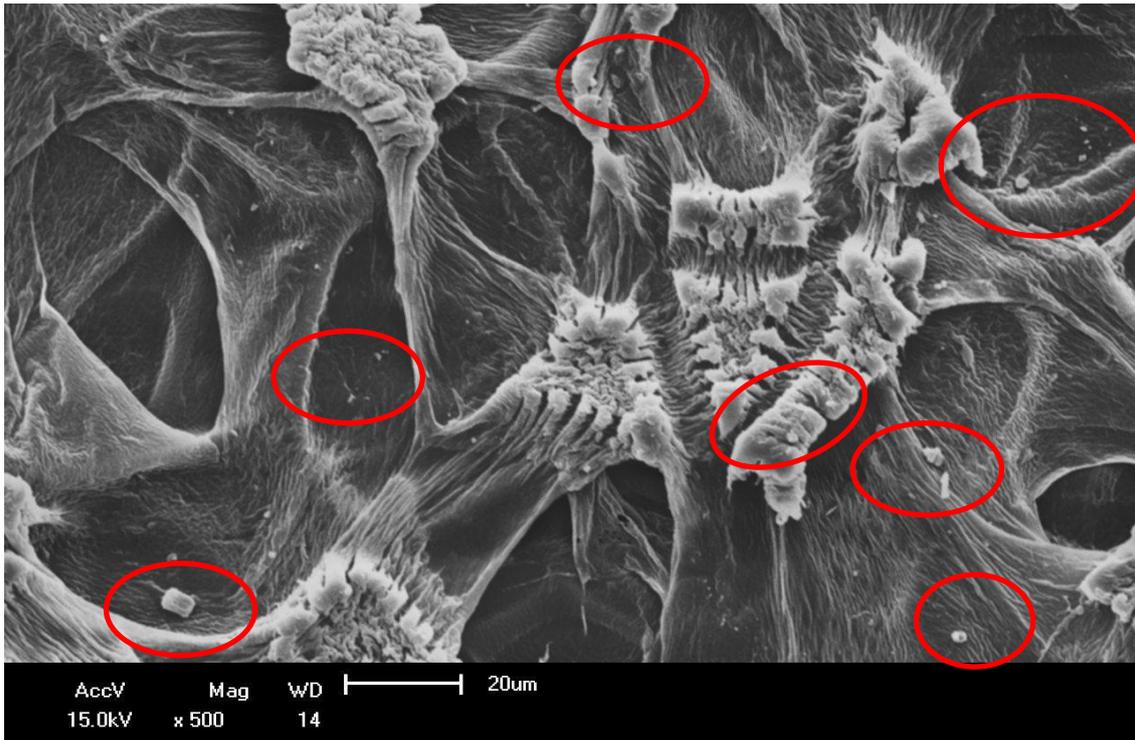
**Figura 28: Imagens das esferas de poliestireno limpa, ampliadas 20 e 100 vezes.**



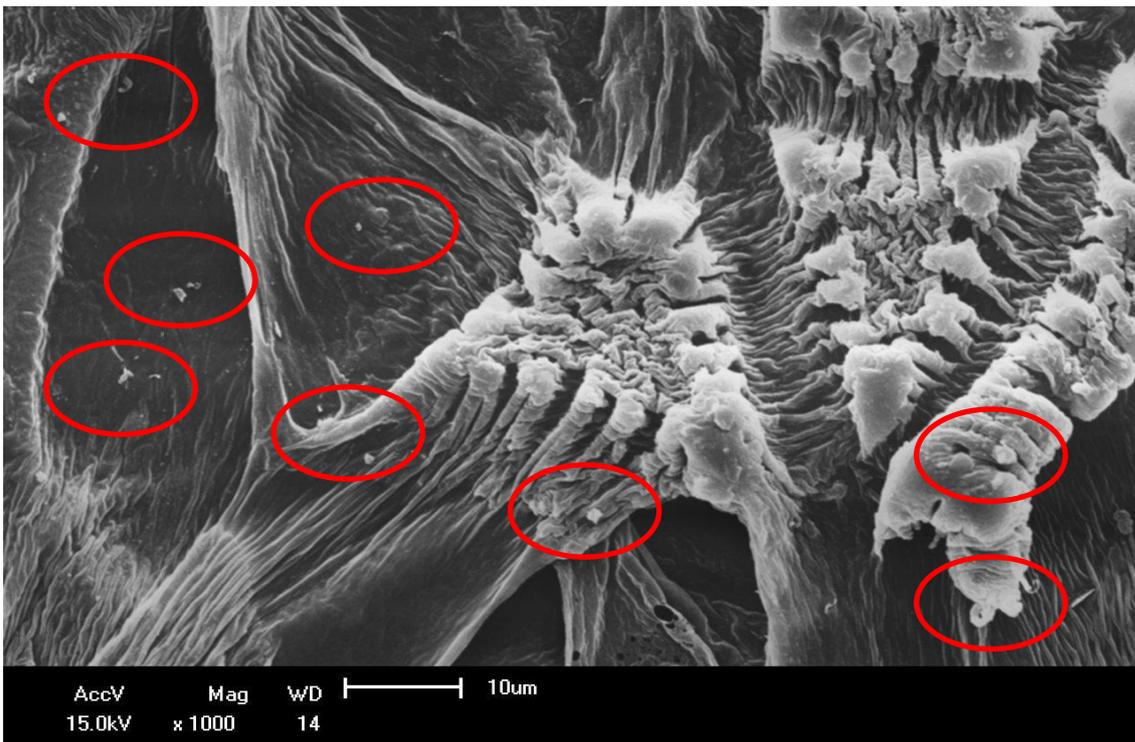
**Figura 29:** Imagens das esferas de poliestireno limpa, ampliada 1000 vezes.



**Figura 30:** Imagens das esferas de poliestireno sujas, ampliadas 20 e 100 vezes.



**Figura 31: Imagens das esferas de poliestireno sujas, ampliada 500 vezes.**



**Figura 32: Imagens das esferas de poliestireno sujas, ampliada 1000 vezes.**

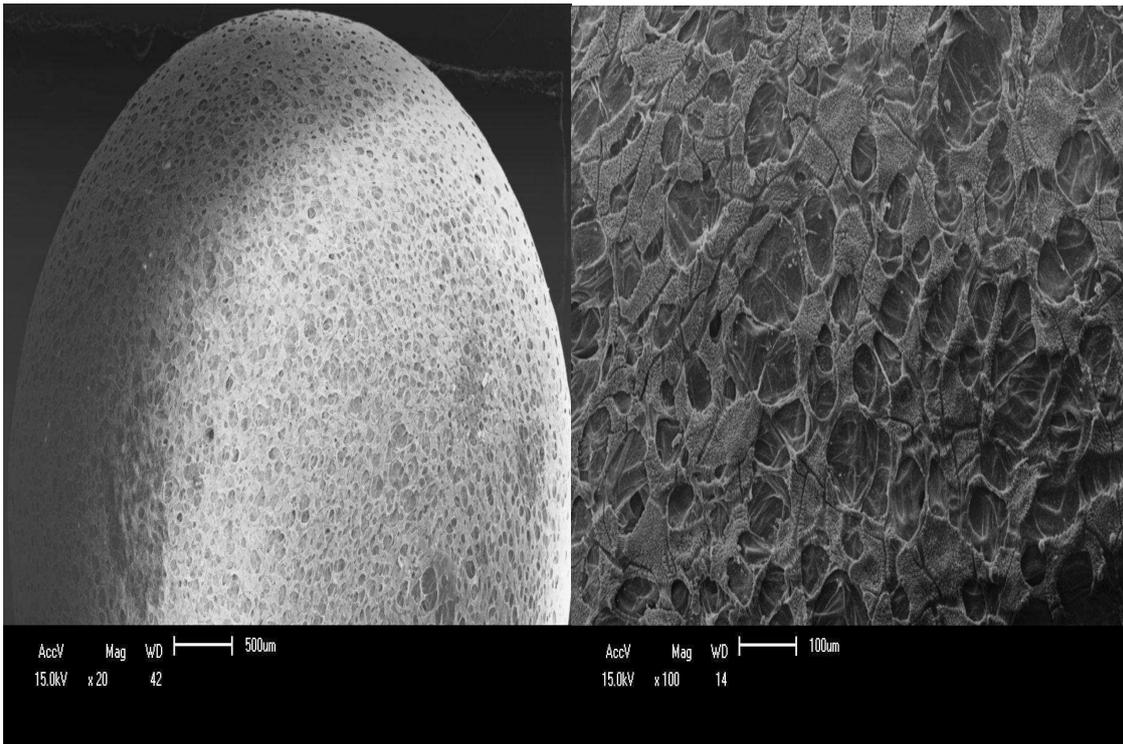


Figura 33: Imagens das esferas de poliestireno depois da retrolavagem, ampliada 20 e 100 vezes.

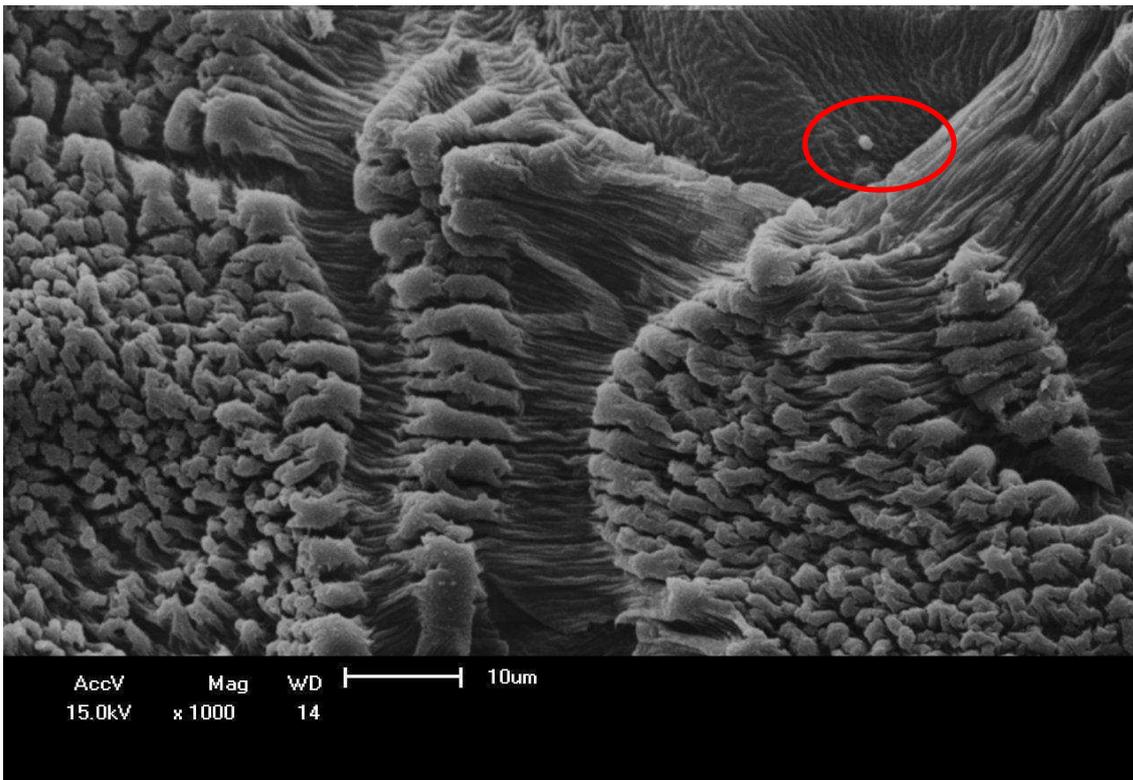


Figura 34: Imagens das esferas de poliestireno depois da retrolavagem, ampliada 1000 vezes.

Analisando as imagens da esfera virgem (Figuras 28 e 29) é possível observar a presença de alguma rugosidade do material (Figura ampliada 5000 vezes) e sua

superfície sem partículas sólidas agregadas. Essas rugosidades têm efeito significativo no processo de filtração devido ao processo de expansão gerado pela fabricação do material. Segundo SOKOLOVIC et al (2009), a baixa densidade do isopor possibilita baixa perda de carga e longo ciclo de filtração.

Nas imagens das esferas que foram usadas na filtração (Figuras 31 e 32) foram observadas algumas placas de sujeira aderidas à superfície dos grãos, conforme marcadas em vermelho nas fotografias. A rugosidade do material é um fator primordial para a aderência dessas partículas. O PS consegue reter particulados em sua superfície, dependendo da concentração dos elementos presentes no efluente, como sais, matéria orgânica e microrganismos, bem como dos sítios ativos da superfície do grão.

As esferas que foram retrolavadas (Figura 33) apresentam grãos aparentemente limpos. Quando ampliadas as imagens, nota-se a presença de algumas partículas de sujeira, porém quando comparadas as imagens com as esferas que foram utilizadas no tratamento do efluente, a remoção dessas partículas por meio da retrolavagem é bem significativa.

Levando em consideração o período de uso desse material (oito meses), nota-se uma grande resistência ao envelhecimento, no entanto a rugosidade superficial vai se perdendo devido principalmente ao processo de limpeza durante a retrolavagem, isso pode acabar deformando o material, bem como reduzindo seu potencial de adsorção após o período de oito meses.

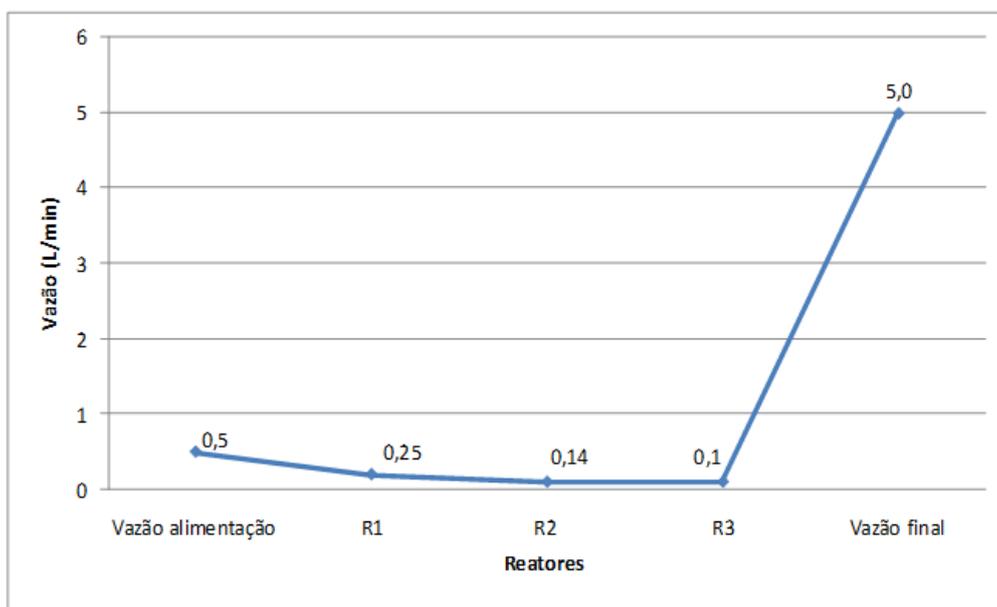
O fato de o PS ter grande resistência ao envelhecimento é de suma importância visto que outros materiais comumente utilizados para construção de filtros biológicos como cortes de bambu, envelhecem bem mais rápido, precisando serem trocados com maior frequência.

Devido à baixa vazão de entrada, a água passa através das esferas de poliestireno com baixa velocidade, de modo que, a aderência das partículas a superfície do leito filtrante por meio de atração eletrostática, retira a cor e a turbidez.

## **6.5 Vazão na saída dos reatores**

Na Figura 35 está representada a média das vazões de saída dos três reatores durante a alimentação do sistema. As coletas de água foram realizadas nos três reatores de forma síncrona, até que ambos estivessem completamente cheios. Os dados usados para construção desses gráficos foram retirados da Tabela 12 presente em apêndice.

Esses dados foram coletados 30 vezes nos três reatores durante seu funcionamento com a configuração em série, com a vazão de entrada de 0,5 L/min, utilizando as esferas de PS de 2,0 mm de diâmetro. Essas variáveis de entrada foram selecionadas por apresentar a maior eficiência no processo de tratamento das águas.



**Figura 35: Média das vazões da alimentação e das saídas dos três reatores.**

Conforme observado na Figura 35, a vazão diminui à medida que a água passa para o reator seguinte, devido à redução da velocidade em consequência da agregação e aderência das partículas na superfície das esferas. Segundo Jimenez et. al (2010), a filtração é o resultado da ação de três mecanismos distintos: transporte, aderência e desprendimento. Após os três reatores ficarem preenchidos de efluente, a vazão se estabiliza em 0,5L/min.

Segundo Melo (2014), os mecanismos de transporte são responsáveis por conduzir as partículas suspensas para as proximidades das superfícies dos coletores (leito filtrante). Ao ficarem aderidas, essas partículas removem as substâncias minerais, orgânicas e os sólidos em suspensão da água, diminuindo assim a cor e a turbidez.

No início da filtração com o meio filtrante limpo, há predomínio de ação física de coar, onde são retidas as partículas maiores que os vazios intergranulares. Com o aumento da quantidade de partículas retidas no topo, ocorre a diminuição dos vazios intergranulares fazendo com que os microrganismos fiquem retidos. No topo da camada

filtrante ocorre a formação da camada biológica aeróbia (Schmutzdecke), causada pela presença dos microrganismos e do oxigênio (DI BERNARDO e SABOGAL, 2008).

## **6.6 Bateladas para análise da configuração e vazão do reator**

Para realização dessa etapa da pesquisa o reator trabalhou seis horas por dia, de modo que foram testadas quatro vazões (0,5 L/min, 1 L/min, 2 L/min e 3 L/min) versus a configuração do reator (série e paralelo) para comparar as respostas no que concerne a remoção de cor, turbidez, DQO, E. coli, amônia, nitrito, nitrato e fósforo total do efluente tratado. Esse teste foi importante para comparar qual configuração e vazão seria mais eficiente para remover esses parâmetros.

As figuras que representam os resultados desses parâmetros apresentam a água da alimentação ilustrada como controle, bem como às seis horas de funcionamento do sistema tanto em série como em paralelo. Os dados usados para construção desses gráficos foram retirados da Tabela 13 presente em apêndice.

### **6.6.1 Cor**

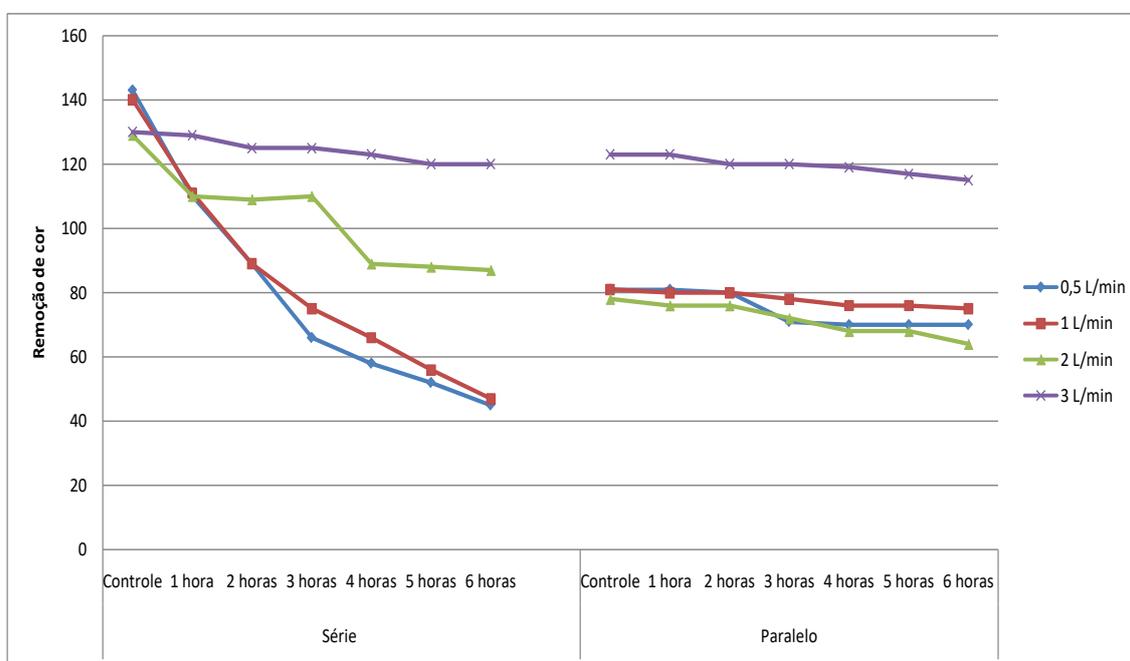
A cor é um parâmetro que não é tão abordado nos estudos relacionados ao reúso de efluente no meio agrícola pelo simples fato do mesmo não prejudicar o desenvolvimento das culturas. Porém, vale salientar que a presença de substâncias e compostos químicos na água devido a decomposição da matéria orgânica na água (principalmente vegetal), e também a introdução de esgotos industriais e domésticos, podem elevar a cor dessas águas, proporcionando assim prejuízo tanto ao meio ambiente como a saúde da população.

Sendo assim, águas com a cor muito elevada é o primeiro indício de uma possível contaminação, e precisa ser analisada do ponto de vista físico, químico e microbiológico. Esse parâmetro foi analisado durante toda a pesquisa em virtude da facilidade de identificação de sua alteração.

Por meio da alteração desse parâmetro foi possível identificar, por exemplo, o momento em que o leito filtrante precisava ser lavado devido à saturação durante o processo de adsorção. Sendo assim, a figura 36 apresenta a comparação da remoção desse parâmetro quando o reator operava nas duas configurações sob vazões diferentes.

Como observado na figura 36 a remoção de cor foi maior quando o reator trabalhou em série, principalmente com as vazões 0,5 L/min e 1,0 L/min pelo tempo de percolação e o contato da água no PS serem maiores devido a água passar pelas três colunas do reator. O reator em paralelo apresenta uma carreira de filtração maior, devido ao fluido passar apenas por uma coluna.

Comparado as remoções desse parâmetro com base nas configurações série e paralela, observa-se uma variação significativa com valor de  $p=0,0059$ . Ou seja, a remoção de cor realizada com o reator em série foi mais expressiva devido à percolação do líquido com o meio filtrante ser maior e conseqüentemente apresentar maior adsorção das substâncias dissolvidas na água.



**Figura 36: Remoção da cor do efluente tratado quando o reator trabalhou em série e paralelo.**

A Resolução do CONAMA nº 357/2005 estabelece valor de até 75 mg Pt/L para cor verdadeira das águas de classes 2 e 3, de modo que o percentual de remoção desse parâmetro proporciona sua utilização na irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto, bem como à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras.

Com base nos resultados da Figura 36, o reator apresentou remoção superior a 60% com as vazões 0,5L/min e 1,0 L/min fato esse que possibilita o uso dessa água na irrigação. Sendo assim, o sistema de tratamento proporciona o enquadramento do efluente tratado entre as classes 2 e 3 do CONAMA.

### 6.6.2 Turbidez

A elevação da turbidez é causada pela presença de partículas em suspensão e em estado coloidal, representado por argila, silte, areia e matéria orgânica em geral. Esses materiais podem interferir na análise da água, além de estarem associados a microrganismos.

Da mesma forma que a cor esse parâmetro isoladamente não acarretaria danos para irrigação, porém valores elevados podem estar associados à presença de partículas suspensas ou a proliferação de microrganismos como algas e cianobactérias que elevam a turbidez devido o aumento da clorofila *a* durante o processo de fotossíntese. A figura 37 apresenta os resultados desse parâmetro quando o sistema operou em série e paralelo.

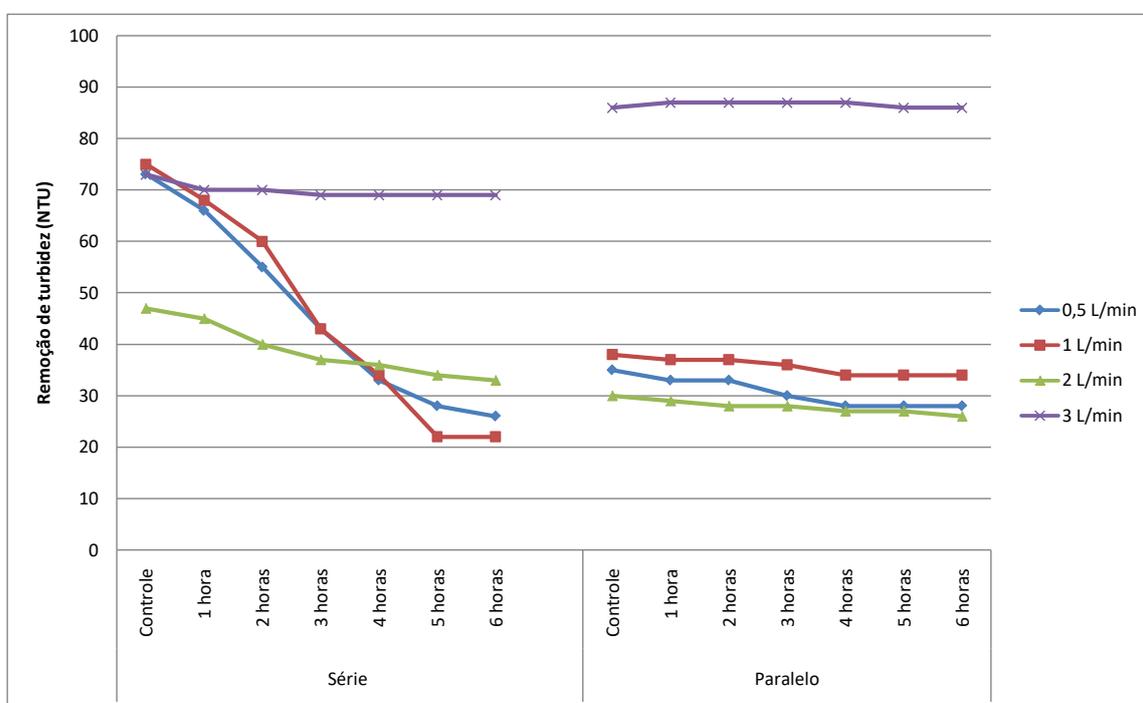


Figura 37: Remoção da turbidez do efluente tratado quando o reator trabalhou em série e paralelo.

A resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece o valor de limite de 100 NTU para águas classe 2 e 3, sendo assim esse efluente tratado pode ser utilizadas na irrigação. Apesar o efluente em estudo não apresentar valor acima de 100 NTU, a remoção realizada pelo reator quando trabalhou em série foi significativa principalmente quando associado às vazões 0,5 L/min e 1,0 L/min, chegando até 75% de eficiência.

Quando comparado a remoção desse parâmetro com base nas configurações série e paralela, observa-se uma variação significativa com valor de  $p=0,04$ . Sendo assim o sistema quando operado em série apresentou maior eficiência de remoção de turbidez em virtude da sua condição de operação, ou seja, devido à velocidade de escoamento entre o PS. Como o sistema opera com baixa velocidade de escoamento, essa característica favorece a remoção tanto de turbidez como cor segundo Ishi (2013).

Sendo assim os resultados apresentados na Figura 37 elucidam a eficiência desse sistema no que concerne a remoção desse parâmetro para enquadrar o efluente tratado entre as classe 2 e 3 do CONAMA, podendo assim ser utilizada nas irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto, bem como à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras.

### **6.6.3 Demanda Química de Oxigênio**

A matéria orgânica presente nos efluentes quantificada em termos de DBO5 e DQO pode ser degradada por microrganismos, principalmente bactérias. A degradação pelos microrganismos ocorre devido às necessidades destes em obter energia e fonte de carbono para seu metabolismo e reprodução.

Os valores de DQO podem ser considerados aceitáveis quando utilizado como água de reúso para fins agrícolas, quando o valor estiver até  $30 \text{ mg L}^{-1}$  para fertirrigação de plantas consumidas cozidas e de plantas não comestíveis (PATERNIANI et al., 2011).

Os dados presentes na Figura 38 ilustram a remoção DQO quando o reator operava em série e paralelo, de modo que os resultados mais significativos foram referentes à configuração em série. As vazões  $0,5 \text{ L/min}$  e  $1,0 \text{ L/min}$  tiveram melhor desempenho nesse processo de remoção de DQO com redução de 67% e 55,7% respectivamente, corroborando com os dados de remoção de *E. coli*. Essa remoção é superior ao observado em filtros de areia como verificado no trabalho de Castro et al. (2017) com remoção de 33,7% de DQO no pós-tratamento.

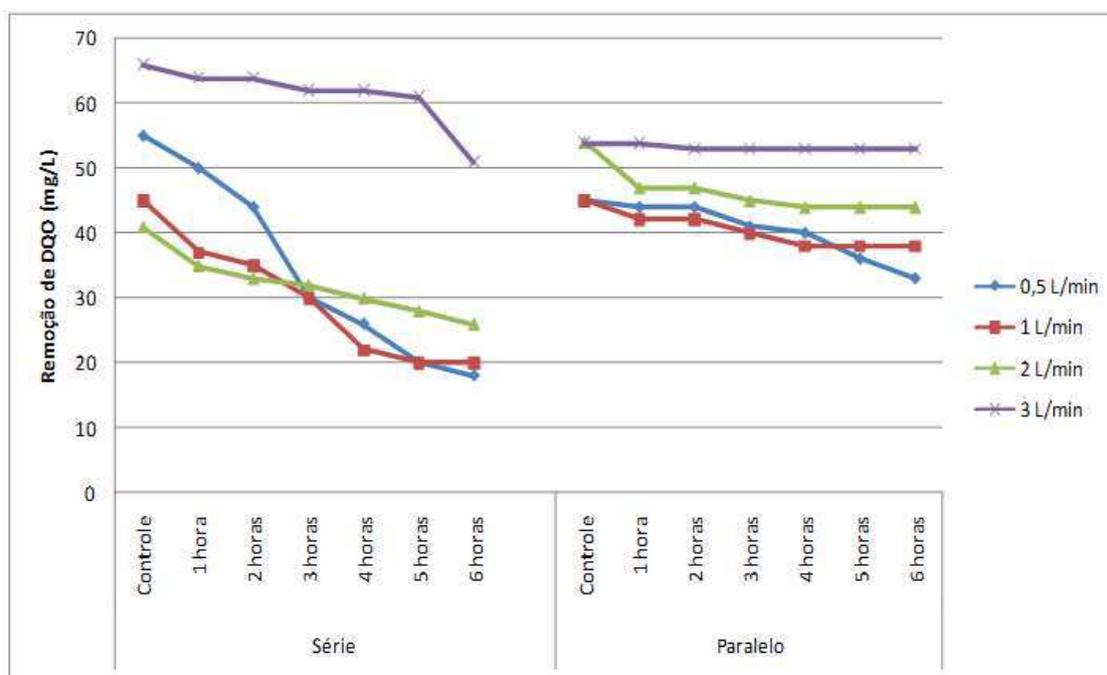


Figura 38: Remoção de DQO do efluente tratado quando o reator trabalhou em série e paralelo.

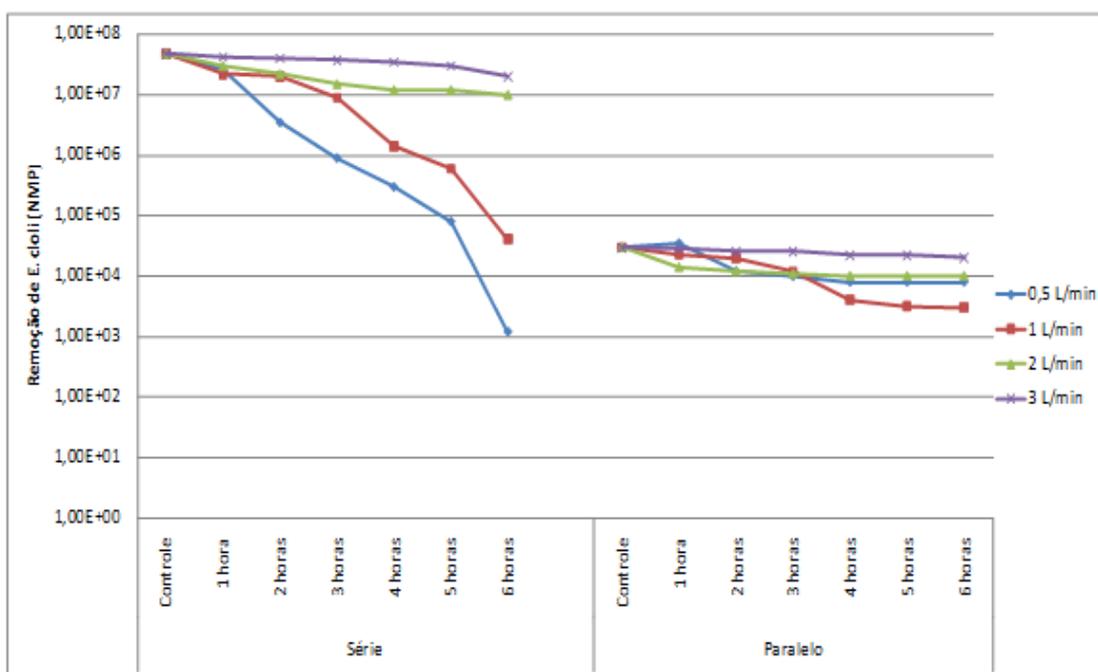
Quando comparado a remoção desse parâmetro com base nas configurações série e paralela, observa-se uma variação significativa com valor de  $p=3,50E-08$ . A matéria orgânica é consumida e reduzida por micro-organismos presentes no biofilme formado na superfície do PS.

Comparando a remoção de DQO quando o reator trabalhava com a configuração série em função das vazões de entrada, a análise de variância apresentou resultados significativos com valor de  $p= 1,139E-05$ . A análise de variância feita com o reator em paralelo em função das vazões de entrada também mostrou resultados significativos, com valor de  $p= 1,13E-07$ .

Devido ao seu poder de adsorção esse material também foi utilizado por Oliveira et al. (2006), de modo que, em seu experimento utilizando biorreator com isopor chegou a remoção de 85% de DQO. O poliestireno também se mostrou um substrato viável e eficaz para remoção de carga orgânica nos experimentos de Avelino (2012).

#### 6.6.4 *Escherichia coli*

A qualidade biológica dos efluentes utilizados na irrigação deve seguir as recomendações da resolução CONAMA nº 357/2005 com o intuito de diminuir a probabilidade de propagação de patógenos, evitando diversas enfermidades tanto aos produtores rurais, como aos consumidores.



**Figura 39: Remoção de E. coli do efluente tratado quando o reator trabalhou em série e paralelo.**

A Figura 39 apresenta os valores de remoção desse parâmetro quando o reator operava em série e paralelo. A remoção de E. coli foi mais acentuada quando o reator operava com a configuração em série, com vazão de operação foi de 0,5 L/min, totalizando uma remoção de 4 logs. A alteração da vazão para 1,0 L/min também apresentou boa remoção desses microrganismos totalizando 3 logs.

A presença de Escherichia coli caracteriza um risco potencial de transmissão de doenças, porém para um indivíduo ser infectado depende de uma série de fatores: a resistência dos microrganismos ao tratamento do esgoto, as condições ambientais da localidade bem como o grau de exposição humana aos focos de transmissão (CARVALHO et al. 2013).

Comparando a remoção de E. coli quando o reator trabalhava com a configuração série em função das vazões de entrada, a análise de variância apresentou resultados significativos com valor de  $p=0,004$ . A análise de variância feita com o reator em paralelo em função das vazões de entrada não mostraram resultados significativos, com valor de  $p=0,0857$ .

A irrigação com água residuárias sem tratamento ou com tratamento ineficiente pode contaminar as culturas pelo contato direto da água com a cultura irrigação, bem como pelo contato com solo devido às bactérias sobreviver por mais tempo no solo do

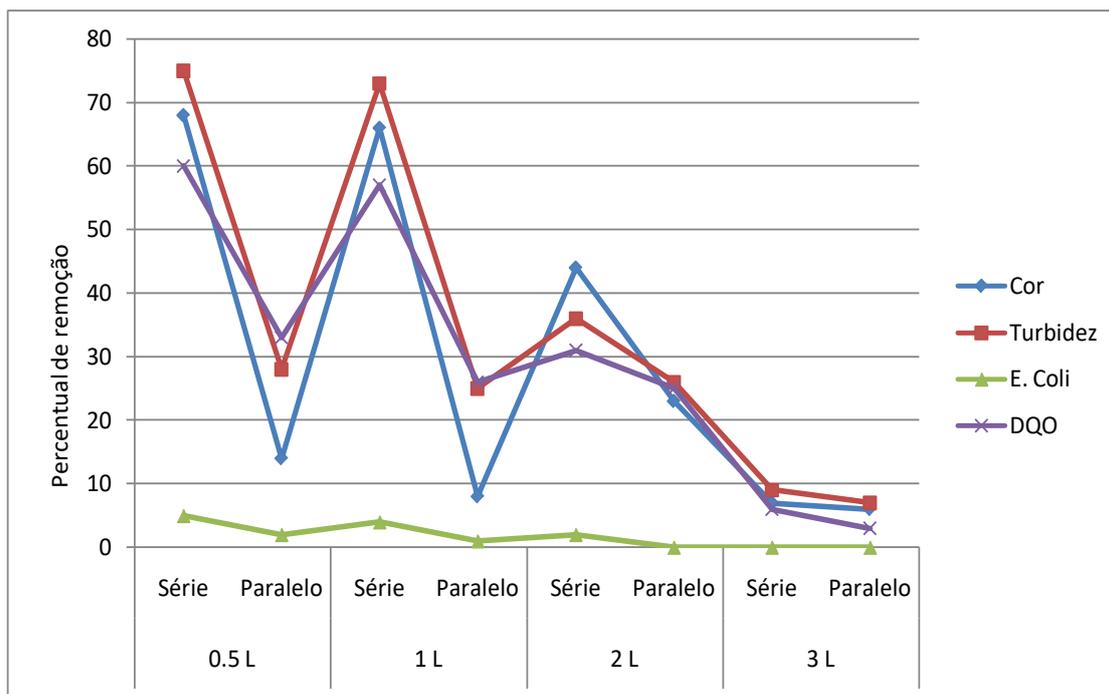
que nas culturas. Por apresentar condições como: matéria orgânica, umidade, temperatura e exposição solar, o solo favorece à sobrevivência e crescimento desses organismos (BASTOS e MARA, 1993).

A presença do biofilme formado na superfície do material bem como o maior tempo de contato que o efluente tem com esse biofilme são fatores fundamentais para os resultados obtidos. Quando comparado a remoção desse parâmetro com base nas configurações série e paralela, observa-se uma variação significativa com valor de  $p=0,04$ .

A Resolução nº 357 do CONAMA estabelece valor máximo de  $1.00E+03$  NMP desses microrganismos para irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto. Para irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras o limite máximo é de  $4.00E+03$  NMP. Sendo assim, o reator apresentou resultados significativos, uma vez que o efluente tratado com a configuração em série e vazão  $0,5$  L/min ficou com o número de bactérias recomendadas para as águas classes 2 e 3.

Apesar das demais vazões não terem apresentado resultados significativos, o reator pode ter um bom desempenho com a vazão de  $1,0$  L/min quando o efluentes apresentar número de bactérias inferior a 7 Logs. Sendo assim se faz necessário a análise do efluente antes do tratamento para analisar qual vazão de entrada seria a mais adequada, visto que quanto maior a vazão de entrada mais água tratada será produzida em um intervalo de tempo menor.

A Figura 40 apresenta a média do percentual de remoção de cor, turbidez e DQO, assim como o número de Logs removidos de E. Coli em seis horas de funcionamento do reator.



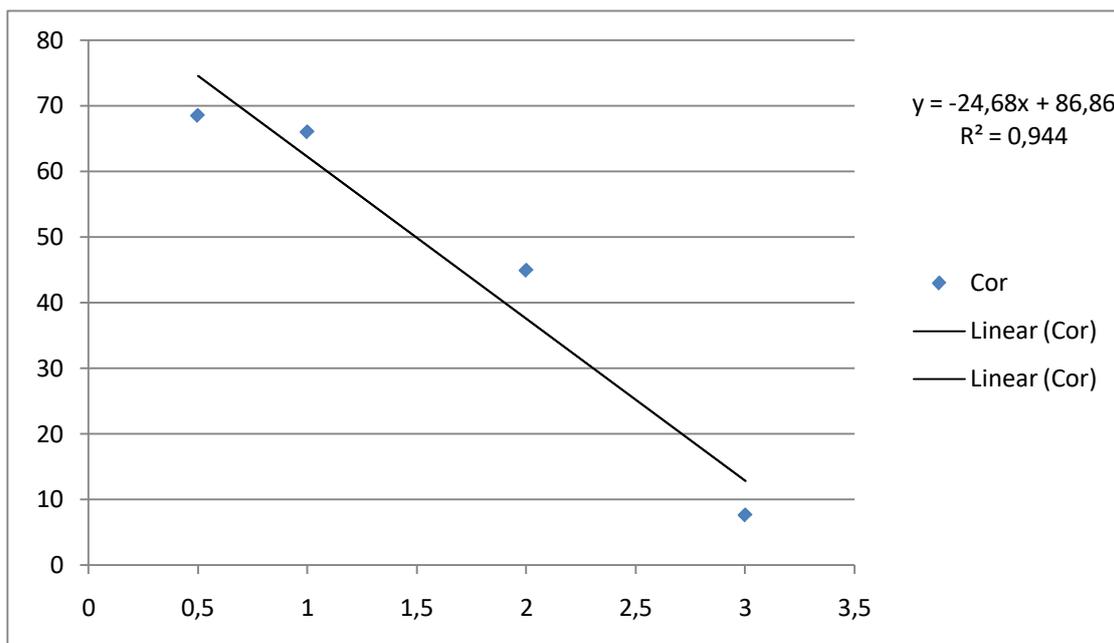
**Figura 40: Percentual de remoção de cor, turbidez, DQO e número de Log de E. Coli.**

Como observado na Figura 40, a configuração série apresentou maior remoção em todos os parâmetros, de modo que à medida que a vazão vai aumentando a eficiência de remoção desses parâmetros diminui. Sendo assim a configuração em série, mais as vazões 0,5 L/min e 1,0 L/min, apresentaram os melhores resultados.

A vazão de 3,0 L/min apresentou resultados totalmente insatisfatórios devido à velocidade de percolação dentro do reator, assim como menor tempo de contato da água com as esferas de PS. A redução do tempo de contato com as esferas diminui o poder de adsorção das partículas presentes na água.

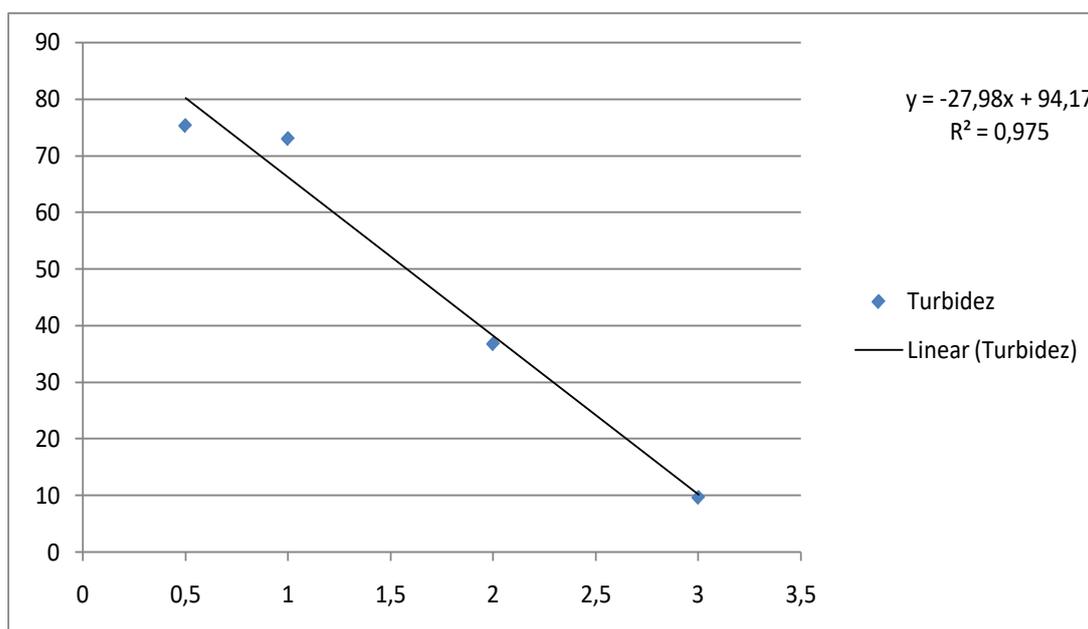
Quando comparado a remoção desses parâmetros com base nas configurações série e paralela, observa-se uma remoção maior quando o reator se encontra em série. Esses dados confirmam os dados apresentados nas Figuras 25 e 26 onde as variáveis configuração e vazão apresentam-se como as mais significativas para a eficiência do tratamento dessas águas.

Foi realizada a análise estatística de correlação de Person, para verificar a influência da vazão na remoção desses parâmetros discutidos anteriormente. Sendo assim, há uma forte correlação negativa entre a vazão e a remoção desses parâmetros, vez que o valor de R foi negativo e próximo a 9. Essa análise confirmou que quanto menor a vazão de entrada maior a remoção. As Figuras 41, 42, 43 e 44 apresentam os gráficos de dispersão desses dados.



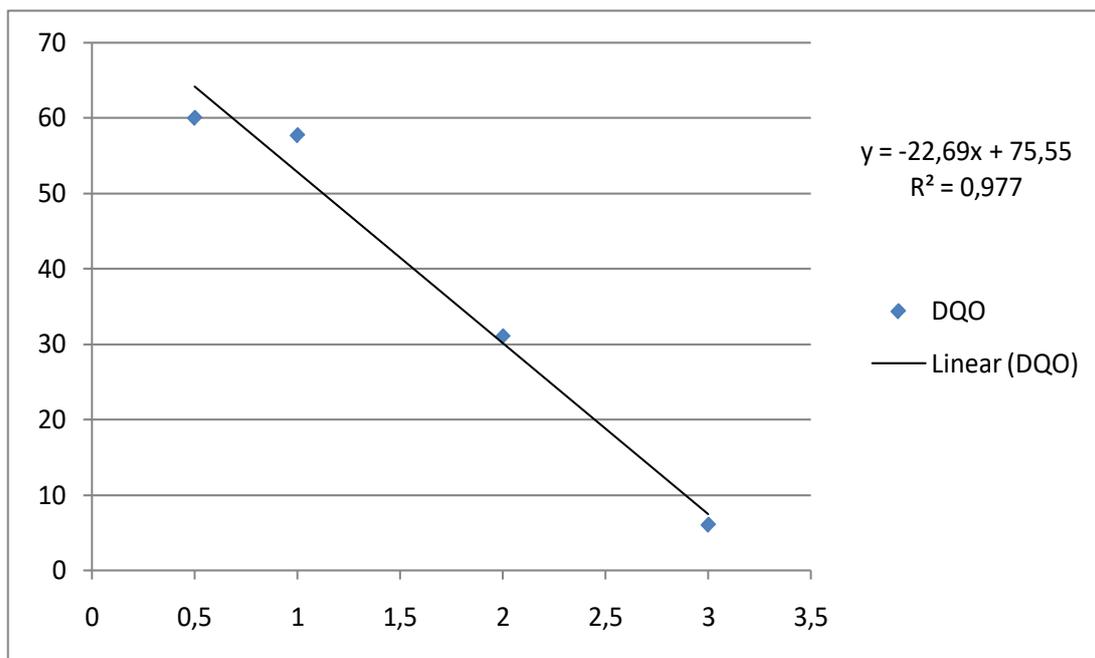
**Figura 41: Correlação entre a vazão de entrada versus remoção de cor.**

De acordo com a figura 37, 94,4% ( $R^2$ ) da remoção de cor é influenciada pela redução da vazão de entrada.



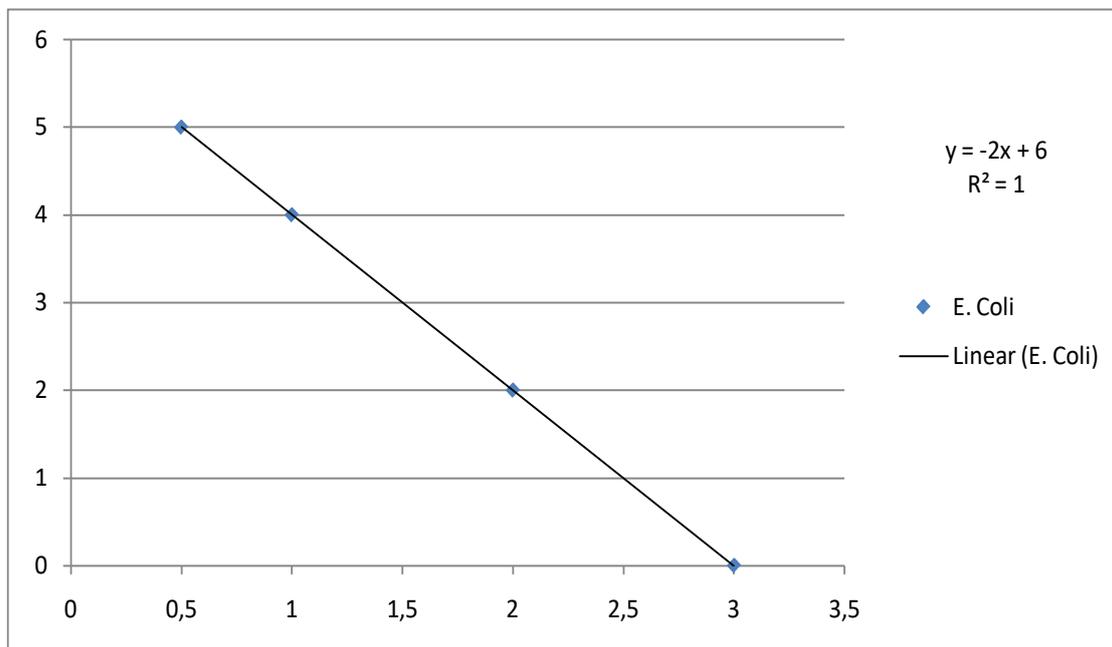
**Figura 42: Correlação entre a vazão de entrada versus remoção de turbidez.**

De acordo com a figura 38, 97,5% ( $R^2$ ) da remoção de turbidez é influenciada pela redução da vazão de entrada.



**Figura 43: Correlação entre a vazão de entrada versus remoção de DQO.**

De acordo com a figura 39, 97,7% ( $R^2$ ) da remoção de DQO é influenciada pela redução da vazão de entrada.



**Figura 44: Correlação entre a vazão de entrada versus remoção de E. Coli.**

De acordo com a figura 40, 100% ( $R^2$ ) da remoção de E. Coli é influenciada pela redução da vazão de entrada.

### 6.6.5 Potencial hidrogeniônico

O pH é um parâmetro físico químico importante para analisar o nível, alcalino ou ácido da água para fins de irrigação. Principalmente, sua influência quando são usadas em diversos tipos de solos.

Influi no grau de solubilidade de diversas substâncias, e como consequência na intensidade da cor, na distribuição das formas livre e ionizada de diversos compostos químicos, definindo também o potencial de toxicidade de vários elementos. A Figura 45 ilustra a variação do pH do meio aquoso durante 6 horas de operação, com o sistema operando em série e/ou paralelo, sob diferentes vazões, conforme mostra a legenda da figura.

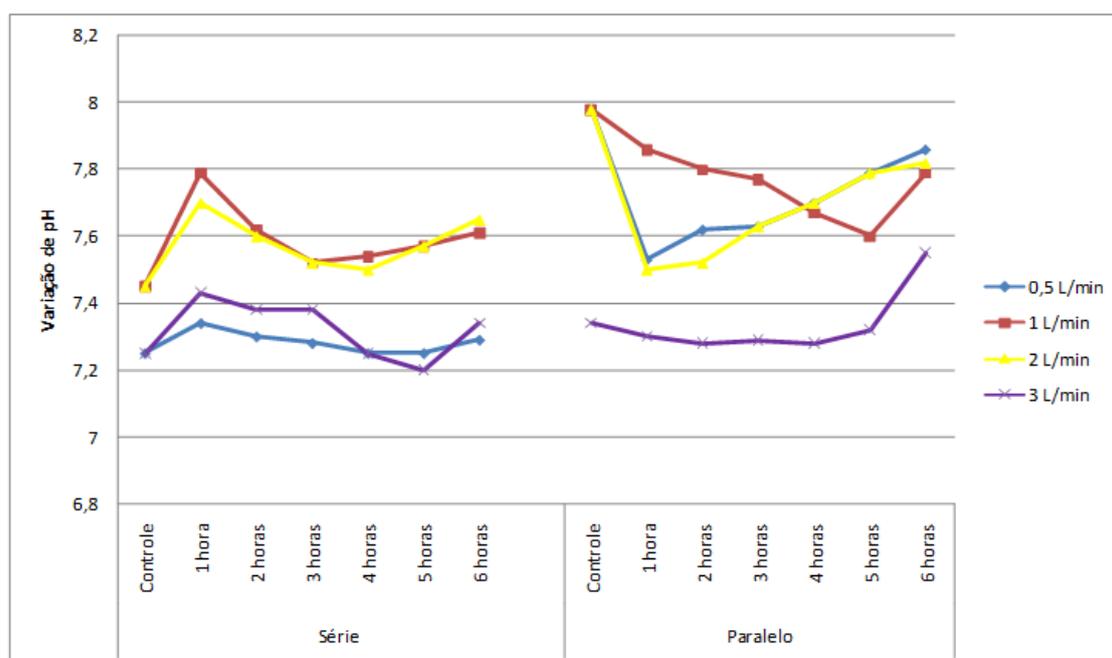


Figura 45: Variação de pH por hora trabalhada nos reatores.

De acordo com os dados, observou-se que a variação do pH não foi significativa para os dois sistemas estudados (série e paralelo). Para esses dados foi realizada uma análise de variância, a qual mostrou que não houve uma diferença significativa entre os resultados gerados pelas configurações série e paralelo, de modo que o valor de  $p=0,73$ .

Exceto para a vazão de 0,5 L/min quando o pH do sistema operando em série apresentou um valor de 7,3 e aumentou para 8,0 quando o sistema começou a operar em paralelo. Nos demais casos a variação o pH (série e paralelo) se mostraram insignificativas independentemente das vazões estudadas.

A elevação do pH na primeira hora quando o sistema operou em série, mostrou que ocorreu uma decomposição/mineralização de matéria orgânica (MEZZOMO, 2019). A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357 de 2005 estabelece valores de pH entre 6,0 a 9,0 para água de irrigação.

Sendo assim, com base nesse parâmetro esses efluentes estariam propícios para irrigação de diversas culturas como hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto. Quanto a classificação, os efluentes tratados apresentam valor de pH dentro das classe 2 e 3, almeçadas por essa tese.

De acordo com a resolução CONAMA nº 430 de 2011, para lançamento de efluente, o pH deve estar compreendido entre 5,0 e 9,0. Dessa forma, foi observado que, para esse parâmetro, as variações desse que ocorreram entre as horas de operação não ultrapassou os valores permitidos pela legislação. Esses dados são de suma importância, pois o pH influencia no crescimento das plantas, dos microrganismos e na disponibilidade e solubilidade de nutrientes em meio aquático (TAN, 1994).

Os valores de pH apresentaram-se dentro da faixa considerada ideal segundo AIRES e WESTCOT, (1999) não proporcionando efeitos negativos na irrigação, uma vez que águas com pH inadequado podem provocar desequilíbrios de nutrição ou conter íons tóxicos.

Quando este valor cai para abaixo de 6,0 ou sobe acima de 8,5, a atividade bacteriana sofre drástica redução. Durante o processo de tratamento de águas residuárias a tendência é ocorrer uma redução no pH, porque o dióxido de carbono que é liberado no processo de decomposição reage com a água produzindo ácido carbônico (HUGHES et al. 2007).

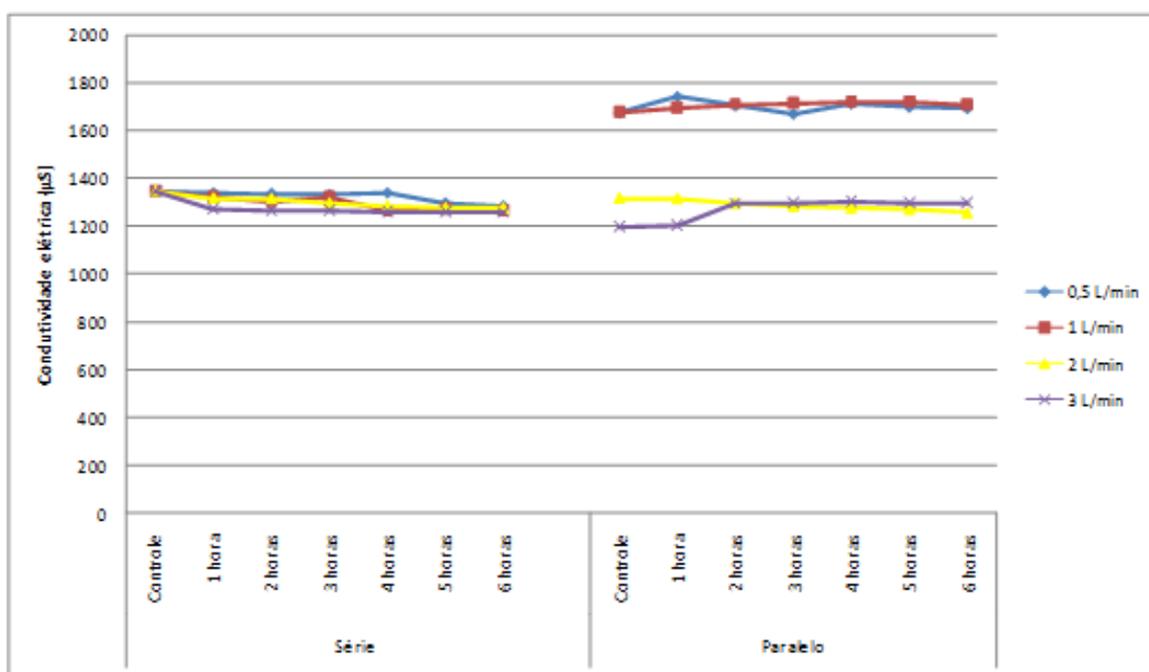
#### **6.6.6 Condutividade elétrica**

A determinação da condutividade elétrica das águas empregadas na irrigação tem grande importância, principalmente no caso das águas residuárias que podem conter altas concentrações de sais. A Resolução CONAMA nº 357 de 2005 não estabelece valores para limite para esse parâmetro.

De acordo com Ayers e Westcot (1976), as águas que apresentam condutividade elétrica menor que  $700 \mu\text{S cm}^{-1}$  podem ser utilizadas para irrigação sem nenhuma restrição de uso. De acordo com Jeong et al. (2016), se a condutividade elétrica da água

de irrigação for inferior a  $700 \mu\text{S cm}^{-1}$ , o crescimento da safra vai não ser afetado. No entanto, se o valor da condutividade elétrica estiver acima de  $3000 \mu\text{S cm}^{-1}$ , pode causar danos severos, caracterizando a água de irrigação como imprópria.

Sendo assim a Figura 46 compara as variações desse parâmetro quando o reator trabalhou em série e paralelo associado às vazões de entrada de 0,5 L/min, 1,0 L/min, 2,0L/min e 3,0L/min. De acordo com os dados apresentados a configuração série apresentou menor variação desse parâmetro, porém quando realizado a análise de variância nota-se que não houve diferença significativa entre as médias quando os reatores trabalharam em série ou paralelo, de modo que o valor de  $p=0,202$ .



**Figura 46: Variação de condutividade elétrica por hora trabalhada nos reatores.**

Considerando que a variação não foi muito significativa, para altas vazões o tempo de residência foi menor e conseqüentemente a taxa de transferência iônica entre o meio aquoso e a superfície do PS foi menor.

A baixa remoção desse parâmetro é proporcionada pelas características físicas do material filtrante. Devido a sua superfície lisa e uniforme, esse material proporciona o aparecimento do biofilme composto por microrganismos que serão responsáveis pelo tratamento biológico do efluente, em contrapartida quando essa situação é instalada os sais não conseguem ficar agregados a superfície do poliestireno. Dessa forma quando o

leito filtrante se encontra limpo há uma pequena redução na condutividade elétrica uma vez que os sais presentes na água ficam agregados aos poros do isopor.

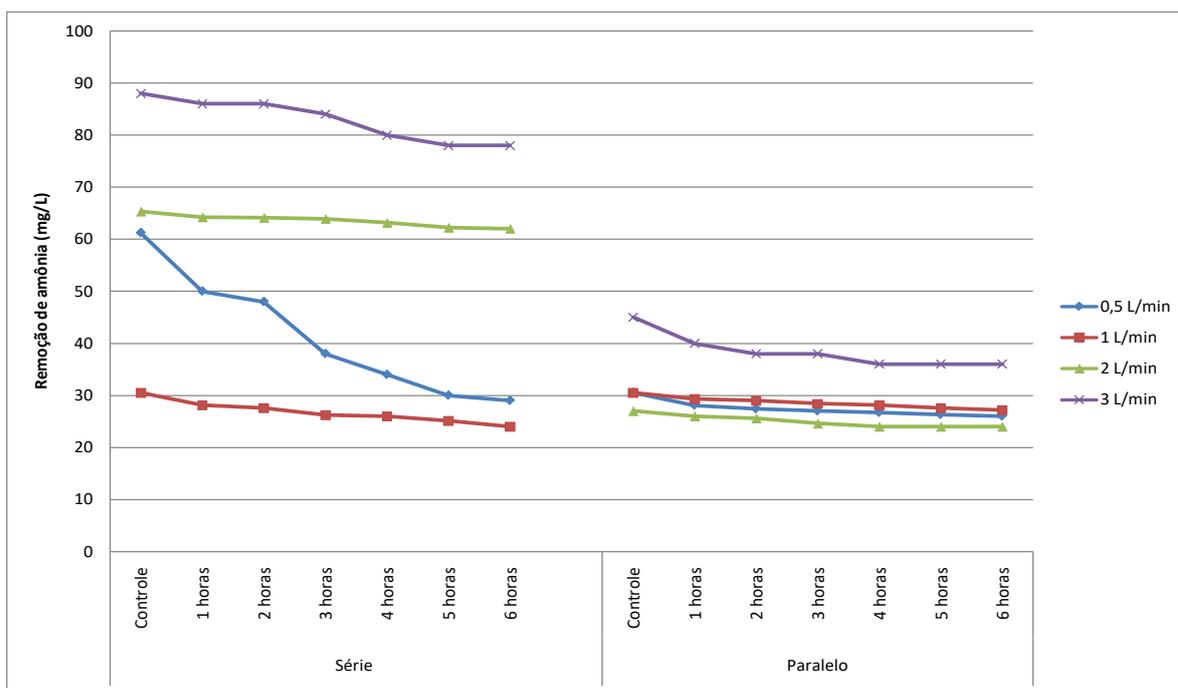
Ao analisar os dados da figura 46 há uma pequena redução no valor de CE na primeira hora de operação do reator quando trabalhado com a configuração em série. Essa remoção se dá pelo fato das esferas de poliestireno estarem limpas devido o processo de retrolavagem que foi realizado anteriormente. Sendo assim, uma possível automação do sistema para realizar a retrolavagem em intervalos de uma ou duas horas podem ajudar na retirada de sais durante o processo de tratamento desses efluentes.

De acordo com os resultados obtidos das CE elétricas para os dois sistemas estudados observou-se que eles não possuem potencial para remoção dos sais dissolvidos na fase aquosa. Para isso se faz necessário um pós-tratamento para deixar o efluente dentro das normas de águas para a irrigação. Todavia os efluentes podem variar em termos de CE em função de sua disposição ao meio ambiente (fechado e/ou aberto com ou sem agitação), o qual pode variar suas características físico-químicas e microbiológicas.

#### **6.6.7 Amônia**

O nitrogênio está presente em grande quantidade na atmosfera, porém os animais e as plantas não conseguem absorvê-lo diretamente do ar, e sim na forma de amônia solúvel em água ou na forma de nitrato, sendo essas formas convertidas por bactérias. O nitrogênio presente no efluente pode ser usado como um fertilizante natural, porém seu excesso pode prejudicar o desenvolvimento das plantas.

O poliestireno se mostrou um substrato viável e eficaz para remoção da amônia nos experimentos realizados por Avelino (2012). A Resolução CONAMA nº 357 de 2005 não estabelece valores para limite para esse parâmetro. A Figura 47 apresenta as variações de amônia nas duas configurações do reator, sendo que essa concentração no efluente tratado decresceu, ao passo que a concentração de  $NO_3^-$  aumentou até atingir as condições estacionárias na comunidade de organismos nitrificantes do efluente tratado.



**Figura 47: Variação de amônia por hora trabalhada nos reatores.**

Comparando o desempenho do sistema quando operando em série e paralelo, observou-se que houve uma variação significativa, entre os resultados gerados a partir da análise de variância com o valor de  $p=0,0475$ .

Sabe-se que o processo de nitrificação trata-se da conversão da amônia em nitrito e nitrato, conforme mostra os dados apresentados para os dois sistemas, nas Figuras 48 e 49 respectivamente. O processo de nitrificação é responsável pela remoção de amônia convertendo-o em nitrato (FONSCECA e TIBIRIÇÁ 2019).

Esses dados estão relacionados com a remoção da amônia (51,1%) ocorreu para uma vazão de 0,5 L/min, quando o sistema operando em série, a qual foi à maior em relação às demais. Esse efeito, aparentemente está relacionado com a velocidade do meio aquoso durante o processo.

O pH é um fator importante para esse processo, uma vez que ele tem efeito inibitório para as bactérias Nitrobacter que convertem nitrito em nitrato. Segundo Cavalcante 2013, o pH ótimo para a nitrificação são próximos a 7,5 de modo ao analisarmos os dados da Figura 45 a média de variação do pH quando o reator trabalhou em série foi de 7,47 e 7,63 quando trabalhado em paralelo. Sendo assim a configuração em série obteve melhores resultados de remoção de amônia, devido às condições favoráveis ao desenvolvimento de seus microrganismos.

Os dados apresentados na Figura 47 para as primeiras quatro horas iniciais foram as que apresentaram a maior de remoção de amônia. Essa remoção está relacionada diretamente com o aumento da temperatura do meio aquoso. No nosso caso as primeiras quatro horas a temperatura aumentou de 25°C e 28°C, a qual favorece o desenvolvimento de bactérias nitrificantes, e, se enquadra com a faixa de temperatura de (25°C e 30°C) segundo Bitton (2005).

A filtração aeróbica apresenta eficiência significativa de remoção de matéria orgânica e possibilita a nitrificação de acordo com as características do efluente que deve ser favorável para o desenvolvimento de uma população de bactérias nitrificantes (CAVALCANTE, 2013).

Essas águas quando usadas na irrigação têm o mesmo efeito para as plantas que o nitrogênio contido nos fertilizantes. A aplicação e a escolha das culturas a serem irrigadas com essa água devem ter critérios bem definidos, pois a falta de nitrogênio pode limitar a produção assim como o excesso pode reduzi-la ou torná-la imprópria para consumo.

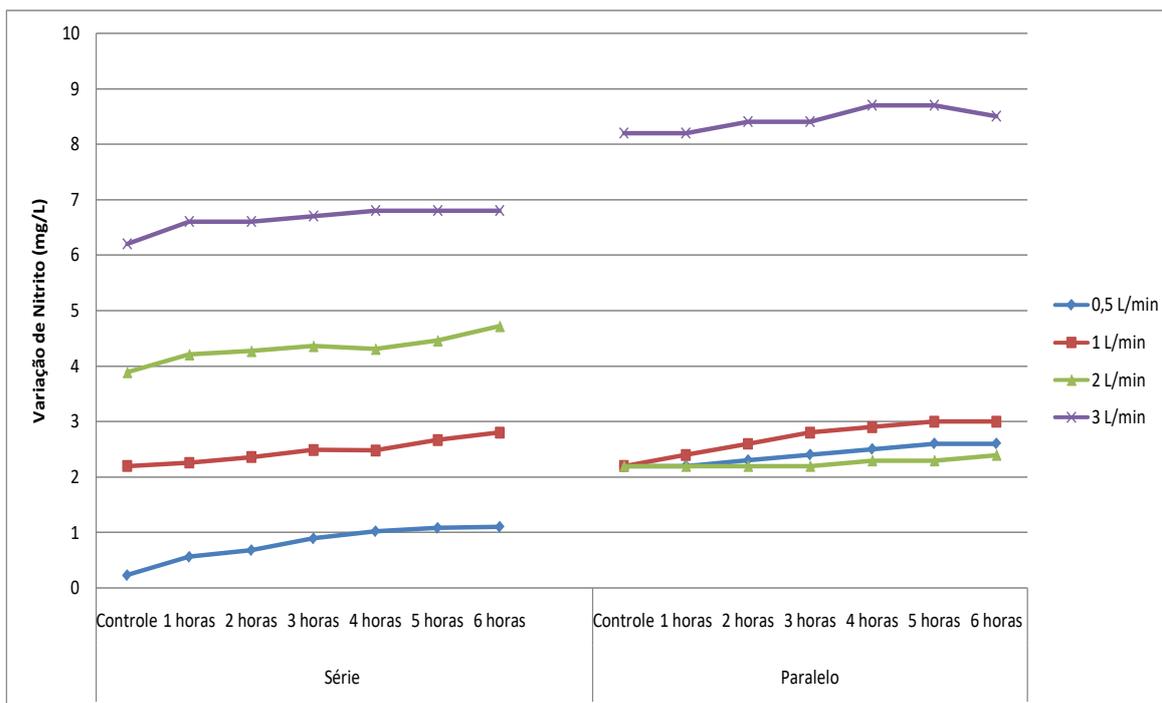
#### **6.6.8 Nitrito**

O nitrogênio é um macronutriente essencial ao ser humano, porém quando em excesso se torna um poluente ao ambiente aquático bem como a saúde das populações. A acumulação de nitrogênio nas águas superficiais, por exemplo, pode levar a desequilíbrios ecológicos e causar crescimento excessivo de plantas e animais, levando à degradação da qualidade da água (eutrofização).

O nitrito é um ânion tóxico para as plantas e para animais que delas se alimentam, por isso sua oxidação a nitrato é de uma importância fundamental para as águas residuárias usadas na irrigação.

A Figura 48 apresenta as variações de nitrito nas duas configurações do sistema, de modo que não houve variação significativa entre os resultados gerados em série e/ou paralelo, com valor de  $p=0,99$ .

Os dados apresentados na Figura 48 apontam uma elevação no valor de nitrito, esse aumento se deu em decorrência do processo de nitrificação, onde a amônia foi convertida em nitrito e posteriormente em nitrato. Essa conversão está ligada ao desenvolvimento das bactérias que utilizam esses substratos para seu crescimento.



**Figura 48: Variação de nitrito por hora trabalhada nos reatores.**

A Figura 48 apresenta o comportamento do aumento da concentração de nitrito, durante o processo em função das vazões de alimentação do sistema em série e paralelo. Para o sistema em série, observou-se que ocorreu um aumento no valor do nitrito em todas as vazões trabalhadas. Com a vazão de 0,5 L/min o aumento foi de 4,78 vezes, com a vazão de 1,0 L/min o aumento foi de 1,27 vezes, com a vazão de 2,0 L/min o aumento foi de 1,21 vezes e para a vazão de vazão de 3,0 L/min o aumento foi de 1,10 vezes.

Considerando que esses aumentos são frutos da amônia se transformando em nitrito e nitrato no processo de nitrificação do efluente dentro do reator, o de menor vazão apresentou o melhor resultado devido seu tempo de residência ter sido o maior o qual contribuiu para o processo de nitrificação.

Para o sistema em paralelo esse aumento foi inferior em relação aos dados obtidos quando o sistema operou em série. Com a vazão de 0,5 L/min o aumento foi de 1,13 vezes, com a vazão de 1,0 L/min o aumento foi de 1,08 vezes, com a vazão de 2,0 L/min o aumento foi de 1,09 vezes e para a vazão de vazão de 3,0 L/min o aumento foi de 1,01 vezes. Mais uma vez observou-se que a menor vazão apresentou um maior aumento na concentração de nitrito. Era de se esperar que esse fato viesse acontecer uma vez que o efluente passa uma única vez através de cada reator.

O importante foi observar a variação da nitrificação, durante o processo para os dois sistemas estudados (série e paralelo). Observou-se que a concentração da água controle de nitrito ser diferente de um experimento para outro, isso se deu em função de dois parâmetros importantes que são: a concentração da matéria orgânica presente no meio aquoso e a sua decomposição, favorecendo o aumento da concentração de amônia.

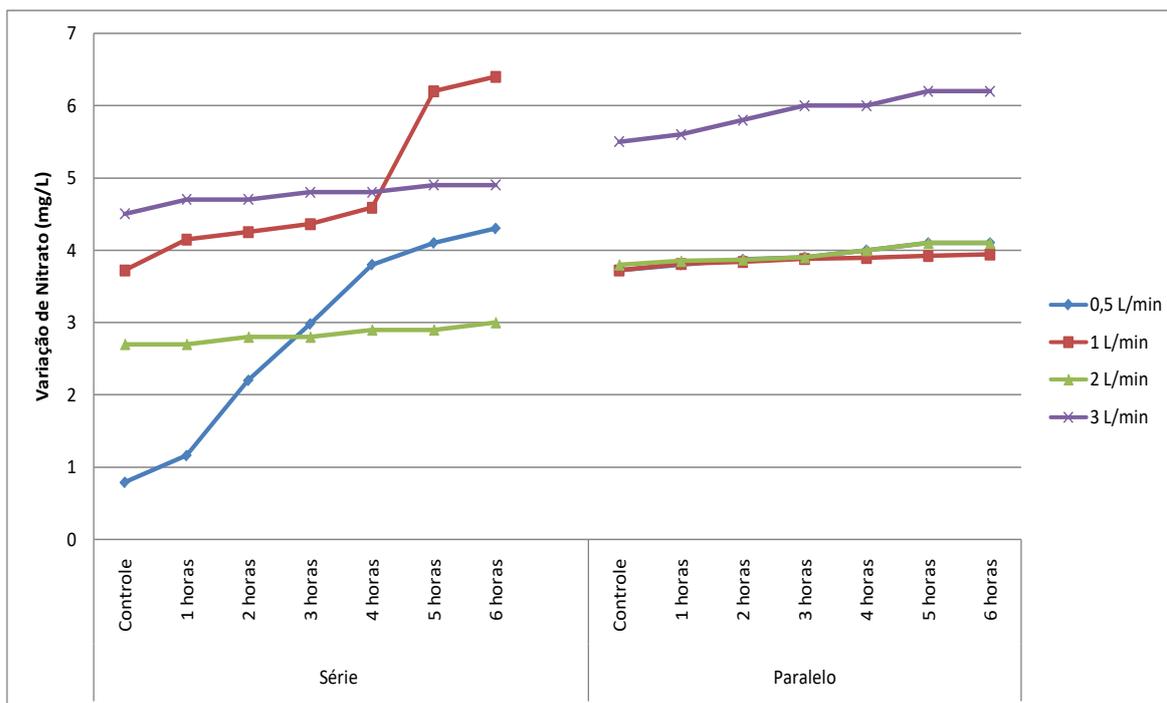
De acordo com os dados obtidos da concentração de nitrito em função da vazão do sistema em série apresentou maiores valores em relação ao paralelo. Considerando que para ambos o sistema operou em forma de *looping* o sistema em série foi mais eficiente do que em paralelo no aumento da produção de amônia, conforme mostra a Figura 47.

#### **6.6.9 Nitrato**

O nitrogênio presente nas águas residuárias tem o mesmo efeito para as plantas que o nitrogênio aplicado com os fertilizantes, porém em quantidade excessivas pode causar problemas relacionados ao crescimento excessivo da cultura, uma tardia maturação dos frutos, bem como a produção de frutos com qualidade inferior (ALMEIDA, 2010).

A Figura 49 apresenta as variações de nitrato nas duas configurações do sistema, de modo que houve variação significativa entre os resultados gerados em série e paralelo, com valor de  $p=0,045$ . Para o sistema em série, observou-se que ocorreu um aumento no valor do nitrato em todas as vazões trabalhadas.

Com a vazão de 0,5 L/min o aumento foi de 5,44 vezes, com a vazão de 1,0 L/min o aumento foi de 1,72 vezes, com a vazão de 2,0 L/min o aumento foi de 1,11 vezes e para a vazão de vazão de 3,0 L/min o aumento foi de 1,09 vezes. Esse dado está diretamente relacionado ao processo realizado pelas bactérias aeróbias do gênero nitrobacter no processo de oxidação do nitrito em nitrato (FONSCECA e TIBIRIÇÁ 2019). .



**Figura 49: Variação de nitrato por hora trabalhada nos reatores.**

Para o sistema em paralelo esse aumento foi inferior em relação aos dados obtidos quando o sistema operou em série. Com a vazão de 0,5 L/min o aumento foi de 1,10 vezes, com a vazão de 1,0 L/min o aumento foi de 1,05 vezes, com a vazão de 2,0 L/min o aumento foi de 1,07 vezes e para a vazão de vazão de 3,0 L/min o aumento foi de 1,12 vezes.

O nitrato juntamente com a amônia são as formas de nitrogênio assimiláveis pelas plantas, sendo assim seu controle deve ser feito de forma criteriosa nas águas residuárias. O limite estabelecido pela legislação vigente, Resolução do CONAMA nº 357/2005, é de 10,0 mg/L de nitrato para irrigação. Segundo AYERS & WESTCOT (1991) e SPERLING (1996), índice de nitrato menor que 10 mg L<sup>-1</sup> (como verificado neste estudo) não apresenta restrições ao uso como fonte de água para irrigação. Sendo assim, o efluente tratado apresentou características que o proporcionam ser classificados em classe 2 e 3 segundo a resolução do CONAMA 357.

Com relação à concentração de nitrato em águas superficiais, essa concentração indica poluição remota de esgoto, porque o nitrato é o produto final da oxidação do nitrogênio (QUEIROZ, 2017). O crescimento de bactérias nitrificantes ocorre em pH 7 a 9 (ZHENG et al., 2013). Quando esse valor está abaixo de 6,5 a nitrificação praticamente deixa de ocorrer devido a sensibilidade das bactérias (RODRIGUES, 2016).

### 6.6.10 Fósforo total

O fósforo é um elemento crucial para o desenvolvimento das culturas irrigadas, sendo assim a utilização de tecnologias de tratamento tem que levar em consideração a sua remoção ao ponto que seja benéfico para o desenvolvimento das culturas envolvidas. Esse parâmetro representa um importante componente dos seres vivos, estando ligado ao metabolismo respiratório e fotossintético, por esse motivo vem ganhando importância nos efluentes usados para irrigação.

A Figura 50 apresenta a remoção de fósforo total nas duas configurações do reator, de modo que não houve variação significativa entre os resultados gerados em série e paralelo, com valor de  $p=0,79$ .

Os valores críticos de fósforo na água de irrigação, segundo Trani (2001), são de  $30 \text{ mg L}^{-1}$ , contudo observa-se grande disparidade entre as literaturas. Segundo Almeida (2010), o valor máximo permitido para esse parâmetro é de  $2 \text{ mg/L}^{-1}$  para águas usadas na irrigação.

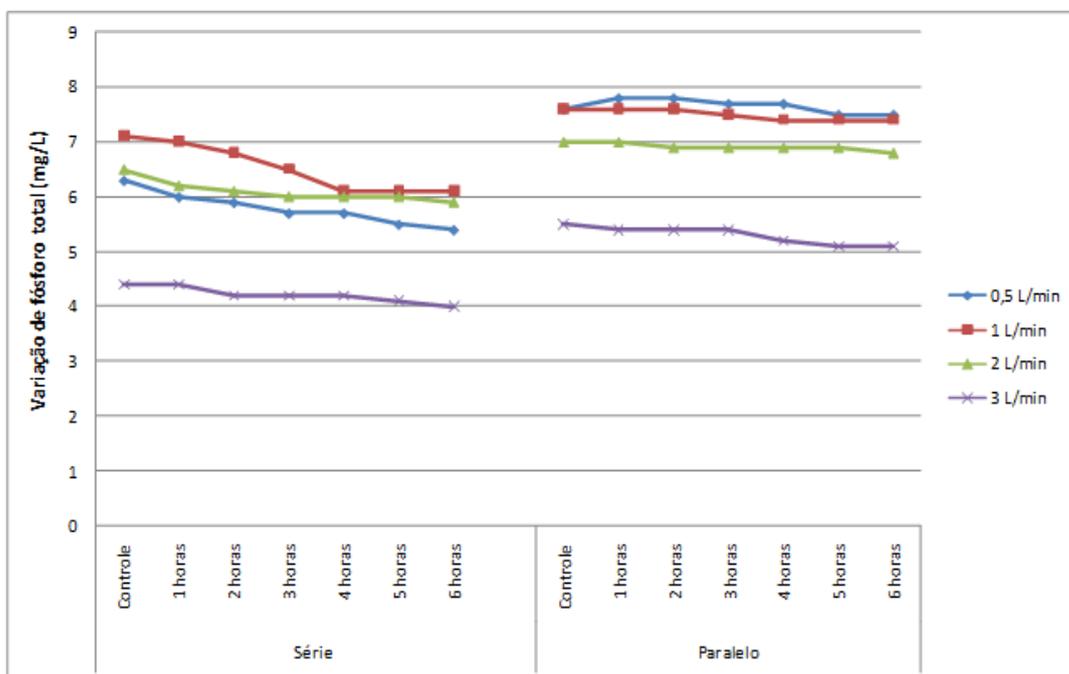


Figura 50: Variação de fósforo por hora trabalhada nos reatores.

De acordo com a Figura 50 os maiores percentuais de remoção de fósforo total foram de 14,9% quando o reator operava com a vazão de 1,0 L/min com a configuração em série seguindo de 12,7% quando o reator operava a uma vazão de 0,5 L/min com a mesma configuração. Provavelmente, essa redução ocorreu devido à assimilação

microbiológica de alguns gêneros de bactérias, contribuindo de forma eficiente para reduzir o fósforo (BEZERRA et al., 2020).

Outra explicação para essa redução pode estar associada ao período de “amadurecimento” do PS quando as cargas positivas são adsorvidas a sua superfície, ocorrendo uma supersaturação das esferas torna-as positivo. Essa saturação de cargas positivas na superfície das esferas proporciona a adsorção de partículas de origem animal ou vegetal e ânions como  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{PO}_4^-$  (JUNIOR et al., 2018).

Segundo Silva (2009) técnicas convencionais de remoção de P, tais como a decantação primária associada a lodos ativados ou filtros biológicos, não são suficientes para assegurar baixas concentrações de P no efluente tratado.

Essa liberação de fósforo é vital para o reaproveitamento agrícola, pois esta componente é essencial para armazenar e transportar energia para a planta. Porém esses teores, de acordo com Brasil (2005), estão acima do permitido para a irrigação de hortaliças consumidas cruas, a qual permite um valor máximo de fósforo total de  $0,025 \text{ mg L}^{-1}$ .

Segundo Sperling (1996), elevados valores de fósforo poderiam causar um excessivo crescimento de algas e um possível entupimento do sistema de irrigação. A remoção de fósforo é bem realizada por meio de processos físico-químicos, com a utilização de sais de alumínio ou ferro e filtração terciária (FLORÊNCIO, et al., 2006). Segundo o mesmo autor o fósforo não apresenta problemas de ordem sanitária, mas pode causar excessivo crescimento de algas e possível entupimento do sistema.

A presença de nutrientes como o fósforo permite que o uso desse efluente na irrigação seja considerado um recurso econômico, pois a depender da quantidade pode promover uma redução na quantidade de fertilizantes. Sendo assim, quando essas águas são usadas na irrigação, a presença desse elemento serve como fertilizante natural. Entretanto, devem-se atender aos padrões de qualidade de maneira a não prejudicar a saúde da população, bem como aumentar a capacidade produtiva das culturas.

### 6.6.11 Batelada para teste de tamanho das esferas e vazão de entrada

Após os testes iniciais foram realizados seis experimentos com a configuração em série variando o tamanho das esferas (2,0 a 5,0mm) e as vazões de 0,5 L/min a 3,0L/min. Os resultados obtidos para a construção da Figura 51 estão presentes em apêndice na tabela 14 presente em apêndice.

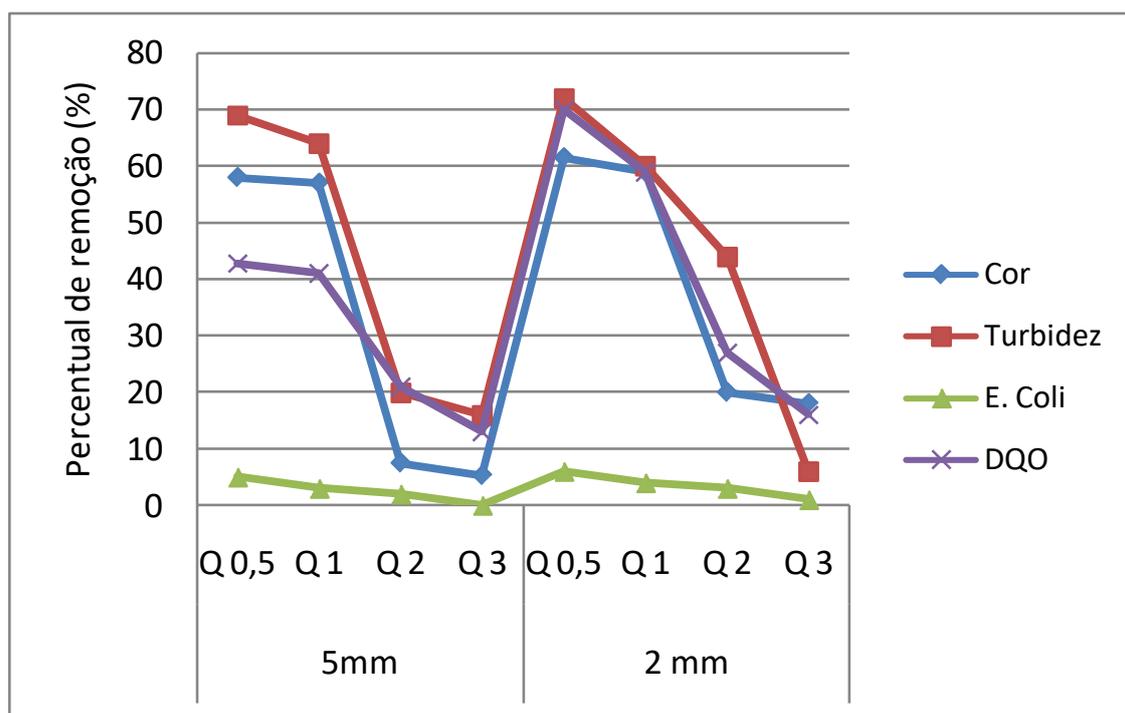


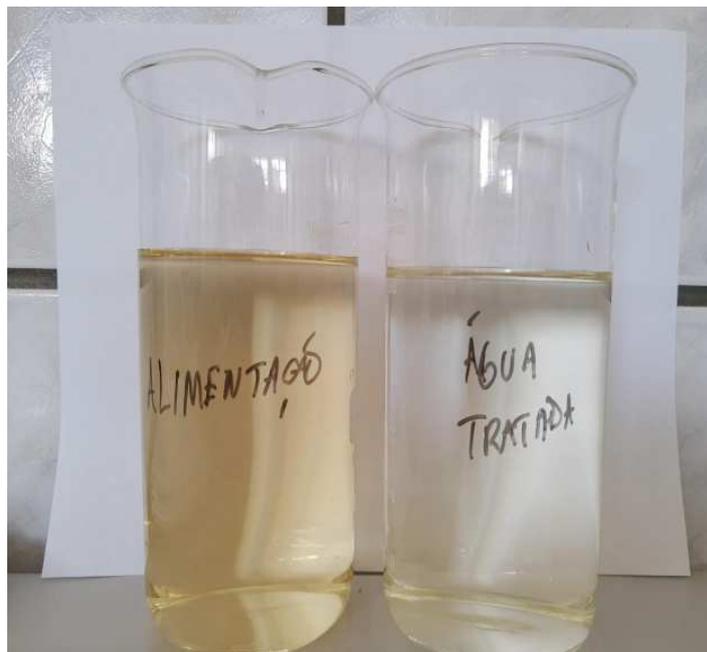
Figura 51: Comparação entre o percentual de remoção de Cor, Turbidez, E. Coli e DQO em função da variação da vazão e tamanho das esferas de poliestireno.

Conforme apresentado nos dados da Figura 51, à medida que a vazão vai aumentando o percentual de remoção desses parâmetros reduz significativamente. Esses resultados são elucidados diante da análise de variância, uma vez que essa estatística aponta diferença significativa entre os resultados, com valor de  $p=0,031$ .

Comparando a remoção desses parâmetros quando o reator operava a uma vazão de 0,5L/min com esferas de 2,0mm e 5,0mm, observa-se que não houve variação significativa uma vez que o valor é de  $p=0,69$ . O mesmo aconteceu para as demais vazões, 1,0L/min ( $p=0,83$ ), 2,0L/min ( $p=0,305$ ) e 3,0L/min ( $p=0,76$ ). As Figuras 52 e 53 apresentam a comparação da água da alimentação e da água tratada com esferas de 2,0 mm e 5,0 mm.



**Figura 52:** Comparação água da alimentação e tratada com esferas de PS de 5 mm.



**Figura 53:** Comparação água da alimentação e tratada com esferas de PS de 2 mm.

Diante dos resultados presentes na figura 51 o reator foi configurado para trabalhar com a configuração série, com vazão de 0,5 L/min com esferas de poliestireno de 2,0 mm. Segundo CRIVILIM (2021) o uso de material filtrante de menor granulometria proporciona a produção de um efluente mais depurado. Todos os experimentos realizados até essa fase foram importantes para otimizar o sistema e assim realizar o tratamento dos efluentes de maneira mais eficaz.

### 6.6.12 Bateladas com reator otimizado

Após os testes iniciais foram realizados 16 experimentos em oito meses, de modo que foi utilizado um intervalo de 15 dias para a realização das análises de qualidade de água. Essa fase da pesquisa teve o intuito de avaliar o desempenho do reator a cada hora trabalhada.

Sendo assim, foram analisadas a remoções de cor, turbidez, E. Coli e DQO, pH, CE, amônia, nitrato, nitrito e fósforo total de modo que os resultados estão presentes nas Figuras 52 a 60. Por meio desses experimentos foi possível avaliar o tempo médio de remoção dos parâmetros de qualidade de água. Os dados usados para construção desses gráficos foram retirados da Tabela 12 presente em apêndice.

Conforme apresentado na Figura 54, a maior remoção de cor está presente nas três primeiras horas de operação do reator. Vale ressaltar a baixa remoção ocorrida no segundo mês, esses dados estão ligados diretamente ao baixo valor da cor da água da alimentação do sistema.

Ao final de cada mês teve-se um total de remoção de cor de: 56,25% no mês um, 16,22% no mês dois, 36,36% no mês três, 38% no mês quatro, 46% no mês cinco, 40,14% no mês seis, 42,14% no mês sete e 31,11% no mês oito.

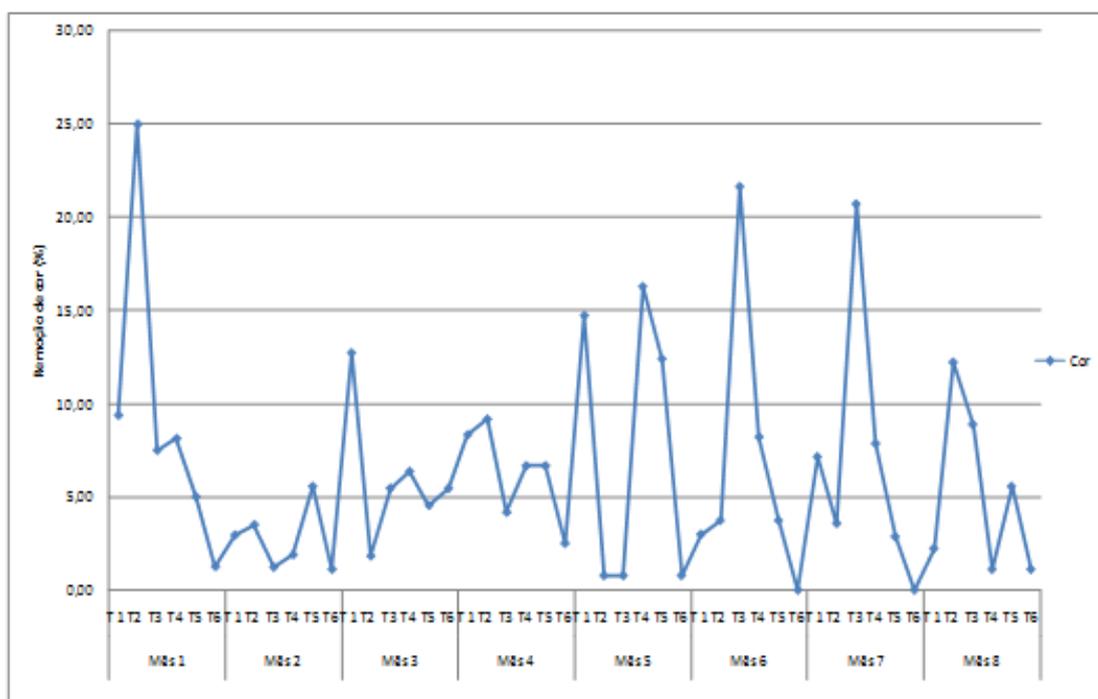
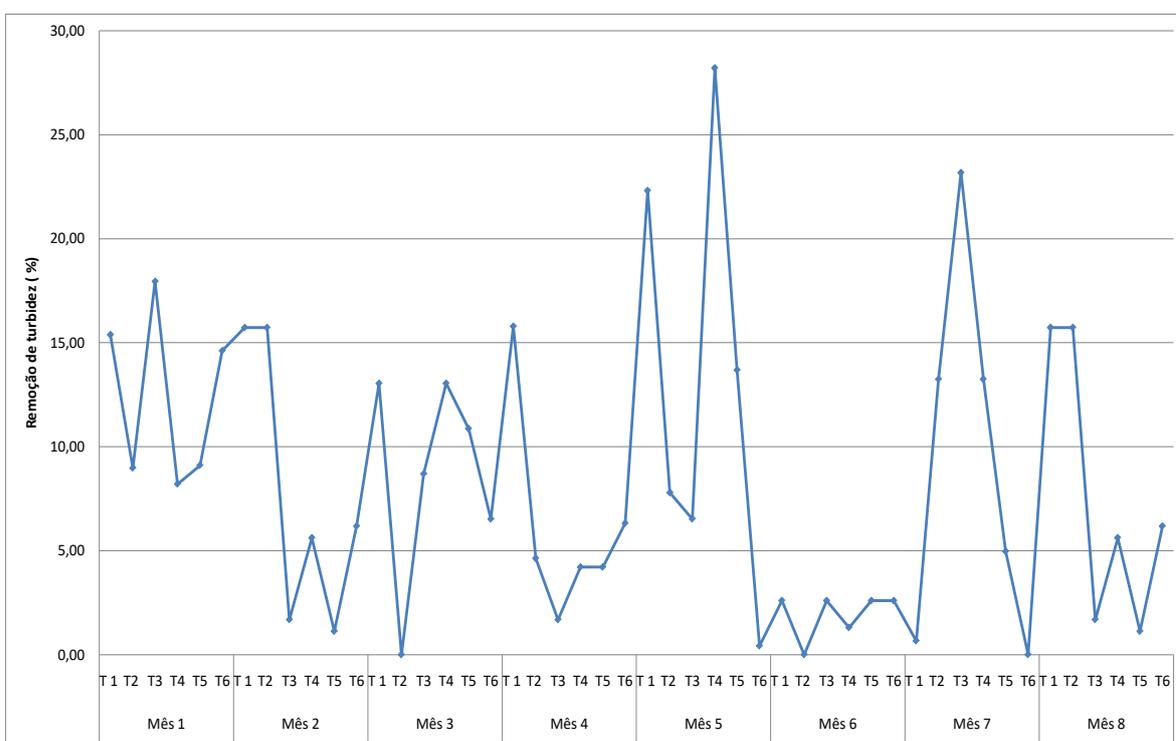


Figura 54: Percentual de remoção de cor a cada hora de operação do reator.

A variação na remoção desse parâmetro não foi significativa uma vez que a análise de variância apresentou valor de  $p=0,19$ , ou seja, o percentual de remoção de cor ao longo das 6 horas trabalhadas não sofreu variação significativa ao longo dos oito meses de estudo. Esses dados são explicados em virtude do processo de retrolavagem que era realizado ao final de cada experimento, não deixando assim acúmulo de partículas sólidas na superfície do PS.

Analisando a Figura 54 observam-se oscilações na remoção de cor, esse fenômeno é explicado pelo fato da água da alimentação ficar mais concentrada pelas partículas dissolvidas na água que volta pelo bypass, sendo assim com o passar das horas a água do tanque da alimentação vai aumentando sua cor bem como a turbidez. Essa oscilação também ocorre com a turbidez, como pode ser observado na Figura 55.



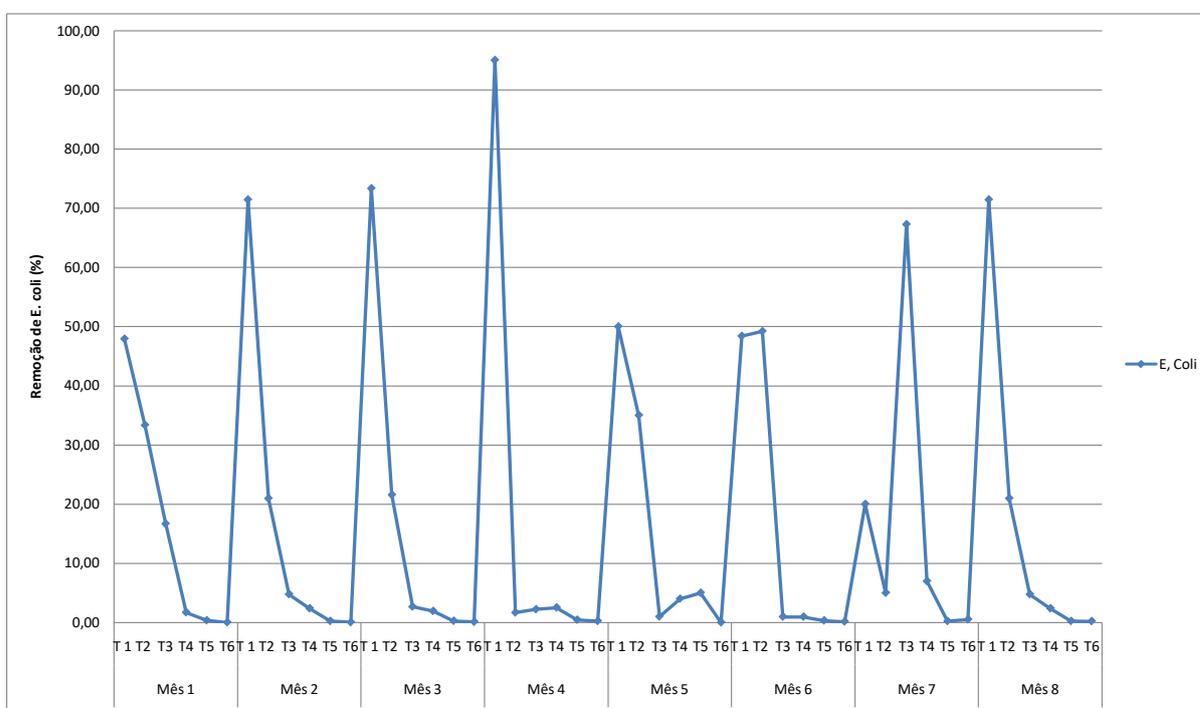
**Figura 55: Percentual de remoção de turbidez a cada hora de operação do reator.**

A variação na remoção desse parâmetro não foi significativa uma vez que a análise de variância apresentou valor de  $p=0,18$ , ou seja, o percentual de remoção de turbidez ao longo das 6 horas trabalhadas não sofreu variação significativa ao longo dos oito meses de estudo.

Ao final de cada mês teve-se um total de remoção de turbidez de: 74,23% no mês um, 46,07% no mês dois, 52,17% no mês três, 36% no mês quatro, 78% no mês cinco, 11,69% no mês seis, 53,30% no mês sete e 46,07% no mês oito.

A Figura 56 apresenta o percentual de remoção de remoção de E. coli em seis horas de experimento durante oito meses. A média de remoção de E. coli nos oito meses de experimento foi bem expressiva principalmente nas três primeiras horas de funcionamento do reator, variando entre 20% a 95% de remoção.

Comparando essa remoção com filtros contendo areia como elemento filtrante, percebe-se que a remoção com filtros de areia varia entre 70% a 99% quando forma a camada de biofilme segundo CAWST, 2010.



**Figura 56: Percentual de remoção de E. coli a cada hora de operação do reator.**

Esse resultado está atrelado ao biofilme que foi formado durante o tempo que o reator permaneceu sem funcionar, uma vez que durante esse período o mesmo ficou cheio de água para garantir a proliferação desses microrganismos. O aumento do acesso a nutrientes, como nitrogênio e carbono, contribui para aumentar a espessura do biofilme, mudando assim a estrutura da comunidade microbiana (HU et al., 2009).

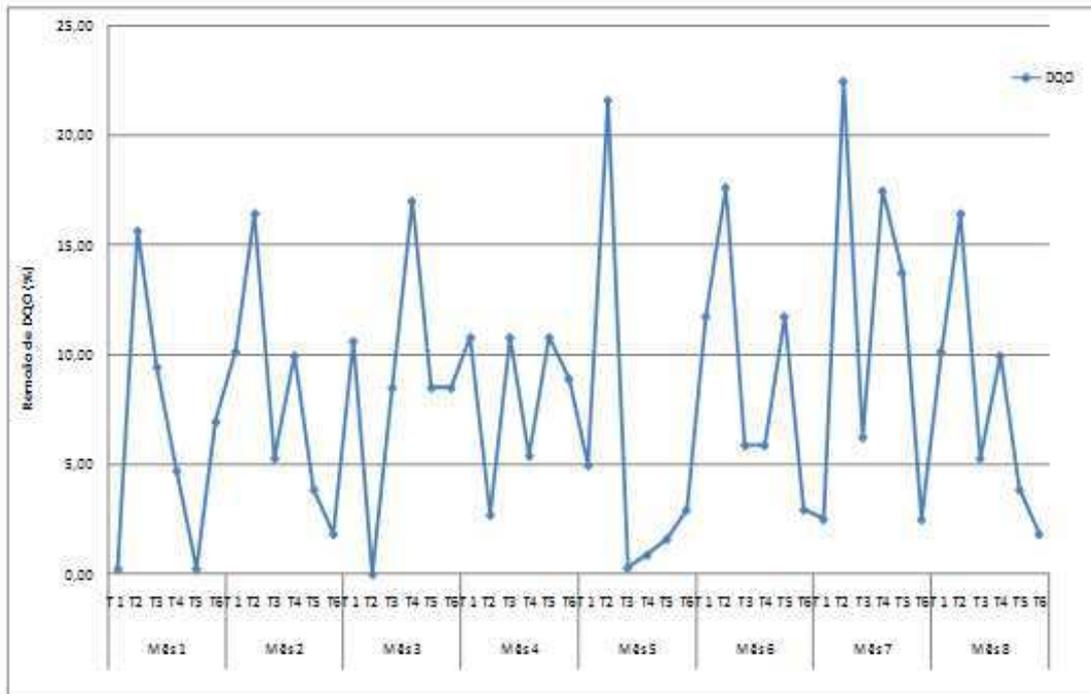
Basicamente após quatro horas de operação a remoção de E. coli diminuiu, devido o desprendimento desse biofilme em virtude do escoamento do efluente entre as esferas de PS.

A variação na remoção desse parâmetro não foi significativa uma vez que a análise de variância apresentou valor de  $p=0,56$ , ou seja, o percentual de remoção de *E. coli* ao longo das 6 horas trabalhadas, não sofreu variação significativa ao longo dos oito meses de estudo.

Em média o pico de remoção de *E. coli* esteve presente entre a primeira e segunda hora de operação do reator. Com relação redução do número de logs o reator remove uma média de 2 a 4 logs nas primeiras 3 horas, fato esse que possibilita o uso dessas águas no reúso agrícola quando o efluente tratado a ser tratado apresentar uma concentração de *E. coli* de até  $1.00E+07$  NMP. Essa remoção é garantida pela presença do biofilme formado na superfície das esferas de PS que degradam matéria orgânica, nitrificam e desnitrificam, dependendo das condições operacionais impostas.

Segundo Tonetti et al. (2003) os microrganismos responsáveis pelo tratamento biológico de esgoto necessitam de pH entre 4 e 8 para garantir a formação do biofilme, principal responsável pela depuração do efluente, os resultados de pH presentes na Tabela 7 estão dentro do mencionado pelos autores.

A Figura 57 apresenta os dados de remoção de DQO nas seis horas trabalhadas durante os oito meses de experimento. A DQO é usada como uma medida de oxigênio equivalente ao necessário para oxidar a matéria orgânica contida numa amostra. As maiores remoções de DQO também estiveram presentes nas três primeiras horas de funcionamento do reator, sendo que esse comportamento também foi observado na remoção *E. coli*.

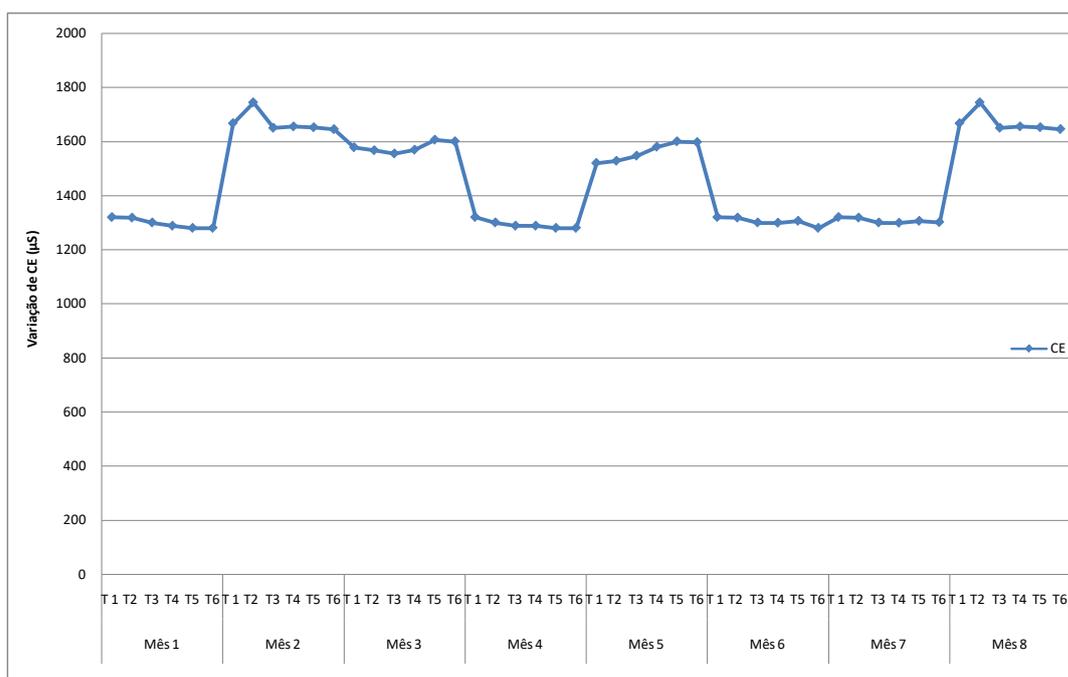


**Figura 57: Percentual de remoção de DQO a cada hora de operação do reator.**

A variação na remoção desse parâmetro não foi significativa uma vez que a análise de variância apresentou valor de  $p=0,28$ , ou seja, o percentual de remoção de DQO ao longo das 6 horas trabalhadas não sofreu variação significativa ao longo dos oito meses de estudo.

Ao final de cada mês teve-se um total de remoção de DQO de: 37,31% no mês um, 47,56% no mês dois, 57,19% no mês três, 49,46% no mês quatro, 32,31% no mês cinco, 55,88% no mês seis, 65% no mês sete e 47,56% no mês oito.

Analisando a Figura 58 apresenta a variação de condutividade elétrica nas seis horas de operação do reator. A variação de condutividade elétrica não foi significativa uma vez que a análise de variância apresentou valor de  $p=0,995$ , ou seja, não houve variações significativas ao longo das 6 horas trabalhadas do reator ao longo dos oito meses de estudo.



**Figura 58: Variação de condutividade elétrica a cada hora de operação do reator.**

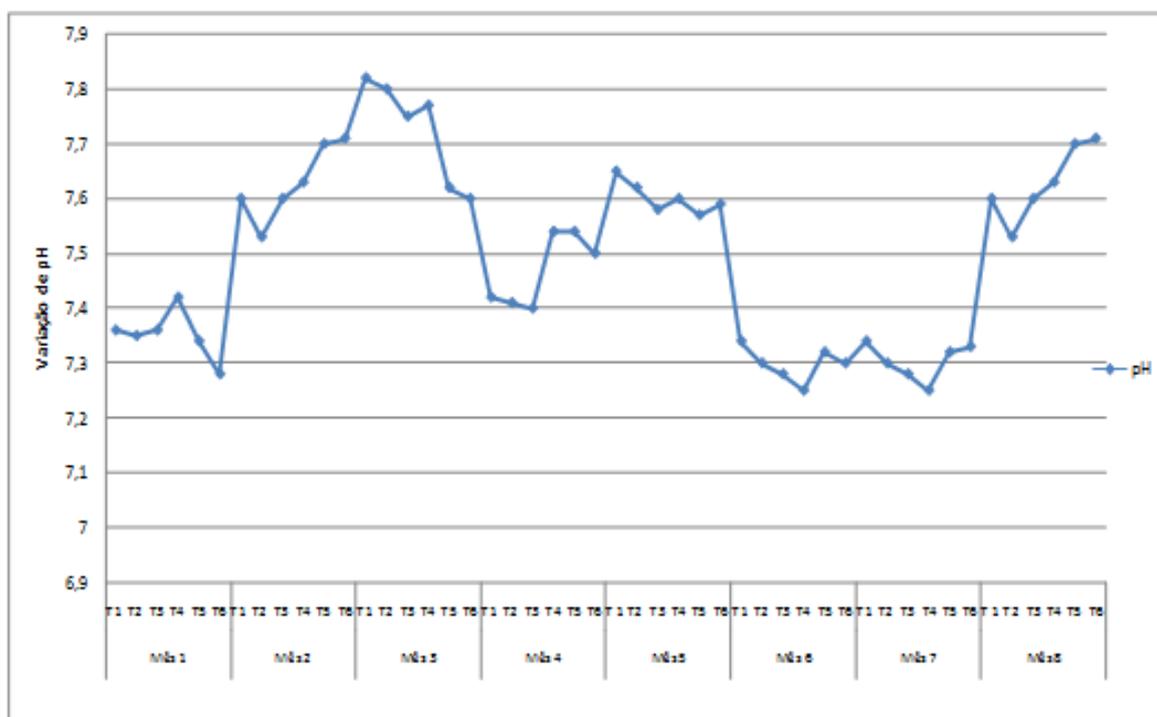
Esse comportamento do reator quanto à remoção de condutividade elétrica também foi observado durante a realização dos ensaios que comparavam a remoção desse parâmetro nas duas configurações do reator (figura 46). Sendo assim observa-se uma pequena remoção de CE no mês 1 (6,8%), mês 2 (1,31%), mês 4 (3,03%), mês 6 (3,03%), mês 7 (1,43%) e mês 8 (1,31%).

Nos meses 3 e 5 ocorreu uma elevação nesses valores em detrimento das concentração de sais presentes no tanque da alimentação que foram sendo acumulados na superfície das pérolas de PS. Esse comportamento foi importante para intensificar o processo de retrolavagem nesse período, garantindo o padrão normal de remoção nos meses subseqüentes como observado nos mês 4 e mês 6.

Sendo assim, o acompanhamento *in locu* desse parâmetro pode diagnosticar de forma rápida, possíveis deficiências no sistema, necessitando assim de uma retrolavagem adicional ou mais intensificada. Essa situação pode acontecer devido às características físico-químicas do efluente que reduz a vida útil do PS caso a retrolavagem não seja realizada de forma adequada.

A Figura 59 apresenta a variação de condutividade elétrica nas seis horas de operação do reator. A variação de pH não foi significativa uma vez que a análise de

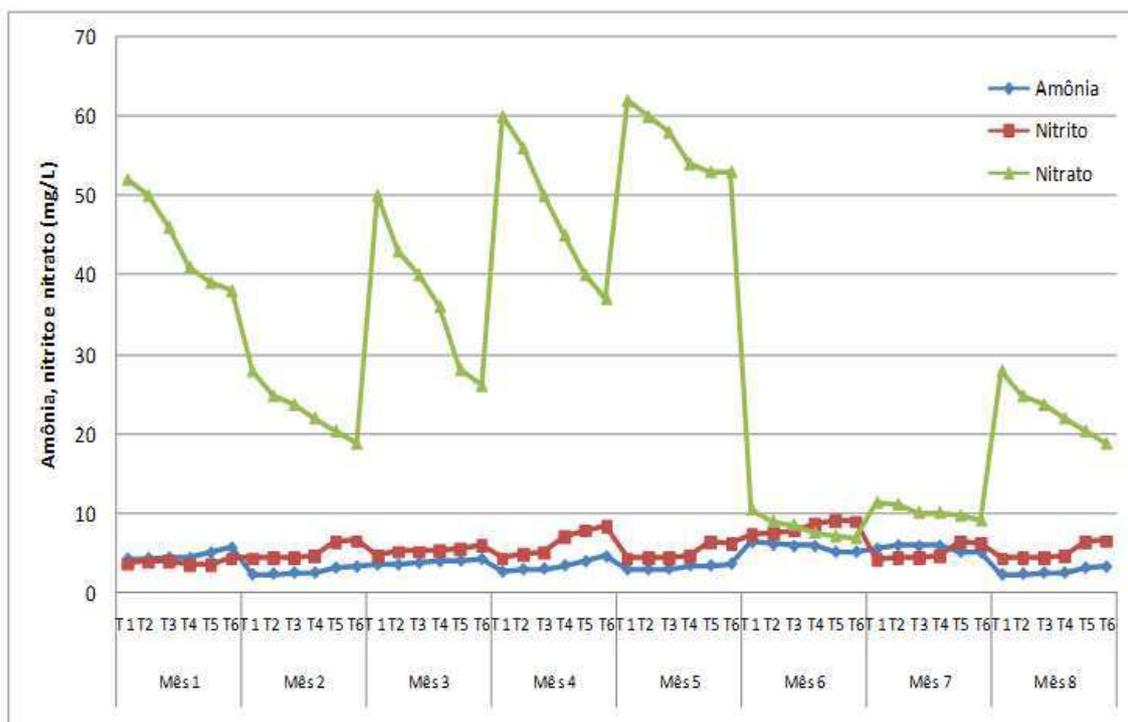
variância apresentou valor de  $p=0,996$ , ou seja, não houve variações significativas ao longo das 6 horas trabalhadas do reator ao longo dos oito meses de estudo.



**Figura 59: Variação de pH a cada hora de operação do reator.**

Analisando os resultados da Figura 59 podemos observar um comportamento ácido nos mês ter, mês cinco e mês seis. Esse comportamento do pH refletiu no processo de nitrificação uma vez que essa redução é proveniente da transformação da amônia em nitrito e nitrato.

A média do pH no primeiro mês foi de 7,35, no segundo mês 7,62, no terceiro mês 7,72, no quarto mês 7,46, no quinto mês 7,6, no sexto mês 7,29, no sétimo mês 7,30 e no oitavo mês 7,62. A maior redução do pH se deu no mês três, fato que foi refletido no maior percentual de remoção de amônia (48% de remoção) no mesmo mês.



**Figura 60: Variação de amônia, nitrito e nitrato a cada hora de operação do reator.**

A Figura 60 apresenta o comportamento do sistema quando ocorre o processo de nitrificação, onde a amônia é transformada em nitrito e nitrato. A maior remoção de amônia ocorre entre as três primeiras horas de operação do reator, de modo que a média de remoção por hora no primeiro mês foi de 5,72%, no segundo mês 7,6%, no terceiro mês 11,9%, no quarto mês 8,46%, no quinto mês 3,2%, no mês seis 9,98%, no mês sete 4,3% e no mês oito 7,6%.

A remoção de amônia total por mês foi de 27% no primeiro mês, 32% no segundo mês, 48% no terceiro mês, 38,3% no mês quatro, 14,5% no mês cinco, 34,6% no mês seis, 14,6% no mês sete e 32,85% no mês oito. Oliveira et al (2006), utilizou biorreatores em seu estudo contendo o PS como meio suporte, de modo que obteve um remoção de amônia de 81,47%.

Na tabela 8 observam-se os valores dos coeficientes de correlação de Person (p) que foram calculados para analisar se havia correção entre a remoção de amônia com o aumento de nitrito e nitrato. Conforme apresentado na tabela à relação entre amônia e nitrito, bem como amônia e nitrato, corresponde a uma relação negativa forte, pois se aproxima de -1.

Sendo assim, essa análise estatística comprova que durante o processo de nitrificação que ocorre no sistema, às bactérias nitrificantes presentes no PS consomem

a amônia e para transformá-la em nitrito e nitrato, por isso acontece esse aumento desses parâmetros.

A correlação entre nitrito e nitrato por sua vez foi positiva e forte em seis meses de estudo. Essa relação positiva está associada ao aumento de ambos os parâmetros durante a nitrificação. Os meses seis e sete apresentaram correlação forte negativa, devido apresentarem uma redução nesse período, esse fato pode estar associado à retirada do biofilme durante o processo de retrolavagem do sistema.

**Tabela 8: Coeficiente de correlação de Person entre amônia, nitrito e nitrato.**

Correlação	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6	Mês 7	Mês 8
Amônia- Nitrito	-0,773	-0,906	-0,947	-0,955	-0,9513	0,910	0,6369	-0,906
Amônia- Nitrato	-0,113	-0,859	-0,948	-0,969	-0,8183	-0,944	-0,823	-0,859
Nitrito- Nitrato	0,5644	0,9902	0,8966	0,9593	0,82635	-0,936	-0,888	0,9902

Tecnologias de adsorção, baseadas na acumulação de fósforo na interface entre duas fases (água contaminada e adsorvente sólido) são uma possibilidade para remoção desse parâmetro (ALI et al., 2012). Essa adsorção pode ocorrer a partir das interações de Van der Waals universais, ou pelas ligações químicas entre a molécula de adsorvente e o poluente adsorvido (DABROWSKI, 2001).

Na Figura 61 pode-se observar a remoção de fósforo total nos nas seis horas de operação do reator durante os oito meses de experimento.

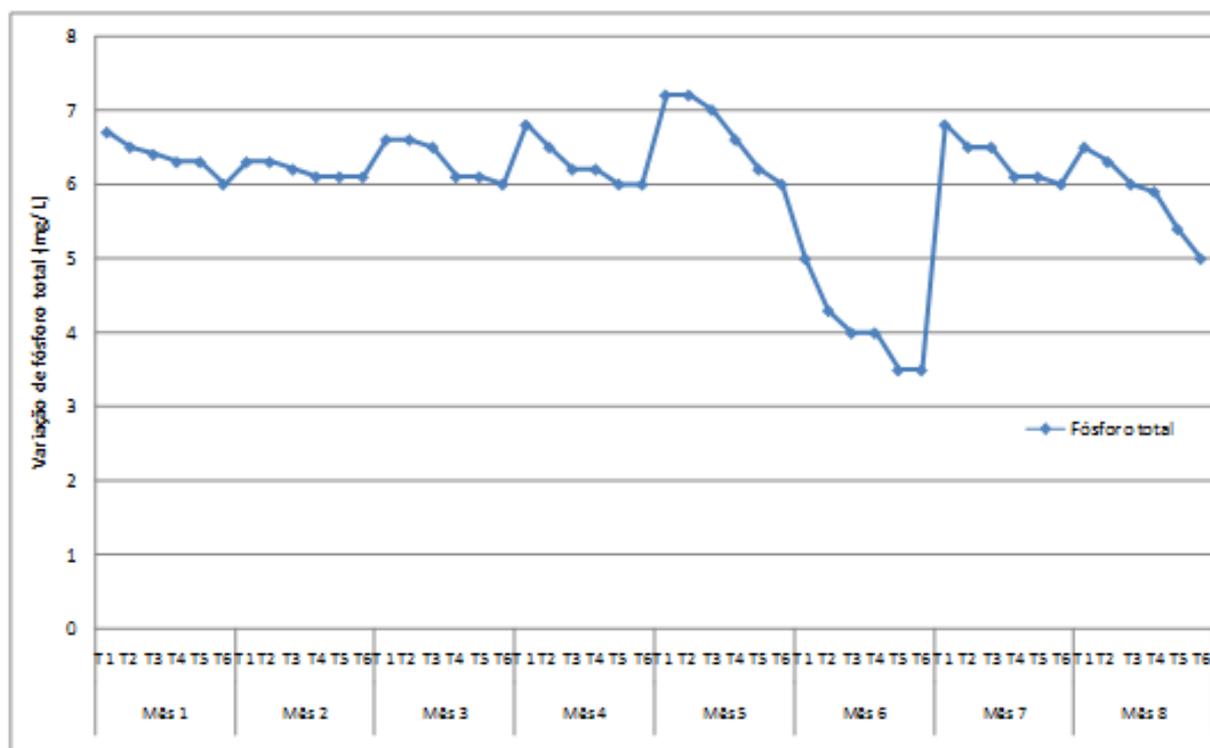


Figura 61: Variação de fósforo total a cada hora de operação do reator.

Assim como nos demais parâmetros analisados a maior remoção de fósforo ocorre na maioria dos meses entre as três primeiras horas de operação do reator, de modo que a média de remoção por hora no primeiro mês foi de 2,136%, no segundo mês 0,6%, no terceiro mês 1,83%, no quarto mês 2,44%, no quinto mês 3,53%, no mês seis 6,69%, no mês sete 2,45% e no mês oito 3,03%. A análise de variância apresentou variação significativa entre a remoção de fósforo nos oito meses de experimento, apresentando valor de  $p=5,48E-14$ .

Esse valor de correção apresentou valor alto por causa da concentração de fósforo na água da alimentação nos meses 5 e 6. Sendo assim, tomando como base os resultados dos demais meses que apresentaram concentração inicial de fósforo no tanque de alimentação similares a correlação não é significativa, apresentando valor de  $p=0,079$ .

### 6.6.13 Análise qualitativa da retrolavagem

Observou-se que após quatro horas de funcionamento, o sistema começou a diminuir sua eficiência. Para esses casos foi necessário fazer uma lavagem dos meios. Esse procedimento foi realizado pela introdução de água no sentido ascensional, com

vazão de entrada de 4,0L/min, para promover a fluidificação parcial do meio granular, com liberação das impurezas.

Na Figura 62 estão apresentadas a variação do pH e da condutividade elétrica, durante o processo de retrolavagem dos reatores. Podemos observar que o primeiro reator apresentou maior pico de condutividade elétrica, quando a água entrou em contato com as esferas sujas.

Esse resultado é explicado pelo fato desse reator absorver a maior carga de impurezas do efluente. O segundo reator obteve um pico menor, justamente por já receber a água vindo do reator 1, previamente tratada, sendo esse o mesmo raciocínio aplicado, para o terceiro reator.

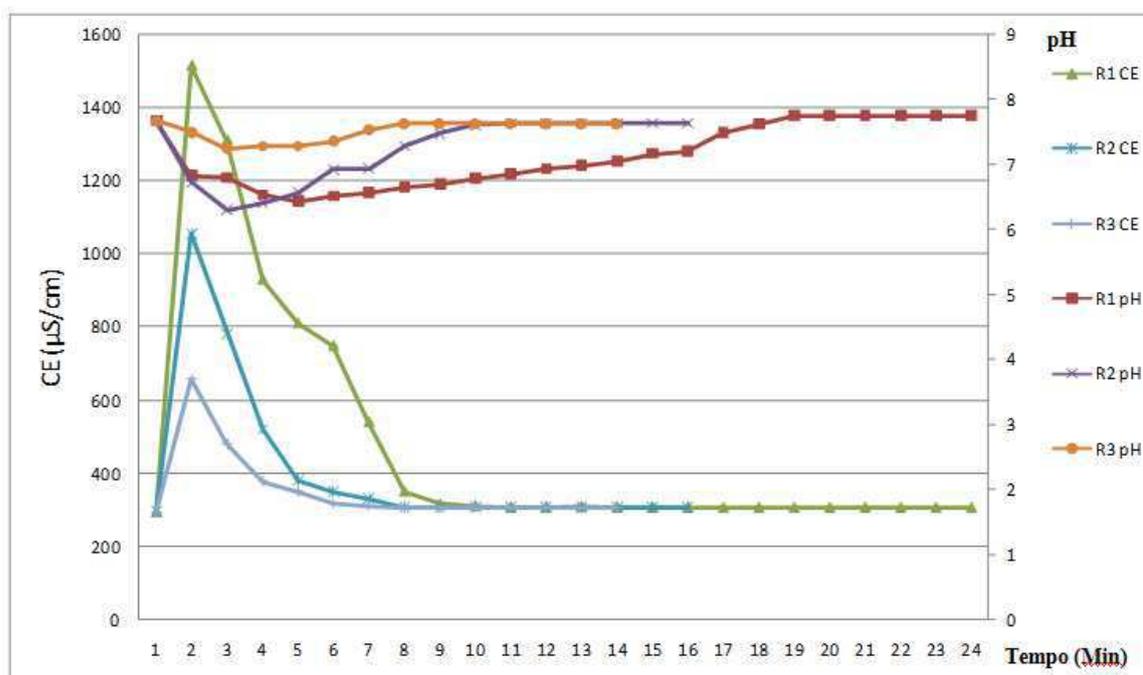


Figura 62: Variação do pH e Condutividade elétrica no momento da retrolavagem.

Considerando-se que a vazão utilizada para a retrolavagem foi de 4,0L/min, na Tabela 9 estão apresentados os valores do consumo de água utilizada, para realização desse procedimento, nos três reatores. Vale ressaltar que, apesar do volume de água ser considerável, o mesmo retornava para o tanque de alimentação para ser diluído e assim passar pelo processo de filtração nos reatores.

**Tabela 9: Tempo médio para estabilização do pH, condutividade elétrica e volume de água utilizado para a retrolavagem.**

Dados da lavagem			
Reator	Tempo de estabilização do pH	Tempo de estabilização da CE	Volume de água
1	17 minutos	9 minutos	68 litros
2	10 minutos	8 minutos	40 litros
3	7 minutos	6 minutos	28 litros

Na Tabela 9 também estão apresentados o tempo médio para que os valores de pH e condutividade elétrica retornem aos valores iniciais, da água utilizada para lavar o poliestireno. O formato esférico do poliestireno é uma característica que auxilia no processo de limpeza. Segundo Schöntag (2015), quando se utiliza grãos leves no processo de filtração esses necessitam de menor velocidade para realizar a retrolavagem.

Conforme podemos observar, o primeiro reator demora mais tempo para estabilizar esses parâmetros em virtude de receber a maior carga orgânica do efluente. Em virtude disso, ele precisa de uma maior demanda de água para desprender os sais e as impurezas que alteram o pH do isopor.

Quando comparado com filtro de areia, esse sistema contendo poliestireno necessita de mais tempo para lavagem, uma vez que segundo Melo (2014), os filtros de areia gastam de 7 a 10 minutos para serem lavados. No entanto, deve-se levar em consideração a espessura da camada filtrante bem como a velocidade da lavagem.

ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ et al. (2009) observaram que o uso de PS como meio filtrante diminui o custo de capital e operação e oferece boas possibilidades de otimização do filtro. Outro fator importante é que o PS pode ser restaurado mais rapidamente após a limpeza em comparação com o filtro de areia, uma vez que a areia precisa de mais tempo para o crescimento do consórcio microbiano o que limita a eficiência do sistema (SILVA, 2020).

## 7.0 CONCLUSÕES

As conclusões deste trabalho em função dos objetivos específicos foram às seguintes:

- ❖ Em função dos diâmetros das esferas de poliestireno, observou-se que as de 2,0mm foi que obteve melhores resultados no aumento e volume após o contato com o efluente, e suas características físicas iniciais foram restabelecidas após a secagem a luz natural do sol. Essa comprovação foi registrada através das análises de microscopia eletrônica de varredura, as quais mostram a preservação da textura superficial do poliestireno mesmo após os oito meses de uso durante essa pesquisa.
- ❖ A análise do planejamento experimental mostrou que a variável da configuração em série apresentou a maior significância para a remoção de cor e turbidez. Associado a essa variável, a vazão de 0,5L/min contribuiu para a remoção dos respectivos parâmetros mencionados acima. As granulometrias de 2,0 mm e 5,0mm não apresentaram diferença significativa quanto a remoção de cor e turbidez. A configuração em paralelo apresentou remoção inferior a 50% quando comparado a configuração em série, chegando ao ponto de não haver remoção nas vazões superiores.
- ❖ O Sistema foi eficiente no tratamento de águas residuárias, de modo que houve redução significativa nos valores de turbidez, cor, DQO, *E. coli* e amônia. Os resultados foram expressivos, principalmente quando o sistema operou com a configuração em série e vazão 0,5 L/min, fato esse que é evidenciado com pela remoção de bactérias indicadoras de contaminação fecal, *E. coli*, uma vez que o sistema removeu esses microrganismos ao ponto de enquadrar essas águas entre as classes 2 e 3 referentes a Resolução 357 do CONAMA.
- ❖ A retrolavagem do sistema foi um procedimento para limpar o meio filtrante, que após quatro horas de operação seu rendimento diminuiu em termos de qualidade efluente tratado. O processo de retrolavagem do meio foi fundamental para recuperar a qualidade do permeado. Em função da maior carga orgânica nas superfícies esféricas do poliestireno no primeiro reator, este consumiu mais água e levou mais tempo que os demais, durante sua limpeza.

- ❖ De acordo com os testes e resultados apresentados observou-se que as esferas de poliestireno mostraram-se capazes de serem utilizadas como elemento filtrante para o tratamento de efluentes destinados ao reúso agrícola. Esse material apresentou boa resistência ao envelhecimento e seu uso para fins de tratamento de águas residuárias. Quanto à classificação dessas águas, quando o sistema operava com a configuração em série e vazão 0,5 L/min, os parâmetros pH, turbidez, nitrato e E. coli, apresentaram remoção significativa ao ponto estarem dentro dos limites estabelecidos para Classe 2 e 3 do CONAMA.
- ❖ Sendo assim essas águas podem ser utilizadas na irrigação de áreas verdes como parques, jardins, lavagem de pisos e calçadas, reúso em pomares, cereais, forragens e pastagens para gado e lavagem de veículos. Sendo assim, o sistema de tratamento de águas residuárias estudado nesta tese tem potencial para transformar um poluente ambiental em um recurso econômico, além de apresentar-se como uma solução sanitariamente segura, economicamente viável e ambientalmente sustentável.

## **8.0 PERSPECTIVAS**

O presente trabalho apresenta várias perspectivas que visam estudar com mais profundidade o uso do poliestireno para fins de tratamento de águas residuárias assim como segue:

- Testar o potencial do poliestireno combinado com outros elementos no processo de tratamento de águas residuárias;
- Avaliar o desempenho do sistema quando utilizado diferentes granulometrias de poliestireno juntas no mesmo reator;
- 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.

## 9.0 REFERÊNCIAS

ABRAPEX - Associação Brasileira do Poliestireno Expandido. Disponível em <http://www.abrapex.com.br/>. Acessado em setembro de 2018.

ALI, I.; ASIM, M.; KHAN, T.A. Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 130, p. 170-183, 2012.

ALMEIDA, O. A. **Qualidade da água de irrigação**. Embrapa Mandioca e Fruticultura. Cruz das Almas -BA. 2010

ALVES, M. P. Pós-tratamento de esgoto doméstico em filtros lentos, com diferentes meios filtrantes. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental. Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande. 2020.

ALVES, P. F. S.; SANTOS, S. R.; KONDO, M. K.; ARAÚJO, E. D.; OLIVEIRA, P. M. Fertirrigação do milho com água residuária sanitária tratada: crescimento e produção. **Eng. Sanit. Ambient.** | v.23 n.5 | set/out 2018 | 833-839. DOI: 10.1590/S1413-41522018136152.

AMIANTI, M. Uso e Aplicação do Poliestireno Expandido (EPS) Reciclado para Impermeabilização por Impregnação de Superfícies de Concreto Pré-fabricado. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais -UFOP/CETEC/UEMG. 2005.

ANDRADE, L. R. S. Avaliação da qualidade das águas superficiais e seu reúso na irrigação de áreas verdes do campus sede da Universidade Federal de Campina Grande-PB. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia em Recursos Naturais. Campina Grande-PB. 2017.

ANDRADE, L. R. S. Avaliação da qualidade das águas superficiais e seu reúso na irrigação de áreas verdes do campus sede da Universidade Federal de Campina Grande-

PB. Dissertação de mestrado. Programa de Pós graduação em Recursos Naturais. Campina Grande – PB. 2017.

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.

APHA - American Public Health Association New York. **Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater**. Ed. New York, 1999.

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.

ARAÚJO, N. C.; OLIVEIRA, R.; COURA, M. A.; BANDEIRA, F. A. Macronutrientes e produtividade da forragem hidropônica de milho fertilizado com soluções compostas por águas amarelas. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.9, n.7, p.42-51, 2018. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.007.0005>.

AVELINO, M. C. G. S. Construção de um sistema de alagados construídos e o comportamento dos parâmetros físico-químicos e biológicos da fase de maturação dos leitos de fluxo vertical. **Dissertação (Mestrado)** em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Bauru-SP. 2012.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. 2. ed. Campina Grande: UFPB. 153 p. (Estudos da FAO Irrigação e Drenagem, 29). 1999.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 218 p. 1991.

AZEVEDO, B. S. M.; RIZZO, A. C. L.; LEITE, S. G. F.; SOBRAL, L. G. S.; REICHWALD, D. WALCHAN, G. M. Utilização da fibra da casca de coco verde como

suporte para a formação de biofilme visando o tratamento de efluentes. **Série tecnologia ambiental**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

AZEVEDO, P. R. L.; JÚNIOR, E. B. P.; MOREIRA, J. N.; BEZERRA, D. E. L.; FILHO, P. L. Reúso de água e efluente agroindustrial na produção de mudas de gravioleira. **Revista Verde**. v. 14, n.1, jan.-mar, p.05-11, 2019.

BARBONI, J. T.; ROCHETTO, U. L. Análise da eficiência de fossa séptica biodigestora para tratamento de esgotos domésticos em área rural. **XI congresso nacional de meio ambiente de poços de caldas**. 2014.

BARROS, A. J.; SILVA, G. R.; LOPES, A. E.; MADEIRA, M. S. Estudo de caso: o dimensionamento de uma estação compacta de tratamento de efluentes sanitários no Município de Itabira, Minas Gerais, com foco no desenvolvimento local. **Revista Caribeña de Ciencias Sociales**. 2017.

BASTOS, R. K. X.; MARA, D. D. Avaliação dos critérios e padrões de qualidade microbiológica de esgotos sanitários tendo em vista sua utilização na agricultura. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**, 17, 1993, Natal. Anais. Natal: UFRN, 1993.

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, A. M. N.; RIBEIRO, M. H. G.; COUTINHO, A. P.; RABELO, A. E. C. G. C.; GONÇALVES, E. A. Performance of slow sand filters in the after-treatment of effluent from Pernambuco state textile Center. **Rev. Ambient. Água**. vol. 15 n. 6, e2586 - Taubaté 2020.

BEZERRA, D. E. L.; FILHO, P. L.; JÚNIOR, E. B. P.; AZEVEDO, P. R. L.; SILVA, E. A. Reúso de água na irrigação de mudas de mamoeiro no Semiárido brasileiro. **Revista Verde**. v. 14, n.1, jan.-mar, p.05-11, 2019.

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, 2021.

BITTON, G. Wastewater microbiology. 3th edition. Gainesville, Florida: Wiley. 2005.

BOITA, A.; BELLEI, P. Análise da substituição parcial do agregado miúdo por poliestireno expandido (EPS) na argamassa de assentamento. **Revista Tecnologia**, Chapecó, v. 9, n. 1, p. 1-14, jan. 2019.

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  $\beta$ lactamases (ESBLs). **Science of The Total Environment**, v. 698, p. 134201, 2020.

BRAGA, T.; CAMPOS, R. F. F.; RIBEIRO, O. Análise das políticas públicas e o perfil da atual destinação de efluentes sanitários no interior do Município de Caçador/SC. **Revista de Iniciação Científica da Universidade Vale do Rio Verde**, Três Corações, v. 8, n. 1, p. 72-103. 2018.

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

BRASIL. **Lei 11.445**. Diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2007:

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.

BRASIL. **Resolução Nº. 54**. critérios gerais para reúso de água potável. Brasília, 2005.

BRITTO, A. L; REZENDE, S. C. A política pública para os serviços urbanos de abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil: financeirização, mercantilização e perspectivas de resistência. **Cad. Metrop.** São Paulo , v. 19, n. 39, p. 557- 581, 2017.

BUSSOLO, C. S. INFLUÊNCIA DO USO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COMO AGREGADO EM ARGAMASSA. **Trabalho de conclusão de curso** de engenharia civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville. 2020.

CAO, S. M. S. Nitrificação e desnitrificação em situações críticas de substrato. **Tese de Doutorado** - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

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.

CARVALHO, R. S.; SANTOS. F, J. S.; SANTANA, L. O. G.; GOMES, D. A.; MENDONÇA, L. C.; FACCIOLI, G. G. Influência do reúso de águas residuárias na qualidade microbiológica do girassol destinado à alimentação animal). **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 2, p. 157-167, 2013. <http://dx.doi.org/10.4136/ambiagua.1116>.

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

CASTRO, L. V. de.; BRANDT, E. M. F.; CAMPOS, A. C. V.; AFONSO, R. J. de C. F.; MOTA FILHO, C. R. Avaliação da remoção de microcontaminantes em filtros lentos de baixo custo para o polimento de efluentes de estações de tratamento de esgoto. In: **CONGRESSO ABES FENASAN**, São Paulo. Trabalhos completos [...]. Rio de Janeiro: ABES. p. 1–16. 2017.

CAVALCANTE, F. F. S. Desempenho de filtros aeróbios na filtração de efluente de tanque séptico. **Trabalho de conclusão de curso**. Ciências biológicas. Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2013.

CAVALCANTE, K. D. B.. O Uso de Águas Residuais e as vantagens de sua Aplicação na Agricultura. **Monografia** (Bacharelado) - Universidade Estadual da Paraíba, João Pessoa, 2015.

CAVALCANTE, K. L.; MACIEL, W. M.; MACIEL, H. M.; NOGUEIRA, D. H.; PEREIRA, S. M. Análise Microbiológica da Qualidade de Efluentes para Fins de Reúso na Irrigação no Município de Iguatu – CE. **Braz. J. of Develop**. Curitiba, v. 6, n. 9, p. 73638-73653 sep. 2020.

CAWST - CENTRE FOR AFFORDABLE WATER AND SANITATION TECHNOLOGY. Biosand Filter Manual. Design, Construction, Intallation, Operation and Maintenance. Canadá, 2010.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. **Metodologia científica**. 6ª ed. São Paulo: Prentice Hall, 2007.

CLARK, T.; STEPHENSON, T.; PEARCE, P. A. Phosphorus removal by chemical precipitation in a biological aerated filter. In: **Water Research**, v. 31, n. 10, p. 2557-63, out. 1997.

COELHO, C. S.; BORJA, P. C.; SANTOS, M. E. P. Desigualdades de acesso e qualidade dos serviços de saneamento básico da bacia hidrográfica do rio Camarajipe – Salvador (BA). **Rev Bahia análise e dados**. v.27n.2. Jul./Dez.2019.

CONCEIÇÃO, M. M. M.; SOUZA, R. R. N. SILVA, A. C. S.; MACHADO, N. I. G.; CARNEIRO, C. C. A.; GUEDES, F. L.; SILVA, N. S.; SILVA, M. O.; TAVARES, L. S.; SOUZA, G. B.; MARTINS, I. V. M.; RIBEIRO, T. S.; SILVA, M. P.; SILVA, A. S. F. A lógica fuzzy no estudo da qualidade da água do rio Uraim Paragominas PA. **Brazilian Journal of Development**. 2020.

COSTA, C. C.; GUILHOTO, J. J. M. Saneamento rural no Brasil: impacto da fossa séptica biodigestor. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**. Edição Especial. p. 51-60. 2014.

CRIVILIM, B. R. Eletrocoagulação seguida de filtração direta para tratamento de efluente de suinocultura. **Dissertação de mestrado** Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina. 2021.

DABROWSKI, A. Adsorption—from theory to practice. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 93, p. 135-224, 2001.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL, P. L. P. Seleção de Tecnologia de Tratamento de Água. São Carlos: LDIBE LTDA, 2008.

DUTTA, A.; SARKAR, S. Sequencing batch reactor for wastewater treatment: Recent advances. **Current pollution reports**, v. 1, n. 3, p. 117-190, 2015.

DUTTA, S; DWIVEDI, A.; SURESH, K. M. Use of water quality index and multivariate statistical techniques for the assessment of spatial variations in water quality of a small river. **Environmental monitoring and assessment**, 190, 2-17. 2018.

ELLIS, K. V. Slow sand filtration. In: CRC Critical Reviews in Environmental Control. Vol. 15. 1985.

FERRAZ, G. A. Reutilização do poliestireno expandido como agregado no composto de concreto leve para contrapiso. **Trabalho de Conclusão de Curso** de graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão. 2014.

FERREIRA, E. A.; COURA, M. A.; OLIVEIRA, R.; MEIRA, C. M. B. S.; RODRIGUES, A. C. L. Nitrificação de águas amarelas em leito percolante de areia. **Eng Sanit Ambient**, v.24, n.4, jul/ago., 2019. 675-685. DOI: 10.1590/S1413-41522019143919.

FERREIRA, M. P.; GARCIA, M. S. D. Saneamento básico: meio ambiente e dignidade humana. **Revista Dignidade Re-vista**. v. 2 n. 3. 2017.

FLORÊNCIO, L.; XAVIER, R. K.; AISSE, M. M. Tratamento e utilização de esgoto sanitário. **ABES**. Rio de Janeiro. 427p. 2006.

FONSCECA, W, C.; TIBIRICA, C. E. J. A. Avaliação da influência da estação de tratamento de efluente de Catanduva (SP) na qualidade da água do rio São Domingos. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**. v.26 n.1. 2021.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). Ações de Saneamento Rural-Funasa. 2016. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/site/engenharia-de-saude-publica-2/saneamento-rural/>. Acesso em: 01 mar. 2016.

GUERRA, A. B.; TONUCCI, M. C.; CEBALLOS, B. S. O.; GUIMARÕES, H. R. C. Remoção de microcistina-LR de águas eutrofizadas por clarificação e filtração seguidas de adsorção em carvão ativado granular. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**. vol.20 n°4 Rio de Janeiro Oct./Dec. 2015.

HARWANTO, D.; OH, S.; JO, J. Comparison of the Nitrification Efficiencies of Three Biofilter Media in a Freshwater System. **Fish Aqua Sci**, v. 14, n. November, p. 363–369, 2011.

HELENA, M. S. Estudo para Aplicação de Poliestireno Expandido (EPS) em Concretos e Argamassas. 2009. 87 f. TCC (Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, Criciúma, 2009.

HESPANHOL, I; MACHADO, P. A. M. Reúso Potável de Água na Região Metropolitana de São Paulo e em outros Países. **EcoDebate**, v. 3105, p. 1–21, 2018.

HU S., YANG F., LIU S., YU L. “The development of a novel hybrid aerating membraneanaerobic baffled reactor for the simultaneous nitrogen and organic carbon removal from wastewater”, **Water Research**, 43 (2), p. 381-388. 2009.

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](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/default_zip.shtm). Acessado em agosto de 2018.

ISHI, M. M. Filtração lenta com retrolavagem para tratamento de água de abastecimento. Florianópolis- SC. 2013.

JEONG, H.; KIM, H.; JANG, T. Irrigation water quality standards for indirect wastewater reuse in agriculture: a contribution toward sustainable wastewater reuse in South Korea. **Water**, v. 8, n. 4, p. 1-18, 2016. <http://dx.doi.org/10.3390/w8040169>

JESUS, F. L. F.; SANTOS, O. N. A.; JUNIOR, M. V. T.; GOMES, T. M.; ROSSI, F.; ROMÁN, R. M. S. Águas residuárias para irrigação no Brasil: uma abordagem química, física e microbiológica. *Irriga, Botucatu*, v. 25, n. 3, p. 562-589, julho-setembro, 2020.

JIMENEZ, B.; MARA, D.; CARR, R.; BRISSAUD, F. Wastewater treatment for pathogen removal and nutrient conservation: suitable systems for use in developing countries. In: **Wastewater Irrigation and Health – Assessing and mitigating risk in low-income countries**. Earthscan, IDRC. 2010.

JUNIOR, A. S. M.; RIBEIRO, K. A.; MERIJ, A. C.; SILVA, A. O.; DAMASCENO, J. M. N.; FARIA, P. R.; CAMPOS, S. S. Desempenho na remoção de fósforo em sistema de filtração lenta. **Inovae**. São Paulo, Vol.6. pág. 254-278. 2018.

LARSEN, D. Diagnóstico do saneamento rural através de metodologia participativa. Estudo de caso: Bacia contribuinte ao reservatório do rio verde, região metropolitana de Curitiba, PR. **Dissertação** (Mestre Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2010.

LATTMANN, B. H. Síntese e caracterização de poliestireno modificado com óleo vegetal e derivados de ácidos graxos. **Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Química, Departamento de Química, Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

LIMA, J. K. L. Avaliação da filtração direta descendente no tratamento de água de manancial com baixa turbidez e cor elevada. **Dissertação de Mestrado** - Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Natal. 2019.

LIMA, J. R. N., ABREU, F. O. M. S. Produtos Naturais Utilizados como Coagulantes e Floculantes para Tratamento de Águas: Uma Revisão sobre Benefícios e Potencialidades. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 3, ps. 709-735, 2018.

LUNA, M. L. D. Tratamento de esgoto doméstico para comunidades difusas com fins de reúso na agricultura. **Tese (Doutorado)** - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande. 2014.

MACHADO, S. M. De. O. Avaliação do efeito antimicrobiano do surfactante cloreto de benzalcônio no controlo da formação de biofilmes indesejáveis. 114 f. **Dissertação** (Mestrado em Tecnologia do Ambiente) – Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2005.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J.; DUNLAP, P. V.; CLARK, D. P. Microbiologia de Brock, 12ª edição, Editora Artmed, Porto Alegre, 1160p., 2010.

MARQUES, A. S.; PINHEIRO, E. F. M.; OLIVEIRA, A. P. S.; CAMPOS, D.V. B.; OLIVEIRA, R. S.; SILVA, R. M; MATOS, C. F. Tratamento da Água Residuária da Bovinocultura Utilizando Resíduos Agrofloreais: Retenção de Poluentes Ambientais. **Rev. Virtual de Química**. Vol. 12, nº 2, 335-344. 2020.

MARTINS, G. O.; SOUZA, A. R.; FILHO, M, V, S. Cultivo de bactérias nitrificantes a partir do biofilme de filtro biológico aerado submerso tratando esgoto. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**. v.10, n.6. 2019.

MARTINS, R. A.; ARAÚJO, M. G. D. Projeto de construção de sobrados geminados com poliestireno expandido: comparativo com a construção em alvenaria tradicional de tijolos cerâmicos. **Revista engenharia na prática: construção e inovação**. Vol 2. Cap 8. 2021.

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.

MELO, A. R. B. **Pós-tratamento de efluente de reator UASB por filtração em areia e carvão ativado**. Dissertação. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife. 2014.

MORAES, C. B.; BRASIL, P. C. Estudo da Viabilidade do Poliestireno Expandido (EPS) na produção de edificações com baixo impacto ambiental. **4º Seminário nacional de construções sustentáveis**. Passo Fundo-RS. 2015.

MOZZOMO, L. F. Reatores de biofilme em batelada sequencial visando a nitrificação e desnitrificação simultânea de esgoto sintético sob baixa relação carbono/nitrogênio.

**Dissertação de mestrado** – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Universidade Federal de Alagoas. Maceió. 2019.

NASCIMENTO, J. S.; FILHO, J. F. Crescimento, produção e alterações químicas do solo em algodão irrigado com água de esgotos sanitários tratados. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 2, p. 36 – 45, abr –jun., 2015.

NETO, A. P. O.; GUERRA, L. R. M.; SILVA, M. R. P.; SILVA, R. F. Biorremediação vegetal do esgoto domiciliar: o caso da fossa verde em comunidades rurais do alto sertão alagoano. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v.1, n.3, p.103-113, set./dez., 2015.

NIKOONAHAD, A.; GHANEIAN, M. T.; MAHVI, A. H.; EHRAMPOUSH, M. H.; EBRAHIMI, A. A.; LOTFI, M. H.; SALAMEHNEJAD, S. Aplicação do novo Modified Biological Aerated Filter (MBAF) como promissor pós-tratamento para reutilização de água: Modificação em processo de configuração e retrolavagem. **Journal of Environmental Management**. p. 191-199. 2017.

NOGUEIRA, B, L. Modelagem matemática de reatores de leito móvel com biofilme para tratamento de efluentes. **Dissertação de Mestrado** - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

OLIVEIRA G, S. P.; PIRES, R. Ranking do saneamento: Instituto Trata Brasil: São Paulo: GO Associados; 2018.

OLIVEIRA, A. P. S.; PINHEIRO, E. F. M.; ARAÚJO, S. C. Desempenho do filtro orgânico preenchido com palha de feijão no tratamento da água residuária da suinocultura. **Anais 6º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade**. 2017.

OLIVEIRA, E. L.; MALVA, M; PEREIRA, RICARDO MOLTO.; CONCEIÇÃO, AUGUSTO DE ALMEIDA ; CASTILHO, G . **Constructed Wetland system for wastewater treatment by using recycled EPS (Expandable Polystyrene) Support Medium**. In: 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution

Control, 2006, Lisboa. Wetland Systems for Water Pollution Control. Almada - Portugal : IWA - International Water Association and MAOTDR. v. II. p. 1215-1222, 2006.

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.

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.

PAIVA, R. F. P. S; SOUZA, M. F. P. Associação entre condições socioeconômicas, sanitárias e de atenção básica e a morbidade hospitalar por doenças de veiculação hídrica no Brasil. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 34, n. 1, 2018.

PATERNIANI, J. E. E.; SILVA, M. J. M.; RIBEIRO, T, A, P.; BARBOSA, M. Pré-filtração em pedregulho e filtração lenta com areia, manta não tecida e carvão ativado para polimento de efluentes domésticos tratados em leitos cultivados. **Revista Engenharia Agrícola**. vol.31 no.4 Jaboticabal 2011

PINHEIRO, F. W. A.; NOBRE, R. G.; SOUZA, L. P.; OLIVEIRA, S. G.; ARAÚJO, J. E. S.; VELOSO, L. L. S. A. Irrigação com águas salinas e adubação nitrogenada na produção de mudas de mamoeiro “Formosa”. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.12, n. 1, p. 17-22, 2017.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E C. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

QUEIROZ, F. R. M. Sistema de membrana de microfiltração/nanofiltração e ultrafiltração/osmose inversa: Uma alternativa para a redução do nitrato em águas doces e salobras. **Tese de Doutorado** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Campina Grande – PB. 2017.

REIS, M. M. Impactos de metais pesados presentes na água e esgoto tratado usados para irrigação de área situada na bacia do rio vieira e em sistema de cultivo de milho (Pennisetum glaucum). **Tese de doutorado**. Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP. 2020.

RESENDE, R. G.; FERREIRA, S.; FERNANDES, L. F. R. O saneamento rural no contexto brasileiro. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 10, n. 1, mar. 2018.

RODRIGUES, V. A. J. Influência do sedimento no processo de remoção de nitrogênio por nitrificação/desnitrificação em lagoas de polimento. **Tese de Doutorado**. Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2016.

SABEI, T. R.; BASSETTI, F. J. Alternativas ecoeficientes para tratamento de efluentes em comunidades rurais. **IX Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, 2013.

SANTANI, K. S. T.; ARANTES, C. C.; JESUS, T. A. Comparação da remoção de turbidez e cor aparente em filtros lentos de areia com e sem adição de proteína imobilizada de *Moringa oleifera*. **Rev. Brasileira de Ciência Tecnologia e Inovação**. Uberaba, MG. v. 4 n. 2 p. 169-179 jul./set./2019. DOI: 10.18554/rbcti.v4i2.3721

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.

SCHICOSKI, C. A. Isopor: uso abusivo e reciclagem incipiente. **Revista Meio Ambiente**, Campo Mourão, v.3 n.11, p.16-17, fev. 2008.

SCHÖNTAG, J. M. Esferas de poliestireno como elemento filtrante em filtração rápida descendente. **Tese de Doutorado**, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. 280p, 2015.

ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ, R.; SOKOLOVIĆ, S.; GOVEDARICA, D. Performance of expanded polystyrene particles in deep bed filtration. **Separation and Purification Technology**, v. 68, n. 2, p. 267–272, ago. 2009.

SILVA, C. P. Pós-tratamento de efluente doméstico de reator anaeróbio utilizando filtração rápida para fins de reúso: estudo físico químico e toxicológico. **Tese de Doutorado** - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa. 2020.

SILVA, C. V. A. Remoção de fósforo em estação compacta de tratamento de esgotos sanitários através de precipitação química. **Dissertação de mestrado** - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória-ES. 2009.

SILVA, D. F.; MOREJON, C. F. M.; LESS, F. R. Prospecção do panorama do saneamento rural e urbano no Brasil. **Rev. Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**. E - ISSN 1517-1256, V. Especial, maio, 2014.

SILVA, H. R. T. S.; EGERT, P.; WILLEMANN, M. I. Avaliação de um sistema alternativo para tratamento de efluente doméstico e planejamento para conscientização da comunidade. **Mix Sustentável**. Florianópolis. v.7, n.2, p.67-78. 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (Brasil). Diagnóstico dos serviços de água e esgotos, 2017. Brasília; MDR, 2019a. Disponível <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-aguas-pluviais/diagnostico-ap-2017>. Acesso em: 21 julho 2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (Brasil). Diagnóstico de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas, 2017. Brasília: MDR, 2019b. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-aguas-pluviais/diagnostico-ap-2017>. Acesso em: 21 julho 2019.

SNIS - Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2019. Disponível em <http://www.snis.gov.br>, consultado em agosto de 2020.

SOKOLOVIC. R, S.; SOKOLOVIC. S.; GOVEDARICA D. Performance of expanded polystyrene particles in deep bed filtration. **Elsevier**. p. 267–272. 2009.

SOUZA, A. T.; CHAGAS, D. Avaliação da eficiência de agentes coagulantes em efluente de frigorífico. **Colloquium Exactarum**, v. 12, n1. 2020, p.11–19. 2020.

SOUZA, J. A. R.; MOREIRA, D. A.; SILVA, É. L.; REZENDE, D. C. V.; OLIVEIRA, W. M.; REZENDE, J. G. F.; RIBEIRO, W. A. S. Desenvolvimento de mudas de eucalipto submetidas à fertirrigação com água residuária da suinocultura. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.9, n.7, p.280-288, 2018. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.007.0026>.

TAN, K. H. **Environmental soil science**. New York: Marcel Dekker, 1994.

TESSARI, J. Utilização de Poliestireno Expandido e Potencial de Aproveitamento de seus Resíduos pela Construção Civil. 102 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

THORN, M.; MATTSSON, A.; SÖRENSSON, F. Biofilm development in a nitrifying trickling filter. **Water Science and Technology**, 34:83–89, 1996.

TIBAU, A. Matéria orgânica e fertilidade do solo. 3ª Ed. São Paulo: Nobel, 221p. 1984.

TIMMONS, M. B.; HOLDER, J. L.; EBELING, J. M. Application of microbead biological filters. **Aquacultural Engineering**. Pag. 332–343. 2006.

TONNETI, A.; CORAUCCI, B. F.; STEFANUTTI, R.; FIGUEIREDO, R. F.; SÃO PEDRO, C. C. O. Remoção de matéria orgânica, coliformes totais e nitrificação no tratamento de esgotos domésticos por filtro de areia. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. V. 10 n.3, p.209-218. 2015.

TRANI, P.E. Hortaliças folhosas e condimentos. In: PEREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B. van; ABREU, C.A. Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/ POTAFOS, p.293-310, 2001.

UNESCO, Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. Água e Emprego fatos e números. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2016.

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

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. **Eclet. Quím.** vol.22 São Paulo 1997.

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.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos/ Marcos von Sperling. - 4. ed. - Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2014. 472 p. 2017.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Princípios básicos do tratamento de esgoto. 2ª ed. Belo Horizonte. UFMG, 211p. 2013.

WHO-WORLD HEALTH ORGANIZATION. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Geneva: WHO, 2006.

WITHERS, P. J. A.; JARVIE, H. P.; STOATE, C. Quantifying the impact of septic tank systems on eutrophication risk in rural headwaters. **Environment International**, v.37, n.3, p.644-653. 2011.

WOLFF, D. B.; PAUL, E.; COSTA, R. H. R. Influência do tipo de material suporte no desempenho de reatores biológicos de leito móvel na remoção de carbono e nitrificação de esgoto sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. V. 15, n. 2, p. 149-154. 2010.

XAVIER, J. F.; AZEVEDO, C. A. V.; BELTRÃO, N. E. M.; FERNANDES, J.; LIMA, V. L. cultivo da mamoneira sob diferentes tipos de águas residuárias e de abastecimento e níveis de água no solo. **Revista Caatinga, Mossoró**, v. 27, n. 3, p. 11 – 21, jul. – set., 2014.

ZHENG, M.; LIU, Y. C.; XU, K. N.; WANG, C. W.; HE, H.; ZHU, W.; DONG, Q. Use of low frequency and density ultrasound to stimulate partial nitrification and simultaneous nitrification and denitrification. **Bioresource technology**, v. 146, p. 537-542, 2013.

## APÊNDICES

**Tabela 10:** Tabela dos pesos e diâmetro das esferas de poliestireno antes e depois do tratamento de efluente.

Repetição	Peso seco (g)	Peso molhado 2 mm	Peso molhado 5 mm	Diâmetro molhado 2 mm	Diâmetro molhado 5 mm
1	1	2	4	5	7,1
2	1	2,1	3,3	5,4	6,3
3	1	2,4	3,8	5,5	7
4	1	2,3	4	5,5	8
5	1	3,8	4,5	5,7	7,2
6	1	2,7	4	5,3	7,3
7	1	2,1	4,4	5,7	8,2
8	1	2,4	4,2	5,6	8,2
9	1	2,1	4,2	4,8	6,6
10	1	2	4,4	4,1	6,4
11	1	2,1	4,2	4,9	6,7
12	1	2,4	4	5,3	7,3
13	1	2,3	3,7	4,2	7,2
14	1	2	3,9	4,2	7,1
15	1	2	4	4,2	7
16	1	2,1	3,9	4,8	7,1
17	1	2,4	3,6	5,2	6,3
18	1	2,1	4,8	5	7
19	1	2	4,2	5	8
20	1	2,1	4	5,1	7,2
21	1	2,4	4	5,5	7,3
22	1	2,3	3,7	5,5	8,2
23	1	2	3,9	5,7	8,2
24	1	2	3,2	5,3	6,6
25	1	2,1	3,9	5,7	6,4
26	1	2	3,8	5,6	6,7
27	1	2,1	4,2	5,6	7,3
28	1	2,4	3,4	4,7	7,2
29	1	2,3	3,6	5	7,1
30	1	2	4,2	4,6	7
31	1	2,1	4,4	5	7,1
32	1	2,4	4,5	4,2	6,3
33	1	2,3	4	4,5	7
34	1	2	4	4,8	8
35	1	2	4,2	4,8	7,2
36	1	2,1	4,4	4,7	7,3
37	1	2,4	4,2	4,7	8,2
38	1	2,1	4	5	8,2
39	1	2	4	5,4	6,6

40	1	2,1	3,8	5	6,4
41	1	2,4	4,2	5,5	6,7
42	1	2,3	4,4	5,7	7,3
43	1	2	4	5,3	7,2
44	1	2	3,7	5,7	7,1
45	1	2,1	3,9	5,6	7
46	1	2,4	3,2	4,5	6,4
47	1	2,1	3,9	5,3	7,5
48	1	2	3,8	5,8	8,5
49	1	2,1	4,2	5,3	7,2
50	1	2,4	4	5,4	7,4
51	1	2,3	4,2	4,7	7,6
52	1	2	3,3	5,4	6,3
53	1	2	3,8	5,5	7
54	1	2,1	4	5,5	8
55	1	2,4	4,5	5,7	7,2
56	1	2,1	4	5,3	7,3
57	1	2	4,4	5,7	8,2
58	1	2,1	4,2	5,6	8,2
59	1	2,4	4,2	4,8	6,6
60	1	2,3	4,4	4,1	6,4
61	1	2	4,2	4,9	6,7
62	1	2	4	5,3	7,3
63	1	2,1	3,7	4,2	7,2
64	1	2,4	3,9	4,2	7,1
65	1	2,1	4	4,2	7
66	1	3,4	3,9	4,8	7,1
67	1	3,5	3,6	5,2	6,3
68	1	2,4	4,8	5	7
69	1	2,3	4,2	5	8
70	1	3	4	5,1	7,2
71	1	2	4	5,5	7,3
72	1	2,1	3,7	5,5	8,2
73	1	2,4	3,9	5,7	8,2
74	1	2,7	3,2	5,3	6,6
75	1	2,7	3,9	5,7	6,4
76	1	2,6	3,8	5,6	6,7
77	1	2,4	4,2	5,6	7,3
78	1	2,3	3,4	4,7	7,2
79	1	2	3,6	5	7,1
80	1	2,7	4,2	4,6	7
81	1	2,1	4,4	5	7,1
82	1	2,4	4,5	4,2	6,3
83	1	2,1	4	4,5	7
84	1	3,4	4	4,8	8

85	1	2,7	4,2	4,8	7,2
86	1	2,4	4,4	4,7	7,3
87	1	2,3	4,2	4,7	8,2
88	1	2,7	4	5	8,2
89	1	2	4	5,4	6,6
90	1	3,2	3,8	5	6,4
91	1	2,4	4,2	5,5	6,7
92	1	2,1	4,4	5,7	7,3
93	1	3,1	4	5,3	7,2
94	1	2,1	3,7	5,7	7,1
95	1	2,4	3,9	5,6	7
96	1	2,3	3,2	4,5	6,4
97	1	2,7	3,9	5,3	7,5
98	1	2	3,8	5,8	8,5
99	1	2,1	4,2	5,3	7,2
100	1	2,4	4	5,4	7,4

**Tabela 11:** Percentual de remoção de cor e turbidez em função das variáveis configuração, vazão, tamanho da esfera utilizadas para o gráfico de Pareto.

Configuração	Vazão	Tamanho das esferas	Cor (% remoção)	Turbidez (% remoção)
Série	0,5	2,0	60	73
Série	0,5	2,0	55	69
Série	0,5	2,0	50	68
Série	3,0	2,0	3	48
Série	3,0	2,0	3	43
Série	3,0	2,0	3	42
Série	0,5	5,0	51	72
Série	0,5	5,0	47	64
Série	0,5	5,0	44	56
Série	3,0	5,0	0	0
Série	3,0	5,0	3	47
Série	3,0	5,0	25	3,0
Paralelo	0,5	2,0	5	11
Paralelo	0,5	2,0	11	26
Paralelo	0,5	2,0	9	22
Paralelo	0,5	5,0	7	17
Paralelo	0,5	5,0	13	29
Paralelo	0,5	5,0	10	21
Paralelo	3,0	2,0	0	0
Paralelo	3,0	2,0	0	0
Paralelo	3,0	2,0	0	1
Paralelo	3,0	5,0	1	2
Paralelo	3,0	5,0	0	0
Paralelo	3,0	5,0	0	0

**Tabela 12:** Vazões medida nos três reatores quando operado em série.

Repetições	Vazão alimentação	R1	R2	R3	Vazão final
1	0,5	0,2	0,2	0,1	5,0
2	0,5	0,2	0,1	0,1	5,0
3	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
4	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
5	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
6	0,5	0,2	0,2	0,1	5,0
7	0,5	0,2	0,1	0,1	5,0
8	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
9	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
10	0,5	0,2	0,2	0,1	5,0
11	0,5	0,2	0,1	0,1	5,0
12	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
13	0,5	0,2	0,2	0,1	5,0
14	0,5	0,2	0,2	0,1	5,0
15	0,5	0,2	0,2	0,1	5,0
16	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
17	0,5	0,2	0,2	0,1	5,0
18	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
19	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
20	0,5	0,2	0,2	0,1	5,0
21	0,5	0,2	0,2	0,1	5,0
22	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
23	0,5	0,2	0,2	0,1	5,0
24	0,5	0,2	0,2	0,1	5,0
25	0,5	0,2	0,2	0,1	5,0
26	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
27	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
28	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
29	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
30	0,5	0,3	0,1	0,1	5,0
Média	0,5	0,25	0,14	0,1	5
Desvio padrão	0	0,050855	0,049827	4,23E-17	0
Valor máximo	0,5	0,3	0,2	0,1	5
Valor mínimo	0,5	0,2	0,1	0,1	5

**Tabela 13:** Média das análises durante oito meses de experimento utilizando o reator em série.

Meses	Parâmetros	Controle	1 hora	2 hora	3 hora	4 hora	5 hora	6 hora	Média
Maio	pH	7,25	7,36	7,35	7,36	7,42	7,34	7,28	7,4
	1350	1320	1318	1300	1288	1280	1280	1280	1291
	Nitrito	5,2	4,21	4,27	4,36	4,31	4,98	5,6	4,62
	Nitrato	3,3	3,56	3,78	3,8	3,4	3,4	4,2	3,69
	Amônia	55	52	50	46	41	39	38	44,33
	F. Total	6,3	6,7	6,5	6,4	7,2	7,1	7,2	6,85
	DQO	40,2	40,1	33,8	30	28,1	28	25,2	30,87
	E. coli	4,80E+07	2,50E+07	9,00E+06	1,00E+06	1,80E+05	1,00E+04	4,60E+03	5,87E+06
Junho	pH	7,86	7,6	7,53	7,6	7,63	7,7	7,71	7,63
	CE	1652	1667	1744	1650	1655	1652	1645	1668,83
	Nitrito	2,7	2,26	2,36	2,49	2,5	3,1	3,23	2,65
	Nitrato	3,89	4,21	4,27	4,36	4,59	6,2	6,4	5,005
	Amônia	30,5	27,85	24,7	23,6	21,9	20,3	18,7	22,84
	F. Total	6,2	6,3	6,3	6,5	6,1	6,1	6,3	6,26
	E. coli	4,20E+04	1,20E+04	3,20E+03	1,20E+03	2,00E+02	1,00E+02	8,60E+01	2,80E+03
	DQO	49,2	44,2	36,1	33,5	28,6	26,7	25,8	32,48
Julho	pH	7,82	7,82	7,8	7,75	7,77	7,62	7,6	7,74
	CE	1567	1578	1567	1555	1569	1606	1600	1577,42
	Nitrito	3,21	3,5	3,5	3,7	3,9	3,98	4,2	3,71
	Nitrato	4,5	4,6	5,1	5,1	5,2	5,4	5,8	5,1
	Amônia	56	50	43	40	36	28	26	39,85
	F. Total	6,4	6,6	6,7	6,5	6,1	6,1	6	6,34
	E. coli	4,50E+04	1,20E+04	2,30E+03	1,10E+03	2,30E+02	1,10E+02	6,50E+01	8,69E+03
	DQO	47	42	42	38	30	26	22	35,28
Agosto	pH	7,45	7,42	7,41	7,4	7,54	7,54	7,5	7,46
	CE	1350	1320	1300	1288	1288	1280	1280	1300,85
	Nitrito	2,4	2,6	2,9	3	3,4	3,9	4,5	3,24
	Nitrato	3,89	4,21	4,7	4,9	6,9	7,7	8,2	5,78
	Amônia	61,24	60	56	50	45	40	37	49,89
	F. Total	3,2	3,1	3,2	3	3,4	3,4	3,5	3,25
	E. coli	9,00E+05	4,50E+04	5,00E+04	3,00E+04	7,30E+03	3,30E+03	1,20E+03	1,48E+05
	DQO	37	33	32	28	26	22	18,7	28,1
Setembro	pH	7,68	7,65	7,62	7,58	7,6	7,57	7,59	7,60
	CE	1503	1520	1528	1547	1580	1600	1597	1562
	Nitrato	3,89	4,21	4,27	4,36	4,59	6,2	6	4,93
	Nitrito	2,7	2,9	2,9	3	3,4	3,4	3,6	3,2
	Amônia	65,29	62	60	58	54	53	53	56,66
	F. Total	8,5	6,5	7,2	7,5	6,4	6,9	7,4	6,98
	E. coli	2,00E+04	1,00E+04	3,00E+03	2,80E+03	2,00E+03	1,00E+03	1,00E+03	3,30E+03
	DQO	68,4	65	50,2	50	49,4	48,3	46,3	51,53
Outubro	pH	7,25	7,34	7,3	7,28	7,25	7,32	7,3	7,298
	CE	1399	1320	1318	1300	1299	1306	1280	1303,83
	Nitrato	7	7,23	7,44	7,69	8,4	8,94	8,83	8,08
	Nitrito	6,6	6,3	6	5,8	5,8	5,1	5,1	5,68
	Amônia	11,33	10,4	8,89	8,45	7,45	7	6,8	8,165
	F. Total	5,3	5	4,3	4	4	3,5	3,5	4,05

	E. Coli	6,20E+03	3,20E+03	1,50E+03	9,00E+02	3,00E+02	1,00E+02	1,20E+02	1,02E+03
	DQO	34	30	24	22	20	16	15	21,16
Novembro	pH	7,75	7,34	7,3	7,28	7,25	7,32	7,33	7,30
	CE	1350	1320	1318	1300	1299	1306	1301	1307,33
	Nitrato	3,72	4,15	4,25	4,36	4,59	6,2	6	4,92
	Nitrito	5,3	5,5	5,9	5,8	5,8	5,1	5	5,516
	Amônia	12,6	11,25	11	10	10	9,6	9	10,14
	F. Total	7,1	6,5	6,8	6,5	6,1	6,1	6	6,33
	E. Coli	4,00E+04	3,20E+04	3,00E+04	3,10E+04	3,10E+04	2,20E+03	2,20E+03	2,14E+04
	DQO	80	78	78	76	75	75	75	76,16
Dezembro	pH	7,89	7,6	7,53	7,6	7,63	7,7	7,71	7,62
	CE	1652	1667	1744	1650	1655	1652	1645	1668,83
	Nitrito	2,7	2,26	2,36	2,49	2,5	3,1	3,23	2,65
	Nitrato	3,89	4,21	4,27	4,36	4,59	6,2	6,4	5,005
	Amônia	30,5	27,85	24,7	23,6	21,9	20,3	18,7	22,84
	F. Total	6,2	6,3	6,3	6,5	6,1	6,1	6,3	6,26
	E. Coli	4,20E+04	1,20E+04	3,20E+03	1,20E+03	2,00E+02	1,00E+02	1,00E+01	2,79E+03
	DQO	49,2	44,2	36,1	33,5	28,6	26,7	25,8	32,48

**Tabela 14:** Remoção de cor, turbidez, DQO e E. Coli em função das vazões e tamanho das esferas.

Reator com esferas de PS de 2,0 mm e vazão 0,5 L/min							
Parâmetros	Controle	1 hora	2 hora	3 hora	4 hora	5 hora	6 hora
Cor	143	123	120	115	90	80	55
Turbidez	73,1	64	55	50	46	30	20
E. Coli	4,80E+08	2,00E+06	4,50E+05	1,50E+05	2,00E+03	1,50E+03	1,30E+02
DQO	20	18	15	14	13	12	6
Reator com esferas de PS de 2,0 mm e vazão 1,0 L/min							
Parâmetros	Controle	1 hora	2 hora	3 hora	4 hora	5 hora	6 hora
Cor	140	130	125	90	81	64	54
Turbidez	75	72	69	44	42	38	30
E. Coli	3,20E+07	1,20E+05	5,00E+04	2,00E+04	1,20E+04	8,00E+03	6,00E+03
DQO	27	19,2	18,1	18	17,5	17,2	11
Reator com esferas de PS de 2,0 mm e vazão 2,0 L/min							
Parâmetros	Controle	1 hora	2 hora	3 hora	4 hora	5 hora	6 hora
Cor	120	115	111	100	100	98	96
Turbidez	70	64	61	54	50	44	38
E. Coli	9,00E+07	7,00E+06	5,00E+06	3,00E+06	3,00E+06	8,70E+05	6,20E+04
DQO	30,4	30,1	28	28,6	28,3	27	22
Reator com esferas de PS de 2,0 mm e vazão 3,0 L/min							
Parâmetros	Controle	1 hora	2 hora	3 hora	4 hora	5 hora	6 hora
Cor	123	123	120	120	118	116	100
Turbidez	86	87	87	85	84	82	80
E. Coli	6,70E+08	5,80E+08	5,30E+08	3,20E+08	3,10E+08	2,11E+08	2,00E+07
DQO	54	54	53	53	52	53	45
Reator com esferas de PS de 5,0 mm e vazão 0,5 L/min							
Parâmetros	Controle	1 hora	2 hora	3 hora	4 hora	5 hora	6 hora
Cor	143	132	100	85	75	72	60
Turbidez	73,1	64,1	55,4	41,2	38,6	30,5	22
Fósforo Total	6,3	6,7	9,2	12,2	15,5	16,7	17,5
DQO	10,5	9,7	9,0	9,0	8,7	7	6
Reator com esferas de PS de 5,0 mm e vazão 1,0 L/min							
Parâmetros	Controle	1 hora	2 hora	3 hora	4 hora	5 hora	6 hora
Cor	129	110	109	87	71	65	55
Turbidez	47,5	36,9	33,2	30,1	28	22	17
E. Coli	4,80E+07	3,50E+07	9,00E+06	1,00E+05	8,00E+04	1,40E+04	1,20E+04
DQO	43,1	40,2	33,8	30	28,1	28	25
Reator com esferas de PS de 5,0 mm e vazão 2,0 L/min							
Parâmetros	Controle	1 hora	2 hora	3 hora	4 hora	5 hora	6 hora
Cor	160	155	154	153	153	155	148
Turbidez	88	84	82	80	78	77	70
E. Coli	5,80E+06	3,10E+06	1,00E+06	5,10E+05	2,30E+05	2,10E+05	2,60E+05
DQO	37	35	34	34	33	33	29
Reator com esferas de PS de 5,0 mm e vazão 3,0 L/min							
Parâmetros	Controle	1 hora	2 hora	3 hora	4 hora	5 hora	6 hora

Cor	130	129	129	129	126	126	123
Turbidez	73,1	70	70	68	65	65	63
E. Coli	5,00E+07	4,00E+07	4,00E+07	3,20E+07	3,00E+07	2,20E+07	2,00E+07
DQO	66	64	63	62	60	60	55