



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Bruna Magalhães de Araujo

**Avaliação da aplicabilidade da filtração terciária para condicionamento de efluente secundário a desinfecção por radiação Ultravioleta**

Rio de Janeiro

2019

Bruna Magalhães de Araujo

**Avaliação da aplicabilidade da filtração terciária para condicionamento de efluente secundário a desinfecção por radiação Ultravioleta**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Ana Silvia Pereira Santos

Coorientadora: Daniele Maia Bila

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

A663 Araujo, Bruna Magalhães de.  
Avaliação da aplicabilidade da filtração terciária para  
condicionamento de efluente secundário a desinfecção por radiação  
ultravioleta / Bruna Magalhães de Araujo. – 2019.  
118f.

Orientadoras: Ana Silvia Pereira Santos, Daniele Maia Bila.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,  
Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Água - Purificação - Filtração -  
Teses. 3. Água - Qualidade - Teses. 4. Radiação ultravioleta - Teses. I.  
Santos, Ana Silvia Pereira. II. Bila, Daniele Maia. III. Universidade do  
Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 628.54

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese,  
desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Bruna Magalhães de Araujo

**Avaliação da aplicabilidade da filtração terciária para condicionamento de efluente secundário a desinfecção por radiação Ultravioleta**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada em 25 de fevereiro de 2019.

Banca Examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Silvia Pereira Santos, D. SC. (Orientadora)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Daniele Bila (Coorientadora)  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Dr.<sup>a</sup> Marília Carvalho de Melo  
Instituto Mineiro de Gestão de Águas – IGAM

---

Prof. Dr.<sup>a</sup> Iene Christie Figueiredo  
Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2019

## AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho aos meus pais Celeste e Roberto, que desde muito nova me ensinaram a continuar e a acreditar sempre que o sol há de brilhar mais uma vez. Nunca me imaginei defendendo um mestrado, mas sei que vocês sim. Obrigada por todo amor dado, toda confiança e força que vocês me deram. Vocês estão em mim.

Agradeço pelas oportunidades diárias e por ter amigos. Vocês continuam a se revezar incansavelmente em lutar junto comigo, sei que tentam aliviar todo e qualquer peso e nunca me deixam sozinha. Levantam-me quando eu tropeço e logo depois riem junto comigo e me fazem acreditar que na verdade o tropeço foi um suspiro. Agradeço de verdade por ter vocês e sei que o mundo é mais bonito e engraçado por vocês existirem. Obrigada Nath, Alethia, Julinha, Furt, Marie, Lory, Kamila, Selma, Mabi, Ju e Bruno.

Obrigada Pedro, muito desse mestrado vem de você. Você me mostrou o real significado de companheirismo e realmente confia e acredita no meu potencial. Obrigada por ter lutado junto comigo.

Agradeço a minha Irma e aos meus sobrinhos por aguentarem minhas distrações e erros. Sei que vocês foram compreensíveis ao máximo e se esforçaram para entender esse momento.

Ana, você não sabe como agradeço por ser você a minha orientadora. Saí graduação, entra pós, vem mestrado e você continua trocando seu almoço por uma coxinha para me ajudar. Na graduação você me mostrou o real significado e importância de um professor, mas foi no mestrado que você me fez querer ser um. Obrigada por ensinar com amor, leveza e alegria e a extrair o melhor de cada aluno. Sou muito grata pela confiança que você deposita em mim e pela sua amizade. Sua orientação continua sendo muito além da academia.

Obrigada professora Dani, você sempre ensina de uma forma amorosa, sempre muito solícita e disposta a ajudar no que for preciso. Sua paixão pela profissão, sem dúvida nenhuma irradia para os alunos. Agradeço ao pessoal do LES, pela ajuda, compreensão e por me aguentarem. Agradeço especialmente ao Johnny e Gabi!

Obrigada Mairia e Lauana, os frutos desse trabalho são seus também. Vocês são ótimas e tem um futuro lindo pela frente. Obrigada também pela companhia de vocês e por toparem entrar nessa junto comigo.

Paulinho, obrigada por se despencar do fundão para o Maracanã, por montar meu filtro e por toparem todas as enrascadas. Com toda certeza os alunos têm muito que te agradecer. Você

é sensacional!! Desculpa pelo Tombo! Obrigado CESA, por doar a areia e brita !! Além do bidim que o Paulinho arrumou em algum canto rs. E por me receber durante a fase inicial da pesquisa.

Agradeço ao professor Grandhi por gentilmente doar o carvão ativado, além de suas aulas ao longo da graduação, pós e mestrado. Agradeço também a ETE Sapucaia por doar o efluente e ao Caetano por transportar.

Por fim, agradeço a todos os professores e trabalhadores da UERJ, que continuam resistindo dia após dia ao sucateamento da faculdade. Eles ainda não perceberam que a educação é a solução, mas vocês sim.

Obrigada UERJ, conquistei muito com você. Levo seus ensinamentos para a vida. Você é amor, mas também é dificuldade. Não foi fácil. Mas, saio daqui uma pessoa diferente. Obrigada pela sua diversidade e força.

A água de boa qualidade é como a saúde e a liberdade: só tem valor quando acaba.

*Guimarães Rosa*

## RESUMO

ARAÚJO, Bruna Magalhães de. *Avaliação da aplicabilidade da filtração terciária para condicionamento de efluente secundário a desinfecção por radiação ultravioleta*. 2019. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Em razão das secas severas e da necessidade em proteger os mananciais, torna-se essencial propiciar a discussão sobre o reuso de efluentes, de maneira a fomentar a consolidação da prática no território nacional. Para tanto, se faz necessário a busca por tecnologias de tratamento, para produção de águas regeneradas que sejam adequadas e interessantes as características locais. Os Filtros Terciários, diante da sua simplicidade de operação e custo reduzido, quando comparado a técnicas mais sofisticadas, podem representar uma interessante ferramenta de pré tratamento à desinfecção. Nesse contexto, a presente pesquisa realizou uma avaliação da aplicabilidade da filtração terciária para condicionamento de efluente secundário a desinfecção por radiação Ultravioleta. Para tal foi utilizado o efluente da ETE Sapucaia do Rio, tratado a nível secundário, por meio do Reator UASB, seguido do Filtro Aerado Submerso. Em uma primeira fase, o efluente então foi submetido a um filtro de camada simples (FS) e um filtro de camada dupla (FD), separadamente. Posteriormente, de maneira a complementar o estudo em questão, o efluente oriundo da filtração foi desinfetado através do Reator Ultravioleta em uma segunda fase. Para avaliação qualitativa a respeito da água de reuso gerada, foram efetuados ensaios de Coliformes Termotolerantes, Turbidez, COD, Temperatura e pH. Assim, no que tange os resultados encontrados a partir da temperatura e do pH, os Filtros Terciários, apresentaram valores esperados e sem grandes variações. Porém, sobre o parâmetro COD, este tipo de tecnologia não apresentou bom desempenho, como já era de se esperar. Com relação a clarificação dos efluentes, os filtros de camada simples e dupla apresentaram em média eficiência de redução de turbidez de 79% e 88%, respectivamente. O Filtro Simples apresentou, um efluente com 5 NTU em média e chegou a alcançar uma eficiência máxima de 95%. Já para o Filtro Duplo, em média o efluente apresentou 10 NTU de turbidez e uma eficiência máxima de 99%. No tocante ao parâmetro Coliformes Termotolerantes, as unidades removeram em média somente 1 unidade logarítmica. Embora, tal redução não seja suficiente para o efluente ser adotado para o reuso, de maneira direta, destaca-se que a passagem do efluente pela filtração terciária reduziu a carga afluente desse parâmetro à unidade de desinfecção. Assim, a partir dos resultados encontrados no presente trabalho, pode-se concluir que de maneira geral tanto o FS como o FD, apresentaram resultados satisfatórios para serem utilizados na pré-desinfecção, tanto em relação ao parâmetro turbidez como em relação ao parâmetro Coliformes Termotolerantes. Na segunda fase do experimento, obteve-se uma redução máxima de 2 casas logarítmicas em termos de Coliformes Termotolerantes para o FS seguido de reator UV; e em torno de 3, para o FD seguido de reator UV. Ressalta-se que seria indicada a continuidade da segunda fase em trabalhos futuros de modo a obter resultados mais conclusivos.

Palavras-chave: Reuso de efluentes; Filtro Terciário; Filtro de areia; Filtro de areia e carvão ativado.

## ABSTRACT

ARAÚJO, Bruna Magalhães de. *Evaluation of the applicability of tertiary filtration for conditioning of effluent secondary to disinfection by ultraviolet radiation*. 2019. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Due to the severe droughts and the need to protect the water sources, it is essential to promote the discussion on the reuse of effluents, in order to foster the consolidation of the practice in the national territory. To do so, it is necessary to search for treatment technologies, to produce regenerated water that are appropriate and interesting local characteristics. The Tertiary Filters, due to their simplicity of operation and reduced economic cost, when compared to more sophisticated techniques, can represent an interesting tool of pre-treatment the disinfection. In this context, the present research carried out an evaluation of the applicability of tertiary filtration for the conditioning of effluent secondary to disinfection by Ultraviolet radiation. For this purpose, the effluent from the Sapucaia do Rio ETE, treated at a secondary level, was utilized through the UASB Reactor, followed by the Submerged Aerated Filter. In a first phase, the effluent was then subjected to a single layer filter (FS) and a double layer filter (FD), separately. Subsequently, in order to complement the study in question, effluent from the filtration was disinfected through the Ultraviolet Reactor in a second phase. For qualitative evaluation of the generated reuse water, tests were carried out on Thermotolerant Coliforms, Turbidity, TOC, Temperature and pH. Thus, with respect to the results found from the temperature and pH, the Tertiary Filters presented expected values and without large variations. However, on COD, this type of technology did not perform well. Regarding effluent clarification, single and double layer filters have an average efficiency of 79% and 88%, respectively. The Simple Filter presented an effluent with 5 NTU in average and reached a maximum efficiency of 95%. For the dual filter, on average, effluents present 10 NTU turbidity and a maximum efficiency of 99%. Regarding the parameter Coliformes Termotolerantes, the units removed on average only 1 logarithmic unit. Although such a reduction is not enough for the effluent to be used for reuse, it is pointed out that the effluent flow through the tertiary filtration reduced the affluent load of this parameter to the disinfection unit. Thus, from the results found in the present work, it can be concluded that in general both FS and FD presented interesting and satisfactory results to be used in the pre-disinfection, both in relation to the turbidity parameter and in relation to the parameter Thermotolerant Coliform. In the second phase of the experiment, the maximum reduction was obtained around 2 and 3 decimal places respectively for FS followed by UV and FD reactor followed by reactor. It is emphasized that the continuation of the second phase of the second phase in future work would be indicated in order to obtain more conclusive results.

Keywords: Reuse of effluents; Tertiary filter; Sand filter; Sand and activated charcoal filter.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática do Reator UASB.....	28
Figura 2 - Fluxograma típico de um sistema de tratamento de esgoto por reatores UASB .....	29
Figura 3 - Desenho esquemático do Filtro Aerado Submerso.....	30
Figura 4 - ETE composta por UASB seguido de Filtro Aerado Submerso .....	31
Figura 5 - Ilustração de um filtro terciário .....	39
Figura 6 - Proporção da demanda hídrica industrial por região brasileira em 2015.....	47
Figura 7 - Cronologia das principais normas, diretrizes e legislações nacionais existentes ....	52
Figura 8 - Vista geral da ETE Sapucaia do Rio.....	65
Figura 9 - Fluxograma da ETE Sapucaia do Rio .....	65
Figura 10 - Fotografia da brita 0 utilizada nos Filtros Simples e duplo.....	69
Figura 11 - Fotografia da areia utilizada no Filtro Simples e duplo .....	69
Figura 12 - Fotografia do carvão ativado utilizado no filtro de camada dupla .....	70
Figura 13 - Fotografia realizada durante o procedimento de instalação do fundo falso .....	71
Figura 14 - Fixação do filtro terciário na parede .....	72
Figura 15 - Fotografia da bomba dosadora .....	72
Figura 16 - Série temporal de eficiência de redução de DBO na ETE Sapucaia do Rio .....	78
Figura 17 - Distribuição de Frequência da concentração efluente x padrão – DBO, na ETE Sapucaia do Rio .....	78
Figura 18 - Série temporal de eficiência de redução de DQO na ETE Sapucaia do Rio .....	78
Figura 19 - Distribuição de Frequência da concentração efluente DQO, na ETE Sapucaia do Rio.....	78
Figura 20 - Série temporal de eficiência de redução de SST na ETE Sapucaia do Rio.....	79
Figura 21 - Distribuição de Frequência da concentração efluente x padrão – SST, na ETE Sapucaia do Rio .....	79
Figura 22 - Representação do filtro de bancada de camada única (areia).....	80
Figura 23 - Representação do filtro de bancada de camada dupla .....	80
Figura 24 - Fotografia da Implantação dos filtros terciários em escala de bancada .....	81
Figura 25 - Fotografia da operação do Filtro Duplo .....	81
Figura 26 – Foto do Reator UV .....	82
Figura 27 - Gráfico BoxPlot de Turbidez afluente e efluente - Filtro Simples .....	86

Figura 28 - Gráfico de distribuição de frequência para Turbidez afluente e efluente - Filtro Simples .....	87
Figura 29 - Gráfico BoxPlot de eficiência de redução de Turbidez - Filtro Simples .....	88
Figura 30- Gráfico de distribuição de frequência para eficiência de redução de Turbidez - Filtro Simples .....	89
Figura 31 - Gráfico BoxPlot de Coliformes Termotolerantes afluente e efluente - Filtro Simples .....	90
Figura 32 - Gráfico de distribuição de frequência para Coliformes Termotolerante afluente e efluente - Filtro Simples .....	90
Figura 33 - Gráfico BoxPlot de eficiência de redução de Coliformes Termotolerantes - Filtro Simples .....	92
Figura 34 - Gráfico de distribuição de frequência para eficiência de redução de Coliformes Termotolerantes - Filtro Simples .....	92
Figura 35 - Gráfico BoxPlot de Turbidez afluente e efluente - Filtro Duplo .....	94
Figura 36 - Gráfico de distribuição de frequência para Turbidez afluente e efluente - Filtro Duplo .....	94
Figura 37 - Gráfico BoxPlot de eficiência de redução de turbidez - Filtro Duplo .....	96
Figura 38 - Gráfico de distribuição de frequência para eficiência de redução de Turbidez - Filtro Duplo .....	96
Figura 39 - Gráfico BoxPlot de Coliformes Termotolerantes afluente e efluente - Filtro Duplo .....	97
Figura 40 - Gráfico de distribuição de frequência para Coliformes Termotolerantes afluente e efluente - Filtro Duplo .....	98
Figura 42 - Gráfico de distribuição de frequência para eficiência de remoção de Coliformes Termotolerantes - Filtro Duplo .....	100
Figura 43 - Gráfico comparativo entre valores (médio, máximo e mínimo) efluentes de turbidez do Filtro Simples e do Filtro Duplo .....	103
Figura 44 - Gráfico comparativo entre valores (médio, máximo e mínimo) efluentes de Coliformes Termotolerantes do Filtro Simples e do Filtro Duplo .....	103
Figura 45 - Gráfico BoxPlot das medidas de turbidez efluente do Filtro Simples e do Filtro Duplo .....	104
Figura 46 - Gráfico BoxPlot das densidades de Coliformes Termotolerantes efluentes do Filtro Simples e do Filtro Duplo .....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Microrganismos indicadores no esgoto .....	21
Tabela 2 - Tecnologias empregadas no tratamento de efluentes líquidos.....	22
Tabela 3 - Principais processos de tratamento utilizados no Brasil.....	23
Tabela 4 - Remoção (Casas Logarítmicas *) de Microrganismos segundo processos de tratamentos .....	35
Tabela 5 - Características de filtros terciários convencionais com diferentes meios .....	39
Tabela 6 - Resultados obtidos através do estudo realizado por Tonetti et al (2012) sobre avaliação da combinação de filtros anaeróbio com filtro de areia.....	40
Tabela 7 - Valores médios de densidade de coliformes totais e Escherichia coli nos efluentes dos filtros de areia encontrados por Tonetti et al (2012) .....	41
Tabela 8 - Resultados obtidos através do experimento de filtração terciária descendente realizado pela PUC PR.....	41
Tabela 9 - Exemplos da aplicação de água de reuso na indústria brasileira .....	48
Tabela 10 - Classes de Reuso e Parâmetros de acordo com a NBR 13.969 (ABNT, 1997)....	53
Tabela 11 - Parâmetros e padrões estabelecidos pela Resolução conjunta SES/SMA/SSRH N° 01 de acordo com diferentes finalidades de reuso .....	54
Tabela 12 - Diretrizes do PROSAB para uso urbano de esgoto sanitários .....	55
Tabela 13 - Diretrizes do PROSAB para uso agrícola de esgoto sanitários .....	55
Tabela 14 - critérios mínimos recomendados para as modalidades de reuso direto não potável, por meio da INTERÁGUAS .....	57
Tabela 15 - Critérios da U.S.E.P.A para água de reuso .....	59
Tabela 16 - Diretrizes do OMS para uso agrícola de efluentes tratados de ETEs (1989-2006), em relação aos aspectos microbiológicos.....	60
Tabela 17 - Critérios de qualidade da água de reuso em locais com acesso irrestrito .....	61
Tabela 18 - Critérios de qualidade da água de reuso em locais com acesso restrito .....	62
Tabela 19 - Dimensões e taxas relevantes das unidades de tratamento presentes na ETE Sapucaia do Rio .....	65
Tabela 20 - Parâmetros adotados nos cálculos de proporção utilizados no dimensionamento do filtro de camada única (areia) .....	67
Tabela 21 - Parâmetros adotados nos cálculos de proporção utilizados no dimensionamento do filtro de camada dupla (areia e carvão ativado).....	67

Tabela 22 - Taxas de filtração obtidas na literatura para filtro descendente de camada única	68
Tabela 23 - Taxas de filtração obtidas na literatura para filtro descendente de camada dupla	68
Tabela 24 - Materiais utilizados na implantação dos Filtros Simples e duplo	69
Tabela 25 - Dados estatísticos referentes aos parâmetros DBO, DQO e Sólidos Suspensos totais da ETE Sapucaia do Rio	77
Tabela 26 - Valores obtidos do dimensionamento dos filtros terciários	80
Tabela 27 - Especificações do Reator de radiação ultravioleta	82
Tabela 28 - Condições experimentais dos ensaios no Reator de radiação ultravioleta	83
Tabela 29 - Monitoramento complementar do efluente oriundo da ETE Sapucaia do Rio	84
Tabela 30 - Resultados do efluente do Filtro Simples de areia	84
Tabela 31 - Resultados do efluente do Filtro Duplo	85
Tabela 32 - Estatística descritiva da turbidez afluente e efluente - Filtro Simples	86
Tabela 33 - Estatística descritiva da eficiência de redução de turbidez - Filtro Simples	88
Tabela 34 - Estatística descritiva de Coliformes Termotolerantes afluente e efluente - Filtro Simples	89
Tabela 35 - Estatística descritiva da eficiência de redução de Coliformes Termotolerantes - Filtro Simples	91
Tabela 36 - Estatística descritiva da turbidez afluente e efluente - Filtro Duplo	93
Tabela 37 - Estatística descritiva da eficiência de redução de turbidez - Filtro Duplo	96
Tabela 38 - Estatística descritiva de Coliformes Termotolerantes afluente e efluente - Filtro Duplo	97
Tabela 39 - Estatística descritiva da eficiência de redução de Coliformes Termotolerantes - Filtro Duplo	99
Tabela 40 - Estatística descritiva resumida e comparativa para os parâmetros turbidez e Coliformes Termotolerantes afluente e efluente para os Filtros Simples e duplo	101
Tabela 41 - Estatística descritiva resumida e comparativa para eficiência de redução de turbidez e Coliformes Termotolerantes para os Filtros Simples e duplo	102
Tabela 42 - Resultados do teste de hipótese t-student para valores de turbidez efluentes entre os dois filtros	105
Tabela 43 - Resultados do teste de hipótese t-student para valores de eficiência de redução de turbidez entre os dois filtros	105
Tabela 44 - Resultados do teste de hipótese t-student para valores de Coliformes Termotolerantes efluentes entre os dois filtros	105

Tabela 45 - – Resultados do teste de hipótese t-student para valores eficiência de redução de Coliformes Termotolerantes entre os dois filtros .....	105
Tabela 46 - Resultados de Coliformes Termotolerantes realizados efluente do Filtro Simples e duplo seguido de reator UV.....	106
Tabela 47 - Resumo dos limites de C.Term. de acordo com as legislações abordadas .....	108

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
1.1 Objetivo Geral.....	18
1.2 Objetivos Específicos .....	18
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 Esgoto sanitário.....	19
2.2 Tratamento de Esgotos domésticos .....	21
2.2.1 Etapa preliminar .....	25
2.2.2 <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors (UASB)</i> .....	26
2.2.3 Filtro Aerado Submerso (FAS) .....	30
2.2.4 Desinfecção.....	32
2.2.4.1 Filtros Terciários .....	36
2.2.4.2 Reatores Ultravioleta.....	42
2.3 <b>Reuso</b> .....	<b>45</b>
2.3.1 Reuso industrial.....	46
2.3.2 Reuso urbano .....	49
2.3.3 Reuso agrícola.....	50
2.4 <b>Aspectos legais</b> .....	<b>51</b>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>64</b>
3.1 <b>Etapa 01 - Avaliação do desempenho da ETE Sapucaia do Rio em função da qualidade do seu efluente tratado a nível secundário</b> .....	<b>66</b>
3.2 <b>Etapa 02 - Dimensionamento e implantação do aparato experimental</b> .....	<b>66</b>
3.3 <b>Etapa 03 - Avaliação qualitativa dos efluentes gerados para a produção de água de reuso</b> .....	<b>73</b>
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>76</b>
4.1 <b>Etapa 01 - Avaliação do desempenho da ETE Sapucaia do Rio em função da qualidade do seu efluente tratado a nível secundário</b> .....	<b>76</b>
4.2 <b>Etapa 02 - Dimensionamento e implantação do aparato experimental</b> .....	<b>79</b>
4.3 <b>Etapa 03 - Avaliação qualitativa dos efluentes gerados para a produção de água de reuso</b> .....	<b>83</b>
4.3.1 Estatística Descritiva – Filtro Simples .....	86

4.3.2	Estatística Descritiva – Filtro Duplo .....	93
4.3.3	Testes Estatísticos para comparação de desempenho entre as duas unidades de filtração (simples e duplo).....	101
4.3.4	Avaliação do desempenho da unidade de desinfecção.....	106
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>109</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>112</b>
	<b>ANEXO A – Tabela T student.....</b>	<b>118</b>

## INTRODUÇÃO

A escassez hídrica assola inúmeras regiões do globo terrestre e, por conseguinte, afeta o desenvolvimento social e econômico de países onde as limitações de água são uma realidade constante. A nível nacional, ainda que o Brasil detenha aproximadamente 12% do volume de água doce disponível no mundo (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2018), diversas regiões sofrem com a falta d'água para os seus mais diversos usos. Segundo a Conjuntura dos recursos hídricos, lançada pela ANA (2018), cerca de 38 milhões de pessoas no Brasil foram afetados com secas e estiagens em 2017. Além disso, estima-se que até 2030, a retirada de água no Brasil deve aumentar 24% (ANA, 2018).

Diante da vulnerabilidade hídrica que afeta desde a região Nordeste até grandes metrópoles do Sudeste, nas quais a oferta de água tem sido drasticamente reduzida ao passo que as demandas hídricas estão crescendo continuamente, torna-se essencial a busca pela inserção de novas fontes de água na matriz hídrica nacional. Nesse sentido, o reuso de efluentes se apresenta como uma interessante e importante ferramenta, capaz de propiciar a redução dos volumes de água captados de mananciais, evitar a descarga de esgotos *in natura* nos corpos de água e permitir a preservação do solo por meio da acumulação do húmus.

No cenário mundial, o reuso é uma prática já realizada por diversos países, como Estados Unidos, Austrália, Chipre, Israel, Japão, México entre outros (REZENDE, 2017). A técnica é utilizada desde regiões que sofrem com a escassez hídrica, até países mais desenvolvidos que utilizam o reuso no intuito de proteger seus mananciais e evitar uma futura recessão de água, como é o caso da Suécia e Reino Unido (SILVA et al, 2016). Na Austrália, Califórnia, Cingapura, Namíbia e Texas, por exemplo, tal prática é realizada a nível potável e algumas destas regiões já a adotam como forma de gestão adequada de recursos hídricos, inserindo essa fonte na matriz hídrica local (LIMA ET AL., 2018).

No âmbito nacional, o reuso de efluentes ainda ocorre de forma incipiente, diante do seu potencial. Entretanto, a meta para o reuso não potável direto no Brasil é de aproximadamente 13m<sup>3</sup>/s até 2030, frente aos 2m<sup>3</sup>/s estimados em 2017, o que representaria 4% do total de água reutilizada no mundo (ANA, 2018).

Diante da extensa área territorial brasileira, com aproximadamente 8.515.759,090 km<sup>2</sup> (IBGE, 2018), o país apresenta uma heterogeneidade física, cultural, social e econômica entre suas regiões, estados e até mesmo municípios. Dessa forma, tem-se regiões desde a Sudeste, que é mais desenvolvida economicamente, porém são extremamente adensadas e com

recursos hídricos limitados, até regiões menos desenvolvidas, com uma maior disposição de áreas e com recursos hídricos extremamente escassos. Este é caso da região Nordeste. Nesse sentido, é essencial a definição de tecnologias utilizadas na produção de água de reuso, compatíveis com as realidades locais.

Sabe-se que a finalidade da água de reuso está intrinsecamente relacionada com a qualidade final do efluente gerado a partir da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Nesse sentido, quando pretende-se destinar as águas residuárias para fins mais nobres torna-se necessário utilizar tecnologias mais sofisticadas, como processos de separação por membranas, radiação UV e ozonização, que apresentam risco reduzido e elevado investimento econômico. Já para usos menos nobres, tecnologias mais simples, como cloração, filtração terciária e infiltração no solo, podem se mostrar adequadas. Em geral países desenvolvidos buscam risco mínimo e máxima eficiência de seu tratamento, em detrimento de recursos financeiros mais elevados. Já países em desenvolvimento, trabalham com um risco aceitável, porém dispõem de um custo mais reduzido. Este é o caso de regiões brasileiras com menor desenvolvimento socioeconômico.

Para tanto, se faz necessário a realização de estudos e investigações com o intuito de identificar ferramentas e procedimentos capazes de contribuir para que se alcance um equilíbrio entre custo de implantação e operação das tecnologias, com a qualidade final da água de reuso. Assim, a implantação de tecnologias que preparem o efluente à desinfecção, podem se mostrar como uma estratégia interessante nesse sentido, uma vez que podem contribuir com a redução de custos operacionais de tecnologias mais sofisticadas, e aumentar seu tempo de vida útil.

Visto que os Filtros Terciários apresentam simplicidade de operação e custo reduzido, quando comparados a técnicas mais elaboradas e podem possibilitar a produção de um efluente final com baixa turbidez, a aplicação da tecnologia em questão, pode-se mostrar adequada na preparação do efluente à desinfecção por radiação ultravioleta.

Diante das perspectivas apresentadas anteriormente, o presente estudo realizou uma avaliação qualitativa da produção de água de reuso gerada a partir do uso de filtros terciários, de camada simples de areia, e duplo, constituído por areia e carvão ativado. Para tanto, os efluentes da ETE Sapucaia do Rio, localizada no município de Sapucaia, no estado do Rio de Janeiro e as margens do rio Paraíba do Sul, foram designados como objeto de estudo. Assim, os efluentes tratados a partir de Reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) e Filtro aerado submerso (FAS) da ETE em questão, foram submetidos à filtração terciária, com diferentes meios, em escala de bancada. Por fim, foi possível verificar a qualidade das águas

de reuso produzidas, em relação aos parâmetros Coliformes Termotolerantes, Turbidez, Carbono Orgânico Total e pH. Além disso, de maneira complementar foi efetuada uma quantidade reduzida de ensaios realizados a partir de efluentes submetidos aos respectivos filtros terciários e posteriormente a Radiação Ultravioleta.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo Geral**

Avaliar a aplicabilidade da filtração terciária (simples de areia e duplo de areia e carvão ativado) de efluente secundário para o seu condicionamento à desinfecção por radiação ultravioleta para produção de água de reuso.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar o desempenho da ETE Sapucaia do Rio em função da qualidade do efluente secundário adotado na presente pesquisa;
- Avaliar e comparar o desempenho da filtração terciária em diferentes meios (Areia e Areia + Carvão ativado) como pré-tratamento a desinfecção;
- Avaliar de forma preliminar o desempenho do reator UV para remoção de Coliformes Termotolerantes após a filtração terciária; e
- Avaliar o potencial do sistema de filtração terciária seguida de radiação UV para produção de água de reuso.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Esgoto sanitário

O termo esgoto pode ser utilizado para caracterizar os despejos provenientes dos diversos usos da água. Segundo Jordão & Pessoa (2017), os esgotos podem ser classificados em dois grupos principais, sanitários e industriais. O primeiro, em geral, é constituído essencialmente de despejos domésticos, uma parcela de água pluvial, água de infiltração, e ocasionalmente uma parcela insignificante de despejos industriais. Já o segundo, é considerado extremamente diverso, uma vez que provem de qualquer utilização da água para fins industriais, e adquire características próprias em função do processo industrial utilizado.

Ainda segundo Jordão & Pessoa (2017), os esgotos domésticos ou domiciliares provêm, sobretudo de residências, edifícios comerciais, instituições ou quaisquer edificações que contenham instalações de banheiros, lavanderias, cozinhas, ou qualquer dispositivo de utilização de água para fins domésticos. É composto fundamentalmente de água de banho, urina, fezes, papel, restos de comida, sabão, detergentes, água de lavagem e possui características bem definidas.

Uma vez que os esgotos industriais são considerados extremamente diversos e apresentam elevada amplitude de características tanto qualitativas como quantitativas, e levando-se em conta os objetivos da presente pesquisa, os esgotos domésticos serão apresentados de forma mais detalhada.

Segundo Von Sperling (2014), os esgotos domésticos contêm em torno de 99,9 % de água e sua parcela restante inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvido, assim como Microrganismos. Assim, a necessidade do tratamento de esgoto se dá em razão da fração de 0,1%.

Sabe-se que as características das águas residuais estão intimamente relacionadas com o uso a qual a água foi submetida e conseqüentemente sofrem influência do clima, situação social e hábitos da população (VON SPERLING, 2014). Salienta-se que em um projeto de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) em geral não, pretende-se determinar os diversos compostos presentes nas águas residuárias. No entanto, é necessário analisar os parâmetros físicos, químicos e biológicos que traduzem de maneira indireta o caráter ou potencial poluidor do despejo realizado.

Resumidamente os parâmetros físicos são determinados pela temperatura, cor, odor e turbidez. A temperatura influencia na atividade microbiana, solubilidade dos gases, velocidade das reações químicas e viscosidade do líquido. A cor e o odor podem indicar a condição de chegada dos esgotos, isto é, fresco ou séptico. Já a turbidez é utilizada como um importante controle nas ETEs para avaliação do tratamento secundário, terciário, principalmente quando se deseja submeter o efluente a desinfecção via ultravioleta. Segundo Jordão & Pessoa (2017) a cor e a turbidez possuem interesse em relação ao aspecto estético e são importantes especialmente quando se deseja praticar o reuso do esgoto tratado, ou ainda quando há o lançamento do efluente em corpos de água onde os aspectos estéticos são relevantes.

Os parâmetros químicos por sua vez, são analisados pelos sólidos totais (composto pelos suspensos, dissolvidos e sedimentáveis), por meio da matéria orgânica, Nitrogênio total (composto pelo Nitrogênio orgânico, Amônia, Nitrito e Nitrato), Fosforo (orgânico e inorgânico), pH, alcalinidade, cloretos, óleos e graxas. Há de se destacar que a matéria orgânica (MO) pode ser medida de forma indireta, por meio da Demanda Bioquímica de Oxigênio medida em 5 dias (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxigênio e DBO última. A MO ainda pode ser determinada de forma direta através do ensaio de Carbono Orgânico Total (COT), realizado pela conversão de carbono orgânico total.

Por fim, segundo Jordão & Pessoa (2017) os parâmetros biológicos são analisados por meio dos Microrganismos, como, algas, bactérias, fungos, protozoários, vírus e etc. Dentre os Microrganismos, os patogênicos merecem destaque, uma vez que podem causar doenças ao homem e aos animais. Visto que, a identificação dos organismos patogênicos em uma amostra de água, seja extremamente difícil, é utilizado os organismos indicadores de contaminação fecal, já que oferecem uma indicação satisfatória a respeito da presença de fezes humanas ou de animais na amostra e por isso podem representar a potencialidade para a transmissão de doenças (VON SPERLING, 2014).

Dentre os principais indicadores de contaminação fecal, estão os Coliformes Totais, Coliformes Termotolerantes (CTerm) e *Escherichia coli* (*Ecoli*). De acordo com Jordão & Pessoa (2017), os coliformes totais, representam um grande grupo de bactérias que embora estejam associados à matéria fecal podem também se desenvolver em vegetação, no solo e serem carregados junto à água de lavagem e por isso não devem ser utilizados como indicadores de contaminação fecal. Ainda segundo Jordão & Pessoa (2017), os CTerm, constituem-se como um subgrupo dos coliformes totais e diferem deste, por serem resistentes a altas temperaturas, isto é, desenvolve-se também em temperaturas mais elevadas, e por isso

praticamente pode se afirmar que são exclusivamente de origem fecal. Já a *Escherichia Coli* é considerada o único coliforme que se desenvolve apenas no intestino de animais do sangue quente e conseqüentemente é o único indicador exclusivo de contaminação fecal. Na Tabela 1, podem-se observar a concentração típica dos Microrganismos utilizados como indicadores biológicos no esgoto.

Tabela 1 - Microrganismos indicadores no esgoto

<b>Microrganismo</b>	<b>Contribuição unitária Org /háb.d</b>	<b>Concentração org /100ml</b>
<b>Bactérias</b>		
-Coliformes totais	$10^9$ a $10^{12}$	$10^6$ a $10^{10}$
-Coliformes termotolerantes	$10^8$ a $10^{11}$	$10^6$ a $10^9$
- <i>Escherichia Coli</i>	$10^8$ a $10^{11}$	$10^6$ a $10^9$
-Estreptococos	$10^8$ a $10^9$	$10^5$ a $10^6$
<b>Protozoários</b>		
-Cistos de Giárdia	$10^5$ a $10^7$	$10^2$ a $10^4$
-Ocistos de <i>Cryptosporidium</i> spp.	$10^4$ a $10^5$	$10^1$ a $10^2$
<b>Helmintos</b>		
-Ovos de helmintos	$10^4$ a $10^6$	$10^1$ a $10^3$

Fonte: Adaptado Gonçalves, 2003.

Visto o potencial poluidor das águas residuais e seu risco a saúde da população é necessário realizar a coleta e o tratamento adequado de todo esgoto gerado. Para isso as águas servidas deverão ser encaminhadas para uma ETE e quando não for possível deverá ser aplicado uma solução individual. Destaca-se que no presente trabalho não será abordado o tratamento individual, visto que o meio urbano foi definido como enfoque principal.

## 2.2 Tratamento de Esgotos domésticos

Nas ETEs podem ser utilizadas diversas tecnologias, cada qual classificada de acordo com o processo de remoção de poluentes ou desempenho. Inicialmente, é necessário remover os sólidos grosseiros e areia, de modo a proteger os demais equipamentos. Esse tipo de remoção ocorre de maneira física e é denominada Etapa Preliminar. Já o tratamento primário é responsável por remover os sólidos em suspensão e eventualmente os coloidais, e

consequentemente parte da matéria orgânica. Em geral o processo é físico podendo ser físico-químico e físico-biológico. O tratamento secundário, por sua vez, realiza a redução da matéria orgânica (MO) dissolvida através de processos biológicos com eficiência de redução de DBO na faixa de 60 a 98% e de coliformes entre 60 a 99% (VON SPERLING, 2014). Por fim, a partir dos objetivos desejados, pode ser realizado um polimento do efluente seja para remoção de nutrientes, seja para redução de organismos patogênicos, ou até mesmo para remoção complementar de poluentes que não foram removidos suficientemente. Esta etapa é geralmente designada como tratamento terciário ou avançado. Na Tabela 2, é possível observar as principais tecnologias e suas respectivas classificações.

Tabela 2 - Tecnologias empregadas no tratamento de efluentes líquidos

<b>Tecnologia</b>	<b>Processos</b>	<b>Etapa</b>
Gradeamento e Desarenador	Físico	Etapa Preliminar
CEPT Decantador primário Reator UASB	Físico, Físico- químico ou Biológico	Etapa Primária
Biofiltro Aerado Submerso (BAS) Filtro Biológico Percolador Filtro Aerado Submerso (FAS) Lodos Ativados Reator Biológico de Contato (RBC)		Etapa Secundária
Lodo Ativado para remoção de nutrientes Lodo Aeróbio Granular Precipitação Química de Fósforo Reator Biológico com Membranas	Biológico	Etapa Avançada
Reator Biológico com Leito Móvel Flotação por Ar Dissolvido – FAD Cloração Radiação UV Ozonização	Físico, Físico- químico	
Lagoas de estabilização	Biológico	-

Fonte: O autor, 2019.

No presente trabalho foi utilizada a classificação das tecnologias de tratamento de esgoto conforme apresentado na Tabela 2. No entanto, sabe-se que na literatura os autores podem apresentar essa classificação de diversas maneiras. O reator UASB, por exemplo, ao observar o tipo de tratamento aplicado pode ser considerado como tratamento secundário, uma vez que o processo realizado é biológico. Porém, ao analisar sua eficiência de redução de

matéria orgânica, o mesmo é classificado como tratamento primário, já que, segundo Jordão & Pessoa (2017), alcança eficiência máxima de até 85%, quando bem operado.

Em relação a aplicação dos tratamentos de efluentes no Brasil, de modo geral, as ETEs nacionais tratam seus efluentes a nível secundário, isto é, ocorre apenas tratamento biológico convencional, sem remoção significativa de nutrientes e organismos patogênicos. De acordo com o ATLAS Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas, publicado pela Agência Nacional de Águas (ANA) em 2017, das 2.657 ETEs nacionais 259 removem até 60% de matéria orgânica, 1.428 removem entre 60 a 80%, 839 removem mais de 90%, somente 131 removem nutrientes e das 359 que removem mais de 80% de MO apresentam lagoa de maturação em seu fluxograma.

Embora seja fundamental remover a matéria orgânica em um projeto de saneamento, deve-se garantir o bem-estar da população e proteção do meio ambiente e com a realização apenas do tratamento secundário, não é possível atingir tais objetivos. Na Tabela 3, é possível observar o número de unidades das principais técnicas implantadas no território nacional, juntamente com suas respectivas eficiências média de redução de matéria orgânica.

Tabela 3 - Principais processos de tratamento utilizados no Brasil

<b>Faixas de Remoção de DBO (%)</b>	<b>Principais processos de tratamento no Brasil</b>	<b>Eficiência média (%)</b>	<b>Número de unidades</b>
<b>Até 60</b>	Primário	35	21
	Fossa Filtro (Fossa Séptica + Filtro Biológico)	49	215
	/Tanque Imhoff + Filtro Biológico		
	Fossa Séptica/Tanque Imhoff	51	23
	<b>Total</b>		259
<b>60 a 80</b>	Fossa Filtro (Fossa Séptica + Filtro Biológico) + Disposição no solo / Sumidouro	66	10
	Reator Anaeróbio + Lodos Ativados	80	2
	Lagoa Anaeróbia	68	68
	Primário com físico químico	68	13
	Reator Anaeróbio	69	328
	Reator Anaeróbio + Decantador	72	16
	Filtro Biológico	73	22
	Reator Anaeróbio + Filtro Biológico	75	177
	Lagoa Facultativa	76	203
	Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa	77	364
	Reator Anaeróbio + disposição no solo	77	16
	Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio	77	64
	Reator Anaeróbio + Lagoa Anaeróbia / Facultativa / Maturação	78	145
		<b>Total</b>	

Fonte: Atlas Esgotos – Despoluição de Bacias Hidrográficas (ANA/2017).

\*Ressalta-se que a presente tabela aborda apenas os tratamentos com redução de DBO até 80%.

A seleção da tecnologia a ser utilizada para o tratamento de esgotos domésticos, em geral, está intrinsecamente relacionada às características do corpo receptor e legislação específica. O lançamento de efluentes em corpos d'água no Brasil fica condicionado à legislação federal, denominada como, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 357, publicada em 2005 ou às legislações estaduais, caso existam.

Com o intuito de dispor sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementar e alterar a Resolução 357 (BRASIL, 2005), em 2011 foi publicada a CONAMA 430 (BRASIL, 2011). Tal legislação, possui uma abrangência federal e, por conseguinte, deve nortear as áreas brasileiras, que em geral são distintas entre si. Neste sentido, em um âmbito federal que aborde o território nacional como um todo, torna-se extremamente complexo definir parâmetros coerentes que amparem as diversas áreas, suas peculiaridades e limitações. Assim, a legislação em questão, de certa forma, pode ser considerada pouco restritiva com relação aos parâmetros indicadores de matéria orgânica, sólidos e nutrientes.

As legislações estaduais, por sua vez, em muitos casos são bastante restritivas, como é o caso da legislação do estado do Rio de Janeiro, DZ.215. R4 (INEA, 2007), estabelecida pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Pode-se exemplificar que, enquanto a CONAMA 430 (BRASIL, 2011) determina concentração máxima efluente de DBO de até 120 mg/L a DZ.215-R4(INEA, 2007), em sua faixa mais restritiva, determina para o mesmo parâmetro, uma concentração máxima de até 40 mg/L.

É sabido que existem diversas tecnologias que satisfazem tais parâmetros, desde um sistema fossa filtro ou Reator UASB, que podem atender a redução de matéria orgânica exigida pela CONAMA 430 (BRASIL, 2011), até Lodos ativados ou filtros biológicos que podem ser utilizados como tratamento secundário para atender legislações estaduais mais restritivas, como é o caso da DZ.215-R4 (INEA, 2007). Cabe salientar que no presente trabalho, será dada ênfase apenas as tecnologias utilizadas na ETE Sapucaia do Rio, isto é, gradeamento fino, desarenador, Reator UASB e Filtro Aerado Submerso. Isto se faz em função deste fluxograma ter sido adotado na presente pesquisa.

Deve-se ressaltar ainda que, o lançamento de esgotos e, por conseguinte, a poluição dos corpos d'água, estão intrinsecamente relacionados com a balneabilidade. E, portanto, há também de se levar em consideração a legislação Federal CONAMA 274 (BRASIL, 2000), que estabelece critérios e limites relativos à análise de balneabilidade, dos quais devem ser atendidos.

### 2.2.1 Etapa preliminar

A Etapa Preliminar, como já mencionada anteriormente, tem como objetivo remover os sólidos grosseiros e areia, de maneira a proteger as unidades de tratamento e os dispositivos de transporte dos esgotos.

Segundo Jordão & Pessoa (2017), as grades de barras convencionais possuem um dispositivo de retenção e remoção. Para retenção são utilizadas barras de ferro ou aço dispostas paralelamente, verticais ou inclinadas, de maneira a permitir a passagem normal dos esgotos através do espaçamento. A definição dos espaçamentos é realizada a partir das dimensões dos sólidos que se deseja remover, bem como o tipo de tecnologias de tratamento que será utilizada a jusante. Segundo a NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011), o gradeamento pode ser classificado como fino, médio ou grosso, variando em função do espaçamento entre as barras. Nestes casos, as grades finas apresentam espaçamento entre 10 e 20 mm, as médias entre 20 e 40 mm e as grades grossas entre 40 e 100 mm. Ressalta-se ainda que podem ser utilizadas peneiras, cuja abertura varia entre 0,25mm a 10 mm e que necessariamente devem ser precedidas de grade.

Com relação a remoção dos sólidos grosseiros retidos nas barras ou peneiras, é possível realizar tal mecanismo de forma mecanizada ou manual. Em geral, para a escolha do tipo de remoção, há de se levar em consideração a vazão, o porte do empreendimento e o tipo de dispositivo utilizado para retenção dos sólidos. De acordo com a NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011), nos casos em que a vazão de projeto for superior a 100 L/s, as grades médias e finas devem ser de limpeza mecanizada, assim para vazões inferiores, pode-se empregar apenas limpeza manual. Embora a limpeza mecanizada seja operada com maior facilidade, o risco de dano é superior e, por isso, de maneira conservadora, recomenda-se a instalação de pelo menos duas unidades, cada qual com a capacidade para vazão afluyente total, onde uma pode ser utilizada como reserva.

No que tange os dispositivos de remoção dos sólidos grosseiros, há de se destacar que o material retido deve ser removido tão logo possível, de maneira a evitar represamento de esgoto no canal a montante e conseqüentemente causar a elevação do nível, aumento de velocidade do líquido entre as barras e provocar o arraste do material do qual se pretende remover.

Posteriormente a remoção dos sólidos grosseiros é realizada a remoção da areia. A areia embora seja constituída majoritariamente por material mineral, pode conter também uma quantidade de material putrescível como vegetais, gordura, cascas de ovos, pedaços de ossos, penas de aves, dentre outros (JORDÃO & Pessoa, 2017). Por esse motivo esta parte da ETE, seja responsável por um odor forte e característico. Os desarenadores tem como finalidade evitar a abrasão nos equipamentos e tubulações, reduzir os riscos de manutenção dos equipamentos e facilitar o manuseio e transporte das fases líquidas e sólidas.

Ainda segundo Jordão & Pessoa (2017), as caixas de areia podem ser classificadas quanto as suas características. Que podem ser relacionadas quanto a sua forma (prismática ou cilíndrica), ao tipo de separação sólido-líquida (gravidade ou centrífuga), a partir do tipo de remoção do material retido (manual, mecanizado ou ciclone separador), e de acordo com o fundo (plano, inclinado ou cônico). Analogamente ao gradeamento, os desarenadores também são constituídos de um sistema de retenção e de remoção.

O sistema de retenção conta com a propriedade de rápida sedimentação da areia, com uma velocidade tal que permita a retenção adequada da areia no fundo da caixa. De acordo com a NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011), a caixa de areia deve ser projetada para remoção mínima de 95% em massa das partículas com diâmetro igual ou superior a 0,2mm densidade de 2,65.

Já o sistema de remoção pode ser realizado de forma manual ou mecânica. Há de se ressaltar que a limpeza manual, exige a paralização da unidade, enquanto que a remoção mecanizada e está por sua vez necessita do constante fornecimento de energia elétrica. Segundo a NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011), vazões acima de 100 L/s devem adotar obrigatoriamente a limpeza mecanizada. Assim, é importante analisar as características e limitações da Estação, para definição do tipo de remoção a ser utilizado.

### 2.2.2 Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors (UASB)

Segundo Jordão & Pessoa (2017), no final da década de 70 surgiu na Holanda um modelo de reator caracterizado por possuir a entrada do esgoto pelo fundo, em fluxo ascendente, e por dispor de um sistema de separação das fases líquida, sólida e gasosa, na parte superior, com o lodo suspenso e formando flocos e grânulos. Desenvolvida pelo professor Gatzke Lettinga e sua equipe, recebeu o nome de *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

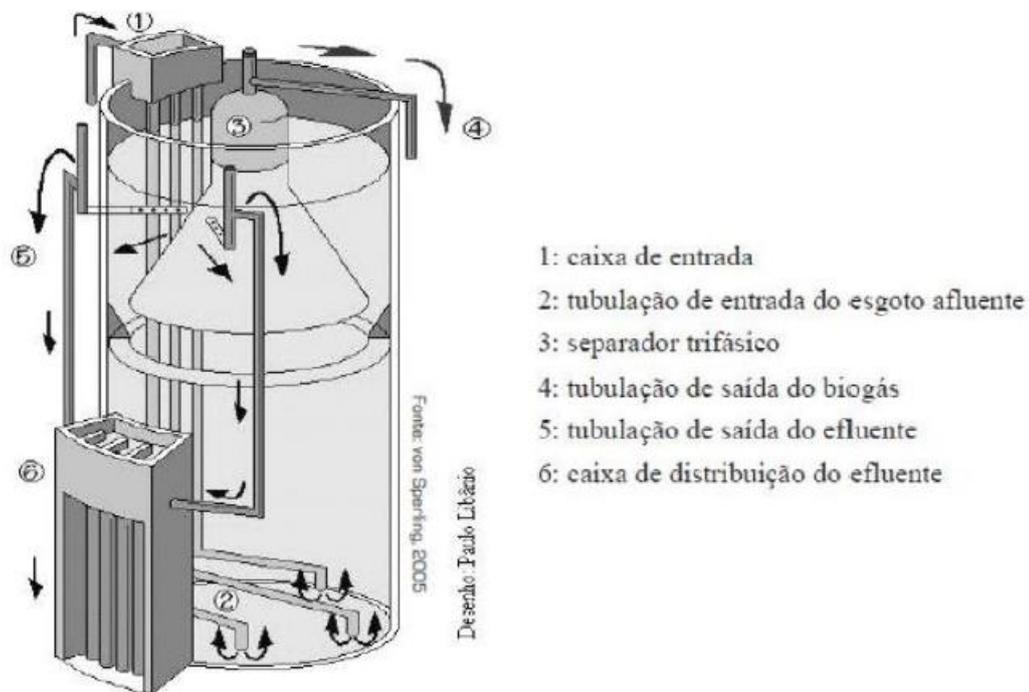
*Reactors* (UASB), no entanto de acordo com Chernicharo (2007), notadamente alguns tipos de reatores apresentam denominação bastante confusa, no Brasil.

Ainda de acordo com Chernicharo (2007), em sua tradução para o português, este tipo de tecnologia deveria ser denominado como Reatores Anaeróbio de Fluxo Ascendente e manta de lodo. Atualmente, no Brasil, tem sido divulgado novas terminologias para identificação e em geral pelo menos quatro siglas têm sido utilizadas com maior frequência, sejam elas: Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente (DAFA), Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA), Reator Anaeróbio de Leito Fluidificado (RALF) e Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente Através de Leito de Lodo (RAFAALL). A exemplo disso, Borges & Santos (2018), afirma que as companhias nacionais de saneamento, fazem uso de diferentes nomenclaturas para identificação do tratamento, variando de DAFA RAFA, RALF e UASB. Para Chernicharo (2007), entende-se que as novas terminologias e suas siglas, em geral, apresentam impropriedades e não contribuem para a harmonização da terminologia a ser utilizada e nem para a difusão da modalidade de tratamento em questão. Nesse sentido, Chernicharo (2007) sugere que seja utilizada a nomenclatura original.

No cenário mundial os reatores UASB tem ocupado posição de destaque, em especial no território nacional, frente as condições ambientais de temperatura brasileira. No Brasil, pode-se considerar que os reatores UASB colocam o país em posição de vanguarda a nível mundial e estima-se que grande parte de sua quantidade implantada no país esteja localizada nos estados do Paraná, Bahia, Minas Gerais e no Distrito Federal (CHERNICHARO, 2007).

Segundo Florêncio et al. (2006), o Reator UASB é capaz de converter a DBO de maneira anaeróbia através de um consórcio de bactérias presente na manta de lodo do reator. Nesse sistema o tratamento ocorre da seguinte maneira: O esgoto é introduzido na parte inferior da câmara de digestão e após ser distribuído pelo seu fundo segue uma trajetória em sentido ascendente até encontrar a manta de lodo, onde ocorre a mistura. Nesta zona ocorre a biodegradação e a digestão anaeróbia do conteúdo orgânico e como subproduto ocorre a formação de gases metano, carbônico e sulfídrico. A partir de passagens definidas pela estrutura dos dispositivos de coleta de gases e de sedimentação, o esgoto, com velocidade adequada para sedimentação, alcança a zona de sedimentação e permite a saída do efluente clarificado e o retorno dos sólidos ao sistema, aumentando a sua concentração no reator. Na Figura 1, pode-se observar a representação esquemática do Reator UASB.

Figura 1 - Representação esquemática do Reator UASB

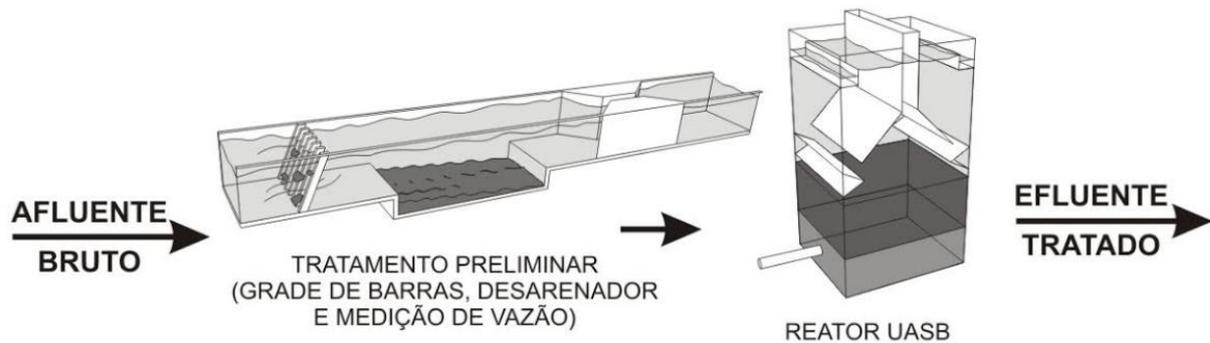


Fonte: Von Sperling (2014).

Ainda, segundo Jordão & Pessoa (2017), o Reator UASB apresenta eficiência média na ordem de 65% e 70% de redução de DQO e DBO respectivamente. Em geral, no caso dos esgotos domésticos pode ser obtido um efluente com concentração máxima de DBO inferior a 120 mg/L e de 80 mg/L de SST. Cabe salientar que, esses valores são fortemente influenciados pela temperatura e tempo de detenção hidráulica. Além disso, tais valores de eficiência podem ser alcançados somente quando há operação adequada do sistema.

Assim, em termos de legislação o reator UASB, por si só já atenderia aos 60%, de redução de matéria orgânica, exigidos pela CONAMA 430 (BRASIL, 2011), em contrapartida em geral tal eficiência máxima atingida não satisfaz os requisitos mínimos das legislações estaduais mais restritivas. Além disso, neste tipo de processo, utilizado como única unidade de tratamento, não há uma redução significativa de nutrientes e organismos patogênicos, bem como, sabe-se que a redução de apenas 60% de MO não é suficiente no tocante a proteção ambiental. Neste sentido é altamente indicado a inclusão de unidades complementares após o reator UASB e praticamente todos os processos de tratamento de esgotos podem ser utilizados como pós tratamento do reator. Na Figura 2, pode-se observar o fluxograma típico de um sistema de tratamento de esgoto por meio de reatores UASB utilizado como única unidade de tratamento.

Figura 2 - Fluxograma típico de um sistema de tratamento de esgoto por reatores UASB



Fonte: Jordão & Volschan, 2009

O Reator UASB, pode apresentar diversas vantagens, dentre elas, baixa produção de sólidos, tolerância a elevadas cargas orgânicas, possibilidade de operação com elevados tempos de retenção de sólidos e baixos tempos de detenção hidráulica. Além disso, os reatores de fluxo ascendente e manda de lodo, possuem características harmônicas e atrativas para a realidade brasileira, como; sistema compacto, com baixa requisição de área, baixo custo de implantação e operação, reduzido gasto de energia, além de baixa produção de excesso de lodo, uma vez que o mesmo já se apresenta digerido. Entretanto, a utilização do reator UASB pode também apresentar certas desvantagens como, baixa capacidade de recebimento de cargas tóxicas, alto potencial de formação de  $H_2S$ , remoção insatisfatória de nitrogênio, fósforo e organismos patogênicos, necessidade de inoculação do lodo para início de operação, dentre outros (CHERNICHARO, 2007).

Há de se destacar que neste tipo de unidade é importante que o tratamento preliminar seja realizado de forma adequada e eficiente, de modo a evitar problemas na operação e manutenção do reator. Neste sentido, de acordo com a NBR 12.209 (ABNT, 2011) é imprescindível a utilização de dispositivos de remoção de sólidos com aberturas iguais ou inferiores a 12 mm para uma vazão máxima de até 100 L/s, e a 6 mm para uma vazão máxima acima de 100 L/s. Assim, diante das vantagens já apresentadas anteriormente, com destaque a elevada eficiência de redução de MO para um tratamento primário, e da baixa demanda de área, além das condições favoráveis de temperatura no Brasil, atualmente a tendência nacional tem apontado para a substituição do decantador primário para o Reator UASB.

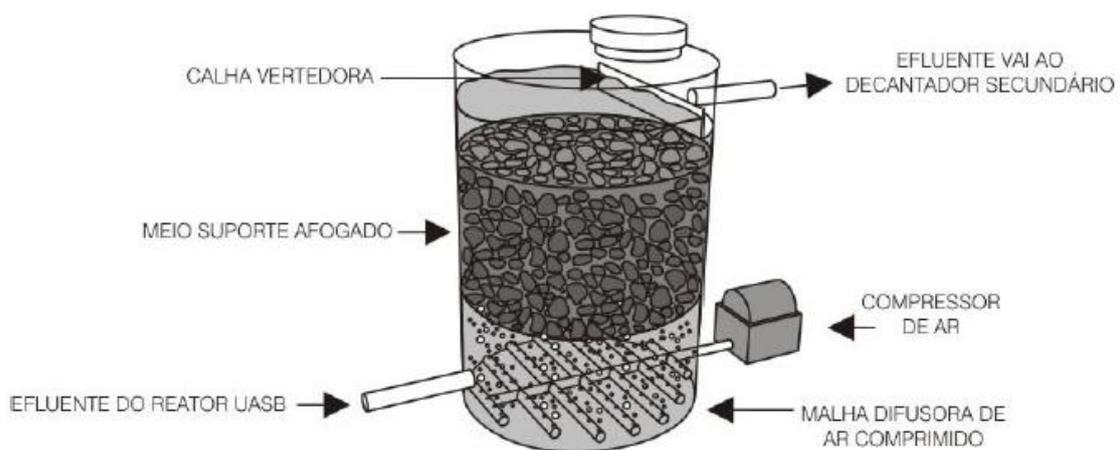
### 2.2.3 Filtro Aerado Submerso (FAS)

De acordo com Gonçalves et al. (2001), a utilização dos materiais sintéticos intensificadas nos anos 90 propiciou novos processos de tratamento a partir de meio suporte flutuante ou estruturado. Assim, mais recentemente, os Filtros Aerados Submersos (FAS) foram desenvolvidos e são caracterizados, em especial por possuírem meio estruturado fixo, semelhante ao Filtro Biológico Percolador. Salienta-se que, diante do tipo de meio suporte utilizado nos FAS, é possível encontrar na literatura a nomenclatura para este tipo de tecnologia como Biofiltro Aerado Submerso com leitos estruturados e Filtro Biológico Aerado Submerso.

Os Filtros Aerados Submersos consistem na oxidação bioquímica da matéria orgânica, neste caso então não há remoção física da biomassa por ação da filtração e conseqüentemente não é necessário realizar a contra lavagem (JORDÃO & PESSOA, 2017). Ressalta-se ainda que neste tipo de tratamento a biomassa se desprende naturalmente e, por conseguinte, em geral, há a necessidade de decantação secundária.

Em relação ao fluxo, o FAS pode operar de forma ascendente ou descendente, e necessitam do fornecimento de ar para realização da aeração, que pode ser realizada por meio de difusores de bolhas grossas, inseridas na parte inferior do filtro e alimentada via sopradores (VON SPERLING, 2014). Na Figura 3, é apresentado o desenho esquemático do Filtro Aerado Submerso.

Figura 3 - Desenho esquemático do Filtro Aerado Submerso

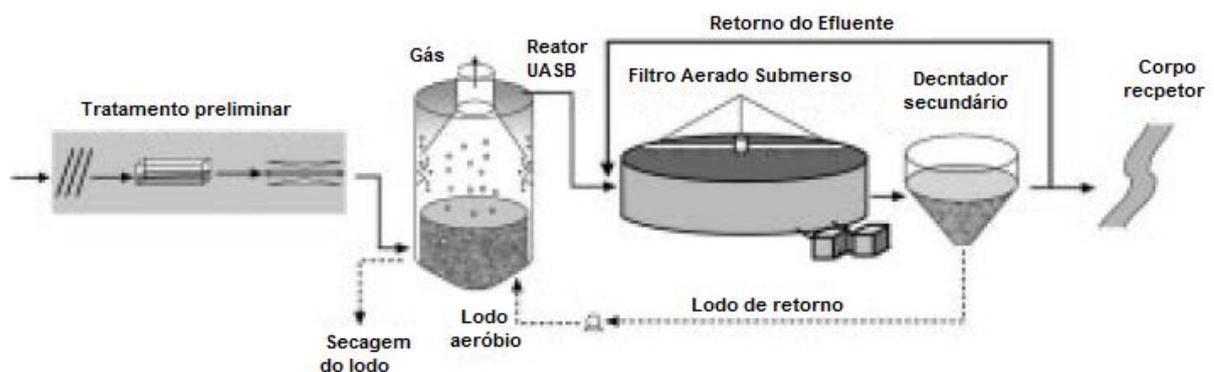


Fonte: Adaptado Jordão & Volschan (2009).

Cabe salientar que frequentemente o Filtro Aerado Submerso é confundido com o Biolfiltro Aerado Submerso (BAS), todavia ambos possuem diferenças conceituais demasiadamente expressivas. Enquanto o FAS apresenta meio suporte estruturado semelhante ao do Filtro Biológico Percolador, o BAS apresenta meio suporte granular. A oxidação do BAS ocorre por ações bioquímicas e físicas e se caracteriza por um processo de filtração e por isso existe a necessidade de lavagem periódica. Além disso, diferentemente do FAS, o Biolfiltro Aerado Submerso não carece de um decantador secundário.

Segundo Jordão & Sobrinho (2001), para um sistema de tratamento composto por UASB e FAS, espera-se um efluente com qualidade final que apresente  $DBO_5$  e SST, igual ou inferior a 30mg/L e Nitrogênio amoniacal inferior a 20mg/L. Além disso, no tocante a produção de lodo, para tal fluxograma será produzido, em geral, de 0,10 a 0,12 L lodo/hab.dia, com a vantagem do lodo já se encontrar digerido. Jordão & Sobrinho (2001), ainda estimam que o custo de implantação para esse sistema encontre-se em torno de 70 a 120 R\$/hab e que a área demandada esteja na faixa de 0,03 a 0,10 m<sup>2</sup>/hab. Na Figura 4, pode-se observar o fluxograma constituído pela Etapa Preliminar, Reator UASB e FAS.

Figura 4 - ETE composta por UASB seguido de Filtro Aerado Submerso



Fonte: Jordão & Sobrinho (2001).

Como já dito anteriormente, para alcançar os objetivos de um projeto de saneamento, é necessário além de remover a matéria orgânica, realizada majoritariamente no tratamento secundário, remover nutrientes e organismos patogênicos. E em especial quando se pretende realizar a prática de reuso, remover tais organismos torna-se imperativo.

Segundo Jordão & Pessoa (2017), a redução de organismos patogênicos e seus indicadores obtida nos diversos tipos de unidades de tratamento, é relativamente desprezível, uma vez que em geral nos tratamentos secundários, como no caso dos lodos ativados, mesmo

ao reduzir de 90 a 99% de coliformes, ainda assim, mantem um efluente com uma considerável densidade de organismos, com redução de apenas 1 a 2 casas logarítmicas.

Ainda segundo Jordão & pessoa (2017) no esgoto bruto é encontrado em torno de  $10^8$  NMP/100 mL, em um efluente com 90% de redução de Coliformes Termotolerantes encontra-se em torno de  $10^7$  NMP/100 mL, e por sua vez um efluente com 99% de redução obtém-se em média  $10^6$  NMP/100. Isto é, embora em termos de porcentagem, o tratamento secundário atinja relativamente uma eficiência elevada, em termos de densidade de organismos patogênicos o tratamento secundário mostra-se pouco eficiente quanto a sua redução.

Nesse sentido para a obtenção de um efluente tratado possivelmente apto para o reuso, devem-se utilizar as tecnologias avançadas, presentes na Etapa terciária. Assim, no presente estudo serão abordadas a desinfecção, em especial os processos pertencentes ao objeto do trabalho.

#### 2.2.4 Desinfecção

A desinfecção de esgotos tem por objetivo a inativação seletiva dos organismos que ameaçam a saúde humana de acordo com os padrões de qualidade estabelecidos para as diferentes situações (GONÇALVES et al., 2003). Para Daniel (2001), os mecanismos que envolvem a desinfecção podem ser classificados em três grupos:

- Destruição ou Danificação da parede célula, do citoplasma ou do núcleo: O agente desinfetante atua sobre componentes destas estruturas celulares, impedindo que desenvolvam suas funções elementares de maneira adequada;
- Alteração de importantes compostos envolvidos no catabolismo, tais como enzimas e seus substratos, alterando o balanço de energia na célula; e
- Alteração nos processos de síntese e crescimento celular, mediante a alteração de funções, tais como a síntese de proteínas, de ácidos nucléicos e coenzimas.

Em 2003 o entendimento era que a prática de desinfecção era recente, de acordo com Gonçalves et al (2003), atualmente segundo o Atlas (ANA, 2018), percebe-se que esta realidade ainda não mudou e poucas são as ETEs que incluem esta etapa em seu fluxograma. Porém, no que tange as legislações, as resoluções federais há muito já identificam e requerem

a implantação de unidades de desinfecção nas estações de tratamento. A resolução CONAMA 357 (BRASIL, 2005), por exemplo, ao fixar para a classe 2, limites máximos de até  $10^3$ CF/100mL, praticamente definiu a necessidade de realizar a redução de microrganismos por meio da desinfecção de esgotos tratados, que são lançados em corpos d'água da classe em questão. Além disso, as águas de classe 2, são destinadas para a irrigação de hortaliças consumidas cruas, além de outros usos, e, portanto, tal exigências também se aplica ao uso agrícola.

Por sua vez a Resolução 274/00 do CONAMA (BRASIL, 2000), em se tratando da balneabilidade, indica um limite máximo de  $10^3$  CF/ 100 ml para as águas salinas (classe 5) e salobras (classe 7), o que conduz igualmente à necessidade de desinfecção para esgotos lançados próximo à costa e em profundidades rasas.

Em relação aos métodos de desinfecção, a prática pode ser realizada por meio de processos naturais (lagoas e infiltração do solo), artificiais físicos (radiação UV e membranas) ou artificiais químicos (cloração e ozonização). Ressalta-se que, nos processos naturais, além dos agentes físicos há, ainda, os agentes biológicos na inativação de patógenos. Segundo Gonçalves et al. (2003), em geral a produção de efluentes tratados que apresentam uma baixa concentração de densidade de Coliformes Termotolerantes, inferior à  $10^3$  NMP/100 mL por exemplo, pode ser atingida por meio de processos naturais, ou físico-químico. Dentre os diferentes processos de desinfecção, cada qual apresenta vantagens e desvantagens e sua aplicabilidade varia em função de cada situação.

As lagoas de estabilização são unidades utilizadas principalmente para a redução de matéria orgânica. Todavia através de algumas adaptações no fluxograma, número e geometria das lagoas podem alcançar uma elevada eficiência de remoção de organismos patogênicos (JORDÃO & PESSOA, 2017). As unidades destinadas para tal são denominadas, Lagoas de maturação (LM). Há ainda as Lagoas de polimento (LP), das quais em termos conceituais são consideradas semelhantes às LM, porém, recebem esta nomenclatura por realizarem um polimento do efluente oriundo dos reatores anaeróbios. Embora as lagoas possam obter uma elevada eficiência de remoção de coliformes, aproximadamente 99,9999% em lagoas de maturação em séries (JORDÃO & PESSOA, 2017), possuam operação relativamente simples e não necessitam de energia, para sua implantação é necessária uma disponibilidade considerável de área, e por isso as lagoas em geral, não são aconselháveis para grandes centros urbanos.

Já a infiltração no solo, não necessita de produtos químicos, e apresenta ambiente desfavorável no solo para os organismos patogênicos, promovendo a redução de tais

organismos. No entanto, para a aplicação da unidade em questão, deve-se atentar para a contaminação de vegetais, dos quais em geral não devem ser ingeridos e além disso necessitam também de grandes áreas para sua implantação (VON SPERLING, 2014).

As membranas removem os patógenos por meio de processo físico, não necessitam da aplicação de produtos químicos no líquido e podem ser implantadas em áreas adensadas, além disso é eficiente quanto a remoção de ovos e larvas de helmintos, e cistos de protozoários. Entretanto, apresentam custos ainda elevados e segundo Dezotti et al. (2011), a natureza dos meios líquidos contidos nas membranas tornam a elucidação da formação do *fouling* uma difícil tarefa na manutenção das membranas.

Entre os agentes físicos pode-se citar ainda a transferência de calor (aquecimento ou incineração) e as radiações ionizantes. Entretanto, embora o aquecimento seja uma técnica eficiente na desinfecção de águas, em termos práticos e econômicos, tal procedimento não se mostra aplicável, até mesmo em escalas reduzidas. Já as radiações ionizantes do tipo gama, novamente em relação aos custos envolvidos, restringem-se a aplicações somente em pequena escala.

Com relação aos processos artificiais químicos, é possível realizar a desinfecção por meio da Ozonização ou Cloração. Embora o Ozônio, seja um agente bastante eficaz atuante na remoção de patógenos, tal prática ainda é considerada onerosa, e conseqüentemente nos países em desenvolvimento, há menos experiências (VON SPERLING, 2014). Além disso, a desinfecção por ozônio em esgotos tratados, seria recomendado apenas, em casos de efluentes já tratados a nível terciários, nitrificados ou filtrados (JORDÃO & PESSOA, 2017). Assim, uma vez que o tratamento terciário atualmente não é uma prática constante no cenário nacional, a ozonização encontra dificuldades em sua aplicação no Brasil.

Já o cloro é o agente inativador de organismos patogênicos presentes em esgotos sanitários mais econômicos e difundidos, considerado muito eficiente quanto à inativação de bactérias e vírus (GONÇALVES ET AL., 2003). No entanto, alguns de seus compostos podem produzir subprodutos tóxicos com efeitos crônicos a saúde da população e ao meio ambiente, além disso, não possuem capacidade desinfetante para protozoários e helmintos. Atualmente tem-se dado uma particular atenção aos efeitos causados a partir da cloração, uma vez que ao entrar em contato com a matéria orgânica presente no esgoto, há a possibilidade de formação de organoclorados e trihalometanos e, por conseguinte gerar eventuais conseqüências carcinogênicas (JORDÃO & PESSOA, 2017).

Em países desenvolvidos, a cloração tem sido substituída por processos menos nocivos à saúde e ao meio ambiente. No Brasil, considerado um país ainda em desenvolvimento,

assume-se risco elevado em razão das vantagens econômicas da cloração. Somente a título de curiosidade, segundo Araujo et al. (2016) no Município do Rio de Janeiro, as ETEs Alegria e Penha realizam a desinfecção por cloração para produção de água de reuso.

De acordo com Gonçalves et al. (2003), outras opções com base em processos químicos (ozonização e misturas oxidantes), assim como físicos (filtração terciária ou radiação ultravioleta) e naturais (lagoas de estabilização ou disposição controlada no solo), oferecem alternativas cada vez mais interessantes à cloração seguida de descloração dos efluentes tratados. Nesse sentido, torna-se preponderante aprofundar estudos relacionados as demais práticas de desinfecção e sua aplicabilidade.

Na Tabela 4, pode-se observar a faixa de microrganismos a partir de diversos processos de tratamento.

Tabela 4 - Remoção (Casas Logarítmicas \*) de Microrganismos segundo processos de tratamentos

<b>Microrganismo</b>	<b>Lodos Ativados</b>	<b>Filtração Terciária</b>	<b>Membranas de microfiltração</b>	<b>Osmose Reversa</b>
Coliformes fecais	0 – 2	0 – 1	1 – 4	4 – 7
Salmonella	0,5 - 2	0 – 1	1 - 4	4 – 7
Mycobaterium tuberculosis	0 -1	0 – 1	1 – 4	4 – 7
Shigella	0,7 - 1	0 – 1	1 – 4	4 – 7
Giardia lamblia	2	0 – 3	2 - 6	>7
Ovos de helmintos	<0,1	0 - 4	2 - 6	>7
Vírus entéricos	0,6 – 2	0 - 1	0 – 2	4 - 7

(\*) 1 log = remoção de 90%; 2log = remoção de 99%; 3log = remoção de 99,9%; 6log = remoção de 99,9999%  
Fonte: Jordão & Pessoa, 2017.

Além dos procedimentos de desinfecção já mencionados anteriormente, a Radiação Ultravioleta apresenta grandes vantagens e segundo Von Sperling (2014) este processo vem tornando-se competitivo ou mais vantajoso que a cloração em várias aplicações. Para a realização da desinfecção por esta prática é necessário que o efluente esteja bem clarificado de modo a possibilitar a penetração da radiação na massa líquida. Nesse sentido, a filtração terciária, pode-se mostrar como uma importante unidade de pré-tratamento para a desinfecção por radiação UV ou até mesmo ser considerada como desinfecção em primeiro estágio. Assim, a seguir serão aprofundados os procedimentos de pré-tratamento por Filtração terciária e a radiação UV como prática de desinfecção.

#### 2.2.4.1 Filtros Terciários

É sabido que a filtração foi originalmente desenvolvida para utilização no tratamento da água e sua potabilidade. Entretanto, ao longo do tempo sua utilização foi estendida para o tratamento de esgotos. De acordo com Jordão & Pessoa (2017), o processo de filtração em meio a areia ou antracito e areia, é suficientemente seguro para a melhoria da qualidade final do efluente secundário e também indicado como pré-tratamento no uso de membranas.

Nos primórdios de sua utilização, realizada como um processo unitário no tratamento de águas residuais, eram adotados as mesmas técnicas e parâmetros utilizados no tratamento da água, porém tão logo tal procedimento, mostrou-se inadequado visto as diferentes características pertencentes a água e o esgoto (MANCUSO, 2003). Posteriormente este fato, propiciou uma série de modificações no processo e surgimento de diversos equipamentos.

Ainda de acordo com Mancuso (2003), a filtração consiste na passagem do esgoto por meio de um leito formado por material granular para remoção de sólido e conseqüentemente exige eventuais lavagens com água em contra-corrente para remoção do material retido. Mancuso (2003) ainda ressalta que, a filtração é um processo-chave na produção do efluente de alta qualidade, combinando mecanismos físicos e químicos na remoção de sólidos, sendo por isso normalmente utilizado como uma etapa final imediatamente antes da desinfecção e da disposição final de reuso.

Para Jordão & Pessoa (2017), paralelamente à remoção de sólidos em suspensão, obtém-se uma remoção de DBO, correspondente a DBO particulada, assim como turbidez. Destaca-se que, na filtração terciária, em geral, a turbidez é considerada o parâmetro de controle da qualidade do efluente e para cada caso há uma curva que relaciona os sólidos em suspensão e turbidez.

Para DI BERNARDO (2003) a filtração é o resultado de três mecanismos distintos: transporte, aderência e desprendimento. Ainda segundo o mesmo autor, “os mecanismos de transporte são responsáveis por conduzir as partículas em suspensão para as proximidades da superfície dos coletores (meios filtrantes), as quais podem permanecer aderidas a estes através de forças superficiais, que resistem às forças de cisalhamento resultantes das características do escoamento ao longo do meio filtrante. Quando essas forças superam as forças de aderência, tem-se o desprendimento. Caso a taxa de filtração, ou velocidade de aproximação, permanecer constante, a velocidade de escoamento nos poros, denominada velocidade intersticial, aumenta em decorrência das partículas retidas e causa o arrastamento das partículas para

subcamadas inferiores (filtro descendente) do meio filtrante e surge na água filtrada, podendo ocasionar o fenômeno denominado como transpasse. Tal fenômeno é caracterizado pelo aumento significativo da turbidez.

Com relação aos meios filtrantes, a filtração terciária pode ser realizada por meio de areia, ou antracito, denominadas meio simples ou ainda através de antracito sobre areia, denominada meio duplo. Para Mancuso (2003), o meio mais utilizado é a areia, porém ao lavar o filtro em contracorrente, as partículas mais finas dessa areia migram para a superfície do leito e causam entupimento no filtro, conseqüentemente faz com que o meio filtrante perca uma parcela de sua ação de superfície. No que tange a especificação do meio filtrante a ser utilizado na filtração, a NBR 13.969 (ABNT, 1997) indica que, no caso da areia, deve-se atender um diâmetro efetivo na faixa de 0,25 mm a 1,2 mm com coeficiente de uniformidade inferior a 4.

Segundo Heller & Pádua (2010), com relação ao escoamento dos efluentes nos filtros, o ideal é que o líquido flua no sentido dos maiores grãos para os menores do meio filtrante. Teoricamente, este tipo de disposição de grãos, é ideal uma vez que propicia que todo o leito participe da filtração e com isso permite uma filtração mais longa, fixando os grãos com o aumento da taxa de filtração (DI BERNARDO, 2003).

Na prática, a grande maioria dos filtros descendentes possui apenas duas camadas filtrantes, e os materiais mais utilizados no Brasil como meio filtrante têm sido a areia e o carvão antracitoso, sendo o primeiro empregado em filtros de camada única e a combinação dos dois, em filtros de dupla camada (DI BERNARDO, 2003). Sabe-se que o antracito é um carvão ativado com densidade inferior ao da areia e, com isso, durante a lavagem dos filtros, os grãos são mantidos no topo do meio filtrante. O terceiro material utilizado com muita frequência em literaturas especializadas é a granada, porém no território nacional, esse material raramente seja aplicado.

Destaca-se que o objetivo de empregar vários materiais é conseguir, em função da diferença de densidades, uma disposição granulométrica que permita que a filtração seja efetuada no sentido do material de grãos maiores para o material de grãos menores. E com isso, haverá uma diminuição do tamanho dos vazios no sentido do escoamento da água, permitindo maior participação do leito na filtração (DI BERNARDO, 2003). Tal aspecto é muito importante para a duração das carreiras na filtração direta, uma vez que a retenção das impurezas ocorre nos vazios intergranulares do meio filtrante.

De acordo com Mancuso (2003), são altamente conhecidas as combinações carvão ativado e areia, resina e areia, resina e antracito, antracito e areia-granada, carvão e antracito e

areia e por fim, carvão ativado, areia e granada. Além destes, diversos tipos de materiais, como casca de coco, plásticos, carvões e zeólitas, têm sido pesquisados para uso como meio filtrante (DI BERNARDO, 2003). O objetivo desses estudos tem sido a busca por materiais alternativos, que abordem aspectos técnicos e econômicos interessantes, como custo reduzido, alta durabilidade, facilidade de produção e/ou aquisição e eficiência (DI BERNARDO, 2003).

Ainda segundo Mancuso (2003), no que tange à filtração terciária, a classificação dos filtros pode ser realizada da seguinte forma:

- De acordo com o sentido do fluxo, ou seja, de forma ascendente, descendente, duplo sentido, fluxo radical e fluxo horizontal;
- A partir do material que constitui o leito, já mencionado anteriormente;
- Segundo as taxas de filtração: Lentos rápidos e de altas taxas; e
- Filtros de pressão ou gravidade, isto é, normalmente os filtros de pressão são metálicos e os de gravidade podem ser de alvenaria e também metálicos.

Quanto ao dimensionamento de um filtro utilizado para o tratamento de esgotos, de acordo com Jordão & Pessoa (2017), pode-se admitir que a tecnologia em questão segue os mesmos procedimentos de um filtro clássico utilizado para o tratamento de água: Altura aproximadamente de 2,5 m, fundo falso com bocais ou lajotas, meio filtrante com espessura correspondente, profundidade da água sobre o leito em torno de 0,5 a 0,80m borda livre de 0,40m e possui calhas de coleta de água de lavagem posicionadas com seu fundo acima da camada filtrante a uma altura equivalente à expansão do meio, na qual pode ser estimada em 50% da espessura do meio filtrante.

Para cálculo da área superficial do filtro, segundo NBR 13.969 (ABNT, 1997), deve-se limitar a taxa de aplicação em 200L/dia x m<sup>2</sup>, em caso de efluentes oriundos de processo aeróbio. Destaca-se que, em locais onde a temperatura média mensal de esgoto seja inferior a 10°C, é recomendado adotar taxa de aplicação limitada a 100L/dia x m<sup>2</sup>.

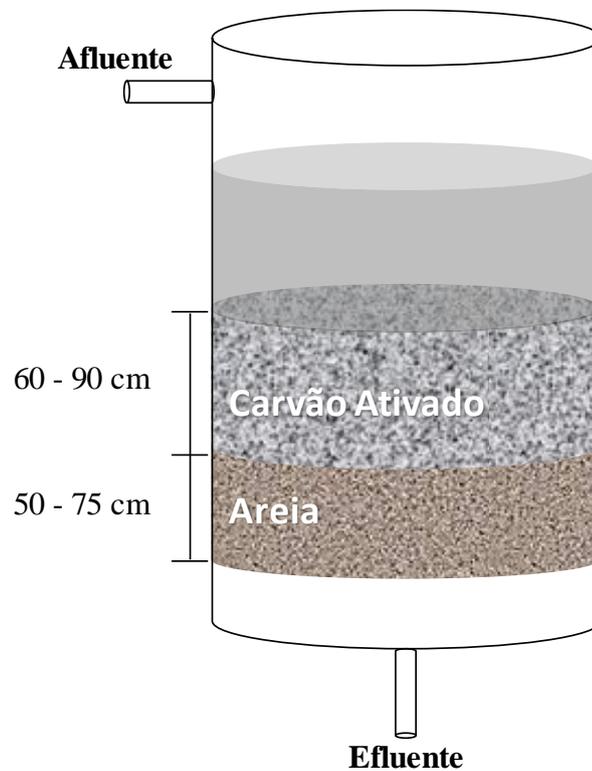
Ressalta-se ainda que os filtros utilizados para tratamento de água são normatizados pela NBR 12.216 (ABNT, 1992) e por isso podem ser utilizados como base para o dimensionamento dos filtros terciários, além das orientações apresentadas pela NBR 13.969 (ABNT, 1997) para construção desse tipo de tecnologia. Na Tabela 5 é possível observar as características de filtros com diferentes meios filtrantes e já na Figura 5 é apresentado a representação gráfica de um Filtro Duplo com meio filtrante composto de areia e Carvão ativado.

Tabela 5 - Características de filtros terciários convencionais com diferentes meios

Características	Antracito	Areia	Meio duplo camada antracito	Meio duplo camada Areia
Espessura do meio, mm	600-900	500 – 750	360 – 900	180 – 360
Tamanho Efetivo, mm (D <sub>60</sub> )	0,8 - 2,0	0,4 – 0,8	0,8 - 2,0	0,4 – 0,8
Coefficiente de uniformidade (U)	1,3 – 1,8	1,2 – 1,6	1,3 – 1,6	1,2 - 1,6
Taxa de filtração, ℓ/min.m <sup>2</sup>	80 – 400	80 – 240	80 – 400	80 – 400
Densidade	1,40 – 1,75	2,55 – 2,65	1,40 – 1,75	2,55 - 2,65

Fonte: Jordão & Pessoa (2017)

Figura 5 - Ilustração de um filtro terciário



Fonte: Adaptado de Jordão & Pessoa (2017)

No que se refere a conservação dos filtros, a NBR 13.969 (ABNT, 1997) indica a implantação de duas unidades de filtração, com o intuito de possibilitar a manutenção de um dos filtros, sem prejuízo do processo de tratamento. A substituição de um filtro por outro, deve ser realizada ao observar um excessivo retardamento na velocidade de filtração do esgoto. Recomenda-se ainda que após a secagem da superfície do filtro de areia, deve-se efetuar à raspagem e remoção do material depositado na superfície, juntamente com uma

pequena camada de areia (0,02 m a 0,05 m). É importante ressaltar que a camada removida de areia deve ser repostada imediatamente com areia limpa de características idêntica àquela removida anteriormente. Além disso, também se faz necessário remover eventuais vegetações presentes na superfície do filtro.

Com relação a aplicações do tipo de tecnologia em questão, Tonetti et al (2012), realizou uma avaliação a respeito da combinação de filtros anaeróbio com filtro de areia. Para isso, foram avaliados três filtros anaeróbios operados com tempo de detenção hidráulica de nove horas, dos quais tinham o efluente disposto sobre quatro filtros de areia em distintas taxas de aplicações. No primeiro filtro de areia aplicaram-se 50 L.m<sup>2</sup> uma vez por dia. No segundo, terceiro e quarto filtros, essa mesma carga foi disposta em dois, três e quatro horários, espaçadas entre às 9:00 e às 16:00 horas. Com relação a construção dos filtros de areia, foram utilizadas caixas cilíndricas com estrutura de fibra de vidro e diâmetro interno de 1,00 m, com abertura na parte superior e com um orifício de 0,032 m na inferior, onde foi instalada a tubulação de saída do efluente. No que tange a composição do leito, foram empregadas três camadas estratificadas a partir da base do reator. A primeira possuía 0,20 m de profundidade e foi composta por Brita 2, com diâmetro efetivo (D10) de 16,12 mm, coeficiente de desuniformidade (CD) de 1,89 e coeficiente de vazios (Cv) de 45,80±0,40%. Logo acima estava a camada formada por Brita 1 com D10=7,51 mm, CD de 1,66 e Cv de 44,08±0,38%, tendo 0,05 m de profundidade.

Já com relação aos aspectos operacionais Tonetti et al (2012) utilizou em sua pesquisa a carga de 50 L.m<sup>2</sup> em todos os quatro filtros, onde cada um recebeu esta carga em horários e quantidades diferentes. Ao final da pesquisa foram encontrados resultados pertinentes no que se refere o desenvolvimento da técnica de reuso no canário nacional, como podem ser observados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Resultados obtidos através do estudo realizado por Tonetti et al (2012) sobre avaliação da combinação de filtros anaeróbio com filtro de areia

<b>Reator</b>	<b>Turbidez (UT)</b>	<b>Remoção (%)</b>	<b>SST (mg/L)</b>	<b>Remoção (%)</b>
Esgoto bruto	79,8	-	115	-
Efluente anaeróbio	57,9	25,9	66	39
FA1	8,1	86,8	13	74
FA2	12,2	80,7	22	64
FA3	6,3	91	10	83
TFA4	7,8	88,8	12	81

Fonte: Tonetti et al (2012).

Tabela 7 - Valores médios de densidade de coliformes totais e *Escherichia coli* nos efluentes dos filtros de areia encontrados por Tonetti et al (2012)

Reator	CT (NMP 100 mL <sup>-1</sup> )	E. coli (NMP 100 mL <sup>-1</sup> )	Remoção de E. coli (%)
FA1	1,09x10 <sup>5</sup>	3,09x10 <sup>4</sup>	98,99
FA2	7,45x10 <sup>5</sup>	1,60x10 <sup>5</sup>	94,77
FA3	5,22x10 <sup>5</sup>	1,08x10 <sup>5</sup>	95,76
FA4	4,54x10 <sup>5</sup>	6,08x10 <sup>4</sup>	97,23

Fonte: Tonetti et al (2012).

De acordo com a Tabela 7 pode-se observar que quanto a redução de organismos indicadores de contaminação fecal, o estudo elabora por Tonetti et al (2012) não apresentou redução significativa.

A partir de experiências no âmbito do PROSAB, a Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR) projetou e operou uma instalação experimental que utilizou o efluente flotado advindo da ETE Cambuí, enviado por bombeamento ao filtro piloto. Tal ETE emprega o fluxograma composto por tratamento preliminar, reator UASB, tratamento físico-químico com flotação por ar dissolvido e desinfecção. Para esse sistema foi projetado um filtro rápido de areia, de leito duplo descendente, construído com altura de carga de 1,70 m, leito de carvão de 55cm, leito de areia de 25 cm e fundo de 30 cm. Ressalta-se que, para este experimento não foi utilizado camada suporte, por sugestão do fabricante. As taxas de aplicação hidráulica variaram de 200 a 100 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia. Na Tabela 8, pode-se observar os resultados encontrados para a filtração terciária a partir de diversas taxas de aplicação.

Tabela 8 - Resultados obtidos através do experimento de filtração terciária descendente realizado pela PUC PR

Taxas de filtração (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia)	DQO (mg/L)	Turbidez (NTU)	SST (mg/L)	Tempo de colmatação (h)
200	73	29	19,3	6
150	59	11	13,1	8
100	31	9	9,1	12

Fonte: Chernicharo, 2003.

Para este experimento concluiu-se que, a qualidade do efluente foi melhorado proporcionalmente à diminuição da taxa de filtração. Entretanto, a filtração descendente do experimento operado pela PUC PR, teve problemas colmatação devido à má qualidade do efluente e com isso não foi possível superar o período de 12 horas sem extravazamento do filtro. Por fim, a pesquisa em questão recomendou que, a filtração terciária seja realizada

apenas em efluentes de boa qualidade, que apresentem com aproximadamente 20 a 40 (mg/L) de SST.

#### 2.2.4.2 Reatores Ultravioleta

Os efeitos benéficos da luz solar sobre ferimentos e na prevenção de determinadas doenças são conhecidos pelo homem há vários séculos. No entanto, a radiação UV utilizada na desinfecção teve sua evolução considerada lenta no século XX, em função do vagaroso desenvolvimento das lâmpadas germicidas, da larga comercialização das lâmpadas fluorescentes e pelo surgimento da cloração (GONÇALVES ET AL., 2003). Atualmente, tal processo em questão tem se desenvolvido bastante, tornando-se competitivo ou até mesmo mais vantajoso que a cloração em várias aplicações (VON SPERLING, 2014).

A radiação ultravioleta é caracterizada como um processo totalmente físico e segundo Jordão & Pessoa (2017), neste tipo de desinfecção, a energia transmitida é absorvida pelos microrganismos e como consequência ocorre alterações estruturais no DNA que impedem a reprodução. Tal método apresenta como vantagem, sua eficiência, simplicidade, baixa requisição de espaço, quando comparado a outros métodos, além de não requerer nenhuma adição de produtos químicos, não possui riscos de formação de compostos organoclorados e de gerar subprodutos tóxicos.

No entanto, a radiação UV não possui qualquer ação nas características físico-química do esgoto e para que ocorra uma boa desinfecção é necessário garantir que o efluente submetido ao procedimento em questão, seja clarificado, de modo que a radiação consiga penetrar satisfatoriamente na massa líquida. Assim, a apresentação de um efluente com baixa concentração de sólidos em suspensão e turbidez, torna-se essencial para um bom funcionamento da radiação ultravioleta. Neste sentido, a utilização de procedimentos, como a filtração terciária, pode-se apresentar de maneira interessante, como tratamento preliminar a desinfecção via UV. Além disso, para um bom funcionamento do sistema, deve-se realizar a limpeza dos tubos com periodicidade, de modo que não acumulem limo e matéria graxa.

Cabe salientar ainda que, tal processo trata-se essencialmente da inativação dos microrganismos e com isso existe a possibilidade de ativação dos mesmos. Assim, os microrganismos podem, em determinados casos, reparar e reverter os efeitos destrutivos do

UV através de mecanismos de reativação, conhecidos como fotoreativação, ou em ausência da luz, conhecido como recuperação no escuro (GONÇALVES et al., 2003).

Quanto à implantação do sistema, usualmente as lâmpadas são montadas em bandejas removíveis em canais, ou em dutos sob pressão, de maneira que o esgoto seja exposto a radiação. E com relação a disposição do sistema, as lâmpadas podem ser colocadas com ou sem contato com o esgoto. E para esse sistema é atribuído nomes como reatores fotoquímicos e fotoreatores (JORDÃO & PESSOA, 2017).

Para dimensionamento, implantação e operação dos reatores UV, é importante entender e levar em consideração alguns parâmetros, como, intensidade da radiação (I), absorvância (A) e dose (D). Tais parâmetros são essenciais para identificar o tempo de exposição necessário para inativação dos organismos patogênicos.

A intensidade (I) é uma indicação da energia transmitida através da lâmpada para o efluente líquido. Porém, está mesma intensidade não está disponível para a inativação dos microrganismos, já que esta se reduz à medida em que, aumenta-se a distância entre o líquido e as lâmpadas, assim como de acordo com a espessura da lâmina em que a radiação deve atravessar (JORDÃO & PESSOA, 2017).

Deve-se destacar que a presença de SST influi de forma direta na redução da radiação, tanto por efeito de absorção como por formar uma barreira física protetora dos microrganismos. Nesse sentido, pode-se considerar assim o efeito da absorvância (A) a radiação no meio líquido, que influi na intensidade da radiação e varia de acordo com a turbidez do efluente. Por isso, estima-se a referida atenuação para efeito de projeto e com isso é utilizado o coeficiente de absorvância ( $\alpha$ ) para corrigir a absorvância do meio (GONÇALVES ET AL., 2003). Nas Equações 01 e 02, são descritas respectivamente as fórmulas utilizadas para calcular do coeficiente de absorvância e a intensidade média efetiva ( $I_{med}$ ) de determinada radiação em um meio.

$$\alpha = 2,303 A \quad (01)$$

Onde:

$\alpha$  = coeficiente de absorvância; e

A=Absorvância 254 nm ( $\text{cm}^{-1}$ ).

$$I_{med} = \frac{I_o}{\alpha x L} (1 - e^{-\alpha L}) \quad (02)$$

Onde:

$I_{med}$ =intensidade média efetiva da radiação;  
 $I_0$ =intensidade UV aplicada a um meio líquido;  
 $\alpha$ = coeficiente de absorvância=2,303 A; e  
 L= caminho ótico.

Por fim, segundo Gonçalves et al. (2003), a dose pode ser definida como, o produto da intensidade pelo tempo de exposição (t), conforme exibido na Equação 03, e é considerada o principal parâmetro de projeto e controle operacional da desinfecção UV. Quanto a unidade atribuída a tal parâmetro, dose é expressa em  $J.m^{-2}$ , entretanto, é mais comumente utilizada em  $mW.s.cm^2$ , ou  $mJ.cm^{-2}$  ( $1 mJ/cm^2 = 1 mWs/cm^2 = 10 J/m^2$ ).

$$D = I x t \quad (03)$$

Onde:

D=dose;

I=intensidade da radiação à profundidade x ( $mW/cm^2$ ); e

t= tempo de exposição à radiação.

De acordo com Bilotta & Daniel (2012), a literatura científica tem reportado que efluentes secundários e terciários necessitam de dosagens de radiação UV entre 30,0 e 45,0  $mW.s.cm^{-2}$  com o intuito de garantir redução de 3,0 a 5,0 log no número de coliformes termotolerantes, coliformes totais e *Streptococcus faecalis* sobreviventes. No entanto, Gonçalves et al., (2003) indica a utilização de 6,6  $mW.s.cm^{-2}$  para redução de coliformes termotolerantes, tal valor infere um tempo de exposição menor e conseqüentemente um gasto inferior de energia elétrica.

Com relação a aplicações do tipo de tecnologia em questão, a partir de experiências no âmbito do PROSAB, a Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), juntamente com a Sanepar, desenvolveu estudos em escala piloto de um sistema de tratamento com UASB seguido de FAS e posteriormente desinfecção via radiação UV, dentre outros estudos. Inicialmente a concentração inicial de *Escherichia coli* foi de  $1,0 \times 10^6$  NMP/100 ml para o efluente anaeróbio e de  $1,0 \times 10^5$  NMP/100 ml para os efluentes secundários. Posteriormente ao utilizar radiação UV a uma frequência 254 nm e tempo de contato de 2,5 minutos a concentração de *Escherichia coli* encontrada foi inferior a  $1,0 \times 10^3$  NMP/100 ml (GONÇALVES ET AL., 2003).

Já Agnholetto & Botari (2015), desenvolveram um experimento a partir de um sistema composto de filtro de areia e reator de UV, com o objetivo de melhorar os parâmetros físicos e biológicos de um efluente de reator UASB, à uma taxa de aplicação Superficial de 1000 l/m<sup>2</sup>. dia. Para tanto, foram realizados testes de DQO, SST, turbidez e bacteriológico. Ao fim do

estudo, ao comparar o efluente bruto com o tratado, foi possível inferir uma redução de 30,5% com relação a DQO, 78,6% sobre o parâmetro SST, 94,1% na turbidez e 100% no bacteriológico. Para Agnholetto & Botari (2015) este resultado foi considerado satisfatório, de acordo com a Resolução CONAMA 430/2011, uma vez que, à ausência do tipo Coliforme Termotolerantes e a alta presença de nutrientes, indicam que este efluente tratado poderia ser usado para a fertirrigação.

### 2.3 Reuso

Diante da limitação de recursos hídricos vivenciada por diversas regiões do planeta, torna-se imprescindível a inserção de novas fontes de água na matriz hídrica. O reuso de efluentes propicia a liberação de água de melhor qualidade para usos mais nobres, como o abastecimento de água da população, evita a descarga de esgotos *in natura* nos corpos de água, dentre outras vantagens existentes. Nesse sentido, o reuso de efluentes se apresenta como uma alternativa promissora e interessante no combate e minimização das consequências sofridas pela crise hídrica, além de contribuir para a proteção dos mananciais em regiões onde a falta de água não é uma realidade atual.

No cenário mundial, países com histórico de estresse hídrico possuem o reuso como prática comum e regiões mais desenvolvidas utilizam até mesmo a técnica somente no intuito de proteger seus mananciais. Israel, por exemplo, diante de sua situação de escassez hídrica crônica, realizou uma reforma tarifária da água e incluiu o reuso em sua matriz hídrica (ARAÚJO ET AL., 2018). Atualmente, o país faz uso das águas regeneradas em cerca de 40% de sua demanda de água na irrigação (MARIN et al., 2017) e possui uma das gestões de água mais respeitadas do mundo. No Brasil, o mercado de produção de água de reuso ainda é muito incipiente, embora discussões sobre o tema tenham se tornado mais frequentes.

De acordo com Jordão & Pessoa (2017), as principais aplicações de reuso são: Irrigação de áreas cultiváveis, aspersão de áreas de parques e campos esportivos, recarga de aquíferos, reuso industrial, uso domiciliar e comercial como água não potável, uso público, utilização na construção civil, reuso nas próprias atividades do setor de saneamento, reservação para fins recreacionais, uso residencial como água potável e etc. Ressalta-se que, as aplicações referidas anteriormente, englobam as atividades praticadas ao redor do globo terrestre. É sabido que a aplicação de tais atividades depende da necessidade hídrica local,

desenvolvimento do país, tecnologias disponíveis e aplicáveis na região, aceitação e envolvimento da população, amparo legal, existência de políticas sustentáveis, vontade política, gestão eficiente das águas, dentre outros.

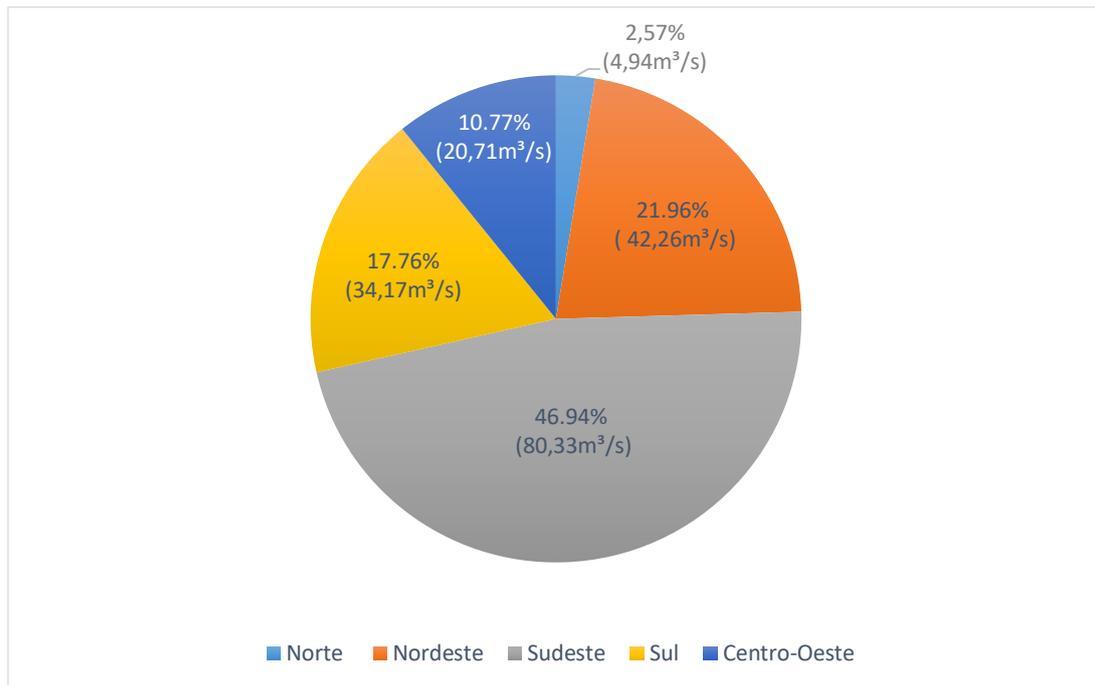
Atualmente, no território brasileiro, a técnica tem sido aplicada principalmente nos serviços urbanos de lavagem de ruas e de veículos de limpeza urbana, na construção civil e nos serviços de saneamento em geral, como por exemplo, a desobstrução de galerias pluviais e/ou redes de coleta de esgotos. Na área industrial, esta prática tem sido mais frequente, já que há um interesse em reduzir custos e tirar vantagens a partir do *marketing* ambiental.

### 2.3.1 Reuso industrial

De acordo com a Resolução CNRH n° 54 (BRASIL, 2005), o reuso industrial pode ser definido como a utilização de águas regeneradas em processos, atividades e operações industriais. Sabe-se que o reuso, pode apresentar vantagens econômicas, além de benefícios ambientais indiscutíveis. Neste sentido, tal prática pode se apresentar de maneira interessante especialmente para o setor da indústria diante da sua elevada demanda hídrica e necessidade de fornecimento contínuo de água.

No Brasil, país composto por grandes metrópoles como São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, dentre outros, a demanda hídrica existente para o setor em questão está estimada em 9,1 %, de acordo com a Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil (ANA, 2018). Na Figura 6, pode-se verificar o gráfico que relaciona a demanda hídrica industrial por região, em 2015.

Figura 6 - Proporção da demanda hídrica industrial por região brasileira em 2015



Fonte: ANA, 2017.

As águas regeneradas podem ser utilizadas em torres de resfriamento, caldeiras, na construção civil, incluindo preparação e cura de concreto e para compactação do solo, irrigação de áreas verdes de instalações industriais, lavagens de piso e alguns tipos de peças, principalmente na indústria mecânica, além de demais processos existentes. Ressalta-se que, naturalmente a utilização da água de reuso na indústria, em geral, exige um efluente que apresente uma excelente qualidade, compatível com sua destinação.

O projeto Aquapolo representa um dos principais exemplos do país voltado à água de reuso oriunda de efluente de ETEs. Desenvolvido em São Paulo, a partir da parceria entre a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP e a BRK Ambiental, o projeto destina a água de reuso produzida para o setor da indústria. Para produção de água de reuso, o Aquapolo faz uso de membranas de ultrafiltração e osmose inversa e atualmente, fornece uma vazão de 650 L/s para o Polo Petroquímico de Mauá, entretanto possui capacidade instalada de aproximadamente 1000 L/s e permite que empresas deixem de usar mensalmente volumes na ordem de 900 milhões de litros de água.

Para Carvalho (2013), embora a experiência brasileira em relação ao reuso de águas regeneradas na indústria seja limitada, existem bons exemplos de racionalização e reuso que podem ser enumerados. Na tabela 9, é possível observar alguns exemplos desse tipo de aplicação no setor em questão.

Tabela 9 - Exemplos da aplicação de água de reuso na indústria brasileira

<b>Setor Industrial</b>	<b>Local</b>	<b>Tratamento utilizado</b>	<b>Principais aplicações</b>
Petroquímico (Petrobras)	Centro de Pesquisas da Petrobras - (Cenpes); Ref. Gabriel Passos (Regap), (MG); Ref. Henrique Lage (Revap), (SP); Ref. do Paraná (Repar), (PR)	Técnicas de biorreatores a membranas (MBR) e dessalinização por eletrodialise reversa (EDR)	Própria “rede de produção”
Laticínios	Estado de Santa Catarina (SC)	Biológico, por meio de minhocas e Bactérias (Técnica chinesa)	Lavagem dos caminhões, tanques, limpeza de áreas Externas, irrigação de Jardins e descarte direto nos leitos dos rios
Sabão em pó Sintéticos	Aparecida de Goiânia (GO)	Não citado	Própria “rede de produção”
Sucro alcooleira	Ariranha (SP)	Não citado	Resfriamento, irrigação do gramado e jardins, Lavagem de áreas externas e caminhões, fertirrigação e descarte direto nos leitos dos rios.
Refrigerantes	Estado de São Paulo	Não citado	Resfriamento, irrigação do gramado e jardins, Lavagem de áreas externas e caminhões, fertirrigação e descarte direto nos leitos dos rios.
Curtumes	Diversos	Processos Oxidativos Avançados (POA's)	Uso limitado pela baixa Qualidade: adesivos de amido, descargas sanitárias e em diversos tipos de limpeza

Fonte: Carvalho, 2013.

### 2.3.2 Reuso urbano

De acordo com a Resolução CNRH n°54 (Brasil, 2005) o reuso urbano pode ser definido como a utilização de águas regeneradas para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações e combate a incêndio, dentro da área urbana. Segundo Aisse & Kiperstok (2003), os diversos usos urbanos requerem qualidade inferior à potável e dispensam o oneroso processo de tratamento ao nível mais exigente de qualidade como, a demanda hídrica destinada a bebida e a preparação de alimentos.

A exemplo de reuso urbano o município do Rio de Janeiro, produz água de reuso a partir das ETE Penha para limpeza de ruas após feiras livres, calçadas, praças e monumentos. Para tanto diariamente são transportados em média 315 m<sup>3</sup> de efluente tratados, em aproximadamente 45 caminhões-pipa, com capacidade para 7m<sup>3</sup> cada (ARAUJO et al., 2016). A ETE em questão trata seus efluentes a nível secundário e utiliza a cloração para desinfecção do efluente.

Já a ETE Alegria, situada também no município do Rio de Janeiro, segundo Araujo et al. (2016) destinava a água de reuso gerada na estação, para a construção civil. Tal estação também tratava seus efluentes a nível secundário e fazia uso da cloração como método de desinfecção. Assim, eram produzidos mensalmente, em torno de 910 mil litros, que corresponde a aproximadamente 4 a 6 caminhões por dia com capacidade de 8.000L. Esse montante então era encaminhado ao setor de construção civil e limpeza das obras do Porto Maravilha, próximo à estação, no centro da cidade.

A Estação de Água de Reuso (ETAR) Deodoro também representa um exemplo de aplicação de reuso urbano. De acordo com Pieroni (2016), a ETAR Deodoro é uma estação compacta e opera desde 2015, com capacidade de produção de 240 m<sup>3</sup>/dia e capacidade de reservação de 40m<sup>3</sup>. Atualmente, atende às demandas relacionadas a: desobstrução e limpeza preventiva de redes e ramais de esgoto; limpeza de estações elevatórias de esgoto; execução de método não destrutivo para implantação de novas redes, coletores troncos e interceptores de esgoto e limpeza de rua após a execução das obras. A ETE Sepetiba também disponibiliza água de reuso direcionados aos serviços de manutenção, operação e engenharia e, assim como na ETE Deodoro, também disponibiliza água à Comlurb para as bases que são mais próximas a esta ETE.

Além das aplicações do reuso urbano, apresentadas anteriormente, a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), no passado teve a iniciativa de desenvolver um projeto no qual parte do esgoto sanitário produzido pela Cidade Universitária, após ser devidamente tratado era destinado para irrigação de jardins e canteiros ornamentais do campus. O tratamento do efluente era realizado no Centro Experimental de Saneamento Ambiental (CESA) da UFRJ a nível secundário e posteriormente passava por um filtro terciário de areia. Ao final de um ano, constatou-se uma economia em torno 24 mil litros de água potável, o que significa uma redução de 80 mil reais por ano (REVISTA MEIO FILTRANTE, 2010). Vale ressaltar que a economia realizada neste projeto foi proporcional a dimensão de uma cidade universitária.

### 2.3.3 Reuso agrícola

No cenário nacional e mundial, a irrigação representa a prática de maior consumo de água doce. Em torno de 70% de toda a água consumida no planeta terra é utilizada para irrigação e no Brasil essa estimativa pode chegar a aproximadamente 67%, segundo o estudo realizado pela Agência Nacional de Águas, denominado Atlas Irrigação – Uso da Água na Agricultura Irrigada (ANA, 2017b). Nesse sentido, a utilização do reuso de efluentes para o setor agrícola deve ser encarada de maneira emergencial e prioritária.

A utilização de efluentes tratados pode representar um grande potencial para o uso na agricultura, uma vez que possuem características que contribuem para o cultivo agrícola, como é o caso da fertirrigação. Tais efluentes, quando utilizados na irrigação, tornam-se fonte de água e nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio. E conseqüentemente pode representar uma economia, no que tange a utilização de fertilizantes.

Além de reduzir a demanda de água para uso na irrigação, diminuir o uso de fertilizantes e com isso abrandar a possibilidade de poluição do solo e das águas por meio de produtos tóxicos reminiscentes, o reuso de efluentes na irrigação pode ser encarado também como uma maneira de pós-tratamento dos efluentes pelo sistema solo-planta.

Embora, existem diversos benefícios na implantação da técnica de reuso para o setor em questão, há de se ressaltar que é necessário ter um controle adequado da qualidade do efluente utilizado para este fim, de modo que a saúde dos trabalhadores que atuam na agricultura, da população e dos animais não sejam colocadas em risco. Além disso, o controle

da qualidade do efluente também é importante para a proteção dos solos e das águas. Nesse sentido, é essencial controlar a contaminação microbiológica e de metais pesados, salinidade, dentre outros.

Em uma escala global, as estatísticas apontam que, cerca de 500 mil hectares de terras agrícolas, em 15 países já vinham sendo irrigadas com águas residuárias (EMBRAPA, 2007). Segundo Araujo et al. (2018), regiões como, Oriente Médio, Norte da África, países mediterrâneos (Grécia, Espanha, Chipre, Palestina, Jordânia, Líbano, Marrocos e Turquia), Austrália, México, Chile e Estados Unidos já praticam a técnica de reuso. Além disso, Israel atualmente reusa 87% do esgoto tratado para irrigação, o que supera em 40% a quantidade de água necessária para agricultura no país (MARIN et al., 2017).

Diante de todas as vantagens apresentadas anteriormente, a respeito da utilização do reuso de efluentes nos diferentes setores, e da escassez hídrica que aflige inúmeras áreas brasileiras, nota-se a importância da prática e sua urgência em ser introduzida como uma ferramenta de gestão dos recursos hídricos no país. E para tanto, é importante o desenvolvimento de estudos sobre o assunto, no sentido de fomentar o aprimoramento da técnica, mas principalmente em identificar sistemas de tratamento aplicáveis à realidade brasileira e sua heterogeneidade presente entre os seus 5570 municípios.

## **2.4 Aspectos legais**

Para o desenvolvimento da prática de reuso, torna-se imperativo a existência de uma legislação adequada, onde sejam respaldadas a saúde da população e dos trabalhadores, assim como assegurar a proteção do meio ambiente, sem, entretanto, limitar e inviabilizar a técnica com procedimentos e parâmetros discrepantes com o uso pretendido.

Sabe-se que atualmente o Brasil ainda não dispõe de uma legislação nacional específica, que defina os padrões de qualidade e critérios recomendados para as diversas atividades de reuso. Assim, a prática é realizada sem um amparo legal e conseqüentemente pode colocar a saúde da população e preservação do meio ambiente, em risco. Nesse sentido, quando se deseja implantar um sistema de reuso em território brasileiro adota-se padrões internacionais, que em geral, são restritivos e elaborados de acordo com a característica do local de origem. Ainda, conta-se com orientações técnicas produzidas por instituições privadas, ou legislações estaduais e municipais. A seguir serão apresentadas de forma



Tabela 10 - Classes de Reuso e Parâmetros de acordo com a NBR 13.969 (ABNT, 1997)

Classes	Finalidade	Turbidez uT	CF NMP/100 mL	SDT mg/L	Cloro Res. mg/L	pH
1	Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes	5	200	200	0,5-1,5	6-8
2	Lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes	5	500	-	>0,5	-
3	Reuso nas descargas de vasos sanitários	10	500	-	-	-
4	Reuso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual	-	5000	-	-	-

Fonte: NBR 13.969 (ABNT, 1997).

Para Jordão & Pessoa (2017), a classificação de reuso e seus respectivos padrões de qualidade não deveriam constar na NBR 13.969(ABNT, 1997), uma vez que a norma em questão extrapolou seus objetivos.

No âmbito municipal e estadual, algumas legislações já foram implementadas. Como é o caso da Lei Estadual de São Paulo CRH 156/2013 que estabelece diretrizes para o reuso direto de água não potável proveniente de ETEs de sistemas públicos para fins urbanos; da Lei Municipal de Campinas/SPSVDS/SMS de 2014, que estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso não potável da água das ETEs de sistemas públicos do município; norma estadual da Bahia, em sua resolução do Conselho nacional de recursos hídricos(CONERH) de nº75 publicada em 2010, que estabelece procedimentos para disciplinar a prática de reuso direto não potável de água na modalidade agrícola e/ou florestal e recomenda características físicas e químicas para a água em todos os tipos de reuso para fins agrícolas e/ou florestais.

Mais recentemente o estado de São Paulo, publicou em 28 de junho de 2017, por meio da Resolução conjunta SES/SMA/SSRH Nº 01, a legislação nacional mais atual a respeito do reuso. A resolução em questão apresenta em seu artigo 5 parâmetros e padrões de qualidade e

monitoramento, e disciplina o reuso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de ETE e dá providências correlatas, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros e padrões estabelecidos pela Resolução conjunta SES/SMA/SSRH N° 01 de acordo com diferentes finalidades de reuso

Parâmetro	Unidade de medida	Público exposto	
		Uso com restrição moderada	Uso com restrição severa
Ph	-	6 a 9	6 a 9
DBO <sub>5,20</sub>	mg/L	≤10	≤30
Turbidez	UNT	≤2	-
Sólidos suspensos totais	mg/L	-	<30
Coliformes Termotolerantes	UFC/100mL	Não detectável	<200
Ovos helmintos	Ovo/L	<1	<1
Cloro residual total (CRT)	mg/L	<1	<1
Condutividade elétrica	dS/m	<0,7	<3,0
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	<450	<2.000
Cloreto	mg/L	<106*	<350
Boro	mg/L	<0,7	<2,0
Distância de Precaução	m	70 (Para poços de captação de água potável)	
Tipo de tratamento		Tratamento secundário, desinfecção e filtração. Este tratamento não poderá ter níveis mensuráveis de patógenos	Tratamento secundário, desinfecção e filtração

Fonte: Adaptado da Resolução conjunta SES/SMA/SSRH N° 01, 2017.

\*Este padrão aplica-se para o uso de irrigação. Para os demais usos, aplica-se o padrão do uso com Restrição Severa.

Bastos & Bevilacqua (2006) estudaram e propuseram diretrizes para alguns tipos de reuso durante o Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB), hoje extinto. As Tabelas 12 e 13 apresentam respectivamente as diretrizes propostas para reuso urbano e agrícola.

Tabela 12 - Diretrizes do PROSAB para uso urbano de esgoto sanitários

<b>Categoria</b>	<b>Limites recomendados</b>	<b>Observações</b>
<b>Usos irrestritos:</b> (irrigação de campos de esporte, parques, jardins cemitérios, e etc.), usos ornamentais e paisagísticos em áreas com acesso irrestrito ao público, limpeza de ruas e outros usos com exposição similar;	CF $\leq$ 200/100mL Ovos Helmintos $\leq$ 1/L	Não há restrição de DBO, DQO e SST; o efluente deve apresentar uma qualidade estética não objetável.
<b>Usos restritos:</b> (parque, canteiros de rodovias, e etc), usos ornamentais e paisagísticos em áreas com acesso controlado ou restrito ao público abatimento de poeira em estradas vicinais, usos na construção (compactação do solo, abatimento da poeira , etc.);	CF $\leq$ 10.000/100 mL Ovos helmintos $\leq$ 1/L	Não há restrição de DBO, DQO e SST; o efluente deve apresentar uma qualidade estética não objetável
<b>Uso predial:</b> (descarga de toaletes)	CF $\leq$ 1.000/100m L Ovos de helmintos $\leq$ 1/L	Para efluentes com concentração de DBO e NO <sub>3</sub> inferiores a 30 e 50 mg/L respectivamente, e potencial de oxi –redução $\geq$ 45Mv, não é esperada a geração de odores no sistema de armazenamento.

Fonte: Bastos & Bevilacqua, 2006.

Tabela 13 - Diretrizes do PROSAB para uso agrícola de esgoto sanitários

<b>Categoria</b>	<b>Limites recomendados</b>	<b>Observações</b>
<b>Irrigação irrestrita</b> (irrigação superficial ou por aspersão de qualquer cultura, inclusive culturas alimentícias consumidas cruas	CF $\leq$ 1.000/100ml Ovos de helmintos $\leq$ 1/L	CF $\leq$ 1000/100mL No caso de irrigação por gotejamento de culturas que se desenvolvem distantes do nível do solo ou técnicas hidropônicas em que o contato com a parte comestível da planta seja minimizado
<b>Irrigação restrita</b> (irrigação superficial ou por aspersão de qualquer cultura não ingerida crua; inclui culturas alimentícias e não alimentícias, forragens, pastagens e árvores; inclui também hidroponia)	CF $\leq$ 10.000/100ml Ovos de helmintos $\leq$ 1/L	CF $\leq$ 10000/100mL No caso de barreiras adicionais de proteção ao trabalhador. É facultado o uso de efluentes primários e secundários de técnicas de tratamento com reduzida capacidade de remoção de patógenos desde que associado a irrigação subsuperficial (nesse caso não se aplicam limites)

Fonte: Bastos & Bevilacqua, 2006.

Observações: CF – Média geométrica durante o período de irrigação; nematóides - Média aritmética durante o período de irrigação.

Atualmente, encontra-se em tramitação uma proposta de arcabouço normativo (ABNT) e legal (Governo Federal) para a prática de reuso de água no território nacional. O projeto é denominado INTERÁGUAS, Programa de desenvolvimento do setor da água e está sendo elaborado por uma empresa norte americana (CH2M) contratada pelo Ministério das Cidades. Para além do reuso na agricultura, a iniciativa contempla as diferentes opções de reuso nos ambientes urbanos, e deverá propor um conjunto de normas e procedimentos que regerão a prática no país tanto no setor público quanto setor privado. Na Tabela 14, pode-se observar os critérios mínimos recomendados para as modalidades de reuso direto não potável, por meio da INTERÁGUAS.

Tabela 14 - critérios mínimos recomendados para as modalidades de reuso direto não potável, por meio da INTERÁGUAS

Tratamento		Uso agrícola restrito	Uso agrícola irrestrito	Uso urbano restrito	Uso urbano irrestrito	Uso industrial	Uso Ambiental	Uso na aquicultura
		Secundário desinfecção <sup>(2)</sup>	Secundário Filtração desinfecção	Secundário + desinfecção <sup>(2)</sup>	Secundário Filtração desinfecção	Secundário + desinfecção <sup>(2)</sup>	Secundário + desinfecção <sup>(2)</sup>	Secundário + desinfecção <sup>(2)</sup>
Critérios indicadores de Patógenos	Coliformes Termotolerantes	< 10 <sup>3</sup> NMP/100 mL <sup>(2)</sup>	< 10 NMP/100 mL	< 10 <sup>3</sup> NMP/100 mL <sup>(2)</sup>	< 10 NMP/100 mL	< 10 <sup>3</sup> /100 mL <sup>(2)(6)</sup>	< 10 <sup>3</sup> /100 mL <sup>(2)</sup>	< 10 <sup>3</sup> /100 mL <sup>(2)</sup>
	Ovos helmintos	< 1 ovo de helminto/L <sup>(2)</sup>	< 1 ovo de helminto/L	< 1 ovo de helminto/L <sup>(2)</sup>	< 1 ovo de helminto/L	-	< 1 ovo de helminto/L e ausência de trematódeos intestinais	< 1 ovo de helminto/L e ausência de trematódeos intestinais
Outros Critérios	pH	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	-	-	-
	DBO	< 30 mg/L	< 15 mg/L	< 30 mg/L	< 15 mg/L	-	< 60 mg/L <sup>(7)</sup>	< 60 mg/L <sup>(7)</sup>
	Turbidez	-	≤ 5 UNT	-	< 5 UNT	-	-	-
	Cl <sub>(2)</sub> Residual	1 mg/L (min) <sup>(3)(4)</sup>	1 mg/L (min) <sup>(3)(4)</sup>	1 mg/L (min) <sup>(3)(4)</sup>	1 mg/L (min) <sup>(3)(4)</sup>	-	-	-
Monitoramento	Coliformes Termotolerantes	Mensalmente <sup>(5)</sup>	Semanalmente <sup>(5)</sup>	Mensalmente	Semanalmente	Mensalmente <sup>(2)</sup>	Mensalmente <sup>(2)</sup>	Mensalmente <sup>(2)</sup>
	Ovos helmintos	Anualmente <sup>(5)</sup>	Mensalmente <sup>(5)</sup>	Mensalmente	Mensalmente	-	Anualmente	Anualmente
	pH	Mensalmente <sup>(5)</sup>	Mensalmente <sup>(5)</sup>	Mensalmente	Mensalmente	-	-	-
	DBO	Mensalmente <sup>(5)</sup>	Mensalmente <sup>(5)</sup>	Mensalmente	Mensalmente	-	Mensalmente	Mensalmente
	Turbidez	-	Continuamente <sup>(3)(4)(5)</sup>	-	Continuamente	-	-	-
	Cl <sub>(2)</sub> Residual	Continuamente <sup>(3)(4)(5)</sup>	Continuamente <sup>(3)(4)(5)</sup>	Continuamente <sup>(3)(4)(5)</sup>	Continuamente <sup>(3)(4)</sup>	-	-	-

Fonte: Interáguas, 2018.

A partir da Tabela 14 apresentada, percebe-se que tal proposta pode ser considerada bastante restritiva e pouco ambientada com as características e condições nacionais. E caso aprovada, pode limitar e coibir a implantação de sistemas de reuso de águas servidas.

Há de se considerar que uma regulamentação ideal precisaria ser elaborada de acordo com as características brasileiras, na qual aborde padrões de qualidade, a serem obedecidos de acordo com o uso pretendido, aspectos de tratamento complementar, quando necessário, recomendações quanto ao monitoramento da água de reuso, dentre outros.

Para Jordão & Pessoa (2017), através da ausência de uma legislação que norteie e indique, padrões de qualidade para o reuso, as práticas adotadas no momento procuram considerar as diversas utilizações da água. As mais exigentes tentam guiar-se pelos padrões norte americanos e as outras, mais flexíveis, contemplam os aspectos econômicos. Deste modo, a seguir serão apresentadas as principais legislações internacionais vigentes atualmente.

A Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA), em 1992, divulgou em nível federal e estabeleceu seus *Guidelines for water reuse* em 1992, que possui sua última atualização em 2017. As recomendações da U.S.E.P.A são detalhadas para vários tipos de reuso, conforme Tabela 15, sugerindo também outros parâmetros de controle, respectivos processos de tratamento e os usos da água reutilizada. No entanto pelas particularidades, cada estado que pratica reuso deve definir regulamentação específica. Estas recomendações são consideradas mais brandas que as do estado da Califórnia, *Water Recycling criteria* (Califórnia, 2000), por exemplo. Todavia, ainda que mais brandas que as normas da Califórnia, são igualmente muito exigentes.

Tabela 15 - Critérios da U.S.E.P.A para água de reuso

Tipos de reuso	Limites recomendados
<p><b>Reuso Urbano:</b> Todos os tipos de irrigação de áreas jardinadas (campos de golfe, parques, cemitérios, lavagem de carros, descargas de banheiros, combate a incêndios, sistemas comerciais de ar condicionado, e outros usos com acesso a exposição semelhante à água</p>	<p>pH=6 a 9            DBO <math>\leq</math>10 mg/L            Turbidez <math>\leq</math> 2UT            CF- Não detectável            Cloro Residual <math>\geq</math>1 mg/L</p>
<p><b>Represas de uso recreacional:</b> Contato secundário (como pesca e remo), ou contato primário quando permitido.</p>	
<p><b>Irrigação com acesso restrito, proibido ou pouco frequente:</b> gramados, áreas florestadas.</p>	
<p><b>Represas paisagísticas:</b> em que o contato primário não é permitido</p>	
<p><b>Reuso na construção civil:</b> compactação do solo. Controle de poeira, lavagem de agregado e preparo de concreto</p>	<p>pH=6 a 9            DBO <math>\leq</math>30 mg/L            SST<math>\leq</math>30 mg/L            CF<math>\leq</math>200/100mL            Cloro Residual <math>\geq</math>1 mg/L</p>
<p><b>Reuso agrícola - Plantação de alimentos que não são processados industrialmente:</b> Irrigação de superfície ou por aspersão de quaisquer alimentos, incluindo aqueles que podem ser consumidos crus</p>	<p>pH=6 a 9            DBO <math>\leq</math>10 mg/L            Turbidez <math>\leq</math> 2UT            CF- Não detectável            Cloro Residual <math>\geq</math>1 mg/L</p>
<p><b>Reuso agrícola - plantação de alimentos processados industrialmente:</b> irrigação de superfície de pomares e vinhedos</p>	
<p><b>Reuso agrícola - Plantação de não alimentos:</b> pasto para gado, leiteiro, forragem, fibras, grãos</p>	
<p><b>Reuso industrial:</b> Torres de resfriamento            Uso em pântanos, terras úmidas, habitat de vida selvagem</p>	<p>CF<math>\leq</math>200/100mL            Cloro Residual <math>\geq</math>1 mg/L</p>
<p><b>Recarga de aquíferos</b></p>	<p>Variável em local e uso</p>

Fonte: USEPA, 2017.

A organização Mundial de Saúde (OMS) divulgou e estabeleceu seus *Guidelines for use of wastewater in agriculture and aquaculture* em Genova publicado em 1989, com suas categorias e parâmetros apresentados na Tabela 16. Esta diretriz é mais adequada a países em desenvolvimento, aceitando-se que a qualidade microbiológica de efluentes tratados usados em irrigação de culturas consumidas cruas, bem como em campos esportivos ou parques públicos, nos casos em que existem grupos de trabalhadores, ou consumidores, ou público exposto, possa ser igual ou inferior 1.000 NMP CF/100 ml, como média geométrica, e

indicam que lagoas de estabilização em série podem alcançar esta qualidade microbiológica, em regiões de clima quente.

Tabela 16 - Diretrizes do OMS para uso agrícola de efluentes tratados de ETEs (1989-2006), em relação aos aspectos microbiológicos

<b>Categoria</b>	<b>Uso agrícola</b>	<b>Público exposto</b>	<b>CF<sub>≤100mL</sub> (a)</b>	<b>Ovos de helmintos (b)</b>
A	Irrigação de culturas ingeridas cruas, campos de esporte e parques.	Trabalhadores, consumidores, público	≤1000	≤1
B	Irrigação de culturas não ingeridas cruas, como cereais, para a indústria, pastos, forragens e árvores (c).	Trabalhadores	Não se recomenda	≤1
C	Irrigação de culturas da categoria “B” se os trabalhadores e o público e não ficam expostos.	Nenhum	Não se aplica	Não se aplica

Fonte: Adaptado de WHO, 1989.

(a) Média geométrica; durante o período de irrigação ≤ 200 CF/100 mL quando se tratar de gramados públicos onde o público tem contato direto; (b) Média aritmética, espécies de nematoides específicos; (c) no caso de árvores frutíferas, a irrigação deve ser suspensa duas semanas antes da colheita.

Rezende et al. (2017), realizaram um estudo a respeito de critérios nacionais e internacionais da qualidade da água de reuso urbano para fins não potáveis e propôs critérios a serem praticados a nível nacional. Salienta-se que, para a elaboração da pesquisa, adotou-se como critério o tipo de uso baseado em restrito e irrestrito, de acordo com usos de exposição baseados no PROSAB (FLORENCIO, BASTOS E AISSE, 2006). Assim, nas Tabelas 17 e 18 podem-se observar os critérios de qualidade da água de reuso em locais com acesso irrestrito e restrito, respectivamente.

Tabela 17 - Critérios de qualidade da água de reuso em locais com acesso irrestrito

Parâmetros		DBO (mg/L)	SST (mg/L)	CTer (NMP/ 100mL)	Turb. (UT)	pH	Ovos helmintos	Óleos graxas (mg/L)	Cloro Res. (mg/L)	Cor (uC)
<b>Internacionais</b>										
Espanha <sup>1</sup>	Irrestrito		≤ 20	≤ 200	≤ 10		≤ 0,1			
Portugal <sup>2</sup>	Contato direto	≤ 20	≤ 20	≤ 240	≤ 1			< 15		
México <sup>3</sup>	Irrestrito	≤ 10	≤ 20 <sup>12</sup>	ND	≤ 2	6,0 – 9,0			> 0,1/ 0,3 <sup>11</sup>	
Japão <sup>4</sup>	Recreativo			ND	≤ 2				> 0,1/ 0,4 <sup>11</sup>	≤ 10
Grécia <sup>5</sup>	Irrestrito		≤ 20	≤ 100	≤ 1		≤ 1			
Chipre <sup>6</sup>	Irrestrito	≤ 15	≤ 15	≤ 100			AU			
Israel <sup>7</sup>	Irrestrito	≤ 15	≤ 10	≤ 12/ 2,2 <sup>10</sup>						
Arábia Saudita <sup>8</sup>	Irrestrito	≤ 10	≤ 10	≤ 2,2		6,0 – 8,4	≤ 1			
Região Mediterranea <sup>9</sup>	Irrestrito		≤ 10	≤ 200				< 0,1		
Austrália	Uso 2	≤ 20	≤ 30	≤ 10	< 5	6,5 – 8,5			0,2 - 2,0	
Estados unidos	Irrestrito	≤ 10	-	ND	≤ 2	6,0 – 9,0			≥ 1,0	
OMS				≤ 200			≤ 1,0	≤ 1		
<b>Nacionais</b>										
NBR 13.969	Classe 1			< 200	< 5	6,0 – 9,0			0,5 – 1,5	
Sinduscon-SP	Classe 3	< 20	< 20	< 200	< 5	6,0 – 9,0			≤ 1,0	< 30
PROSAB	Irrestrito			≤ 200			≤ 1			
SES/SMA/ SSRH	Classe A/B	≤ 30	≤ 30	≤ 200	≤ 5		≤ 1		0,5 – 1,0	
SABESP		< 25	< 35	< 200	< 20	6,0 – 9,0		VA	2,0 – 10	
Niterói				AU	< 5	6,0 – 9,0			0,5 – 2,0	

Fonte: Rezende et al., 2017.

Tabela 18 - Critérios de qualidade da água de reuso em locais com acesso restrito

Parâmetros		DBO (mg/L)	SST (mg/L)	CTer (NMP/ 100mL)	Turb. (UT)	pH	Ovos helminhos	Óleos graxas (mg/L)	Cloro Res. (mg/L)	Cor (uC)
<b>Internacionais</b>										
Espanha	Restrito		≤ 35	≤ 1x10 <sup>4</sup>						
Portugal	Restrito	≤ 45	≤ 45	≤ 100	≤ 2	6,0 – 9,0			> 0,1/ 1,0 <sup>10</sup>	
México	Contato indireto	≤ 30	≤ 30	≤ 1000	≤ 5			≤ 15		
Japão	Paisagístico			≤ 1000	≤ 2					≤ 40
Grécia	Restrito			≤ 1x10 <sup>4</sup>						
Chipre	Restrito	≤ 30	≤ 45	≤ 1000			AU			
Israel <sup>7</sup>	Restrito	≤ 35	≤ 20	≤ 250						
Arábia Saudita	Restrito	≤ 40	≤ 40	≤ 1000			ND			
Região Mediterrânea	Restrito		≤ 20 ≤ 150 <sup>11</sup>	≤ 1000			< 0,1			
Austrália	Uso 3		≤ 30	≤ 1000	-	6,5 – 8,5			0,2 - 2,0	
Estados unidos	Restrito	≤ 30	≤ 30	≤ 200	-	6,0 – 9,0			≥ 1,0	
OMS				≤ 200			< 1,0			
<b>Nacionais</b>										
NBR 13.969	Classe 2			< 500	< 5	-		-	> 0,5	
Sinduscon-SP	Classe 2	≤ 30	≤ 30	≤ 1000	-	6,0 – 9,0		≤ 1		
PROSAB	Restrito			≤ 1x10 <sup>4</sup>			≤ 1			

Fonte: Rezende et al., 2017.

De acordo com Rezende et al. (2017), dentre os critérios internacionais abordados, foi possível observar que as maiores variações foram encontradas para a concentração de Coliformes Termotolerantes (CTer). Para este parâmetro, podem ser observados 2 grupos principais, um de critérios mais rigorosos, e outro menos rigorosos. Para reuso irrestrito, a variação ocorre desde a ‘não detectável’ a  $\leq 2,2^{10}$  NMP/100 mL. Para o reuso restrito tem-se um grupo que adotam valores  $\leq 200$  NMP/100 mL, outro  $\leq 10^4$  NMP/100.

Ainda é possível destacar que no que diz respeito aos valores limites de CTer propostos nacionalmente, para reuso irrestrito todos recomendam concentrações iguais ou inferiores a 200 NMP/100 mL, com exceção de Niterói que determina a ausência destes microrganismos. Já dentre os critérios que abrangem atividades comparáveis à de acesso restrito verifica-se uma falta de consenso entre eles, visto que todos os 3 dados adotam valores bastante distintos:  $\leq 500$ ,  $\leq 1000$  e  $\leq 10^4$  NMP/100 mL (REZENDE ET AL., 2017).

Ao considerar que, dentre os padrões internacionais praticados, quase todos os países adotam valores menores que 200 NMP/100mL, Rezende et al. (2017) sugere que a concentração de Coliformes Termotolerantes em águas de reuso irrestrito seja de até 200 NMP/100mL, uma vez que a própria legislação nacional admite águas com esta concentração como apropriadas ao contato primário.

Já no caso de reuso restrito, assume-se que o contato com água seja ocasional ou de maneira indireta. Visando a segurança de trabalhadores e outras pessoas que possam vir a ter contato direto com a água de reuso, e considerando que Resolução CONAMA 357 (BRASIL, 2005) admite contato primário com águas classe 2 e ainda que Resolução CONAMA 274 (BRASIL, ) classifica como satisfatórias águas com CTer  $\leq 1000$  NMP/100mL, sugere-se que este deva ser o limite pra águas de reuso restrito.

Por fim Rezende et al, (2017) concluíram que os critérios de qualidade internacionais são, em geral, mais restritivos do que os adotados no Brasil, refletindo a superioridade das técnicas de tratamento de efluentes empregadas e a vasta experiência na prática do reuso pelos países citados. No entanto, há de se levar em consideração que o Brasil, trata-se de um país em desenvolvimento, com uma vasta área territorial e com inúmeras diferenças entre seus municípios, sejam elas físicas, econômicas, sociais e culturais. A realidade econômica brasileira contém desde metrópoles com uma expressiva economia até áreas periféricas, pouco desenvolvidas e com questões primitivas alarmantes. Neste sentido, é importante destacar que, diversos país internacionais contemplados nas legislações abordadas por Rezende et al, (2017) possuem uma realidade distinta da brasileira e, portanto, tal comparação

é importante apenas para lembrar o quanto é necessário em direção a consolidação do reuso no Brasil.

### 3. METODOLOGIA

A presente pesquisa tem por objetivo avaliar e comparar a utilização de dois filtros terciários, constituídos de camada simples e dupla, empregados como uma desinfecção em primeiro estágio, objetivando-se preparar o efluente para uma posterior desinfecção UV, com vistas à produção de água de reuso. Ressalta-se que foi utilizado na pesquisa em questão, os efluentes oriundos da ETE Sapucaia do Rio, instalada no município de Sapucaia no Rio de Janeiro. Para tal, a metodologia foi desenvolvida em três etapas, a saber:

Na Etapa 01, procedeu-se a avaliação do desempenho da ETE Sapucaia do Rio em função da qualidade do seu efluente secundário adotado na pesquisa. Já na Etapa 02, foi realizado o dimensionamento e implantação do aparato experimental. Por fim na Etapa 03, buscou-se avaliar qualitativamente os efluentes gerados para produção de água de reuso, a partir das tecnologias empregadas.

No total, as etapas desenvolvidas do presente trabalho tiveram aproximadamente 11 meses de duração, com início em fevereiro de 2018. Dentre os quais, de fevereiro a março foi realizada a Etapa 01 e de março a abril a Etapa 02, referente ao dimensionamento e implantação dos filtros, entretanto no que tange a implantação do reator UV a etapa em questão teve sua continuidade de agosto a setembro. Por fim os meses de abril a dezembro foram dedicados a Etapa 03.

A ETE Sapucaia do Rio (Figura 8) foi projetada para uma vazão média de 20 L/s, considerando uma população contribuinte de 7.300 habitantes e consumo per capita de água de 170 L/hab.dia, entretanto de acordo com funcionários da operação, a ETE atualmente opera com uma vazão média de 7 L/s. O fluxograma da estação de tratamento em questão (Figura 9), é composto por tratamento preliminar (gradeamento fino e desarenador de fluxo horizontal), etapa primária (reator UASB) e etapa secundária (FAS e decantação secundária). Ressalta-se ainda que atualmente o efluente tratado é encaminhado para o rio Paraíba do Sul.

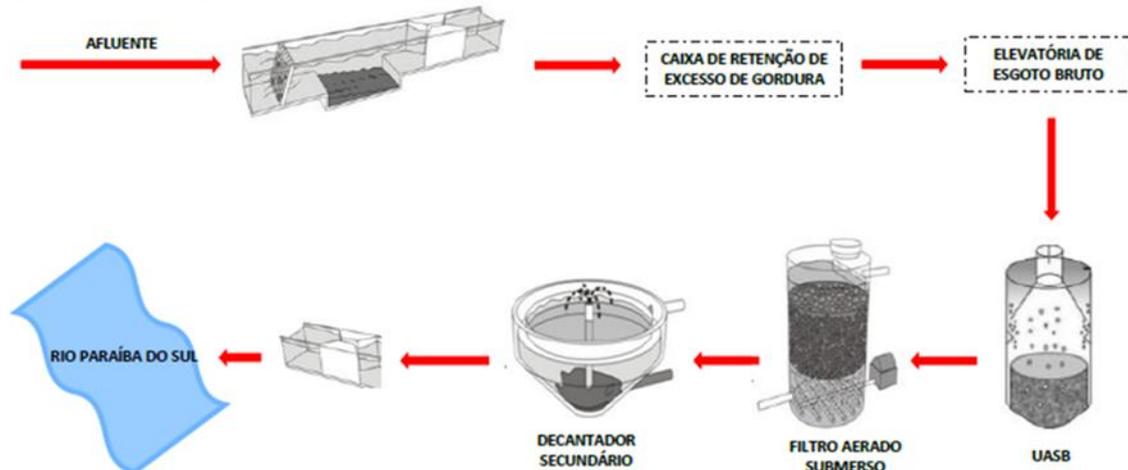
Na Tabela 19 podem ser observadas as principais dimensões das unidades de tratamento primário e secundário.

Figura 8 - Vista geral da ETE Sapucaia do Rio



Fonte: O autor, 2018.

Figura 9 - Fluxograma da ETE Sapucaia do Rio



Fonte: Manual de operação da ETE Sapucaia do Rio, 2018.

Tabela 19 - Dimensões e taxas relevantes das unidades de tratamento presentes na ETE Sapucaia do Rio

Tecnologias	Taxas	Comprimento adotado (m)	Altura	Largura	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
Reator UASB	TDH de 8 hs	7,60	5,50	7,00	53,20	292,60
faz	TAS de 62 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d	7,00	3,00	2,00	28,00	84,00
Decantador secundário	TEV de 151 m <sup>3</sup> /m.d	7,00	1,90	5,70	79,80	161,52

Fonte: O autor, 2019.

Observações: Tempo de detenção hidráulica (TDH); Taxa de Aplicação Hidráulica (TAH); e Taxa de escoamento do vertedor (TEV).

### **3.1 Etapa 01 - Avaliação do desempenho da ETE Sapucaia do Rio em função da qualidade do seu efluente tratado a nível secundário**

Sabe-se que para cada finalidade dada a água de reuso, há um padrão de qualidade adequado a ser atendido. Neste sentido, torna-se essencial identificar o desempenho da ETE Sapucaia do Rio. Para tanto, inicialmente buscou-se realizar uma verificação acerca dos dados de monitoramento, já existentes, obtidos através do Diagnóstico e Estudo de Otimização do Desempenho Operacional das ETEs – Sapucaia/RJ (2017). Assim, na presente etapa, foi utilizado a média, o mínimo e o máximo dos 103 dados referentes aos parâmetros DBO, DQO e Sólidos Suspensos Totais (SST), com o intuito de avaliar se o efluente final gerado na ETE em questão, possui qualidade adequada para ser submetido ao primeiro estágio de desinfecção, composto por filtros terciária, e posteriormente a radiação UV, para produção de água de reuso. Destaca-se que a ETE Sapucaia do Rio opera desde dezembro de 2012 e os dados operacionais utilizados são de julho de 2015 a agosto de 2017.

### **3.2 Etapa 02 - Dimensionamento e implantação do aparato experimental**

Após entendimento da qualidade do efluente final tratado na ETE Sapucaia do Rio, foi então realizado o dimensionamento e implantação de um filtro de camada simples, composta de areia, e um Filtro de camada dupla constituída de carvão ativado e areia. Salienta-se que ambos os filtros possuem fluxo descendente e foram dimensionados e implantados em escala de bancada. Posteriormente foi realizada a implantação do sistema de desinfecção, composto por radiação ultravioleta.

Embora, os filtros utilizados no presente trabalho sejam destinados à produção de água de reuso oriunda de efluentes, o dimensionamento de um filtro terciário segue os mesmos procedimentos de um filtro clássico utilizado no tratamento de água, segundo Jordão & Pessoa (2017). No entanto, de modo a propiciar o aperfeiçoamento do dimensionamento da filtração aplicada em efluentes, foi necessário buscar na literatura parâmetros e recomendações relativas à metodologia de dimensionamento dos Filtros Simples e Duplo. Desta forma, foram utilizadas as seguintes referências:

- i) A Norma Brasileira (NBR) 12.216 publicada em 1992, que trata sobre projeto de Estação de Tratamento de água para abastecimento público;
- ii) Os dados gerados em 2003 pelo Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB) que versam sobre filtração direta aplicada em pequenas comunidades, segundo Di Bernardo et al. (2003);
- iii) O livro Abastecimento de água para consumo humano coordenado por Heller & Pádua (2006); e por fim
- iv) O capítulo 29 (Conservação e Reuso da água) do livro Tratamento de efluentes domésticos de Jordão & Pessoa (2017).

Com o intuito de facilitar a implantação e operação dos filtros no Laboratório de Engenharia Sanitária (LES) da UERJ, foi determinado que ambos os filtros teriam profundidade de 100cm e seriam construídos em tubo de PVC, conforme recomendado por Gonçalves et al. (2003). Assim para identificação das alturas referentes às camadas, foi realizada uma proporção de acordo com as recomendações apresentadas por Jordão & Pessoa (2017) e pela NBR 12.216 (ABNT, 1992). Nas tabelas 20 e 21, podem-se observar os parâmetros adotados na proporção utilizada.

Tabela 20 - Parâmetros adotados nos cálculos de proporção utilizados no dimensionamento do filtro de camada única (areia)

<b>Parâmetros (cm)</b>	<b>Jordão &amp; Pessoa (2017)</b>	<b>NBR 12.216 (1992)</b>
Espessura da camada de areia	50 – 75	45
Profundidade de água sobre o leito	50 – 80	-
Borda livre	40	-

Fonte: Jordão & Pessoa (2017) e NBR 12.216 (1992).

Tabela 21 - Parâmetros adotados nos cálculos de proporção utilizados no dimensionamento do filtro de camada dupla (areia e carvão ativado)

<b>Parâmetros (cm)</b>	<b>Jordão &amp; Pessoa (2017)</b>	<b>NBR 12.216 (1992)</b>
Espessura da camada de areia	50 – 75	25
Espessura da camada de carvão ativado	60 – 90	45
Profundidade de água sobre o leito	50 – 80	-
Borda livre	40	-

Fonte: Jordão & Pessoa (2017) e NBR 12.216 (1992).

Para obtenção da vazão de operação, foi utilizada uma determinada taxa de filtração (TAS) definida a partir das taxas indicadas na literatura, apresentadas nas Tabelas 22 e 23 referentes ao Filtro Simples e duplo respectivamente. Convém destacar que a escolha da taxa

foi realizada levando-se em consideração volumes possíveis de serem transportados do município de Sapucaia até o município do Rio de Janeiro.

Tabela 22 - Taxas de filtração obtidas na literatura para filtro descendente de camada única

Fonte	Taxa de filtração (ℓ/m <sup>2</sup> . min)	
	Mínimo	Máximo
Jordão & Pessoa (2017)	80	240
Metcalf and Eddy (2015)	200	330
PROSAB (2003)	120	600
NBR 12.216 (1992)	180	-

Fonte: O autor (2019).

Tabela 23 - Taxas de filtração obtidas na literatura para filtro descendente de camada dupla

Fonte	Taxa de filtração (ℓ/m <sup>2</sup> . min)	
	Mínimo	Máximo
Jordão & Pessoa (2017)	80	240
Metcalf and Eddy (2015)	80	240
PROSAB (2003)	120	600
NBR 12.216 (1992)	360	-

Fonte: O autor (2019).

A partir da Equação 04, utilizou-se a área superficial do tubo e a taxa de filtração adotada para identificação da vazão de operação dos filtros. A partir do volume definido em função da capacidade de transporte, foi determinado o tempo de filtração em minutos.

$$TAS = \frac{Q}{A} \left( \frac{\ell}{\text{m}^2 \cdot \text{min}} \right) \quad (04)$$

Onde:

TAS → Taxa de filtração superficial;

Q → vazão em ℓ/min; e

A → Área superficial em m<sup>2</sup>.

Após dimensionamento dos filtros foi possível realizar a implantação do aparato experimental. Para tal foi necessário obter os materiais listados na Tabela 24.

Tabela 24 - Materiais utilizados na implantação dos Filtros Simples e duplo

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
Adesivo plástico para PVC	75	Kg
Tubo PVC	200	Cm
Mangueira	15	M
CAP de 100 mm	2	Um
CAP de 75 mm	2	Um
Mão francesa	4	un
Parafuso	8	un
Durepox	250	g
Bidin	30	cm <sup>2</sup>

Fonte: O autor (2019).

Ressalta-se que os materiais utilizados como meio filtrante e camadas suporte foram doados. A brita 0 e a areia foram doados pelo Centro Experimental de Saneamento Ambiental da UFRJ (CESA/UFRJ), que podem ser observadas, nas Figuras 10 e 11. Já o carvão ativado foi ofertado pela TECMA Tecnologia em meio ambiente, conforme exibido na Figura 12.

Figura 10 - Fotografia da brita 0 utilizada nos Filtros Simples e duplo



Figura 11 - Fotografia da areia utilizada no Filtro Simples e duplo



Fonte: O autor, 2019.

Figura 12 - Fotografia do carvão ativado utilizado no filtro de camada dupla



Fonte: O autor, 2019.

Assim, posteriormente à obtenção dos materiais necessários foi possível iniciar a implantação do aparato experimental. Inicialmente, para instalação do fundo falso foi utilizado um CAP com diâmetro inferior ao do tubo PVC. E, de modo a possibilitar a passagem dos fluidos, foram efetivados furos no CAP por meio de uma furadeira, para que os furos fossem espaçalizados de maneira uniforme. Posteriormente, foi colada uma manta Bidim no CAP, com o objetivo de evitar que a areia fosse perdida durante a retrolavagem do filtro. O CAP então já furado e com o Bidim anexado, foi introduzido e colado no tubo de PVC, a uma profundidade de 10 cm da base. Na Figura 13, pode-se observar uma fotografia realizada durante a execução de tais procedimentos.

Figura 13 - Fotografia realizada durante o procedimento de instalação do fundo falso



Fonte: O autor, 2019.

Após a instalação do fundo falso, foi anexado um CAP, esse sim com diâmetro referente ao tubo PVC para fechamento da unidade. Assim, foram colocados dois bocais para saída dos fluidos, dos quais, um deles foi implantado no centro da base do fundo do tubo, com o intuito de possibilitar a saída do efluente. Já o segundo bocal foi instalado na altura da borda livre, para possibilitar a saída do líquido após retrolavagem. Por fim, os filtros já montados foram fixados na parede, conforme apresentado na Figura 14, por meio de duas mãos francesas.

Para passagem do efluente nos filtros foi necessário utilizar uma bomba, capaz de bombear o fluido das bombonas, situadas no piso do laboratório, até a parte superior dos Filtros Simples e Duplo. Para tal foi utilizado uma bomba dosadora, conforme apresentado na Figura 15, de voltagem de 220VAC, modelo DMC 100 e da marca MS TECNOPON Instrumentação. Destaca-se ainda que toda a implantação dos filtros foi realizada gentilmente com o auxílio do técnico Paulo Cesar, presente nas fotografias apresentadas pelas Figuras 13 e 14.

Figura 14 - Fixação do filtro terciário na parede



Fonte: O autor, 2019.

Figura 15 - Fotografia da bomba dosadora



Fonte: O autor, 2019.

No que tange a desinfecção, foi utilizada a metodologia apresentada por Gonçalves et al. (2003), empregada na Equação 05, com a finalidade de identificar o tempo de contato requerido para a inativação dos organismos patogênicos. Para tal foi necessário calcular a intensidade média do reator, por meio da Equação 06. Além disso, foi utilizada a dose de 6,6mWs /cm<sup>2</sup> indicada por Gonçalves et al. (2003).

$$t = \frac{D}{I} \quad (05)$$

Onde:

t → Tempo dados em segundos;

D → Dose dada em mWs /cm<sup>2</sup>; e

I → Intensidade UV em mW /cm<sup>2</sup>;

$$Im = \frac{I_o}{\alpha \cdot L} (1 - e^{-\alpha L}) \quad (06)$$

Onde:

Im → Intensidade média;

I<sub>o</sub> → intensidade UV aplicada no meio líquido;

α → Coeficiente de absorvância do meio líquido; e

L → Caminho ótico no meio líquido.

### 3.3 Etapa 03 - Avaliação qualitativa dos efluentes gerados para a produção de água de reuso

Por fim, foi realizada uma avaliação qualitativa dos efluentes oriundos dos Filtros Simples e duplo, denominada Fase I e filtros terciários seguidos de desinfecção via radiação UV, denominada Fase II. Destaca-se que as fases foram realizadas em ordens temporais diferentes, uma vez que inicialmente foi desenvolvida e discutida a Fase I e posteriormente a Fase II. Há de se ressaltar ainda que, o objetivo do presente trabalho foi baseado na avaliação do uso dos filtros terciários utilizados como pré-tratamento a desinfecção, ainda é possível caracterizar esta Fase como uma desinfecção em primeiro estágio, e nesse sentido a Fase I, foi destinada a responder tal item. Já a Fase II foi elaborada com o intuito de complementar os resultados encontrados na Fase I e, por conseguinte o aprofundamento desta fase é indicado para um trabalho posterior.

Em ambas as fases foram determinados os parâmetros Coliformes Termotolerantes, Carbono Orgânico Dissolvido – COD, turbidez, temperatura e pH, no sentido de se avaliar a qualidade final do efluente gerado para potencial utilização como água de reuso. E para tanto, os ensaios de Coliformes Termotolerantes foram efetivados por meio da técnica de tubos múltiplos (NMP) 9222E, a turbidez foi realizada através do método 2230B, COD a partir do 5310A, temperatura pelo método 2550 e por fim, pH pelo método 4500H+B, todos descritos por AWWA (APHA, 2012).

Assim, de modo a possibilitar a avaliação qualitativa da água de reuso gerada a partir dos Filtros Simples e Duplo, foi necessário realizar o monitoramento complementar do efluente oriundo da ETE Sapucaia do Rio, denominado afluente as Fases I e II. Para tal, foram realizados também os ensaios de Coliformes Termotolerantes, Turbidez, COD, temperatura e pH. Para isso, ao chegar no laboratório, uma parte do efluente era reservado para os ensaios em questão, sem passar pela filtração e Radiação UV, de modo a permitir posteriormente a comparação entre os resultados dos ensaios realizados antes e depois das Fases I e II.

Para uma análise comparativa entre os desempenhos dos dois filtros (simples e duplo) foi necessária a realização de um teste estatístico que permitisse a avaliação das existências de diferenças significativas entre eles. Nesse sentido foi adotado o teste *t-student*, utilizado quando deseja-se testar hipóteses sobre os parâmetros de uma população (VON SPERLING, 2014). Salienta-se que o principal item na realização de um teste de hipóteses é o estabelecimento da hipótese nula ( $H_0$ ) e da hipótese alternativa ( $H_a$ ). A primeira relaciona-se a teoria contraditória em que se apoia, ao passo que a segunda, usualmente relaciona-se a teoria em que se pretende dar suporte. Isto é, o teste em questão é baseado no método análogo ao da prova por exclusão, de modo a provar que  $H_0$  é falso. Para tanto, inicialmente foi calculada a variância, a partir da Equação 07 e a variância combinada, através da Equação 08, entre os resultados encontrados relativos aos Filtros Simples e Duplo.

$$s^2 = \frac{\sum X^2}{N} - \bar{X}^2 \quad (07)$$

Onde:

$S^2 \rightarrow$  Variância;

$N \rightarrow$  Quantidade de dados; e

$\bar{X} \rightarrow$  média.

$$S_{X^1-X^2} = \sqrt{\left(\frac{N_1 S_1^2 + N_2 S_2^2}{N_1 + N_2 - 2}\right) \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 * N_2}\right)} \quad (08)$$

Onde:

$S_{x1-x2}$  → Variância combinada;

$S_1^2$  → Variância dos respectivos dados do Filtro Simples;

$S_2^2$  → Variância dos respectivos dados do Filtro Duplo;

$N_1$  → Quantidade de dados do Filtro Simples; e

$N_2$  → Quantidade de dados do Filtro Duplo.

Posteriormente foi calculado o valor do teste  $t$  de *student*, por meio da Equação 09, e encontrado o grau de liberdade (G) por meio da Equação 10. Para em seguida identificar o valor do  $t$  crítico através da tabela referente ao teste, que pode ser consultada no anexo do presente trabalho.

$$t = \frac{\bar{X}^1 - \bar{X}^2}{S_{X^1-X^2}} \quad (09)$$

$$G = N_1 + N_2 - 2 \quad (10)$$

Visto que a turbidez é um importante parâmetro de monitoramento do efluente a ser submetido a desinfecção por Reator UV e diante da importância do monitoramento do parâmetro Coliformes Termotolerantes, na produção de águas de reuso, foram utilizados para comparação os limites recomendados pelas legislações abordadas na revisão bibliográfica. Por fim, através dos resultados encontrados na etapa em questão, discutiram-se ainda propostas a respeito de destinações adequadas, de acordo com o potencial de produção, qualidade final do efluente gerado e legislações vigentes.

No que tange a rotina de operação dos Filtros Simples e Duplo, os efluentes eram transportados da ETE Sapucaia do Rio até o Laboratório de Engenharia Sanitária da UERJ (LES), reservados por meio de bombonas de 20, 30 e 10 L. Salienta-se que todo o processo contendo transporte, operação dos filtros e reator UV e ensaios pertinentes ocorriam no mesmo dia, uma vez que para o ensaio de Coliformes Termotolerantes não é permitido sua realização após 24 horas, contadas a partir de sua retirada na ETE. Além disso, havia também a necessidade dos efluentes estarem constantemente refrigerados.

Ao chegar no LES, inicialmente aproximadamente 38L desse efluente eram bombeados até o Filtro Duplo. Após filtração de cerca de 19L no filtro de camada dupla, eram retiradas amostras para os ensaios e 1 L era armazenado para posteriormente ser submetido ao Reator Ultravioleta. Enquanto o restante do efluente continuava a passar pelo Filtro Duplo, os ensaios de Turbidez, pH e temperatura eram realizados e duas amostras eram reservadas aos ensaios de COD e Coliformes Termotolerantes.

Posteriormente a passagem do efluente no Filtro Duplo, iniciava-se a filtração de areia, através da passagem de 20 L, onde mesmos procedimentos eram repetidos. Ressalta-se que toda a passagem do efluente era cronometrada, de modo, a permitir o acompanhamento do funcionamento da bomba, através da verificação das vazões. Após filtrar 10L, eram retiradas as amostras correspondentes aos ensaios necessários, além de reservar 1 L desse efluente filtrado, para que o mesmo fosse submetido a Radiação Ultravioleta.

No que tange a limpeza do aparato experimental, durante a operação dos filtros foi observado que, ao fazer uso da unidade em questão pela terceira vez consecutiva, o desempenho, no que diz respeito ao parâmetro turbidez, era reduzido e conseqüentemente ocorria o fenômeno denominado como traspasse. Com relação ao tempo de retrolavagem, para Melo (2014), em condições favoráveis, uma lavagem bastante completa pode ser realizada em três ou cinco minutos, mas em geral o tempo de lavagem varia de 7 a 10 minutos. No entanto, através da experiência adquirida durante a operação dos filtros no presente trabalho, foi observado que para uma eficiente limpeza, era necessário realizar a retrolavagem durante 15 minutos, onde tal procedimento era repetido em média três vezes, ou até o fluido apresentar aparência clarificada. Uma vez que foi adotado fluxo descendente para os Filtros Simples e Duplo, a retrolavagem ocorria a partir da introdução de água pela parte inferior das unidades de filtração.

Com os ensaios concluídos, referentes aos efluentes filtrados era então inicializados o processo de desinfecção via Radiação Ultravioleta. Para tanto o volume reservado anteriormente, oriundo da filtração simples e dupla eram introduzidos no bocal de entrada do Reator UV. Após término do tempo de contato previsto, o respectivo efluente era então retirado e uma parte reservada para ser encaminhado ao ensaio de Coliformes Termotolerantes realizados em um laboratório particular.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 Etapa 01 - Avaliação do desempenho da ETE Sapucaia do Rio em função da qualidade do seu efluente tratado a nível secundário**

Em relação ao monitoramento operacional realizado na ETE ao longo de dois anos, puderam-se consolidar os dados operacionais existentes referentes aos parâmetros DBO, DQO e Sólidos e Suspensão Totais (SST), conforme pode ser observado na Tabela 25. Ressalta-se que os dados de monitoramento foram extraídos do Diagnóstico e Estudo de Otimização do Desempenho Operacional das ETEs – Sapucaia/RJ (2017) oriundo de uma consultoria especializada realizada em relação à operação da ETE Sapucaia do Rio.

Tabela 25 - Dados estatísticos referentes aos parâmetros DBO, DQO e Sólidos Suspensos totais da ETE Sapucaia do Rio

Quantidade de dados	Parâmetros	Estatística	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)
103	DBO	Média	353	22	93
	DBO	Mínimo	91	5	78
	DBO	Máximo	1380	76	99
103	DQO	Média	727	95	86
	DQO	Mínimo	172	33	58
	DQO	Máximo	2742	241	100
103	SST	Média	252	31	84
	SST	Mínimo	6	1	14
	SST	Máximo	2420	178	100

Fonte: Santos & Bila, 2017.

Sabe-se que a qualidade do efluente tratado a nível secundário influi de forma direta na qualidade final da água de reuso produzida, assim como pode tornar mais simples e econômico o tratamento terciário. De acordo com a Tabela 25, pode-se constatar que a ETE Sapucaia do Rio, possui uma elevada eficiência no que tange a redução de matéria orgânica e sólidos suspensos totais. A seguir, os dados de monitoramento referentes aos parâmetros abordados nesta tapa, serão discutidos de forma mais detalhada.

A partir do Diagnóstico e Estudo de Otimização do Desempenho Operacional das ETEs – Sapucaia/RJ (2017), observou-se que a unidade de tratamento da ETE Sapucaia do Rio apresenta bom desempenho, com concentração média de DBO no efluente de 22 mg/L e eficiência média de remoção de 93%, como pode ser visualizado na Figura 16. Salienta-se que, no período de monitoramento analisado, entre 90 a 95 % das amostras de efluente apresentaram valores de DBO inferiores ao limite máximo estabelecido pela DZ-215.R-4 (2007), no que diz respeito a concentração efluente, cujo padrão de lançamento é de 40 mg/L, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 16 - Série temporal de eficiência de redução de DBO na ETE Sapucaia do Rio

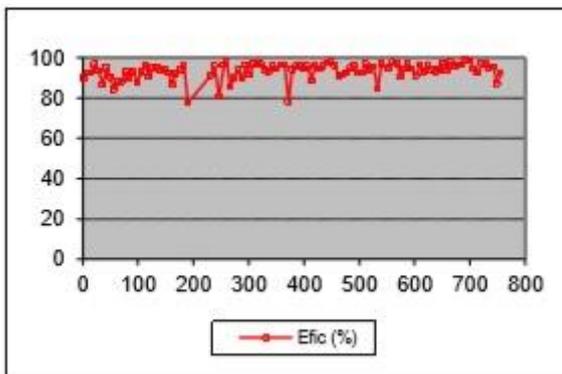
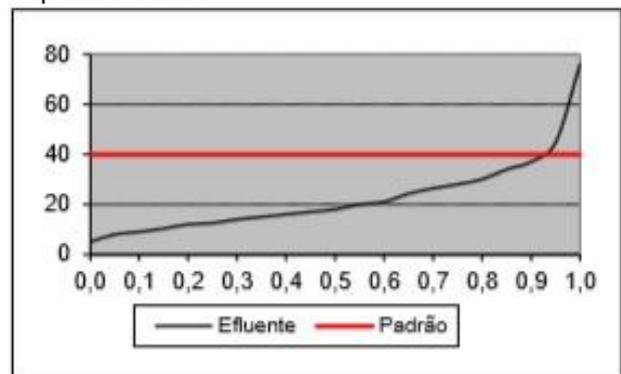


Figura 17 - Distribuição de Frequência da concentração efluente x padrão – DBO, na ETE Sapucaia do Rio



Fonte: Santos & Bila, 2017.

Com relação ao parâmetro DQO, de acordo com o documento de referência em questão, observou-se uma concentração média de DQO no efluente de 95 mg/L e eficiência média de remoção de 86%, conforme pode ser visualizado na Figura 18. Destaca-se que, tal parâmetro não apresenta limites máximos definidos nas legislações pertinentes, DZ 215 (2007) e NT 202 (1986), para esgoto sanitário no Rio de Janeiro, entretanto é possível interpretar que acima de 95% das amostras apresentaram concentração de DQO inferior a 180 mg/L, como pode ser observado na Figura 19, limite fixado para o estado de Minas Gerais, de acordo com a Deliberação Conjunta COPAM/CERH 01/2008).

Figura 18 - Série temporal de eficiência de redução de DQO na ETE Sapucaia do Rio

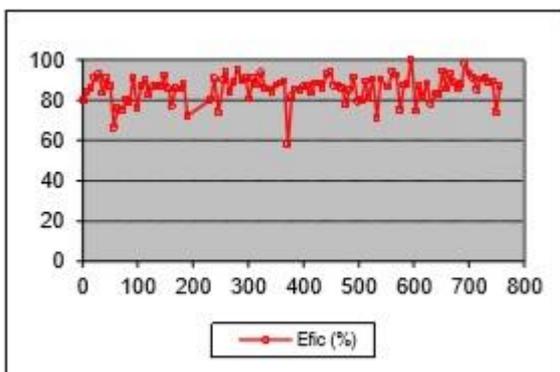
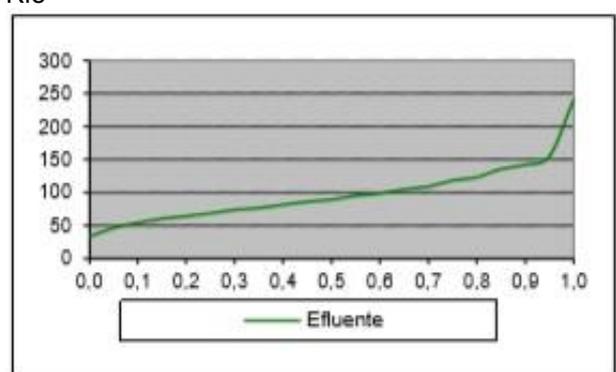


Figura 19 - Distribuição de Frequência da concentração efluente DQO, na ETE Sapucaia do Rio



Fonte: Santos & Bila, 2017.

Por fim, no que tange o parâmetro Sólidos Suspensos Totais foi encontrado o valor médio no efluente de 31 mg/L, a partir do Diagnóstico e Estudo de Otimização do Desempenho Operacional das ETEs – Sapucaia/RJ (2017). É possível afirmar que, tal valor encontrado é inferior ao limite de 40 mg/L, estabelecido pela DZ-215.R-4 (2007). Além disso, de acordo com os resultados apresentados no documento de referência em questão, pode-se constatar uma eficiência de redução média de 84%, como pode ser observado na Figura 20, e que 25% dos dados do período de monitoramento excederam o padrão limite para esse parâmetro, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 20 - Série temporal de eficiência de redução de SST na ETE Sapucaia do Rio

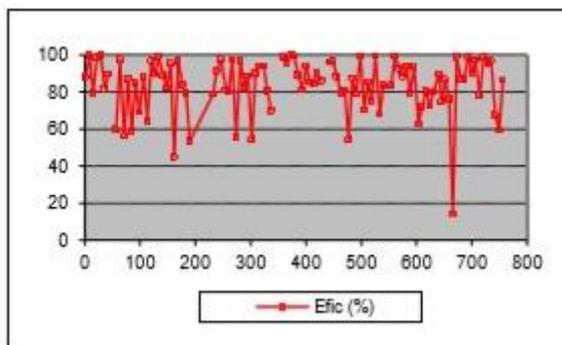
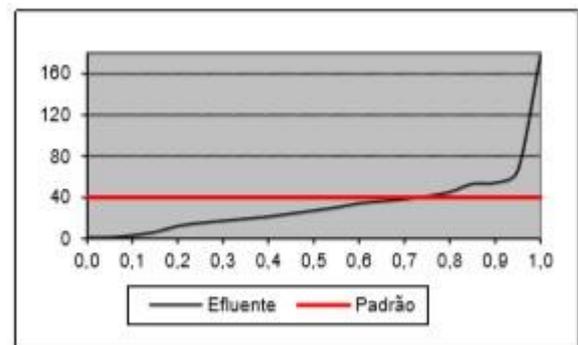


Figura 21 - Distribuição de Frequência da concentração efluente x padrão – SST, na ETE Sapucaia do Rio



Fonte: Santos & Bila, 2017.

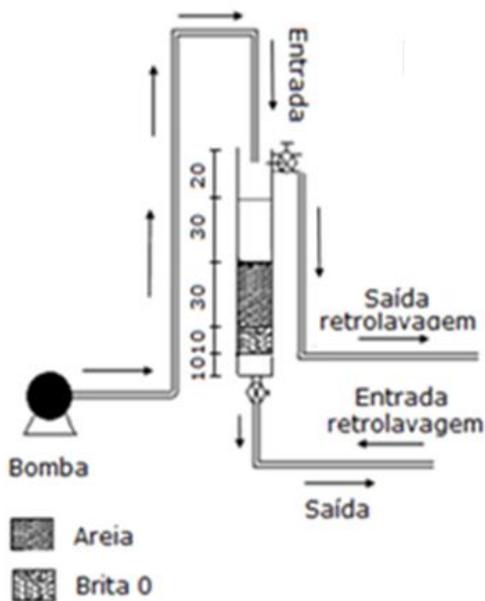
Assim, a partir dos dados de monitoramento extraídos do Diagnóstico e Estudo de Otimização do Desempenho Operacional das ETEs – Sapucaia/RJ (2017), expostos na presente etapa, pode-se avaliar que a ETE Sapucaia do Rio apresenta bom desempenho e oferece uma efluente de qualidade apto a ser submetido ao primeiro estágio de desinfecção, composto por Filtração terciária, e posteriormente a desinfecção via radiação UV.

#### 4.2 Etapa 02 - Dimensionamento e implantação do aparato experimental

Após pesquisa e estudo realizado acerca das taxas de filtração, presentes em diversas literaturas, conforme apresentado anteriormente na metodologia, foram adotados os valores de 80 e 160 L/min.m<sup>2</sup> para os Filtros Simples e Duplo, respectivamente, ambas sugeridas por Jordão & Pessoa (2017). Posteriormente, com base nas taxas de filtração adotadas, foi realizado o restante do dimensionamento dos filtros com o apoio das demais literaturas

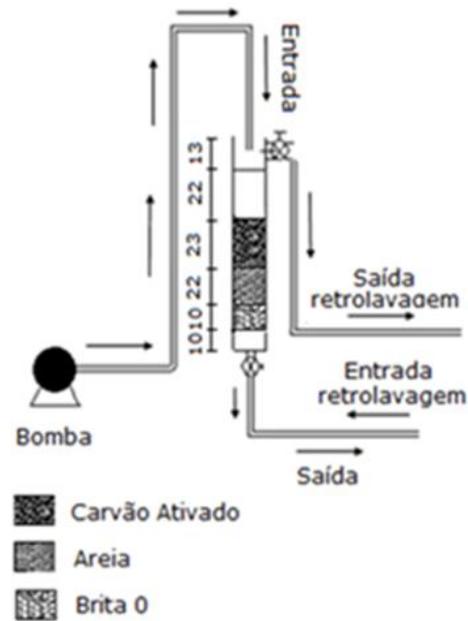
mencionadas anteriormente na metodologia. Assim, os filtros apresentaram valores de dimensionamento exibidos nas Figuras 22 e 23 respectivamente e especificações apresentadas na Tabela 26. Destaca-se que neste item são apresentados somente os resultados oriundos da presente etapa, isto é, dimensionamento e implantação do aparato experimental, conforme metodologia adotada e detalhada no item 3.2 do presente trabalho.

Figura 22 - Representação do filtro de bancada de camada única (areia)



Fonte: O autor (2019)

Figura 23 - Representação do filtro de bancada de camada dupla



Fonte: O autor (2019)

Tabela 26 - Valores obtidos do dimensionamento dos filtros terciários

Especificações	Filtro de camada única (areia)	Filtro de camada dupla (areia + carvão ativado)
Taxa de filtração (ℓ/min)	80	160
Diâmetro (cm)	10	10
Borda livre (cm)	19	14
Profundidade de água sobre o leito (cm)	31	22
Altura da camada de areia (cm)	30	21
Altura da camada de carvão ativado (cm)	-	23
Meio suporte Camada de brita 0 (cm)	10	10
Fundo falso (cm)	10	10
Altura total (cm)	100	100

Fonte: O autor (2019).

Em seguida foi realizada a implantação dos filtros terciários, conforme pode ser observado na Figura 24. Na Figura 25, por sua vez, é apresentada a operação dos filtros.

Figura 24 - Fotografia da Implantação dos filtros terciários em escala de bancada



Fonte: O autor, 2019.

Figura 25 - Fotografia da operação do Filtro Duplo



Fonte: O autor, 2019.

Para desinfecção foi utilizado um reator ultravioleta, conforme exibido na Figura 26, com especificações descritas na Tabela 27. Tais parâmetros foram utilizados no cálculo da

intensidade média e o tempo de contato do reator, de acordo com a metodologia segundo (GONÇALVES ET AL., 2003), apresentada anteriormente. Salienta-se que, dentre outros parâmetros, a intensidade média é calculada em função da absorbância, e esta varia de acordo com cada amostra. Assim, na Tabela 28 são apresentados os parâmetros calculados e utilizados na operação do reator UV.

Figura 26 – Foto do Reator UV



Fonte: O autor, 2019.

Tabela 27 - Especificações do Reator de radiação ultravioleta

Parâmetros	Especificações	Unidade
Comprimento de onda	254	$\lambda$
Caminho óptico (L)	1,65	Cm
Coefficiente de Absorbância ( $\alpha$ )	0,2303	-
Intensidade UV aplicada em um meio líquido (I)	$148 \times 10^{-7}$	w/cm <sup>2</sup>

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 28 - Condições experimentais dos ensaios no Reator de radiação ultravioleta

Parâmetros	Ensaio	Efluente do Filtro de camada única (areia)	Efluente do Filtro de camada dupla (areia + carvão ativado)
Absorbância (A)	12	0,365	0,272
	14	0,205	1,118
	15	0,289	0,225
Coeficiente de absorvância ( $\alpha$ )	12	0,063	0,084
	14	0,047	0,027
	15	0,067	0,052
Intensidade média (Im)	12	$1,38 \times 10^{-5}$	$1,40 \times 10^{-5}$
	14	$1,42 \times 10^{-5}$	$1,44 \times 10^{-5}$
	15	$1,40 \times 10^{-5}$	$1,41 \times 10^{-5}$
Tempo de contato (t)	12	7 min e 58 seg	7 min e 49 seg
	14	7 min e 43 seg	7 min e 36 seg
	15	7 min e 50 seg	7 min e 45 seg

Fonte: O autor, 2019.

#### 4.3 Etapa 03 - Avaliação qualitativa dos efluentes gerados para a produção de água de reuso

Por fim, a presente etapa foi desenvolvida em duas fases, com análise qualitativa da água de reuso produzida. Na Fase I, a análise em questão foi realizada a partir dos Filtros Simples e duplo, caracterizados como uma desinfecção em primeiro estágio. Há e se ressaltar novamente que a Fase I abordou o objetivo principal do trabalho, isto é, avaliar a aplicabilidade da filtração terciária de efluente secundário, para seu condicionamento à desinfecção por radiação ultravioleta, para produção de água de reuso.

Já na Fase II, além dos filtros foi utilizado o reator UV, como método de desinfecção. Destaca-se que para tal, foi necessário realizar o monitoramento operacional complementar da ETE Sapucaia do Rio, de modo a possibilitar a comparação entre o afluente, isto é, o esgoto tratado a nível secundário pela ETE em questão, e a água de reuso gerada. É importante destacar que esta Fase foi elaborada com o intuito de complementar os resultados encontrados na Fase I, e neste sentido foram realizadas somente três amostras de efluentes expostos a radiação UV. Assim, indica-se que para um maior aprofundamento a respeito da desinfecção de efluentes realizada a partir da radiação ultravioleta, sugere-se a continuidade em um trabalho futuro. Na Tabela 29, podem-se observar os resultados obtidos de Coliformes Termotolerantes, turbidez, COD, temperatura e pH do afluente.

Tabela 29 - Monitoramento complementar do efluente oriundo da ETE Sapucaia do Rio

<b>Amostra</b>	<b>Coliformes Termotolerantes (NMP/100ml)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>COD (mg/L)</b>	<b>pH</b>
1	2,8x10 <sup>5</sup>	18,60	5,07	7,11
2	9,2x10 <sup>5</sup>	22,00	10,45	7,10
3	9,2x10 <sup>5</sup>	29,50	13,68	7,07
4	1,6x10 <sup>6</sup>	13,50	18,58	6,85
5	1,6x10 <sup>6</sup>	31,00	15,41	6,93
6	9,2x10 <sup>5</sup>	64,00	10,18	7,20
7	1,6x10 <sup>5</sup>	74,00	13,12	7,26
8	9,2x10 <sup>4</sup>	56,00	13,14	7,24
9	9,2x10 <sup>4</sup>	20,00	10,80	7,03
10	1,6x10 <sup>5</sup>	75,00	19,04	7,15
11	1,6x10 <sup>5</sup>	42,00	12,51	7,59
12	5,4x10 <sup>4</sup>	87,00	14,56	7,51
13	2,4 x10 <sup>5</sup>	46,00	16,73	7,38
14	9,2x10 <sup>4</sup>	29,00	8,05	7,54
15	2,3x10 <sup>3</sup>	60,00	13,97	7,26

Fonte: O autor (2019).

Na Tabela 30 são apresentados os resultados da operação da Fase I, referente ao Filtro Simples. Já na Tabela 31, é possível analisar os resultados obtidos referentes à operação do Filtro Duplo.

Tabela 30 - Resultados do efluente do Filtro Simples de areia

<b>Amostra</b>	<b>Coliformes (NMP/100MI)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>COD (mg/L)</b>	<b>pH</b>
1	9,2x10 <sup>4</sup>	5,90	5,05	7,60
2	1,6x10 <sup>5</sup>	6,70	5,99	7,14
3	1,6x10 <sup>5</sup>	1,80	14,02	7,20
4	1,3x10 <sup>5</sup>	5,30	22,08	7,06
5	3,5x10 <sup>4</sup>	3,10	12,46	7,08
6	1,6x10 <sup>5</sup>	3,30	10,60	7,13
7	1,6x10 <sup>5</sup>	15,90	16,56	7,50
8	5,4x10 <sup>4</sup>	26,00	13,47	7,35
9	5,4x10 <sup>4</sup>	5,10	10,44	7,06
10	2,4x10 <sup>4</sup>	27,00	21,51	7,03
11	5,4x10 <sup>4</sup>	4,60	11,69	7,22
12	2,4x10 <sup>4</sup>	9,10	14,68	7,66
13	1,3x10 <sup>5</sup>	4,30	16,97	7,48
14	1,7x10 <sup>4</sup>	6,70	12,18	7,37
15	230	8,60	10,80	7,35

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 31 - Resultados do efluente do Filtro Duplo

<b>Amostra</b>	<b>Coliformes (NMP/100MI)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>COD (mg/L)</b>	<b>pH</b>
1	3,5x10 <sup>4</sup>	1,66	<LQ*	7,88
2	5,4x10 <sup>4</sup>	4,70	12,65	7,17
3	1,6x10 <sup>5</sup>	2,00	10,37	7,07
4	4,9x10 <sup>4</sup>	0,99	23,68	6,98
5	1,4x10 <sup>5</sup>	4,00	15,79	7,02
6	2,8x10 <sup>4</sup>	2,10	7,32	7,22
7	1,6x10 <sup>5</sup>	28,00	12,52	7,58
8	3,5 x10 <sup>4</sup>	5,30	11,29	7,27
9	3,5x10 <sup>4</sup>	3,00	11,85	7,04
10	2,2x10 <sup>4</sup>	10,80	16,76	7,12
11	2,4x10 <sup>4</sup>	3,50	19,26	7,47
12	3,3x10 <sup>3</sup>	1,03	13,02	7,52
13	4,9x10 <sup>4</sup>	4,60	13,88	7,38
14	1,3x10 <sup>4</sup>	4,50	9,47	7,35
15	-	3,20	10,25	7,36

Fonte: O autor, 2019.

\*LQ – limite de quantificação

Com relação à temperatura e ao pH, os resultados encontrados, tanto no afluente como nos Filtros Simples e Duplo, apresentaram valores esperados e sem grandes variações. Sobre o parâmetro COD, os filtros não apresentaram bom desempenho. Inclusive em algumas campanhas observa-se até mesmo uma elevação da concentração no efluente final, que talvez possa até ter ocorrido em função de algum problema na retrolavagem. Esse resultado já era de se esperar, já que a filtração terciária é um processo físico que não tem o objetivo de remover matéria orgânica dissolvida. É importante destacar que parâmetros indicadores de matéria orgânica até são indicados em legislações tanto para lançamento de efluentes como para reuso. No entanto, esse é um parâmetro a ser analisado na etapa secundária já que, conforme citado anteriormente, a etapa avançada não tem esse objetivo.

Dessa forma, a seguir será realizada uma análise de estatística descritiva somente para os parâmetros Turbidez e Coliformes Termotolerantes, tanto para o Filtro Simples como para o Filtro Duplo. Nessa ordem, essa análise será realizada primeiramente para o Filtro Simples, para o parâmetro Turbidez e em seguida, para o parâmetro Coliformes Termotolerantes. Posteriormente, a análise será realizada para o Filtro Duplo, também para o parâmetro Turbidez seguido do parâmetro Coliformes Termotolerantes.

#### 4.3.1 Estatística Descritiva – Filtro Simples

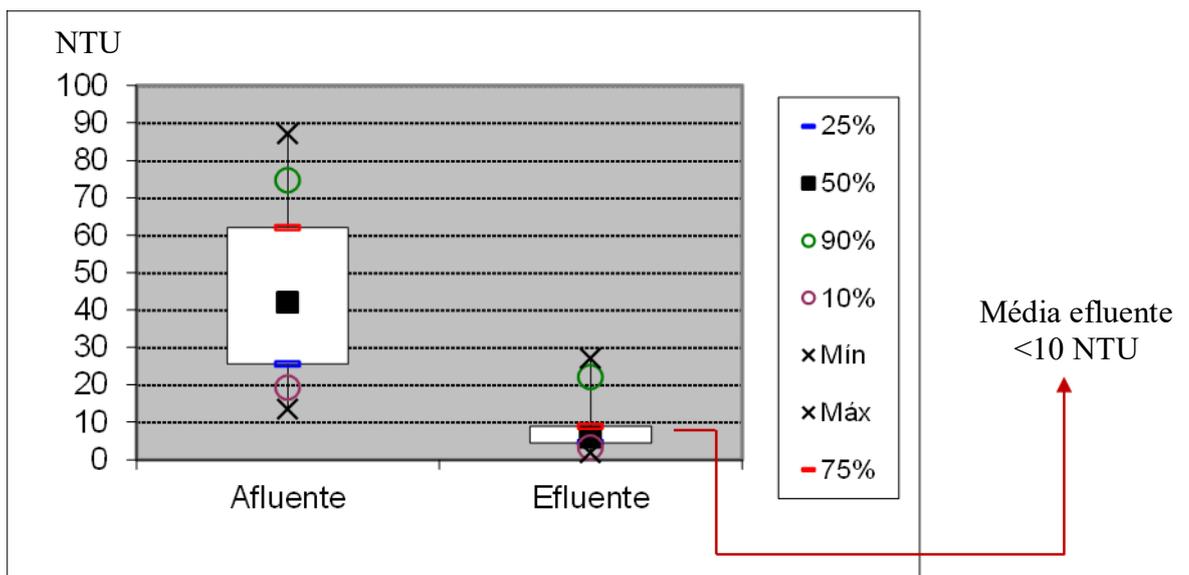
Na Tabela 32, observam-se os resultados de estatística descritiva para o parâmetro turbidez afluente e efluente do Filtro Simples. De maneira análoga, na Figura 27 é possível observar o gráfico BoxPlot para a turbidez e na Figura 28, a distribuição de frequência.

Tabela 32 - Estatística descritiva da turbidez afluente e efluente - Filtro Simples

Turbidez (NTU)					
Ponto	Número de amostras	Média	Mín	Máx	Coefficiente de variância
Afluente	15	45	13,5	87	0,53
Efluente	15	9	1,8	27	0,89

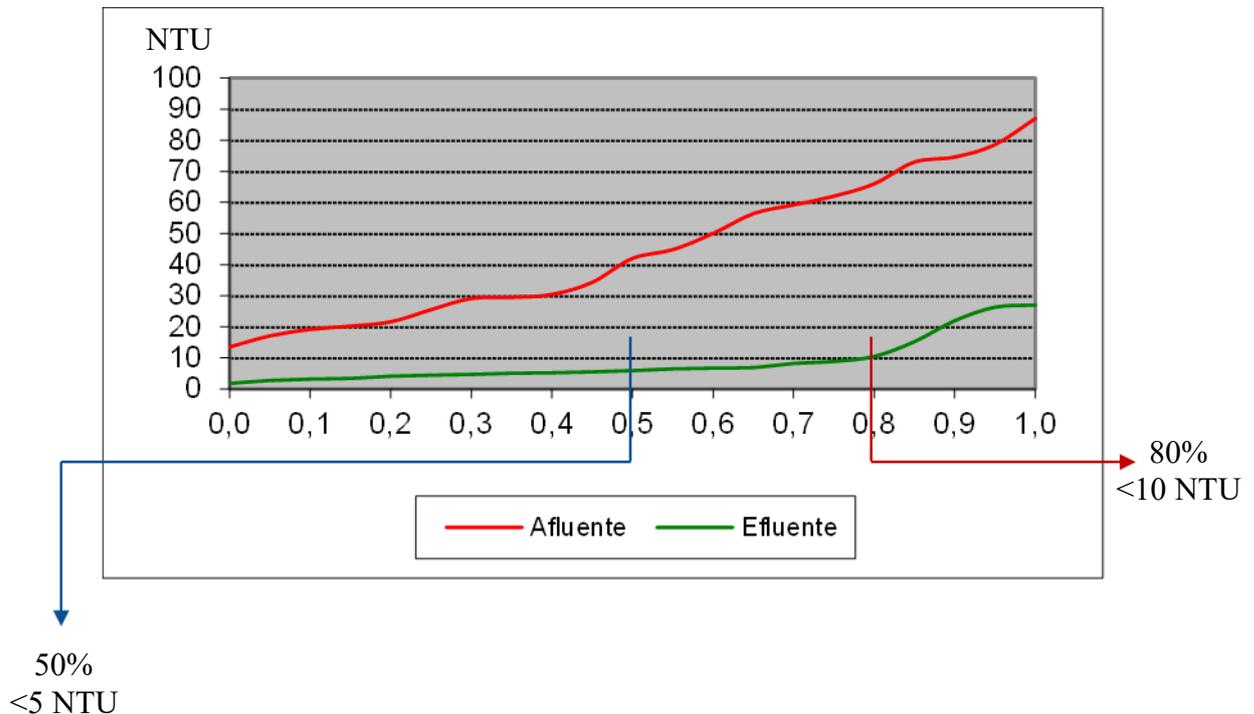
Fonte: O autor, 2019.

Figura 27 - Gráfico BoxPlot de Turbidez afluente e efluente - Filtro Simples



Fonte: O autor, 2019

Figura 28 - Gráfico de distribuição de frequência para Turbidez afluente e efluente - Filtro Simples



Fonte: O autor, 2019.

Neste caso, pode-se observar que o Filtro Simples apresentou bom desempenho em relação à remoção de turbidez, apresentando média efluente inferior a 10 NTU. Observa-se ainda, através da análise do gráfico da Figura 20, que a unidade de filtração foi responsável também por reduzir a discrepância entre os resultados de turbidez efluente, com todos eles entre um intervalo mínimo de 1,8 NTU e máximo de 27,0 NTU. Com base na Figura 21, é possível afirmar que em torno de 80% dos valores de turbidez efluente estiveram abaixo de 10 NTU e em torno de 50% abaixo de 5 NTU. Assim, de acordo com tais resultados, pode-se dizer que 80% dos valores de turbidez atendem as exigências realizadas pela NBR 13.969 (BRASIL, 1997) para a classe 3, que estabelece turbidez de até 10 NTU. Para a classe 1 e 2, da respectiva norma, pode-se dizer que 50% dos resultados encontrados atendem a exigência de 5 NTU. Com relação as propostas de exigência do projeto INTERÁGUAS, metade dos resultados encontrados para o Filtro Simples, atendem ao limite de 5 NTU estipulado para o uso agrícola irrestrito. Cabe ainda salientar, que tais resultados também atendem ao limite de 20 NTU adotado pela Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo (SABESP), conforme informações apresentadas no material, Água de reuso, modelos de comercialização, disponível em sua *web site* (SABESP, 2019).

Além disso, no que tange os valores encontrados na literatura, a partir de experiências no âmbito do PROSAB, exposta na revisão bibliográfica, pode-se realizar uma comparação com os valores de turbidez encontrados no presente trabalho. A Tabela 6, exposta anteriormente, indica que o projeto implantado pela PUC PR, apresentou valores de turbidez de 9 NTU, 11 NTU e 29 NTU, para taxas de filtração de 100, 150 e 200m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia. Nesse sentido, pode-se afirmar que 50% dos valores de turbidez encontrados no presente trabalho, estão abaixo destes números. Ressalta-se que a taxa de filtração utilizada para o Filtro Simples, foi de 80m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia, e, portanto, era de se esperar que os valores de turbidez fossem inferiores, quando comparados aos valores encontrados pela experiência do PROSAB.

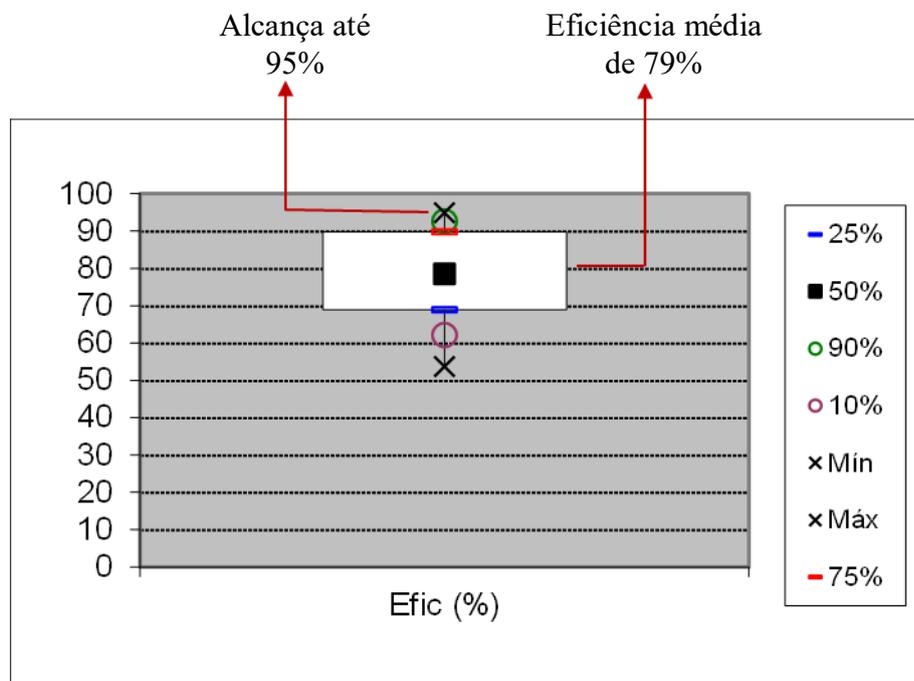
Para análise da eficiência de remoção de turbidez no Filtro Simples, observam-se os resultados na Tabela 33 e nos gráficos da Figura 29 (BoxPlot) e da Figura 30 (distribuição de frequência).

Tabela 33 - Estatística descritiva da eficiência de redução de turbidez - Filtro Simples

Número de amostras	Média (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Coefficiente de Variância
15	79	54	95	0,17

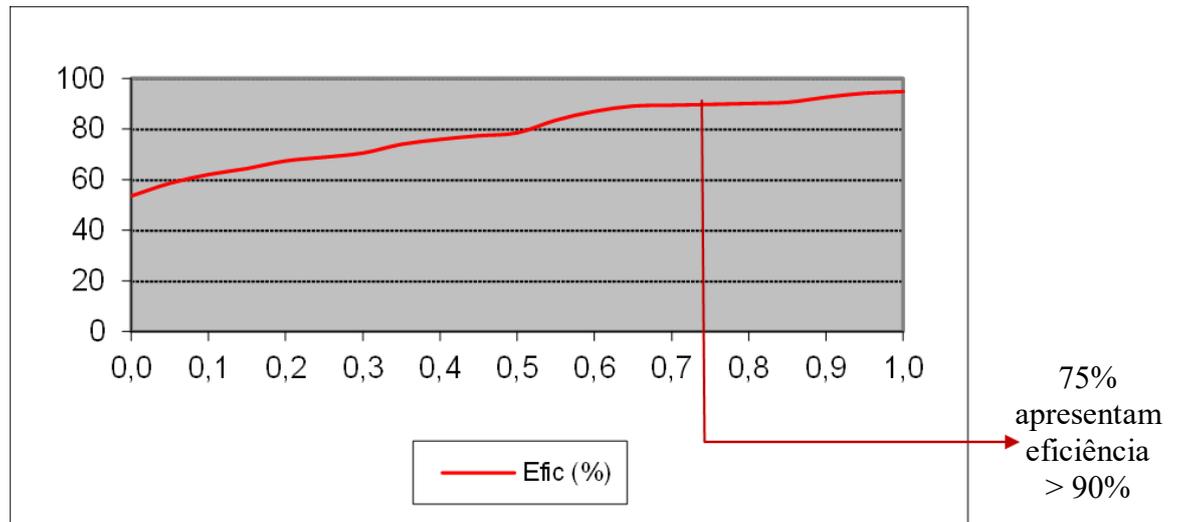
Fonte: O autor, 2019.

Figura 29 - Gráfico BoxPlot de eficiência de redução de Turbidez - Filtro Simples



Fonte: O autor, 2019.

Figura 30- Gráfico de distribuição de frequência para eficiência de redução de Turbidez - Filtro Simples



Fonte: O autor, 2019.

O bom desempenho do Filtro Simples também pode ser observado em relação à eficiência de redução de turbidez. Essa eficiência se apresentou em valor médio de 79%, mas alcançando até 95% no máximo. Ainda, aproximadamente 75% dos resultados apresentam eficiência acima de 90%, o que confere à unidade um bom desempenho para remoção de turbidez e preparação para desinfecção.

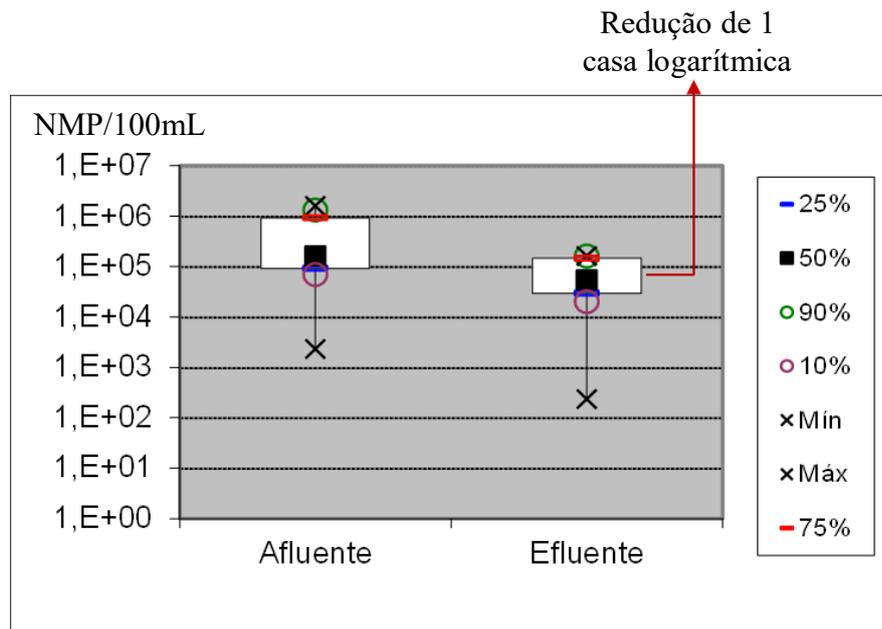
Em relação ao desempenho do Filtro Simples para a remoção de Coliformes Termotolerantes, observam-se os resultados da estatística descritiva para afluente e efluente na Tabela 34 e nos gráficos da Figura 31 (BoxPlot) e da Figura 32 (distribuição de frequência).

Tabela 34 - Estatística descritiva de Coliformes Termotolerantes afluente e efluente - Filtro Simples

Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)					
Ponto	Número de amostras	Média	Mínimo	Máximo	Coefficiente de variância
Afluente	15	2,07E+05	2,3E+03	1,6E+03	1,15
Efluente	15	4,71E+04	2,3E+02	1,6E+02	0,72

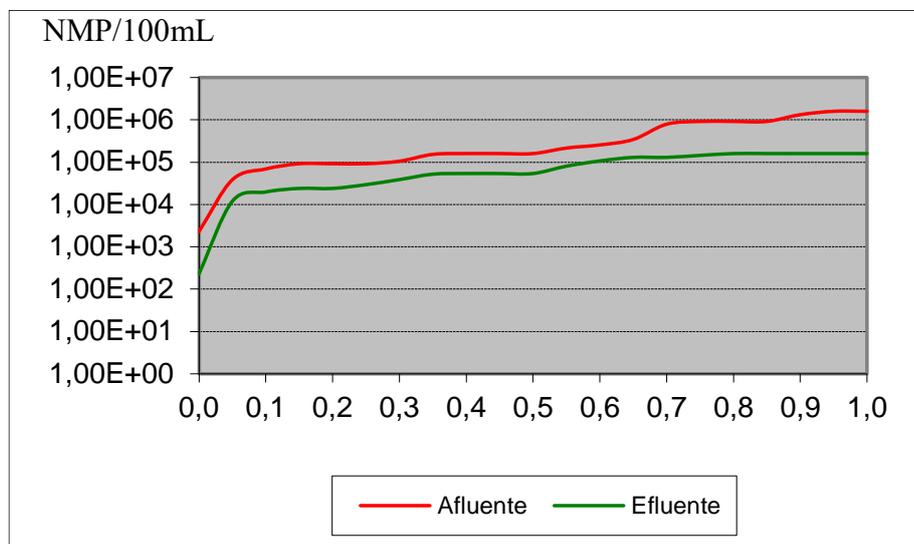
Fonte: O autor, 2019.

Figura 31 - Gráfico BoxPlot de Coliformes Termotolerantes afluente e efluente - Filtro Simples



Fonte: O autor, 2019.

Figura 32 - Gráfico de distribuição de frequência para Coliformes Termotolerante afluente e efluente - Filtro Simples



Fonte: O autor, 2019.

É sabido que a filtração terciária não tem exatamente o objetivo de desinfecção e sim de preparação do efluente para maior desempenho dos processos de desinfecção. Entretanto, foi possível observar desempenho satisfatório para este fim, no Filtro Simples. Em média, observou-se a redução de uma unidade logarítmica, de forma a permitir menor sobrecarga desse parâmetro nas unidades de desinfecção. Assim, a redução de Coliformes Termotolerantes realizada pelo Filtro Simples, ocorreu de acordo com o esperado, já que com

relação aos valores encontrados na literatura, Jordão & Pessoa (2017), indica que os filtros terciários removem de 0 a 1 casa logarítmica. No entanto, claramente com efluente apresentando uma densidade média de Coliformes Termotolerantes de  $10E+4$ , é possível inferir que o efluente da filtração terciária ainda não está pronto para o reuso de acordo com a maioria das recomendações nacionais e internacionais.

Assim, de acordo com as legislações sobre reuso de águas residuárias abordadas na revisão bibliográfica, pode-se observar que o efluente oriundo do Filtro Simples atende as orientações do PROSAB, para uso agrícola restrito, e INTERÁGUAS para uso urbano restrito, que exigem uma densidade de Cterm. inferior a  $10E+4$  (BASTOS & BEVILACQUA, 2006) e  $10E+5$  (INTERÁGUAS, 2018), respectivamente. Porém, pode-se afirmar que somente 10% dos resultados apresentaram valores inferiores a este, além de aqueles que estão nessa situação apresentam valores muito próximos do limite.

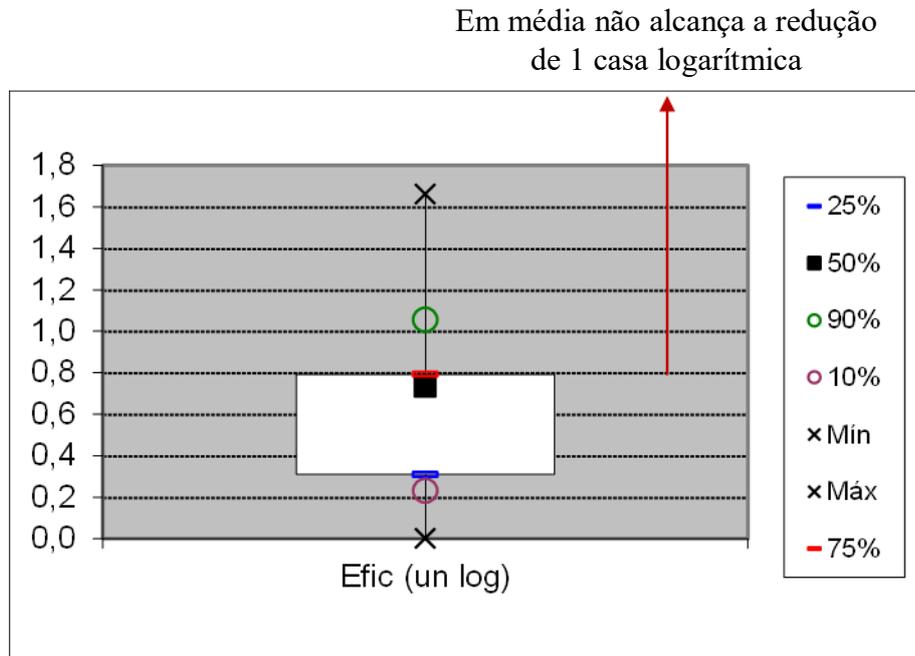
Para análise da eficiência de remoção de Coliformes Termotolerantes no Filtro Simples, observam-se os resultados na Tabela 35 e nos gráficos da Figura 33 (BoxPlot) e da Figura 34 (distribuição de frequência). Ressalta-se que, neste caso, a unidade de análise é dada em unidades logarítmicas.

Tabela 35 - Estatística descritiva da eficiência de redução de Coliformes Termotolerantes - Filtro Simples

<b>Número de amostras</b>	<b>Média (%)</b>	<b>Mínimo (%)</b>	<b>Máximo (%)</b>	<b>Coefficiente de Variância</b>
15	0,64	0,00	1,66	0,66

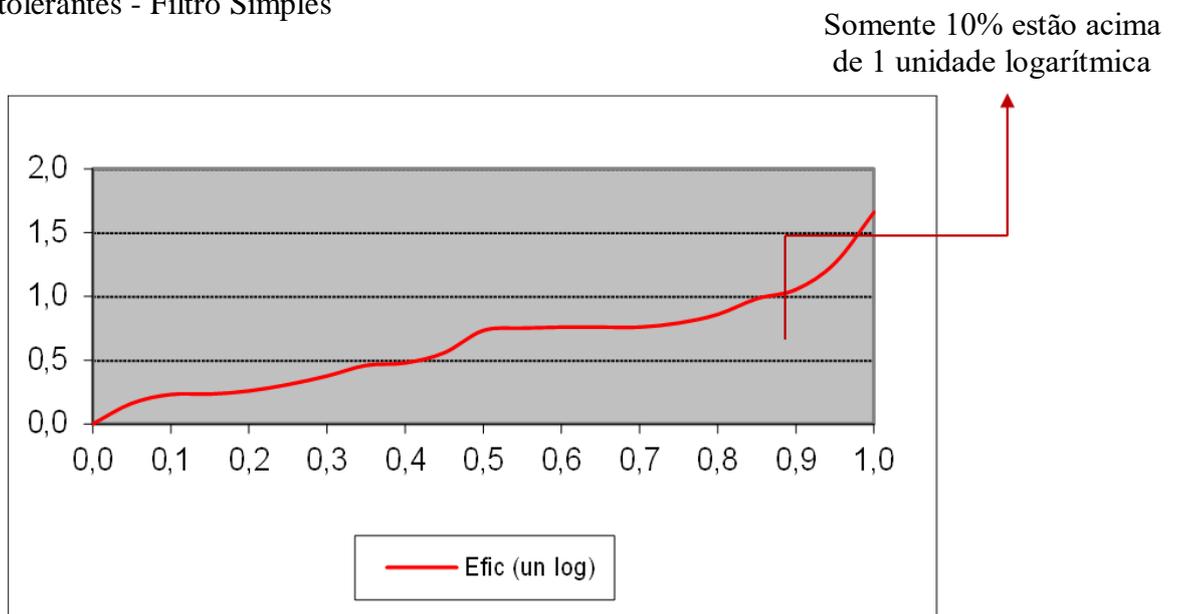
Fonte: O autor, 2019.

Figura 33 - Gráfico BoxPlot de eficiência de redução de Coliformes Termotolerantes - Filtro Simples



Fonte: O autor, 2019.

Figura 34 - Gráfico de distribuição de frequência para eficiência de redução de Coliformes Termotolerantes - Filtro Simples



Fonte: O autor, 2019.

Conforme já mencionado anteriormente, a filtração terciária deve preparar um efluente para a desinfecção. Observou-se dessa forma um desempenho satisfatório em relação à eficiência de remoção de Coliformes Termotolerantes, porém este efluente ainda não deve ser adotado para reuso. Percebe-se que somente 10% dos resultados estão acima de 1,0 unidade logarítmica de remoção e que em média essa tecnologia não alcança nem 1,0 unidade logarítmica de remoção. Entretanto, há de se ressaltar que esse já era um resultado esperado para a unidade.

#### 4.3.2 Estatística Descritiva – Filtro Duplo

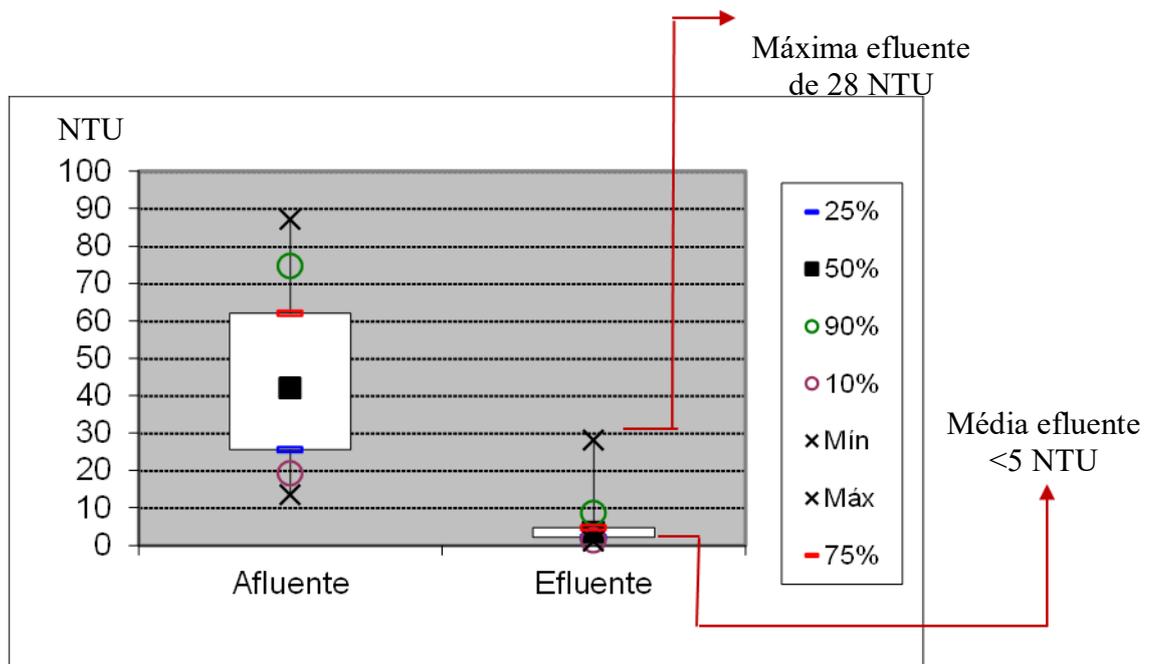
Na Tabela 36, observam-se os resultados de estatística descritiva para as medidas de turbidez afluente e efluente do Filtro Duplo. De maneira análoga, na Figura 35 é possível observar o gráfico BoxPlot para as mesmas medidas e na Figura 36, a distribuição de frequência.

Tabela 36 - Estatística descritiva da turbidez afluente e efluente - Filtro Duplo

<b>Ponto</b>	<b>Quantidade de amostras</b>	<b>Média (NTU)</b>	<b>Mín (NTU)</b>	<b>Máx (NTU)</b>	<b>Coefficiente de variância</b>
Afluente	15	45	13,5	87	0,53
Efluente	15	5	0,99	28	1,27

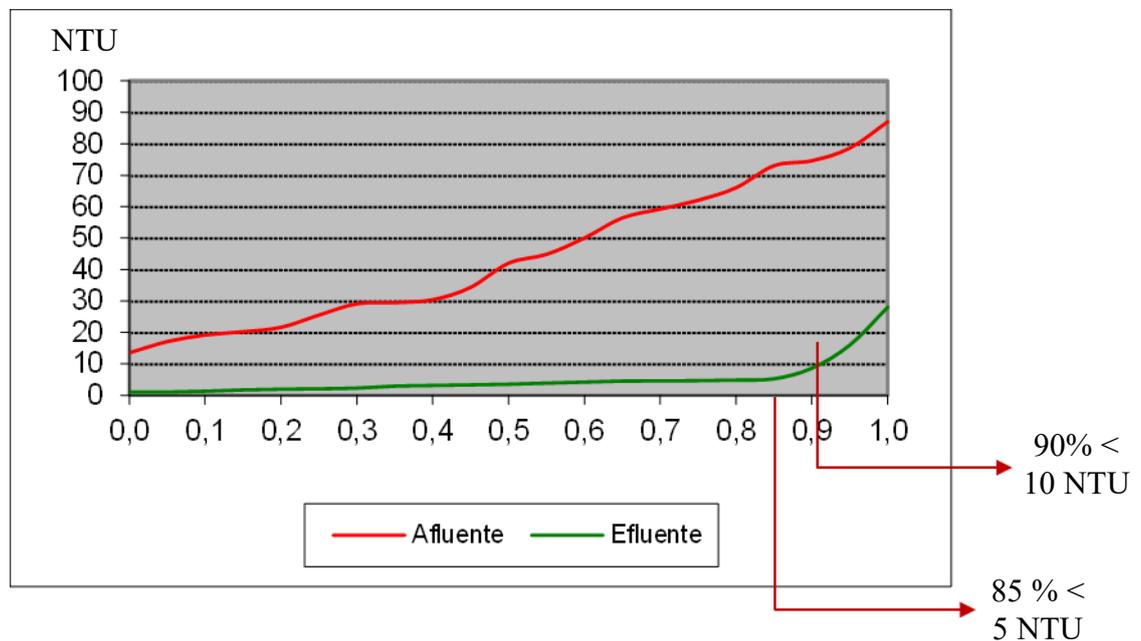
Fonte: O autor, 2019.

Figura 35 - Gráfico BoxPlot de Turbidez afluente e efluente - Filtro Duplo



Fonte: O autor, 2019.

Figura 36 - Gráfico de distribuição de frequência para Turbidez afluente e efluente - Filtro Duplo



Fonte: O autor, 2019.

Neste caso, pode-se observar que o Filtro Duplo, a princípio apresentou melhor desempenho com relação à redução de turbidez, quando comparado ao Filtro Simples, apresentando média efluente igual a 5 NTU e valor máximo de 28 NTU. Observa-se ainda através da análise do gráfico da Figura 35, que a unidade de filtração foi responsável também

por reduzir a variação entre valores extremos, referentes aos resultados de turbidez efluente encontrados nos Filtro Duplo, com todos os valores entre um intervalo mínimo de 0,99 NTU e máximo de 28,0 NTU. Destaca-se que este valor máximo de 28,0 NTU elevou substancialmente a média e caso ele não ocorresse, os dados poderiam se encontrar ainda mais homogêneos, já que o valor máximo passaria a ser 10,8 NTU. Esse é um fator importante para a operação da tecnologia de desinfecção subsequente, já que esta deve trabalhar sempre com afluente clarificado, para garantia de bom desempenho. Pela Figura 36, é possível afirmar que em torno de 90% dos valores de turbidez efluente estiveram abaixo de 10 NTU e em torno de 85% abaixo de 5 NTU. Novamente aborda-se o excelente desempenho para preparo do efluente para a desinfecção.

Assim, de acordo com tais resultados, pode-se dizer que 90% dos valores de turbidez atendem as exigências realizadas pela NBR 13.969 (BRASIL, 1997) para a classe 3, que estabelece turbidez de até 10 NTU. Já para a classe 1 e 2, da respectiva norma, pode-se dizer que 85% dos resultados encontrados atendem a exigência de 5 NTU. Com relação as propostas de exigência do projeto INTERÁGUAS, a grande maioria dos resultados encontrados para o Filtro Duplo, atende ao limite de 5 NTU estipulado para o uso agrícola irrestrito. Cabe ainda destacar, que tais resultados também atendem ao limite de 20 NTU adotado pela Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo (SABESP), conforme informações apresentadas no material, Água de reuso, modelos de comercialização, disponível em sua *web site*.

Além disso, no que tange os valores encontrados na literatura, a partir de experiências no âmbito do PROSAB, exposta na revisão bibliográfica, pode-se realizar uma comparação com os valores de turbidez encontrados no presente trabalho. A Tabela 6, exposta anteriormente, indica que o projeto implantado pela PUC PR, apresentou valores de turbidez de 9 NTU, 11 NTU e 29 NTU, para taxas de filtração de 100, 150 e 200m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia. Nesse sentido, pode-se afirmar que 85% dos valores de turbidez encontrados no presente trabalho, estão abaixo destes números. Ressalta-se que a taxa de filtração utilizada para o Filtro Duplo, foi de 80m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia, e, portanto, era de se esperar que os valores de turbidez fossem inferiores, quando comparados aos valores encontrados pela experiência do PROSAB.

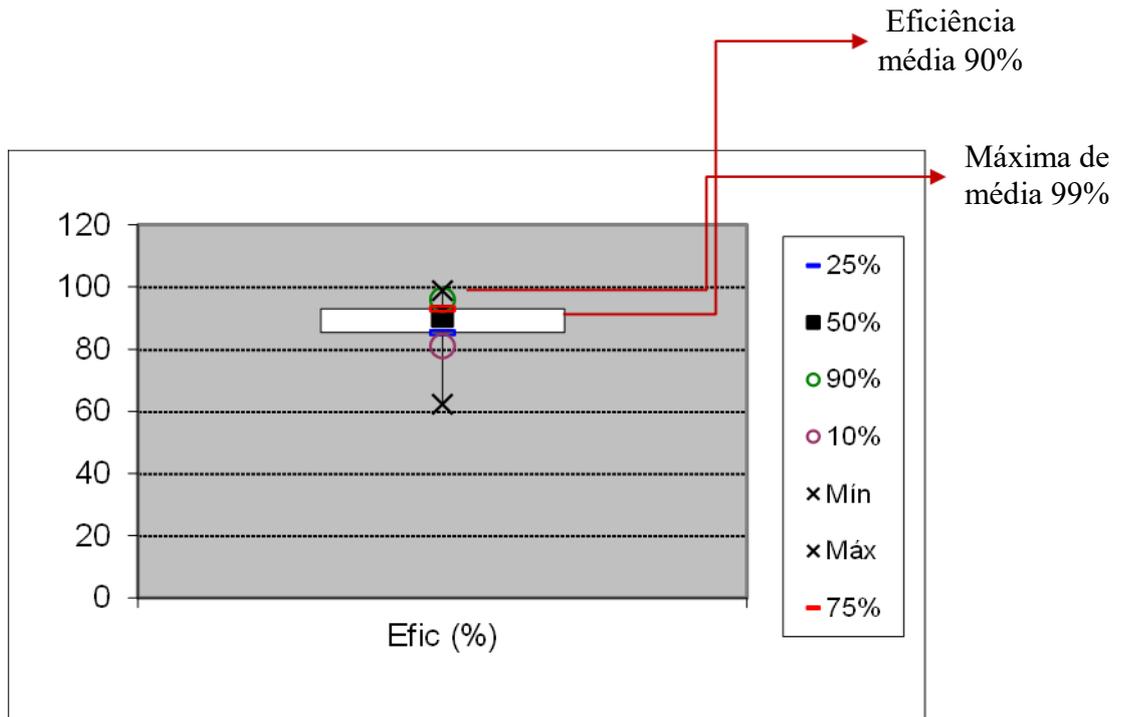
Para análise da eficiência de remoção de turbidez no Filtro Duplo, observam-se os resultados na Tabela 37 e nos gráficos da Figura 37 (BoxPlot) e da Figura 38 (distribuição de frequência).

Tabela 37 - Estatística descritiva da eficiência de redução de turbidez - Filtro Duplo

Quantidade de amostras	Média (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Coefficiente de Variância
15	88	62	99	0,10

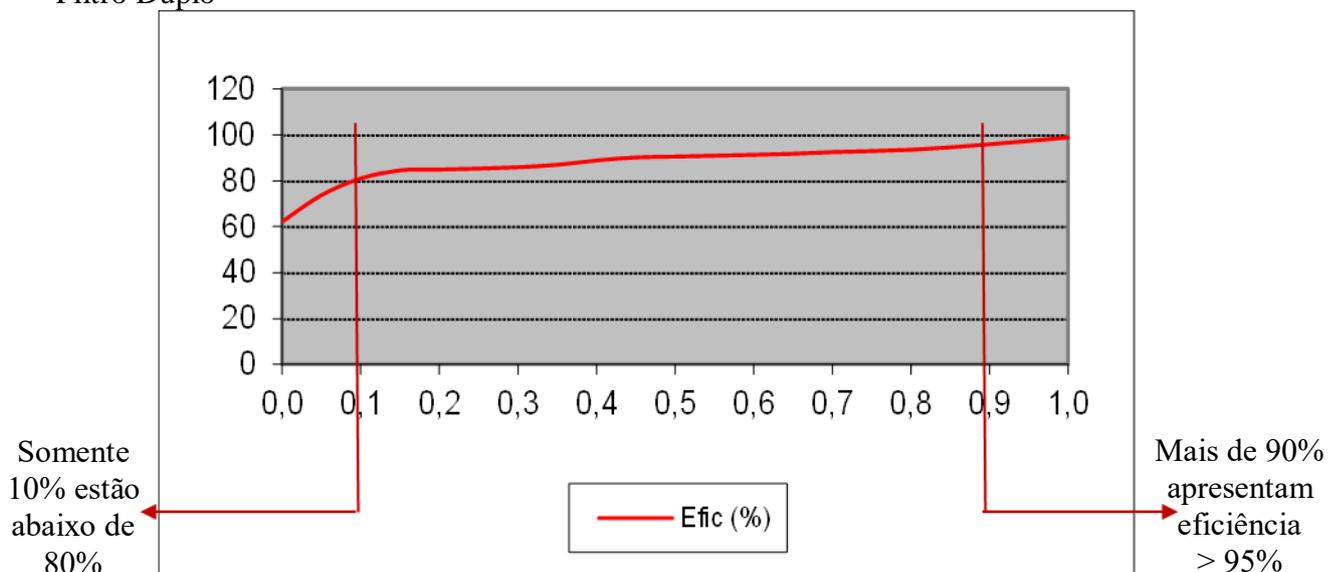
Fonte: O autor, 2019.

Figura 37 - Gráfico BoxPlot de eficiência de redução de turbidez - Filtro Duplo



Fonte: O autor, 2019.

Figura 38 - Gráfico de distribuição de frequência para eficiência de redução de Turbidez - Filtro Duplo



Fonte: O autor, 2019.

A princípio, a análise da eficiência de redução de turbidez do Filtro Duplo revela que este apresenta melhor desempenho em relação ao Filtro Simples. Para esta unidade, a eficiência média é de quase 90%, se caracterizando como bastante elevada e alcançando 99% em seu valor máximo. Observa-se ainda no gráfico de distribuição de frequência da Figura 31, a baixa variação entre valores máximo e mínimo. Somente 10% dos valores estão abaixo de 80% de eficiência e mais de 90% dos valores apresentam eficiência de remoção de turbidez superior a 95%.

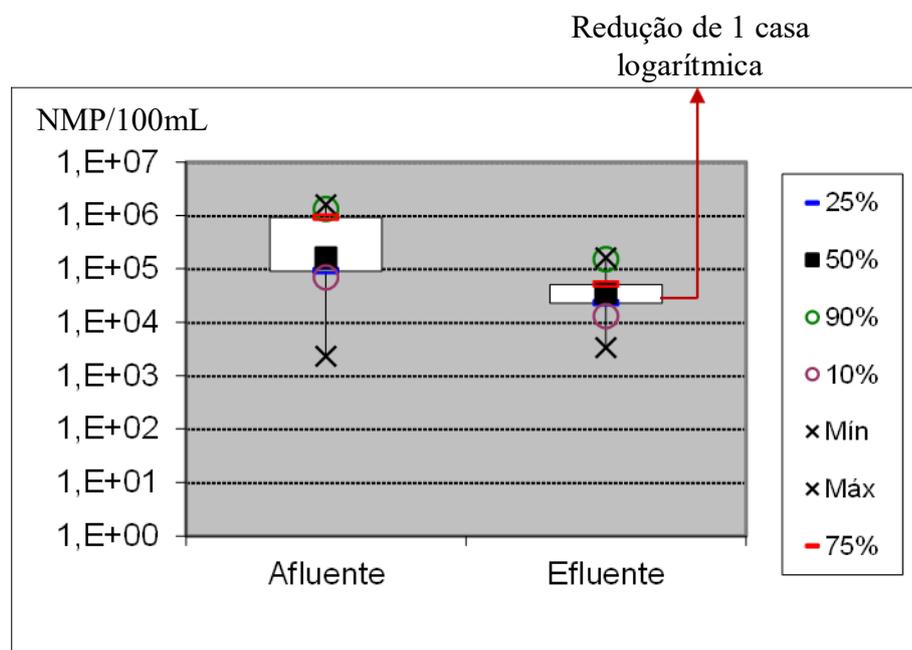
Em relação ao desempenho do Filtro Duplo para a remoção de Coliformes Termotolerantes, observam-se os resultados da estatística descritiva para afluente e efluente na Tabela 38 e nos gráficos da Figura 39 (BoxPlot) e da Figura 40 (distribuição de frequência).

Tabela 38 - Estatística descritiva de Coliformes Termotolerantes afluente e efluente - Filtro Duplo

Ponto	Quantidade de amostras	Média (NMP/100 mL)			Coeficiente de variância
		Média	Mín.	Máx.	
Afluente	15	2,07E+05	2,3E+03	1,6E+06	1,15
Efluente	15	3,53E+04	3,3E+03	1,6E+05	0,97

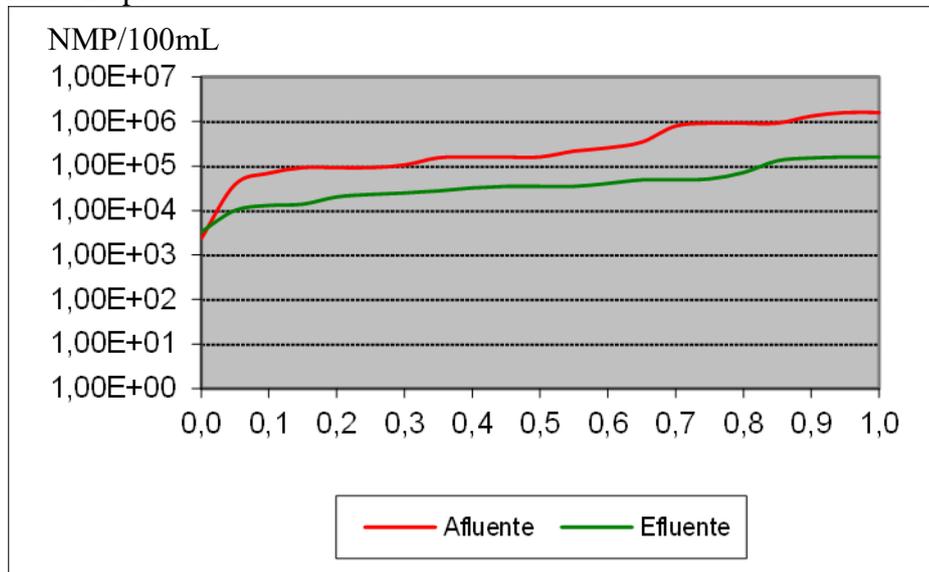
Fonte: O autor, 2019.

Figura 39 - Gráfico BoxPlot de Coliformes Termotolerantes afluente e efluente - Filtro Duplo



Fonte: O autor, 2019.

Figura 40 - Gráfico de distribuição de frequência para Coliformes Termotolerantes afluente e efluente - Filtro Duplo



Fonte: O autor, 2019.

Em relação à unidade de filtração terciária com meio duplo, não se observou um desempenho satisfatório, principalmente quando comparado ao Filtro Simples. Em média, apesar de ser possível observar a redução de aproximadamente uma unidade logarítmica, os valores ainda se apresentam aparentemente maiores do que aqueles apresentados para o Filtro Simples. Entretanto essa dúvida somente será sanada nos testes estatísticos que serão apresentados mais adiante deste trabalho. Com relação aos valores encontrados na literatura, Jordão & Pessoa (2017), indica que os filtros terciários removem de 0 a 1 casa logarítmica. Nesse sentido, pode-se afirmar que a redução de Coliformes Termotolerantes realizada pelo Filtro Duplo, ocorreu de acordo com o esperado. Entretanto, no que tange a densidade média de Coliformes Termotolerantes de  $10E+4$ , é possível inferir que o efluente da filtração terciária ainda não está pronto para o reuso de acordo com a maioria das recomendações nacionais e internacionais. Assim, de acordo com as legislações sobre reuso de águas residuárias abordadas na revisão bibliográfica, pode-se observar que o efluente oriundo do Filtro Duplo atende as orientações do PROSAB, para uso agrícola restrito e INTERÁGUAS para uso urbano restrito, que exigem uma densidade de  $C_{term}$  inferior a  $10E+4$  e  $10E+5$  respectivamente. No entanto, pode-se afirmar que somente 10% dos resultados apresentaram valores inferiores a este.

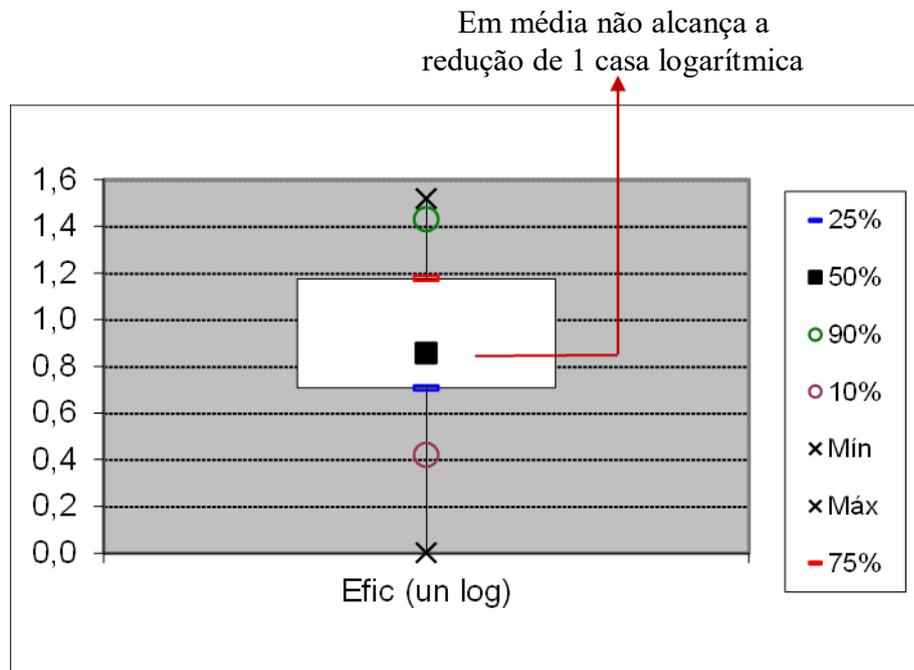
Para análise da eficiência de remoção de Coliformes Termotolerantes no Filtro Duplo, observam-se os resultados na Tabela 39 e nos gráficos da Figura 41 (BoxPlot) e da Figura 42 (distribuição de frequência). Ressalta-se que neste caso, a unidade de análise é dada em unidades logarítmicas.

Tabela 39 - Estatística descritiva da eficiência de redução de Coliformes Termotolerantes - Filtro Duplo

Quantidade de amostras	Média (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Coefficiente de Variância
14	0,88	0,00	1,52	0,48

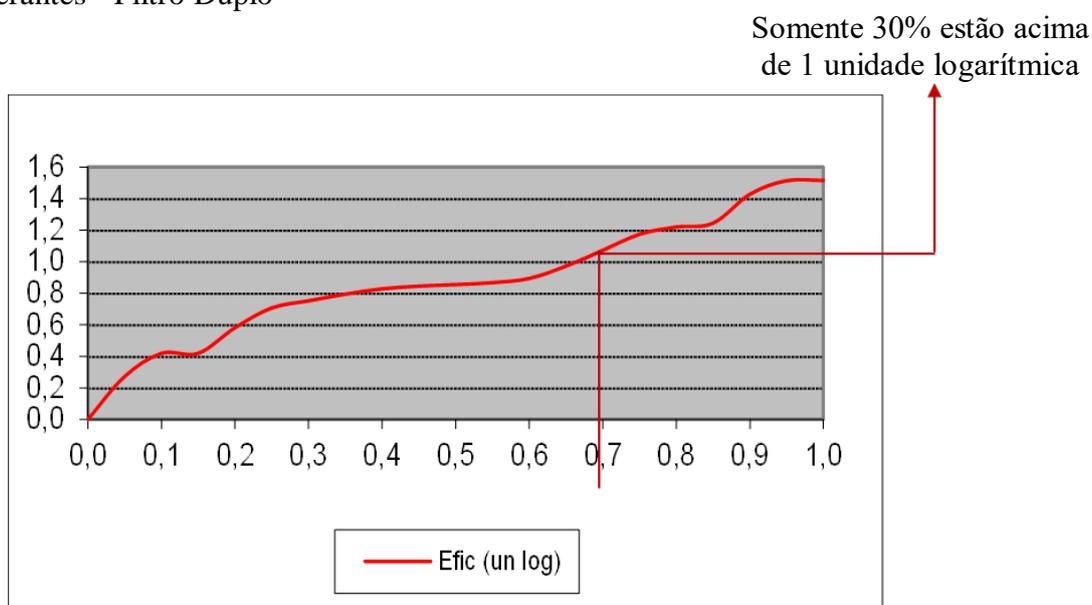
Fonte: O autor, 2019.

Figura 41 - Gráfico BoxPlot de eficiência de redução de Coliformes Termotolerantes - Filtro Duplo



Fonte: O autor, 2019.

Figura 41 - Gráfico de distribuição de frequência para eficiência de remoção de Coliformes Termotolerantes - Filtro Duplo



Fonte: O autor, 2019.

Assim como no caso da operação do Filtro Simples, observou-se um desempenho satisfatório em relação à eficiência de remoção de Coliformes Termotolerantes, porém este efluente ainda não deve ser adotado para reuso. Percebe-se que em torno de 30% dos resultados estão acima de 1,0 unidade logarítmica de remoção. Apesar desse valor ser baixo, é superior àquele apresentado para o Filtro Simples (10%). Mas também, em média, essa tecnologia não alcança nem 1,0 unidade logarítmica de remoção. Entretanto, conforme já mencionado, esse já era um resultado esperado para a unidade.

De maneira geral pode-se afirmar que tanto o Filtro Simples como o Filtro Duplo, apresentaram resultados interessantes e satisfatórios para serem utilizados na pré-desinfecção, tanto em relação ao parâmetro turbidez como em relação ao parâmetro Coliformes Termotolerantes. Cabe salientar que a turbidez é um importante parâmetro de controle de qualidade da filtração terciária e que ainda é considerado um parâmetro especialmente relevante quando pretende-se submeter o efluente a desinfecção via ultravioleta, segundo Jordão & Pessoa (2017). Já em relação ao parâmetro Coliformes Termotolerantes, destaca-se que apesar das unidades terem removido em média somente 1 unidade logarítmica a passagem do efluente pela filtração terciária reduz a carga afluente desse parâmetro à unidade de desinfecção.

#### 4.3.3 Testes Estatísticos para comparação de desempenho entre as duas unidades de filtração (simples e duplo)

Dentre os objetivos da pesquisa, constam tanto a análise dos desempenhos de ambos os filtros (simples e duplo) separadamente, como a comparação entre seus desempenhos. Para tanto, no presente item, foi realizada uma análise conjunta e comparativa entre eles e adotou-se para isso o teste estatístico paramétrico t-student. Este é um teste de hipótese que usa conceitos estatísticos para rejeitar ou não uma hipótese quando os dados a serem analisados seguem uma distribuição normal.

Assim, neste item será apresentada inicialmente uma comparação preliminar dos dados e posteriormente os resultados do teste considerando-se 95% de confiança para avaliação da existência ou não de diferença significativa entre os desempenhos de ambos os filtros.

Na Tabela 40 estão apresentados os dados de turbidez afluente e efluente, bem como os dados de densidade de Coliformes Termotolerantes afluente e efluente, tanto para o Filtro Simples como para o Filtro Duplo. Ressalta-se que esses são os mesmo apresentados nas Tabelas 32,34, 36 e 39, porém encontram-se aqui reorganizados de forma a permitirem a análise comparativa preliminar.

Tabela 40 - Estatística descritiva resumida e comparativa para os parâmetros turbidez e Coliformes Termotolerantes afluente e efluente para os Filtros Simples e duplo

Estatística	Turbidez (NTU)			C. Termolerantes (NMP/100 mL)		
	Afl.	FS	FD	Afl.	FS	FD
Média	45	9	5	2,07E+05	4,71E+04	3,53E+04
Mínimo	13,5	1,8	0,99	2,30E+03	2,30E+02	3,30E+03
Máximo	87	27	28	1,60E+06	1,60E+05	1,60E+05
C. Variação	0,53	0,89	1,27	1,15	0,72	0,97

Fonte: O autor, 2019.

Observações: efluente do Filtro Simples (FS), efluente do Filtro Duplo (FD), afluente (Afl) e Coliformes Termotolerantes (C.Termotolerantes), Coeficiente de variação (C. Variação).

Na Tabela 41 estão apresentados os dados de eficiência de educação de turbidez e de Coliformes Termotolerantes, tanto para o Filtro Simples como para o Filtro Duplo. Ressalta-se que esses são os mesmo apresentados nas Tabelas 33, 35, 37 e 39, porém encontram-se aqui reorganizados de forma a permitirem a análise comparativa preliminar.

Tabela 41 - Estatística descritiva resumida e comparativa para eficiência de redução de turbidez e Coliformes Termotolerantes para os Filtros Simples e duplo

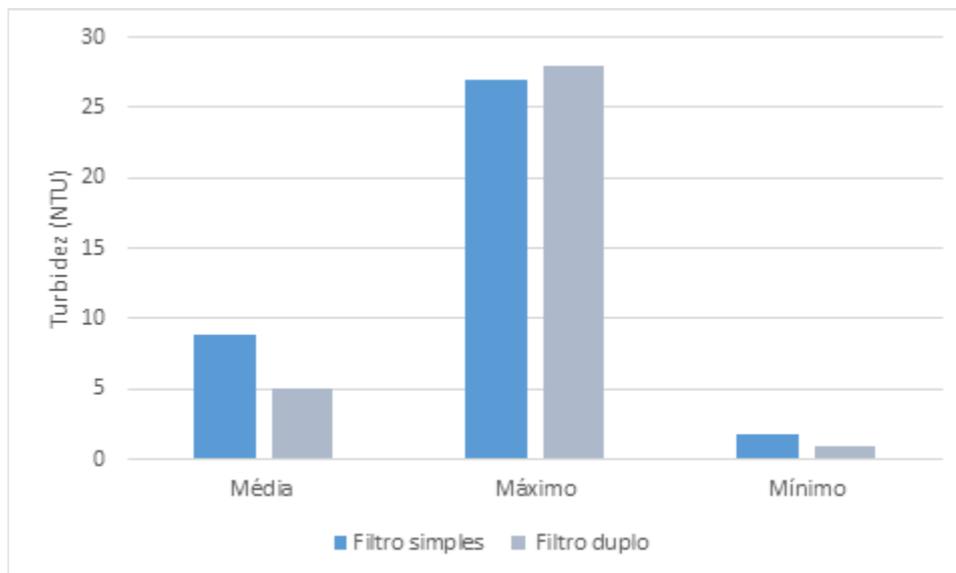
Estatística	Turbidez (%)		C. Termotolerantes (%)	
	FS	FD	FS	FD
Média	79	88	0,64	0,88
Mínimo	54	62	0,00	0,00
Máximo	95	99	1,66	1,52
C. Variação	0,17	0,10	0,66	0,48

Fonte: O autor, 2019.

Observações: Filtro Simples (FS), Filtro Duplo (FD), Coliformes Termotolerantes (C.Termotolerantes) e Coeficiente de variação (C. Variação).

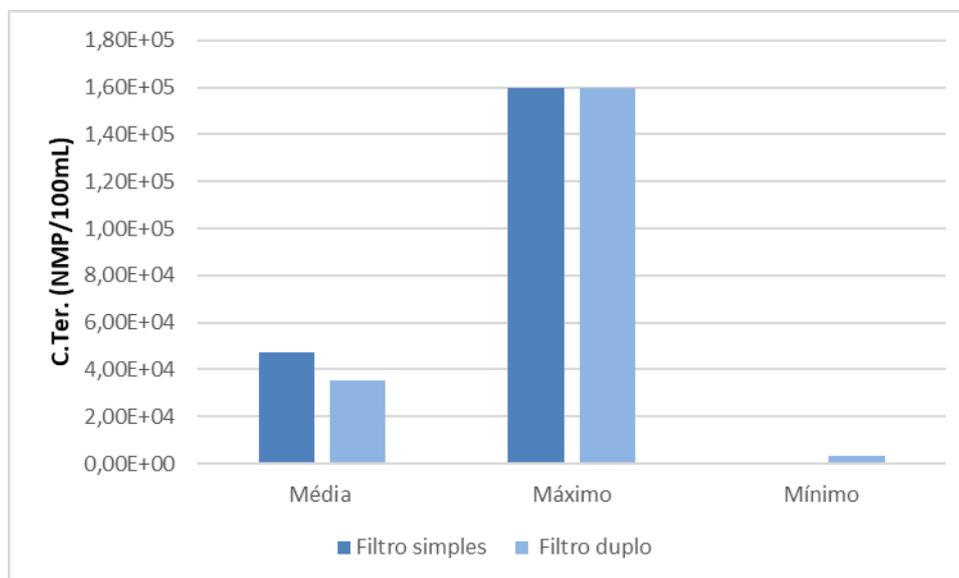
Observando-se os dados apresentados nas Tabelas 40 e 41, percebe-se de maneira preliminar que o Filtro Duplo parece ser mais eficiente que o Filtro Simples em relação à remoção de turbidez. Porém, ele apresenta um valor de turbidez efluente máxima superior ao valor encontrado o Filtro Simples. Porém, em relação à eficiência média, o valor apresentado para o Filtro Duplo (88%) é substancialmente superior àquele apresentado para o Filtro Simples (79%). No caso da análise de Coliformes Termotolerantes, apesar dos valores médios efluentes serem similares para ambos os filtros, o Filtro Simples apresenta um valor mínimo inferior ao valor mínimo apresentado para o Filtro Duplo. E em relação à eficiência de redução de Coliformes Termotolerantes, o Filtro Duplo apresenta valor médio superior e valor máximo inferior ao do Filtro Simples. Isso leva a crer que talvez o Filtro Simples seja mais eficiente em relação ao Filtro Duplo para remoção de Coliformes Termotolerantes. As diferenças e semelhanças citadas podem ser observadas também nos gráficos das Figuras 43, 44, 45 e 46. Estes abordam respectivamente, a comparação para valores médios, mínimos e máximos entre os efluentes dos dois filtros para o parâmetro Turbidez e para o parâmetro Coliformes Termotolerantes, além dos BoxPlots dos efluentes do dois filtros para Turbidez e Coliformes Termotolerantes também.

Figura 42 - Gráfico comparativo entre valores (médio, máximo e mínimo) efluentes de turbidez do Filtro Simples e do Filtro Duplo



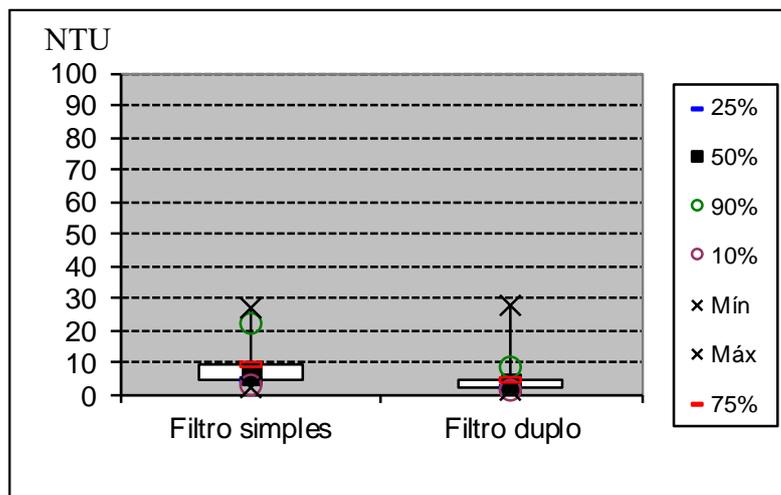
Fonte: O autor, 2019.

Figura 43 - Gráfico comparativo entre valores (médio, máximo e mínimo) efluentes de Coliformes Termotolerantes do Filtro Simples e do Filtro Duplo



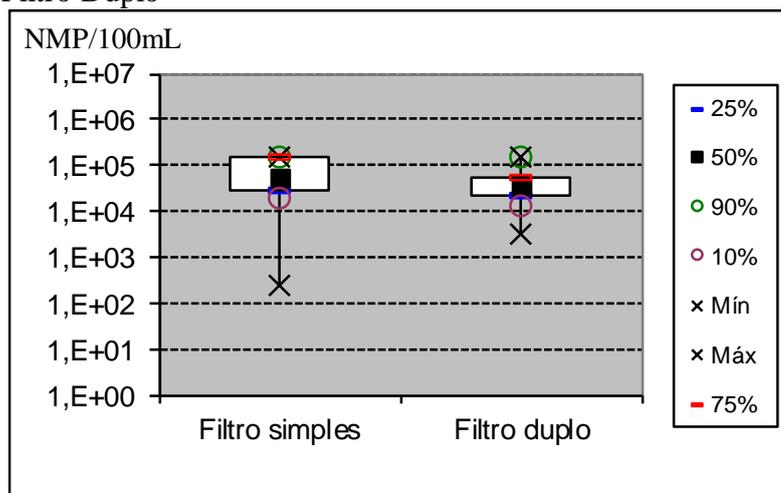
Fonte: O autor, 2019.

Figura 44 - Gráfico BoxPlot das medidas de turbidez efluente do Filtro Simples e do Filtro Duplo



Fonte: O autor, 2019.

Figura 45 - Gráfico BoxPlot das densidades de Coliformes Termotolerantes efluentes do Filtro Simples e do Filtro Duplo



Fonte: O autor, 2019.

Assim, é de fundamental importância a análise estatística desenvolvida a partir de um teste de hipótese para afirmar com segurança se há realmente diferença significativa em relação aos desempenhos dos dois filtros, tanto para turbidez como para Coliformes Termotolerantes.

Os resultados dos testes estatísticos estão descritos nas Tabelas 42, 43, 44 e 45. Na Tabela 42 estão apresentados os resultados para a comparação entre os valores de turbidez efluente entre os dois filtros. Na Tabela 43, as eficiências de remoção de turbidez entre os dois filtros. Na Tabela 44, os resultados para comparação entre os valores de Coliformes

Termotolerantes efluentes entre os dois filtros. E na Tabela 45, as eficiências de remoção de Coliformes Termotolerantes entre os dois filtros.

Tabela 42 - Resultados do teste de hipótese t-student para valores de turbidez efluentes entre os dois filtros

<b>Filtro</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>	<b>Valor t</b>	<b>Grau de Liberdade (gl)</b>	<b>t crítico</b>	<b>Hipótese</b>
Filtro Simples	8,89	58	1,35	28	1,701	Não há diferença significativa
Filtro Duplo	5,29	42				

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 43 - Resultados do teste de hipótese t-student para valores de eficiência de redução de turbidez entre os dois filtros

<b>Filtro</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>	<b>Valor t</b>	<b>Grau de Liberdade (gl)</b>	<b>t crítico</b>	<b>Hipótese</b>
Filtro Simples	78,67	161,56	2,31	28	1,701	Há diferença significativa
Filtro Duplo	88,18	73,81				

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 44 - Resultados do teste de hipótese t-student para valores de Coliformes Termotolerantes efluentes entre os dois filtros

<b>Filtro</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>	<b>Valor t</b>	<b>Grau de Liberdade (gl)</b>	<b>t crítico</b>	<b>Hipótese</b>
Filtro Simples	83615,33	3413679558	1,22	27	1,703	Não há diferença significativa
Filtro Duplo	57664,28	2690322292				

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 45 - – Resultados do teste de hipótese t-student para valores eficiência de redução de Coliformes Termotolerantes entre os dois filtros

<b>Filtro</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>	<b>Valor t</b>	<b>Grau de Liberdade (gl)</b>	<b>t crítico</b>	<b>Hipótese</b>
Filtro Simples	0,64	0,165	1,49	27	1,703	Não há diferença significativa
Filtro Duplo	0,88	0,166				

Fonte: O autor, 2019.

Dessa forma, apesar das discrepâncias entre os resultados de desempenho (concentrações efluentes e eficiências) para o parâmetro Coliformes Termotolerantes, é possível afirmar com 95% de confiança que não há diferenças significativas entre eles. Porém, no caso da Turbidez, os testes mostraram que há diferença significativa somente quando analisada a eficiência de redução. Como os valores de Turbidez efluentes aos filtros são os

mesmos e observou-se diferença significativa somente em relação à eficiência de redução, pode-se inferir que a relação entre afluente e efluente é que leva a constatar que provavelmente o Filtro Duplo apresente melhor desempenho quando comparado ao Filtro de Areia.

#### 4.3.4 Avaliação do desempenho da unidade de desinfecção

Assim, pode-se afirmar que tanto o Filtro Simples como o Filtro Duplo, apresentaram resultados satisfatórios. Dessa forma seus efluentes são indicados para submissão à desinfecção, já que esta requer afluente clarificado para garantia de bom desempenho. Cabe salientar que a turbidez é um importante parâmetro de controle de qualidade da filtração terciária e que ainda é considerada um parâmetro especialmente relevante quando pretende-se submeter o efluente à desinfecção via ultravioleta, segundo Jordão & Pessoa (2017).

Assim, na Tabelas 46, são exibidos os resultados encontrados referentes aos ensaios de Coliformes Termotolerantes, realizados na água de reuso gerada a partir dos filtros de camada simples e dupla, acrescidos da etapa de desinfecção.

Tabela 46 - Resultados de Coliformes Termotolerantes realizados efluente do Filtro Simples e duplo seguido de reator UV

<b>Filtro</b>	<b>Amostra</b>	<b>Coliformes Termotolerantes (NMP/100ml)</b>
Simples	12	$7,0 \times 10^2$
	14	$2,8 \times 10^3$
	15	$7,0 \times 10$
Duplo	12	$3,3 \times 10$
	14	$3,5 \times 10^2$
	15	$3,3 \times 10^2$

Fonte: O autor, 2019.

A partir dos resultados encontrados referentes a Fase II, pode-se dizer que as amostras de efluente desinfetado a partir das duas diferentes unidades de filtração atendem aos seguintes aspectos normativos, norteadores e legais abordados nessa pesquisa:

- NBR 13.969 (BRASIL, 1997). As amostras 15 do Filtro Simples e 12 do Filtro Duplo atenderam as classes 1, 2 e 3, que são as mais restritivas, indicando valores limites para Coliformes Termotolerantes de 200, 500 e 500 NMP/100 mL, respectivamente. Considerando-se todas as amostras, observa-se

que o atendimento completo se dá somente à classe 4 que determina valor limite de 5000 NMP/100mL

- Orientações do PROSAB (BASTOS & BEVILACQUA, 2006). As amostras 15 do Filtro Simples e 12 do Filtro Duplo atenderam ao valor mais restritivo dessas orientações, definido para o uso urbano irrestrito, que exige densidade máxima de Coliformes Termotolerantes de 200 NMP/100 mL. Ainda, todas as outras amostras, atendem às demais indicações para o mesmo parâmetro ( $\leq 1.000$  NMP /100mL), tanto para uso urbano como para uso agrícola, exceto a amostra 14 do Filtro Simples. Por fim, todas as amostras atendem à menor restrição indicada por essas orientações, que é para uso agrícola restrito, com valor limite de 10.000 NMP /100mL para Coliformes Termotolerantes.
- Projeto INTERÁGUAS. Este documento define o valor limite de Coliformes Termotolerantes de 1.000 NMP/100 mL para os seguintes usos: agrícola e urbano restrito, industrial, ambiental e aquicultura. Dessa forma, todas as amostras atendem tal exigência, exceto a amostra 14 do Filtro Simples. Porém, esta atende o uso urbano restrito, com valor limite para Coliformes Termotolerantes de 100.000 NMP/100 mL. Inclusive, este documento sugere a adoção de uma filtração terciária antecedendo a desinfecção para usos urbanos e agrícolas irrestritos.
- Resolução conjunta SES/SMA/SSRH N° 01/2017. Por ser esta, bastante restritiva em relação ao parâmetro Coliformes Termotolerantes, somente as amostras 15 do FS e 12 do FD se mostraram inferiores à 200 NMP/100 mL exigido para uso urbano com restrição severa.

Com relação aos valores identificados na literatura, segundo experiência realizada no âmbito do PROSAB, foi possível realizar uma comparação com os resultados do da Fasee II do presente trabalho, encontrados a respeito da redução de Coliformes Termotolerantes efetuada por meio do reator ultravioleta. Assim, segundo projeto realizado pela PUC PR (GONÇALVES ET AL., 2003), na qual apresentou um efluente com densidade de  $1 \times 10^3$  CTer, pode-se observar que tanto o Filtro Simples quanto o Duplo, do presente estudo, apresentaram em geral um efluente com uma densidade de Coliformes Termotolerantes inferior. Na Tabela 47 é o enquadramento dos resultados encontrados nesta Fase, de acordo com os limites de

Coliformes Termotolerantes, segundo legislações utilizadas como parametro no presente trabalho.

Tabela 47 - Resumo dos limites de C.Term. de acordo com as legislações abordadas

<b>Legislação</b>	<b>Modalidade</b>	<b>Limites (NMP/100 mL)</b>	<b>Amostra</b>
	1	200	
NBR 13.969 (BRASIL, 1997)	2	500	15 (Simples) e 12 (Duplo)
	3	500	
	4	5000	Todas
PROSAB (BASTOS & BEVILACQUA, 2006)	Uso Urbano irrestrito	200	15 (Simples) e 12 (Duplo)
	Uso Urbano e agrícola	$\leq 1.000$	Todo exceto amostra 14 (Simples)
Projeto INTERÁGUAS	Agrícola, urbano restrito, industrial, ambiental e aquicultura	1.000	Todo exceto amostra 14 (Simples)
	Uso urbano restrito	100.000	14 (Simples)
Resolução conjunta SES/SMA/SSRH Nº 01/2017	Urbano com restrição severa	200	15 (Simples) e 12 (Duplo)

O autor, 2019.

Por fim, a presente pesquisa sugere que a análise realizada nesta fase seja persistida em um próximo estudo, uma vez que os ensaios realizados a respeito da desinfecção UV, foram efetuados somente no intuito de complementar avaliação dos filtros terciários utilizados como pré-tratamento do reator UV.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho de pesquisa teve como principal objetivo a avaliação da aplicabilidade de unidades de filtração terciária compostas por camada simples (areia) e camada dupla (areia e carvão ativado) para condicionamento de um efluente secundário à desinfecção por radiação UV. Para atingir este objetivo, foi necessário abordar quatro objetivos específicos, conforme já apresentados.

- Avaliação do desempenho da ETE Sapucaia do Rio em função da qualidade do efluente secundário adotado na pesquisa.

Para este objetivo, pôde-se concluir que a ETE Sapucaia do Rio, com fluxograma de tratamento composto por reator UASB seguido de Filtro Aerado Submerso, possui uma elevada eficiência no que tange a redução de matéria orgânica e sólidos suspensos totais. Dessa forma, este efluente estaria apto e indicado à passagem pelo processo de filtração terciária seguido de desinfecção por radiação UV para produção de água de reuso.

- Avaliar e comparar o desempenho da filtração terciária em diferentes meios (Areia e Areia + Carvão ativado) como pré-tratamento a desinfecção.

Neste caso, observou-se desempenho satisfatório para ambos os filtros, em relação à remoção de Coliformes Termotolerantes e redução de Turbidez.

No caso da Turbidez, a redução média para o Filtro Simples foi de 79%, alcançando no máximo até 95%. Para o Filtro Duplo, esse desempenho médio foi de 88% e máximo de 99%. Aparentemente, seria possível afirmar que o Filtro Duplo teria apresentado um melhor desempenho, como foi comprovado pelo teste estatístico do tipo t-student, quando se comparou as eficiências de redução de turbidez, entre eles. Entretanto, quando se aplicou o mesmo teste para as medidas de Turbidez efluentes, observou-se que os resultados não apresentaram diferença significativa, ao nível de confiança de 95%, apesar de seus efluentes terem apresentado valores médios bastante discrepantes, de 10 e 5 NTU para o FS e o FD, respectivamente. Destaca-se que independentemente dos diferentes desempenhos do FS e do FD, ambos apresentaram efluente clarificado, sendo esta uma condição relevante para o bom desempenho da unidade de radiação UV.

Em relação ao parâmetro Coliformes Termotolerantes, as unidades removeram em média somente uma casa logarítmica, apresentando efluentes com densidades médias de xx e xx. Esses valores ainda são elevados quando se trata de água de reuso, porém são satisfatórios para anteceder a desinfecção, oferecendo um efluente de melhor qualidade. Neste caso, também é importante destacar a característica desse efluente para anteceder a desinfecção. Assim, esta condição proporciona uma redução na pressão do objetivo da desinfecção que é o decaimento bacteriano. Além disso, ressalta-se que não é objetivo principal da filtração terciária, uma redução significativa de coliformes. Por fim, a diferença significativa de desempenho entre os filtros estudados, encontrada para o parâmetro Turbidez, não foi observada para o parâmetro Coliformes Termotolerantes.

Ao analisar a aplicabilidade das unidades de filtração, pôde-se concluir que o meio filtrante, praticamente não é significativo para a remoção de Coliformes Termotolerantes. Assim, em função do custo do carvão ativado e da areia em cada localidade, pode ser relevante para a definição da adoção do Filtro Simples ou Duplo.

- Avaliar de forma preliminar o desempenho do reator UV para remoção de Coliformes Termotolerantes após a filtração terciária.

Inicialmente, destaca-se que a operação do reator UV se deu somente em três ensaios e dessa forma, não foi possível realizar uma estatística descritiva. Porém, com os resultados operacionais destes três ensaios para ambos os filtros, observou-se desempenho satisfatório para a unidade de desinfecção. Dos 6 resultados de operação do reator UV, considerando efluentes provenientes de ambos os filtros, somente 1 deles apresentou resultado na ordem de grandeza acima de  $10^3$  NMP/100 mL. Ainda, 3 deles apresentaram resultados na ordem de grandeza de  $10^2$  NMP/100 mL e 2 resultados na ordem de grandeza de 10 NMP/100 mL.

Em função da dificuldade de se apresentar um resultado conclusivo sobre o desempenho da unidade de desinfecção UV em razão da quantidade de resultados, sugere-se que esta etapa seja mais desenvolvida em trabalhos futuros.

- Avaliar o potencial do sistema de filtração terciária seguida de radiação UV para produção de água de reuso.

De maneira geral, conclui-se que ambos os filtros apresentaram bons resultados com relação à redução de Turbidez do efluente secundário para preparação à desinfecção, sendo

este o seu principal objetivo. Em se tratando da remoção de Coliformes Termotolerantes, mesmo não sendo objetivo dessa unidade, observou-se um desempenho relevante apesar desta não se mostrar apta à geração de água de reuso de maneira direta. Assim, fica evidente que é necessária a combinação da filtração terciária com a desinfecção UV, como uma ferramenta capaz de contribuir para o alcance do equilíbrio entre custo de implantação e operação das tecnologias, com a qualidade final da água de reuso, além do atendimento aos padrões normativos, norteadores e legais para o reuso de efluentes. Todos os efluentes gerados a partir do fluxograma composto por filtração terciária seguida de desinfecção UV, analisado nessa pesquisa, atendem à pelo menos um dos usos definidos nos documentos citados.

Para tanto, se faz necessário a realização de estudos e investigações com o intuito de identificar ferramentas e procedimentos capazes de contribuir para que se alcance um equilíbrio entre custo de implantação e operação das tecnologias, com a qualidade final da água de reuso.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>> Acesso em 28 de out. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Atlas Esgoto: Despoluição de Bacias Hidrográficas. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <<http://atlasesgotos.ana.gov.br/>> Acesso em 28 de out. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada / Agência Nacional de Águas. - Brasília: ANA, 2017b.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2018.
- AGNHOLETO, R. O.; BOTARI, A. Análise da eficiência da desinfecção de efluente de filtração e valas de filtração via radiação UV. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. in: XXIV Encontro Anual de Iniciação Científica & IV Encontro Anual de Iniciação Científica Jr.2015, Paraná.
- AISSE, M. M.; KIPERSTOK, A. Reuso Urbano e Industrial. IN: PROSAB Reuso – 2006.
- APHA, 2012. Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater, 22nd Ed.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC.
- ARAÚJO, B. M & MANHÃES, A, C, S. & SANTOS, A, S, P Análise das Práticas de Reuso dos Efluentes das Estações de Tratamento de Esgoto do Município do Rio de Janeiro – ETE Alegria e ETE Penha. SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, XVII, jun,2016.
- ARAÚJO, B. M.; SANTOS, A. S. P.; LIMA, M. A. M.; RAMOS, L. T. A. Relação entre capacidade de reuso de efluentes e a demanda hídrica para irrigação no Rio de Janeiro. In: XVIII SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (SULUBESA). 2018, Porto.
- ARAÚJO, B. M.; SANTOS, A. S. P.; SOARES, S. R. A.; MELO, M. C.; OHNUMA JR., A. Aspectos econômicos para o reuso na agricultura na bacia do rio Paraíba do Sul e comparação com o modelo da gestão de cobrança de Israel. In: III Simpósio de Recursos Hídricos do Rio Paraíba do Sul, 2018, Juiz de Fora, MG. Anais III SRH-PS, Juiz de Fora, 2018a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitário. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.969: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.

BAHIA (Estado). Resolução CONERH nº. 75, de 29 de julho de 2010. Estabelece procedimentos para disciplinar a prática de reuso direto não potável de água na modalidade agrícola e/ou florestal. Diário Oficial. Salvador, 2010.

BASTOS, R. K. X.; BELEVILAQUA, P. D. Normas e Critérios da Qualidade para Reuso da Água. IN: PROSAB Reuso – 2006.

BASTOS, R. K. X.; BELEVILAQUA, P. D.; KELLER, R. Organismos Patogênicos e Efeitos Sobre a Saúde Humana. IN: PROSAB Desinfecção de efluentes sanitários – 2003.

BILOTTA, P.; DANIEL, L. A. P. Utilização de lâmpadas germicidas na desinfecção de esgoto sanitário. In: Ambient. Água [online]. 2012, vol.7, n.1, pp.120-129. ISSN 1980-993X Disponível em < <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.845>> Acesso em 15 de jan. 2019

BORGES, E. A. M. A.; SANTOS, A. S. P.; SILVA, J. B. G. Desenvolvimento da Aplicação dos Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo (UASB) no Brasil. In: Revista Internacional de ciências (UERJ), V. 7, n.2, p. 247 – 264, 2017.

CAMPINAS (Município). Resolução conjunta SVDS/SMS nº 09, de 31 de julho de 2014. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais que regulamentam e estimulam a prática de reuso direto não potável de água proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) de sistemas públicos para fins de usos múltiplos no município de Campinas. Diário Oficial [do] Município de Campinas, Campinas, SP, 06 de ago. 2014.

CARVALHO, R.A.; O panorama da água de reuso na indústria brasileira: uma Resposta à demanda hídrica atual por meio de processos Avançados. In: Congresso brasileiro de gestão ambiental, 4, 2013, Salvador. Disponível em < <http://agencia.sanesul.ms.gov.br/Content/TARIFAS2017.pdf>> Acesso em 24 de nov. 2018.

CHERNICHARO, C. A. de L. Reatores Anaeróbios: Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Volume 5. 2ª edição. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA). Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CHERNICHARO, C. A. L.; FLORENCO, L.; BASTOS, R. K. X.; PIVELI, R. P.; VON SPERLING, M.; MONTEGGIA, L. Tratamento de esgotos e produção de efluentes adequados a diversas modalidades de reuso da água. IN: PROSAB Reuso – 2006.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH) – Resolução nº 121, de 16 de dezembro de 2010. Estabelece as diretrizes e os critérios para a prática de reuso direto de água não potável para a modalidade agrícola e florestal definida na Resolução CNRH nº 54, de 28 de novembro de 2005. Diário Oficial [da] União, Brasília, DF, 16 de mar. 2011.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH) - Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água, e dá outras providências. Diário Oficial [da] União, Brasília, DF, 09 de mar. 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial [da] União, Brasília, DF, 16 de mai. 2011.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial [da] União, Brasília, DF, 18 de mar. 2005, p. 58-63.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 274 de 29 de novembro de 2000. Revisa os critérios de Balneabilidade em Águas Brasileiras. Diário Oficial [da] União, Brasília, DF, 25 de jan. 2001, p. 70-71.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Água de Reuso – Modelos de Comercialização. Disponível em: <[http://site.sabesp.com.br/uploads/file/ap\\_sabesp\\_div\\_grand\\_cons\\_ leste.pdf](http://site.sabesp.com.br/uploads/file/ap_sabesp_div_grand_cons_ leste.pdf)>. Acesso em 6 de jan. 2016.

DEZOTTI, M.; SANT'ANNA, G. L. J.; BASSIN, J. P. Processos biológicos avançados para tratamento de efluentes e técnicas de biologia molecular para o estudo da diversidade microbiana. Interciência. Rio de Janeiro, 2011.

DI BERNARDO (coordenador). Filtração Direta Descendente. IN: PROSAB Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta – 2003.

DI BERNARDO (coordenador). Seleção de Alternativas de Tratamento por Filtração Direta e Estudos de Tratabilidade. IN: PROSAB Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta – 2003.

DI BERNARDO (coordenador). Dupla Filtração. IN: PROSAB Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta – 2003.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Centro de Pesquisa Agropecuária do Meio-Norte. REUSO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS TRATADAS NA IRRIGAÇÃO. Teresina, PI - dezembro, 2007.

Heller, Léo; DE Pádua, Valter Lúcio. Abastecimento de Água para Consumo Humano. Belo Horizonte: UFMG, 2006.

GONÇALVES, R.F.; CHERNICHARO, C, A.L.; NETO, C, O. A.; SOBRINHO, P.A KATO, M.T.; COSTA, R, H.R.; AISSE, M. M.; ZAIAT, M. Pós-Tratamento De Efluentes De Reatores Anaeróbios Por Reatores Com Biofilme. IN: PROSAB Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios - 2001.

GONÇALVES, R.F.; CORAUCCI FILHO, B.; CHERNICHARO, C. A.; LAPOLLI, F. R.; AISSE, M. M.; PIVELLI, R. P. Desinfecção por Radiação Ultravioleta. IN: PROSAB Desinfecção de efluentes sanitários – 2003.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE DO RIO DE JANEIRO - INEA. Diretriz de controle de carga orgânica biodegradável em efluentes líquidos de origem sanitária – DZ-215.R-4. Aprovada pela Deliberação CECA nº 4886, de 25 de setembro de 2007.

INTERÁGUAS (Programa de desenvolvimento do setor das águas) Disponível em <[http://interaguas.ana.gov.br/Lists/Licitacoes\\_Docs/Attachments/222/Produto%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20Potencial%20de%20Re%C3%BAso.pdf](http://interaguas.ana.gov.br/Lists/Licitacoes_Docs/Attachments/222/Produto%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20Potencial%20de%20Re%C3%BAso.pdf)> Acesso em 24 de nov. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html>> Acesso em 28 de out. 2018.

JORDÃO, E. P., PESSÔA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 8. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 2017.

JORDÃO, E.P, SOBRINHO, P.A. Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbio – Uma Análise Crítica. In: PROSAB Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios - 2001.

KATO, M.T, COSTA, R, H.R, AISSE, M. M, ZAIAT, M. Pós-Tratamento De Efluentes De Reatores Anaeróbios Por Reatores Com Biofilme. IN: PROSAB Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios - 2001.

LIMA, M. A. M.; RAMOS, L. T. A.; ARAUJO, B. M.; SANTOS, A. S. P. Análise prática dos aspectos legais das principais plantas de reuso potável de água no mundo. In: XVIII Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SULUBESA). 2018, Porto.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H.F (editores). Reuso de Água. Barueri, São Paulo.: Manole,2003.

MARIN, P., TAL, S., YERES, J., KLAS, R. Water Management in Israel. Banco Mundial, 2017. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/28097/119309-WP-PUBLIC-56p-WcmpeProof.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em 19 de mai. 2018.

MELO, A. R. B. Pós-tratamento de efluente de reator UASB por filtração em areia e carvão ativado. 2014. 70 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Recife.

METCALF & EDDY, Inc. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4 ed. Nova York, USA: McGraw-Hill Higher Education, 2003.

MINAS GERAIS – Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N° 01 – Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento,

bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, de 05 de maio de 2008.

MOTA, S.; FONSECA, A. F.; STEFANUTTI, R.; VOLSCHAN JR, I.; NAVAL, L. Irrigação com esgotos Sanitários, e Efeitos nas Palntas. IN: PROSAB Reuso – 2006.

NITERÓI (Município). Lei nº 2.856, de 26 de julho de 2011. Estende as obrigações da Lei nº. 2.630, de 07 de janeiro de 2009, instituindo mecanismos de estímulo à instalação de sistema de coleta e reutilização de águas servidas em edificações públicas e privadas. Niterói, RJ, 26 jul. 2011.

OMS - WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, Vol.3, Wastewater Use in Agriculture, WHO, Genebra, 3a, edição, 2006.

PIERONI, M. F. Avaliação da viabilidade de implantação de unidades de reúso em estações de tratamento de esgoto: Estudo de Caso para a Zona Oeste do Rio de Janeiro. 2016. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Revista Meio Filtrante (MF). Disponível em:<  
<http://www.meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=5583&link=noticias>> Acesso em 25 de mai. 2018.

REZENDE, A.T.; PEREIRA, R. O.; SANTOS, A. S. P.; SILVA, J. B. G. Reuso de água para fins urbanos não potáveis: regulação nacional e internacional, e critérios de qualidade da água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2017, São Paulo.

RIO DE JANEIRO – DZ 215.R-4. Diretriz de Controle de Carga Orgânica Biodegradável em Efluentes Líquidos de Origem Não Industrial, do Instituto Estadual do Ambiente – INEA, de 25 de setembro de 2007.

RIO DE JANEIRO – NT 202.R-10. Critérios e Padrões para Lançamento de Efluentes Líquidos, do Instituto Estadual do Ambiente – INEA, de 04 de dezembro de 1986.

SÃO PAULO (Estado). Deliberação CRH Nº 156, de 11 de dezembro de 2013. Estabelece diretrizes para o reuso direto de água não potável, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) de sistemas públicos para fins urbanos e dá outras providências, no âmbito do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGRH).

SANTOS, A. S. P.; BILA, D.; Diagnóstico e Estudo de Otimização do Desempenho Operacional das ETEs – Sapucaia/RJ (Relatório 1). Rio de Janeiro, 2017.

SÃO PAULO (Estado). Resolução conjunta SES/SMA/SSRH Nº 01, de 28 de junho de 2017. Disciplina o reuso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário e dá providências correlatas.

SILVA, K. C.; SANTOS, R. A.; SANTOS, A. S. P. Estudo sobre a atual situação de reuso de águas servidas tratadas no Brasil e no mundo. In: XVII Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SULUBESA). 2016, Florianópolis.

SINDUSCON-SP: Manual de Conservação e reúso de água em edificações, FIESP/CIESP/SINDUSCON. São Paulo, SP, 2005.

TONETTI, A. L.; CORAUCCI FILHO, B.; NICOLAU, C. E.; BARBOSA, M.; TONON, D. Tratamento de esgoto e produção de água de reúso com o emprego de filtros de areia. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v17, n. 3, p.287-294, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v17n3/v17n3a05>> Acesso em 15 de jan. 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Guidelines for Reuse: EPA - 600/R-12-131. Washington,D.C. USA, 2012.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UFMG) 4ªED.2014.

VON SPERLING, M. Princípios de tratamento biológico de águas residuárias - volume 1: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UFMG), 4ªED.2014.

WHO – World Health Organization. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Technical Report series, Genebra: n. 778, 1989.

## ANEXO A – Tabela T student

<i>v</i>	$\alpha$						
	0.40	0.30	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025
1	0.325	0.727	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706
2	0.289	0.617	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303
3	0.277	0.584	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182
4	0.271	0.569	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776
5	0.267	0.559	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571
6	0.265	0.553	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447
7	0.263	0.549	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365
8	0.262	0.546	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306
9	0.261	0.543	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262
10	0.260	0.542	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228
11	0.260	0.540	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201
12	0.259	0.539	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179
13	0.259	0.538	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160
14	0.258	0.537	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145
15	0.258	0.536	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131
16	0.258	0.535	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120
17	0.257	0.534	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110
18	0.257	0.534	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101
19	0.257	0.533	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093
20	0.257	0.533	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086
21	0.257	0.532	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080
22	0.256	0.532	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074
23	0.256	0.532	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069
24	0.256	0.531	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064
25	0.256	0.531	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060
26	0.256	0.531	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056
27	0.256	0.531	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052
28	0.256	0.530	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048
29	0.256	0.530	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045
30	0.256	0.530	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042
40	0.255	0.529	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021