



UNIVERSIDADE DE RIBEIRÃO PRETO
Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental

GUSTAVO ALMEIDA FRATA

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA
DIMENSIONAMENTO DE ESTUFA DE SECAGEM NATURAL
PARA LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

RIBEIRÃO PRETO
2019

Gustavo Almeida Frata

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA
DIMENSIONAMENTO DE ESTUFA DE SECAGEM NATURAL
PARA LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Tese apresentada como requisito para
obtenção do título de Doutor pelo
programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Ambiental do
Centro de Ciências Exatas, Naturais e
Tecnologias da Universidade de Ribeirão
Preto.
Área de concentração: Tecnologia
Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Luciano Farias de
Novaes

Ribeirão Preto
2019

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de
Processamento Técnico da Biblioteca Central da UNAERP

- Universidade de Ribeirão Preto -

Frata, Gustavo Almeida, 1988-

F844d Desenvolvimento de metodologia para dimensionamento de
estufa de secagem natural para lodo de estações de tratamento
de água / Gustavo Almeida Frata. – Ribeirão Preto, 2019.
191 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Farias de Novaes.

Tese (doutorado) - Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP,
Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2019.

1. Lodo de ETA. 2. Resíduos Gerados em ETA. 3. Secagem
Natural. I. Título.

CDD 628

Gustavo Almeida Frata

**“ DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE
ESTUFA DE SECAGEM NATURAL PARA LODO DE ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ÁGUA”.**

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor pelo programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto.

Orientador: Prof. Dr Luciano Farias De Novaes.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental

Data de defesa: 13 de junho de 2019

Resultado: APROVADO

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciano Farias De Novaes
Presidente/UNAERP

Profa. Dra. Luciana Rezende Alves de
Oliveira
UNAERP

Prof. Dr. Valdir Schalch
UNAERP

Prof. Dr. Celso Luiz Franzotti
FATEC

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Córdoba
UFSCAR

Ribeirão Preto
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de, a cada dia, poder dar um passo adiante nesta existência, pela saúde concedida e pela graça de desfrutar do amor das pessoas que me rodeiam.

À minha esposa Cristiane Aparecida Donzeli Frata, pelo amor, companheirismo, compreensão e por cuidar de nossa família em todas as horas que estive ausente a trabalho ou em estudos.

À minha família, em especial ao meu pai Paulo e minha mãe Márcia, por sempre dar, a mim e a meus irmãos, exemplo de dedicação, amor, respeito e honestidade.

Ao meu orientador, o Prof. Luciano Novaes, que tem sido inspiração a todos que tem a oportunidade de conhecê-lo; por todo incentivo para a realização deste trabalho, por todos seus ensinamentos, pela confiança, respeito e carinho despendido.

A todos meus professores do Doutorado, principalmente ao Prof. Dr. Valdir Schalch, Prof. Dr. Murilo Innocentini, Profa. Dra. Maristela Martinez, Profa. Dra. Cristina Paschoalato e Profa. Dra. Ângela Dantas e à Coord. Profa. Dra. Luciana Rezende Alves de Oliveira, por todo conhecimento e experiência transmitida.

Aos meus colegas do doutorado pelo apoio e incentivo, principalmente para meu grande amigo Branco (José Eduardo Freire), pelo companheirismo e pelas palavras de incentivo.

Ao departamento de Pós-Graduação da UNAERP, em nome de Marcela Berti e Carla Roberta de Almeida, por toda receptividade e prontidão quanto aos assuntos relacionados ao curso.

À UNAERP, pelo apoio e pela bolsa de estudos.

Aos diretores e funcionários da empresa Águas de Mandaguahy, pelo apoio e incentivo nas pesquisas e contribuição nos trabalhos realizados.

A todos, que direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

“Todas as ciências se encadeiam e se sucedem numa ordem racional; nascem uma das outras, na medida que encontram um ponto de apoio nas ideias e nos conhecimentos anteriores”.

(Allan Kardec, A Gênese, Cap.01 – 17)

RESUMO

Em todos os processos de tratamento de água há a geração de resíduos sólidos, sendo estes denominados de 'lodo' ou 'resíduos gerados em ETA', os quais, quando despejados in natura nos corpos d'água, proporcionam impactos significativos no meio ambiente. Atualmente a maioria das ETAs existentes no país ainda despejam os resíduos sólidos, gerados nas etapas de tratamento, diretamente nos mananciais sem o devido tratamento. O lodo de ETA é incluído na definição de resíduos sólidos da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS como Resíduos de Serviço Públicos de Saneamento Básico, devendo assim, receber adequada gestão e gerenciamento em prol da preservação ambiental. De forma a contribuir com o gerenciamento dos resíduos gerados em ETA, diminuindo significativamente o volume de resíduos a serem dispostos, o objetivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento de uma metodologia para o dimensionamento de estufa de secagem de lodo para estações de tratamento de água – ETA, a partir de seus parâmetros operacionais tais como vazão e concentração de sólidos totais da água bruta e dosagem de produtos químicos. Os estudos foram realizados em uma ETA em operação do tipo Floto-filtração, a partir do lodo centrifugado (pós processo de centrifugação), na qual alcança em média 20% de ST – Sólidos Totais. O lodo centrifugado foi posto em secagem natural em estufa piloto de polipropileno construída nas imediações da ETA em estudo. Foi desenvolvida uma metodologia para o dimensionamento de estufa de secagem de lodo previamente desaguado, na qual é apresentada uma equação que, a partir dos dados operacionais de uma ETA, tais como vazão, dosagens de produtos químicos, turbidez média e a concentração de sólidos da saída de lodo da ETA e concentração de sólidos desejada para o lodo seco, é possível a determinação da área útil da estufa de secagem natural. Para atendimento da ETA de estudo de vazão de 600,0 m³/h, a massa de lodo seco calculada foi de 651 Kg/dia, sendo necessária uma área útil calculada de 743,0 m² para secagem natural em estufa do lodo pré-desaguado em centrífuga, com altura de leiras de lodo de 0,35 m e tempo de secagem de 97 dias. Verifica-se que foi possível que o lodo posto em secagem na estufa com concentração de sólidos totais de 20%, alcançasse uma concentração de 90% de ST, o que garante uma diminuição significativa de volume de resíduos sólidos finais a serem gerenciados.

Palavras-chave: Lodo de ETA. Resíduos Gerados em ETA. Secagem Natural. Estufa de Secagem de Lodo. Resíduos de Serviço Públicos de Saneamento Básico.

ABSTRACT

In all water treatment processes there is the generation of solid wastes, these being called 'sludge' or 'wastes generated in WTP', which, when dumped in natura in water bodies, provide significant impacts on the environment. Currently, most of the existing WTP in the country still discharge the solid waste generated in the treatment stages, directly into the wells without proper treatment. WTP sludge is included in the solid waste definition of the National Solid Waste Policy - NSWP as Public Waste of Basic Sanitation, and must therefore receive adequate management and management in favor of environmental preservation. In order to contribute to the management of waste generated in WTP, significantly reducing the volume of waste to be disposed, the objective of this work was to develop a methodology for the design of a sludge drying greenhouse for water treatment plants - WTP, from its operational parameters such as flow and concentration of total solids of the raw water and dosage of chemical products. The studies were carried out in an WTP in operation of the Floto-filtration type, from the centrifuged sludge, in which it reaches on average 20% TS - Total Solids. The centrifuged sludge was placed in natural drying in a polypropylene pilot greenhouse constructed near the WTP under study. A methodology was developed for the design of a previously dewatered sludge drying kiln, in which an equation is presented which, from the operational data of an WTP, such as flow rate, chemical dosages, average turbidity and solids concentration of the WTP sludge and desired solids concentration for the dry sludge, it is possible to determine the useful area of the natural drying greenhouse. The calculated mass of dry sludge was 651 kg/day and a calculated area of 743.0 m² was required for natural drying in a pre-drained sludge kiln in a centrifuge, with sludge height of 0.35 m and drying time of 97 days. It was verified that it was possible that the sludge put to drying in the oven with a total solids concentration of 20% reached a concentration of 90% TS, which guarantees a significant decrease in the volume of final solid waste to be managed.

Keywords: WTP sludge. Waste Generated in WTP. Natural Drying. Sludge Drying Oven. Waste from Public Service of Basic Sanitation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Principais tecnologias de tratamento de água para abastecimento público, adotadas no Brasil.....	42
Figura 2. Divisão em áreas quanto à origem dos Resíduos Sólidos - Art. 13. da PNRS - detalhe para resíduos do saneamento.....	45
Figura 3. Estratégia de gestão integrada de resíduos sólidos.....	46
Figura 4. Tanque de recepção e regularização – TRR de uma ETA.....	59
Figura 5. Tanque de Recebimento de Descarte dos Decantadores/Flotadores – TRDD e Tanque de Recebimento da água de lavagem dos filtros – TRALF.	60
Figura 6. Sistema de recepção de resíduos gerados em ETA's seguido de adensamento por gravidade ou mecanizado.....	62
Figura 7. Tecnologias mais utilizadas para desaguamento de lodos de ETA's.....	63
Figura 8. Modelo de Decanter Centrífugo para desaguamento de lodos	64
Figura 9. Filtração em geotêxtil para desaguamento de Lodos.....	65
Figura 10. Lagoas de Lodo.....	66
Figura 11. Leitões de drenagem (a) e Leito de secagem (b).....	68
Figura 12. Processos de remoção de água de lodos	71
Figura 13. Esquema de estufa de secagem solar	72
Figura 14. Planta de secagem solar na Manágua / Nicarágua.....	73
Figura 15. Vista interna de unidade de secagem solar – sistema Huber.	73
Figura 16. Vista interna de unidade de secagem solar – Palma de Mallorca/Espanha.....	74
Figura 17. Unidade de secagem solar da ETE de Fethiye/ Turquia.	74
Figura 18. Modelo de gestão para os resíduos gerados em ETA's.....	77
Figura 19. Sistemas de tratamento de água e de esgoto nas Bacias PCJ.....	78
Figura 20. Diagrama conceitual dos volumes de água e de lodos produzidos em uma ETA de ciclo completo que utiliza sais de alumínio ou ferro como coagulante e algumas opções de tratamento do lodo e disposição final dos resíduos.....	81

Figura 21. Etapas da metodologia utilizada neste trabalho	82
Figura 22. Esquema de filtração com interrupção por perda de carga em uma ETA	85
Figura 23. Perfil esquemático do módulo de Floto-filtração da ETA em estudo	86
Figura 24. Módulo de Floto-filtração da ETA de estudo – momento antes da lavagem do filtro	87
Figura 25. Canais de divisão de fluxo de água coagulada para os 03 módulos de tratamento da ETA de estudo.....	89
Figura 26. Floto-filtro da ETA de estudo – vista para o raspador de lodo flotado.....	88
Figura 27. Vista lateral do Tanque de Acúmulo de Lodo flotado da ETA de estudo .	88
Figura 28. Lavagem do filtro da ETA de estudo – momento da injeção de ar no meio filtrante	89
Figura 29. Lavagem do filtro da ETA de estudo – momento da abertura da calha de coleta de água de lavagem	90
Figura 30. Momento da lavagem do filtro em um dos módulos de tratamento da ETA de estudo.....	91
Figura 31. Perspectiva esquemática do Tanque de Água de Lavagem dos Filtros da ETA de estudo.....	92
Figura 32. Localização do Tanque de Acumulo de Lodo da ETA de estudo	92
Figura 33. Vista do Tanque de Acúmulo de Lodo da ETA de estudo.....	93
Figura 34. Turbidímetro utilizado para análise de turbidez das amostras de água de lavagem dos filtros da ETA de estudo.....	94
Figura 35. Projeto da estufa piloto para secagem de lodo da ETA em estudo.....	100
Figura 36. Modelo de placa de policarbonato utilizada na estufa piloto para secagem natural do lodo da ETA de estudo	101
Figura 37. Estufa piloto construída na ETA em estudo, para avaliação da secagem de lodo centrifugado.....	101
Figura 38. Momento do descarregamento de lodo centrifugado na estufa de secagem piloto da ETA de estudo.....	102
Figura 39. Preenchimento e nivelamento das leras de secagem dentro da estufa piloto, com altura pré-definas, na ETA de estudo.....	103

Figura 40. Transporte da caçamba estacionária com uso de caminhão munck e descaramento do lodo centrifugado na estufa piloto na ETA de estudo	103
Figura 41. Local de instalação do instrumento de medição de temperatura e umidade fora da estufa piloto na ETA de estudo	104
Figura 42. Instrumento de medição de temperatura e umidade instalado do lado externo da estufa piloto de secagem de lodo na ETA de estudo	105
Figura 43. Instrumento registrador de temperatura e umidade utilizado na estufa piloto da ETA de estudo	105
Figura 44. Captura da tela de programação dos parâmetros de registro do instrumento de medição de temperatura e umidade utilizado na estufa piloto da ETA de estudo.....	107
Figura 45. Captura de tela de registro de dados de temperatura e umidade pelo instrumento instalado na estufa piloto da ETA de estudo	107
Figura 46. Procedimento de inserção de tubo PVC 3/4” para extração de amostra de lodo na leira de secagem da estufa implantada na ETA de estudo.....	108
Figura 47. Tubo amostrador retirado da leira de lodo da estufa implantada na ETA de estudo	109
Figura 48. Amostras de lodo extraídas com o tubo amostrador de PVC na estufa implantada na ETA de estudo	109
Figura 49. Espalhamento da amostra no prato de alumínio para determinação da umidade e fração de sólidos em balança determinadora de umidade	110
Figura 50. Balança determinadora de umidade utilizada nos ensaios de análise de secagem do lodo seco pela estufa piloto. À direita, balança ‘tarada’ e pronta para procedimento.....	111
Figura 51. Vista frontal de determinador de umidade e elementos do equipamento	112
Figura 52. Esquema de secagem do equipamento medidor de umidade ID200, no modo “auto”	112
Figura 53. Amostra de lodo colocada na balança determinadora de umidade na ETA de estudo.....	113
Figura 54. Balança determinadora de umidade em operação.....	113
Figura 55. Final do processo de determinação da fração de sólidos da amostra de lodo, na balança determinadora de umidade	114

Figura 56. Localização do município de Jahu no estado de São Paulo - Brasil	117
Figura 57. Classificação climática de Koeppen do Estado de São Paulo	118
Figura 58. Localização da UGRHI 13 no Estado de São Paulo	119
Figura 59. Sistema operacional de captação e tratamento de água superficial da ETA de estudo.....	121
Figura 60. Localização da ETA de estudo no município de Jaú.....	122
Figura 61. Local de captação de água bruta e o caminhamento da adutora que leva água a ser tratada para a ETA de estudo	123
Figura 62. Disposição geral esquemática e linhas de fluxo da ETA de estudo	125
Figura 63. Fluxograma simplificado da ETA Floto-Filtração de estudo	126
Figura 64. Planta esquemática da ETA Floto-filtração de estudo.....	127
Figura 65. Paradas de produção da planta de tratamento de água em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018	132
Figura 66. Sala de preparação de polímero para dosagem na linha de lodo que chega à centrífuga na ETA de estudo	133
Figura 67. Vista da centrífuga de lodo da ETA em estudo	134
Figura 68. Vista frontal da centrífuga de lodo da ETA em estudo	134
Figura 69. Média diária do pH medido para a água bruta da ETA em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018	136
Figura 70. Média diária da cor medida para a água bruta da ETA em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018	137
Figura 71. Média diária da turbidez medida para a água bruta da ETA em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018	137
Figura 72. Média diária do pH medido para a água tratada da ETA em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018	138
Figura 73. Média diária da cor medida para a água tratada da ETA em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018	138
Figura 74. Média diária da turbidez medida para a água tratada da ETA em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018	139

Figura 75. Conjunto moto bomba de lavagem dos filtros da ETA em estudo – detalhe para a placa de identificação – vazão de 1.000m ³ /h	145
Figura 76. Amostras coletadas minuto a minuto durante o processo de lavagem dos filtros da ETA em estudo	147
Figura 77. Resultados da amostragem minuto a minuto do processo de	148
Figura 78. Quantitativos dos resíduos gerados na lavagem de filtros na ETA em estudo	150
Figura 79. Quantitativos dos resíduos gerados no flotor da ETA em estudo	151
Figura 80. Média das temperaturas máxima, média e mínima diária, externa à estufa piloto implantada na ETA de estudo, durante o ensaio de secagem 01	156
Figura 81. Média das Umidades máxima, média e mínima diária, externa à estufa piloto implantada na ETA de estudo, durante o ensaio de secagem 01	156
Figura 82. Temperaturas máximas e mínimas médias do município de Jahu – série histórica 1980 a 2016	157
Figura 83. Aspecto do lodo centrifugado (~21% de ST) e encaminhado para secagem na estufa piloto implantada na ETA de estudo	159
Figura 84. Aspecto do lodo após 10 dias de secagem na estufa piloto implantada na ETA de estudo (~38% de ST)	159
Figura 85. Aspecto do lodo na leira de secagem (camada de 20cm) após 15 dias de secagem na estufa piloto implantada na ETA de estudo (~46% de ST)	160
Figura 86. Aspecto do lodo após 20 dias de secagem na estufa piloto implantada na ETA de estudo (~52% de ST)	160
Figura 87. Aspecto do lodo na leira de secagem (camada 20cm) após 50 dias de secagem na estufa piloto implantada na ETA de estudo (~80% de ST)	161
Figura 88. Concentrações de ST do lodo no ‘período de secagem 01’ na estufa piloto implantada na ETA de estudo, para as camadas de 20, 30 e 60cm	163
Figura 89. Concentrações de ST do lodo no período de secagem 02 na estufa piloto implantada na ETA de estudo, para as camadas de 20, 30 e 60cm	165
Figura 90. Taxas de secagem obtidas a partir da linearização das curvas de secagem de lodo na estufa piloto implantada na ETA de estudo para as camadas de 20, 30 e 60cm.....	167

Figura 91. Variação da Área Útil e do Tempo de Secagem em relação à altura da camada de Lodo para a ETA em estudo 173

Figura 92. Disposição esquemática das leiras de secagem na estufa para a ETA em estudo (leiras de 0,35m de altura de lodo desaguado e 97 dias de secagem) 176

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estimativa da massa seca diária e anual gerada em uma ETA de ciclo completo.....	53
Tabela 2. Concentrações típicas para alguns parâmetros dos resíduos de ETA	54
Tabela 3. Características de águas de lavagens de filtros de ETA's.....	55
Tabela 4. Aspectos do lodo - coagulantes a base de sulfato de alumínio.....	56
Tabela 5. Caracterização do Resíduo (lodo centrifugado) da ETA em estudo, segundo NBR 10.004	135
Tabela 7. Resumo do controle qualitativo da água potável produzida pela ETA de estudo no período de 2017– mensal	140
Tabela 8. Qualidade da água bruta que foi tratada no Módulo A da ETA, no período de realização dos estudos.....	141
Tabela 9. Qualidade da água bruta que foi tratada no Módulo C da ETA, no período de realização dos estudos.....	141
Tabela 9. Qualidade da água bruta que foi tratada no Módulo C da ETA, no período de realização dos estudos (continuação)	142
Tabela 10. Dados médios operacionais do processo de filtração do módulo A da ETA em estudo.....	142
Tabela 11. Dados médios operacionais do processo de filtração do módulo C da ETA em estudo.....	143
Tabela 12. Dimensões do tanque, volume e vazão de água de lavagem calculado para o Filtro A da ETA em estudo	144
Tabela 13. Dimensões do tanque, volume e vazão de água de lavagem calculado para o Filtro C da ETA em estudo	144
Tabela 14. Quantitativos do lodo gerado na unidade de flotação da ETA em estudo –	146
Tabela 15. Quantitativos do lodo gerado na unidade de flotação da ETA em estudo –	146
Tabela 16. Relação entre a Turbidez e a concentração de ST (coeficiente 'a') de amostras de lodo coletadas na ETA em estudo	148

Tabela 17. Comparação dos cálculos de massa seca total, dos resíduos sólidos gerados na ETA em estudo, realizados através de ensaios em campo e de equação empírica.....	154
Tabela 18. Valores médios das temperaturas e umidades máxima, média e mínima diária, monitorados no lado externo da estufa piloto implantada na ETA de estudo no período de secagem 01	156
Tabela 19. Valores médios das temperaturas e umidades máxima, média e mínima diária, monitorados no lado externo da estufa piloto implantada na ETA de estudo no período de secagem 02.....	157
Tabela 20. Concentrações de ST do lodo no ‘período de secagem 01’ na estufa piloto implantada na ETA de estudo, com uma camada de 20cm.....	161
Tabela 21. Concentrações de ST do lodo no ‘período de secagem 01’ na estufa piloto implantada na ETA de estudo, com uma camada de 30cm.....	162
Tabela 22. Concentrações de ST do lodo no ‘período de secagem 01’ na estufa piloto implantada na ETA de estudo, com uma camada de 60cm.....	162
Tabela 23. Concentrações de ST do lodo no ‘período de secagem 02’ na estufa piloto implantada na ETA de estudo, com uma camada de 10cm.....	163
Tabela 24. Concentrações de ST do lodo no período de secagem 02 na estufa piloto implantada na ETA de estudo, com uma camada de 30cm	164
Tabela 25. Concentrações de ST do lodo no período de secagem 02 na estufa piloto implantada na ETA de estudo, com uma camada de 60cm	164
Tabela 26. Taxas de secagem obtidas a partir da linearização das curvas de secagem de lodo na estufa piloto implantada na ETA de estudo para as camadas de 10, 20, 30 e 60cm.....	166
Tabela 27. Período calculado para o atingimento da concentração de ST para as camadas de 20, 30 e 60cm de lodo na estufa piloto, com base nas taxas de secagem de cada camada	168
Tabela 28. Estimativa da massa seca diária e anual gerada na ETA em estudo, no período de 2018	170
Tabela 29. Variáveis de processo de tratamento de água da ETA em estudo.....	172
Tabela 30. Variação da Taxa de Secagem e da Área Útil de secagem em relação à altura da camada de Lodo para a ETA em estudo	172

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Etapas do sistema de abastecimento de água - SAA.....	40
Quadro 2. Relação de dados operacionais recomendados para realização de projetos de sistemas de tratamento de resíduos de ETA.....	51
Quadro 3. Tecnologia de tratamento e características do sistema de lavagem, método de filtração e coagulantes utilizados nas ETA's A, B, C e D.....	54
Quadro 4. Algumas vantagens e desvantagens para os tipos mais comuns de adensadores de lodo.....	62
Quadro 5. Fases da realização experimental realizada na ETA Floto-filtração.....	84
Quadro 6. Características do instrumento de medição de temperatura e umidade utilizado na estufa de secagem piloto na ETA de estudo.....	106
Quadro 7. Dados Técnicos do equipamento medidor de umidade utilizados nos ensaios de determinação de ST do lodo na ETA de estudo	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ALF	Água de Lavagem dos Filtros
AS, Dal	Dosagem de sulfato de alumínio
ASL	Área Total Útil de Secagem
AT	Área Total
Au	Área útil
C	Concentração
CAB	SST (médio) Água Bruta
CADRI	Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental
CC	Ciclo Completo
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Cf -	Concentração ST desejada do Lodo seco na Estufa
Ci	Concentração ST do Lodo na saída desaguamento
cm	Centímetro
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
d	Dia
DAL	Dosagem de Coagulante (a base de Alumínio)
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DF	Filtração Direta
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ETR	Estação de Tratamento de Resíduos
f	Função
FDA	Filtração Direta Ascendente
FDD	Filtração Direta Descendente
Fe	Ferro
FF	Floto-filtração
FiME	Filtração em Múltiplas Etapas
h	Altura
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Kg	Quilograma
L	Litro
m	Metro
m ²	Metro quadrado

m ³	Metro cúbico
mg	Miligrama
MSS	Massa Seca Total
N	Normal
NBR	Norma Brasileira Registrada
NMP	Número Mais Provável
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
ONU	Organização das Nações Unidas
P, Pss	Produção de sólidos
PAC	Policloreto de Alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
Pt	Partículas
Q	Vazão
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
s	Segundo
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
T	Tempo ou Temperatura
TAR	Tanque de Água Recuperada
TF	Tempo de Filtração ou Carreira de Filtração
TRALF	Tanque de Recebimento da água de lavagem dos filtros
TRDD	Tanque de Recebimento de Descarte dos Decantadores/Flotadores
TRR	Tanque de Recepção e Regularização
Ts	Tempo de secagem
Tu	Turbidez
Txs	Taxa de secagem
U	Umidade
UC	Unidade de Cor
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UNCRD	Comissão das Nações Unidas para o Desenvolvimento Regional
uT	Unidade de Turbidez
V	Volume
VAF	Volume da Água Filtrada
γ	Massa específica do Lodo
Δ	Variação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
2	OBJETIVOS	25
2.1.	OBJETIVO GERAL	25
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
3	REVISÃO DE LITERATURA	26
3.1.	VISÃO GERAL DO SANEAMENTO BÁSICO	26
3.1.1.	Saneamento no Brasil	30
3.2.	ENQUADRAMENTO LEGAL E DESAFIOS PARA POTABILIDADE DA ÁGUA ..	32
3.2.1.	Desafios no Tratamento das Águas Contaminadas	34
3.2.1.1.	Microalgas; Cianobactérias e Toxicinas	34
3.2.1.2.	Agroquímicos	35
3.2.1.3.	Subprodutos orgânicos halogenados	35
3.2.1.4.	Hormônios, antibióticos e outros fármacos.....	36
3.2.1.5.	Nitrogênio amoniacal.....	37
3.3.	SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO	38
3.4.	ASPECTOS LEGAIS DA DESTINAÇÃO E DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETA	43
3.5.	QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETA'S	48
3.6.	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETA'S.....	53
3.7.	TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETA'S	56
3.7.1.	Recepção dos Resíduos	58
3.7.2.	Condicionamento	59
3.7.3.	Adensamento	61
3.7.4.	Desaguamento do Lodo	63
3.7.4.1.	Centrífugas.....	64
3.7.4.2.	Membrana geotêxtil	65
3.7.4.3.	Lagoa de lodo.....	66
3.7.4.4.	Secagem natural: leitos de secagem e leitos de drenagem	66
3.7.4.4.1.	Secagem solar de lodos: experiência internacional	69
3.8.	DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO	77
4	MATERIAL E MÉTODOS	82

4.1.	CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	83
4.2.	QUANTIFICAÇÃO DOS VOLUMES DE PRODUÇÃO DE ÁGUA TRATADA E DE RESÍDUOS GERADOS, E DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS E DO LODO GERADO.....	83
4.2.1.	Volume da Água Filtrada, Volume de Água de Lavagem dos Filtros e Volume do Descarte Sobrenadante do Flotador	84
4.2.1.1.	Volume da água filtrada no módulo de filtração	85
4.2.1.2.	Volume de água de lavagem dos filtros.....	86
4.2.2.1.	Volume de lodo gerado na raspagem dos flotadores	91
2.2.1.	Quantificação da Massa Seca dos Resíduos da Lavagem dos Filtros e do Lodo Sobrenadante dos Flotadores	93
2.2.1.1.	Quantificação da massa seca dos resíduos da lavagem dos filtros ...	93
2.2.1.2.	Quantificação da massa seca dos resíduos dos flotadores.....	95
2.2.2.	Cálculo da Massa de Lodo Seco Total	96
2.3.	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS FATORES TEMPERATURA E TEMPO NA SECAGEM DO LODO DA ETA EM ESTUFA DE POLIPROPILENO	97
2.3.1.	Construção da Estufa de Secagem Piloto	98
2.3.1.1.	Leiras de secagem internas à estufa.....	102
2.3.2.	Monitoramento de Temperatura e Umidade do Ar	104
2.3.3.	Monitoramento da Concentração Sólidos Totais do Lodo em fase de secagem.	107
2.4.	DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTUFA DE SECAGEM PARA ETA	114
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	117
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	117
5.1.1.	Descrição da ETA de Estudo	121
5.1.1.1.	Canal de chegada de água bruta e mistura rápida.....	128
5.1.1.2.	Floculadores.....	129
5.1.1.3.	Flotação por ar dissolvido.....	129
5.1.1.4.	Filtração.....	130
5.1.1.5.	Casa de química e condicionamento final da água filtrada	131
5.1.1.6.	Reservatório de água tratada	131
5.1.1.7.	Tratamento dos resíduos gerados na ETA.....	132
5.1.2.	Parâmetros Operacionais e de Qualidade da ETA.....	135

5.1.2.1.	Água bruta.....	135
5.1.2.2.	Água tratada.....	137
5.2.	QUANTIFICAÇÃO DOS VOLUMES DE PRODUÇÃO DE ÁGUA TRATADA E DE RESÍDUOS GERADOS, E DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS E DO LODO GERADO.....	140
5.2.1.	Volume da Água Filtrada, Volume de Água de Lavagem dos Filtros e Volume do Descarte Sobrenadante do Flotador	140
5.2.1.1.	Volume da água filtrada no módulo de filtração	140
5.2.1.2.	Volume de água de lavagem dos filtros.....	144
5.2.1.3.	Volume de lodo gerado na raspagem dos flotadores	145
5.2.2.	Quantificação da Massa Seca dos Resíduos da Lavagem dos Filtros e do Lodo Sobrenadante dos Flotadores	147
5.2.2.1.	Quantificação da massa seca dos resíduos da lavagem dos filtros .	147
5.2.2.2.	Quantificação da massa seca dos resíduos dos flotadores.....	150
5.2.3.	Cálculo da Massa de Lodo Seco Total	152
5.2.3.1.	Cálculo da massa de lodo seco total através de equação empírica .	153
5.3.	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS FATORES TEMPERATURA E TEMPO NA SECAGEM DO LODO DA ETA, APÓS CENTRIFUGAÇÃO, EM ESTUFA DE POLIPROPILENO	155
5.3.1.	Monitoramento de Temperatura e Umidade do Ar	155
5.3.2.	Monitoramento da Concentração Sólidos Totais do Lodo em Fase de Secagem	158
5.4.	DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTUFA DE SECAGEM PARA ETA	168
5.4.1.	Cálculo da Produção de Sólidos Secos Totais.....	169
5.4.2.	Cálculo do Volume de Lodo Desaguado	170
5.4.3.	Cálculo do Tempo e da Área útil de Secagem do Lodo na Estufa ...	171
5.4.4.	Desenvolvimento de Equação Geral para o Cálculo da Área Útil de Secagem de Lodo em Estufa	173
5.4.5.	Estimativa da Área Total de Operação da Estufa.....	174
6.	CONCLUSÕES	177
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	179
ANEXO	189

1 INTRODUÇÃO

O Brasil passa por grandes avanços na temática de proteção ambiental, especialmente com a promulgação de legislações voltadas à preservação dos recursos naturais, exigindo desta forma, um planejamento mais eficaz principalmente dos gestores municipais, que devem estar atentos ao cumprimento das legislações ambientais em comunhão com planejamento urbano e bem-estar da população.

O saneamento é sem dúvida a principal pasta da gestão pública que versa sobre as ações socioeconômicas que visam alcançar a salubridade ambiental, protegendo e melhorando as condições de vida urbana e rural.

Nesta vertente, devem ser adotadas medidas para a universalização ao acesso ao saneamento nos três níveis de governo (Municipal, Estadual e Federal) para que assim, toda população possa ter direito aos serviços abastecimento de água tratada, coleta e tratamento de esgoto, limpeza urbana, manejo de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais, com qualidade.

Vê-se de grande avanço a promulgação da Política Nacional do Saneamento Básico (Lei 11.445/2007), que regulamenta e que contribui para o regimento do saneamento básico nacional, tratando como obrigatoriedade a elaboração de planos municipais direcionados à gestão e ao gerenciamento de cada serviço de saneamento.

Avaliando o cenário brasileiro cabe destacar que ainda há muito a se fazer para a proteção dos mananciais e corpos d'água, relativamente à diminuição do lançamento de esgotos in natura, bem como, com os desperdícios de água, que se torna um tema de muita relevância diante dos cenários de escassez hídrica vivenciados no país e da incessante busca por energias limpas, renováveis e baixo custo.

Verifica-se também a grandeza dos desafios atualmente enfrentados para o fornecimento de água potável com segurança sanitária para a população, a partir de mananciais degradados, principalmente por ação antrópica.

Desta forma, para remover as impurezas presentes na água e satisfazer os padrões de potabilidade, a água deve ser submetida a vários processos e operações de tratamento, constituindo uma Estação de Tratamento de Água – ETA. Assim, para realizar o tratamento da água, em todos os processos, há geração de resíduos

sólidos, sendo estes denominados de “lodo”, os quais quando despejados in natura proporcionam impactos significativos no meio ambiente e principalmente aos mananciais, devido ao aumento da concentração de metais e outras substâncias tóxicas no sedimento, além da diversidade de organismos patogênicos, podendo interferir na reprodutibilidade da biota em geral e inclusive, limitar o uso deste corpo d’água para dessedentação de animais ou como manancial de abastecimento de comunidades localizadas à jusante.

Destaca-se que atualmente cerca de 57% das ETA’s existentes no Brasil ainda estão despejando os resíduos sólidos gerados nas etapas de tratamento diretamente nos mananciais, sem o devido tratamento (CBH-PCJ, 2011).

Os lodos de estações de tratamento de água – ETA’s se incluem na definição de resíduos sólidos da PNRS, devendo estes receberem adequada gestão e gerenciamento em prol da preservação ambiental.

Schalch et al. (2015) esclarece, que uma boa estratégia de gestão dos resíduos sólidos preconizada no PNRS, incluindo nesta gestão os resíduos gerados na ETA’s, é primeiramente a não geração; ou ao menos, não sendo possível ‘Não Gerar’, deve-se pensar em ‘Reduzir’ a quantidade dos resíduos gerados, seguido pela ‘Reutilização’, ‘Reciclagem’ e ‘Recuperação Energética’.

Uma vez gerado, os resíduos sólidos devem ser gerenciados para que não causem impactos negativos ao meio ambiente. Assim, devem sofrer o devido tratamento para que os rejeitos possam ser dispostos de forma ambientalmente correta.

Nesta perspectiva, os lodos gerados em estações de tratamento de água podem ser conduzidos a um bom gerenciamento pelos gestores do setor, de forma a contribuir para a diminuição das disposições inadequadas destes resíduos no solo, ou mesmo pelo lançamento nos corpos d’água, em benefício à fauna e à flora da bacia hidrográfica pertencente.

Sabe-se ainda que são relativamente altos os custos com a destinação e disposição final dos resíduos sólidos, o que contribui para a irresponsabilidade e falta de gerenciamento do setor, principalmente no campo do saneamento básico.

A quantidade e a qualidade dos resíduos gerados em uma ETA dependem de vários fatores tais como a tecnologia de tratamento, vazão, turbidez da água bruta, dosagem de produtos químicos, técnicas de operação, dentre outros, o que

pode dificultar a tomada de decisão quanto ao modelo de gerenciamento adequado para os resíduos sólidos gerados (DI BERNARDO et al., 2012; RICHTER; 2009).

Podendo ser empregado no gerenciamento dos resíduos gerados nas ETA's, a aplicação de estufas de secagem natural de lodo de ETA se mostra favorável, considerando os recursos demandados para a implantação, necessitando de pouca mão de obra para operação e baixo consumo de energia, fatores estes que contribuem para a viabilização da tecnologia em território brasileiro.

Devido a falta de normas técnicas ou mesmo de métodos específicos para dimensionamento de estufas de secagem natural para lodos de ETA, este trabalho consistiu no desenvolvimento de um método para o dimensionamento de estufa de secagem de lodo de ETA, a partir de seus parâmetros operacionais tais como: dosagem de produtos químicos, turbidez média, concentração de sólidos da saída de lodo da ETA e concentração de sólidos desejada para o lodo seco. A partir destes parâmetros operacionais, que fazem parte da rotina operacional de uma planta de tratamento, é possível a determinação da área útil da estufa de secagem natural para o lodo gerado.

Assim, este trabalho visa contribuir para o campo de pesquisa na área de saneamento básico, onde buscou-se realizar estudo para secagem natural dos resíduos gerados em ETA's (lodos), de forma a reduzir consideravelmente os volumes destes resíduos gerados, em proveito inclusive, das condições climáticas do país que favorecem a aplicação desta tecnologia, reduzindo conseqüentemente os custos para a disposição final.

Devido ao seu custo de implantação e operacional reduzido, a secagem solar tem se tornado uma opção estudada e implantada para substituir as tecnologias de secadores térmicos mecânicos em alguns países como Turquia, Grécia, Nicarágua, Espanha e China, com resultados satisfatórios para atendimento da legislação local quanto ao atendimento da concentração mínima de teor de sólidos para disposição final em aterros ou mesmo para disposição em solo agrícola (Al-Muzaini, 2003; Ögleni et al., 2010; Scharenberg et al., 2010; Hii et al., 2012; Bennamoun, 2012; Mathioudakis et al., 2013; Liming Shao, 2015).

2 OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento de um método para o dimensionamento de estufa de secagem natural de lodo de estação de tratamento de água – ETA a partir de seus parâmetros operacionais.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 2.2.1. Caracterizar o sistema de tratamento de água em estudo através de seus parâmetros operacionais e de qualidade;
- 2.2.2. Avaliar a influência dos fatores temperatura e tempo na secagem do lodo desaguado da ETA em estufa de polipropileno;
- 2.2.3. Desenvolver a método para dimensionamento da estufa de secagem natural de lodo para ETA a partir dos dados operacionais da unidade de tratamento.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1. VISÃO GERAL DO SANEAMENTO BÁSICO

Ao longo da década de 1950, as modificações no Brasil começam a se consolidar no que se diz respeito ao consumo e comportamento, principalmente da população que habitava os grandes centros urbanos.

Como descreve Kornis (2012), o processo de mudanças, tanto econômica, política e ideológica, se deu desde os tempos da Segunda Guerra Mundial, propiciado pela produção em massa de bens manufaturados de uso pessoal e doméstico, por influência principalmente dos Estados Unidos.

Nesta década, a paisagem urbana se modificava, surgindo edifícios e casas, juntamente com uma mudança de hábitos de uma sociedade em processo de modernização, com bens de consumo mais acessíveis: uma sociedade urbano-industrial começa a se difundir.

Na década de 70, quando a realidade urbano-industrial se consolida, evidencia-se a necessidade de compatibilização dos instrumentos de regulação ambiental e de política urbana, em que se passou a observar que os problemas ambientais se tornam mais evidentes no meio urbano. Como o processo de execução de políticas públicas não acompanhou o crescimento populacional e das cidades, conseqüentemente se presenciaram os grandes desequilíbrios sociais, econômicos e ambientais (KORNIS, 2012).

Um avanço quanto ao estreitamento das temáticas ambiental e urbana surgiu na promulgação da Constituição Federal de 1988, quando as Leis Orgânicas Municipais e os Planos Diretores tomam forma. Entretanto, ainda está em processo de construção a interligação dos setores governamentais para uma consolidação e posta em marcha de uma gestão sustentável das cidades.

Com objetivo de “ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana” (BRASIL, 1988), os artigos 182 e 183 do capítulo II da Constituição da República Federativa do Brasil, que trata da Política Urbana, são regulamentados pela Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001, lei esta nomeada como “Estatuto da Cidade”.

No Estatuto da Cidade são estabelecidas diretrizes gerais da política urbana a serem executados pelos municípios, no sentido de garantir a todos os cidadãos

acesso à moradia, ao saneamento ambiental, à infraestrutura urbana, ao transporte, aos serviços públicos, ao trabalho e ao lazer.

Em seu art. 2º, inciso IV, é descrito a inter-relação das temáticas urbana e ambiental numa diretriz a ser seguida:

IV - planejamento do desenvolvimento das cidades, da distribuição espacial da população e das atividades econômicas do Município e do território sob sua área de influência, de modo a evitar e corrigir as distorções do crescimento urbano e seus efeitos negativos sobre o meio ambiente (BRASIL, 2001).

Para a viabilização de um planejamento rumo a um desenvolvimento positivo das cidades, em consonância com os aspectos ambientais envolvidos, são necessários cumprimentos de instrumentos urbanísticos, jurídicos e de democratização da gestão urbana, preconizados no Plano Diretor.

No Plano Diretor Municipal são tratadas questões de Política de Desenvolvimento Municipal e questões quanto ao Planejamento Territorial. O conteúdo mínimo do Plano Diretor é estabelecido no artigo 42 do Estatuto da Cidade e especificado através da Resolução nº 34 de 2005 do Conselho Nacional das Cidades – CONCIDADES (SILVA JUNIOR e PASSOS, 2006, p. 12).

No comentário feito sobre o Plano Diretor de Belém, capital do estado do Pará, Maglio (2009) alerta que diversos municípios encontram dificuldades na aplicação dos instrumentos de gestão ambiental no planejamento urbano, o que retrata que poucos planos diretores são elaborados contendo diretrizes compatíveis com sua sustentabilidade ambiental. Mesmo naqueles municípios onde já se aplicam instrumentos urbanísticos como as operações urbanas, o zoneamento territorial e a disciplina de uso e ocupação do solo, ainda se enfrentam conflitos durante a aprovação e execução desses instrumentos, ante os riscos de provocarem novos impactos ambientais nos seus territórios.

A Política Nacional do Saneamento Básico é uma lei federal que estabelece normas para implementação de serviços de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos, drenagem, manejo de águas pluviais e limpeza urbana, pois apresenta critérios e técnicas a serem adotadas pelo município para que garanta a regulação dos mesmos de modo sustentável, a fim de estabelecer aos usuários as condições mínimas de qualidade segundo a norma.

Souza Júnior (2007) complementa que a Política Nacional do Saneamento Básico envolve questões sobre a melhoria da saúde pública, redução da pobreza, a preservação do meio ambiente, qualidade da vida humana, visto que o saneamento básico é o ponto de partida.

A Política Nacional do Saneamento Básico permite:

[...] atender os princípios fundamentais da universalização do acesso; do oferecimento, disponibilidade dos serviços e atividades que compõem o saneamento básico de forma integral; do abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo os resíduos sólidos realizados de forma adequada à saúde pública e a proteção do meio ambiente (SOUZA JÚNIOR, 2007, p. 177).

Conforme se verifica, a Política Nacional do Saneamento Básico promove a universalização dos serviços a todos os municípios brasileiros. Assim, garante a regularidade dos municípios que já possuem os serviços de saneamento básico e a obrigatoriedade para os que ainda não implantaram. Evidentemente, a aplicação deve ser utilizada para que todos tenham o acesso ao saneamento básico, fator indispensável para manter a qualidade de vida humana.

Ainda para Souza Júnior (2007), sobre a política pública de saneamento, a transparência das ações na execução da política pública de saneamento se cumprirá a partir da implantação de um sistema de informações de forma a propiciar processos decisórios institucionalizados, o controle social, a segurança, a qualidade e a regulação dos serviços. Nesse sentido, a Política Nacional do Saneamento Básico permite o fácil acesso às informações que impõe a obrigatoriedade da implementação e regularidade dos serviços que a compõem.

No Brasil, os Planos de Saneamento Básico receberam destaque na Lei Federal nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, atualizada recentemente pela Medida Provisória¹ nº 868, de 27 de dezembro de 2018, bem como nas inúmeras leis estaduais sobre políticas de recursos hídricos. Assim, essa lei instituiu a Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB), entendendo a promoção da salubridade ambiental como um objetivo permanente da Administração Pública Federal, a ser

¹ **Medida Provisória nº 868, de 27 de dezembro de 2018** “Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas competência para editar normas de referência nacionais sobre o serviço de saneamento; a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos; a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País; e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados.”

executada inclusive mediante a cooperação federativa dos Estados, Distrito Federal e Municípios, bem como com suas empresas, concessionárias e autarquias.

É notório e imprescindível ressaltar que a Política Nacional do Saneamento Básico é usada como base para a elaboração de planos de saneamento nos municípios, dos quais se extraem os quesitos mínimos a serem atendidos para a gestão e gerenciamento destes serviços básicos.

Logo, é importante compreender que, garantindo o cumprimento dos serviços do saneamento básico, estar-se-á contribuindo significativamente para a melhoria da saúde pública, evitando o surgimento de doenças, assim garantindo a qualidade de vida em geral da população. Nesse sentido, tem-se a Política Nacional do Saneamento Básico como base que deve ser seguida pelos municípios, a fim de garantir o cumprimento do direito de saneamento básico de maneira indiscriminada.

O Plano de Saneamento Básico é fundamentado na palavra 'planejar', no qual o município organiza o que é necessário fazer em longo prazo nas áreas de abastecimento de água, coleta, afastamento e tratamento de esgoto sanitário, drenagem pluvial e de resíduo sólidos.

Todo município está sujeito a um crescimento, uns mais acentuados que outros, entretanto para todos devem ser previstos através deste plano a necessidade de saneamento básico para novas moradias. Planejar quanto à coleta e transporte do esgoto sanitário. Deve-se pensar que o solo será impermeabilizado e, como consequência, a drenagem pluvial é parte integrante deste planejamento. O "caminhão de lixo" deverá recolher os resíduos sólidos desses novos moradores, essa questão também deve ser discutida no plano.

Nesta vertente, o Plano de Saneamento deve ser fundamentado nas diversas matérias legislativas já vigoradas no município, de forma a organizá-las de maneira exequível em prol do crescimento da qualidade do município. Assim, é importante e indispensável incorporar os instrumentos orientadores, tais como o Plano Diretor do Município, de modo a planejar de forma fundamentada. Quando o Plano Diretor ou mesmo o Plano de Saneamento não apresentam subsídios técnicos, seja na área de saneamento, organizacional ou urbanística, que retratam e orientam o município de forma global, é fundamental a elaboração de "Planos Diretores Setorizados", nos quais os "fragmentos" do município são prognosticados com maior representatividade à realidade de cada setor, dando maior detalhamento técnico por se tratar de regiões menores.

3.1.1. Saneamento no Brasil

Em todo planejamento, não menos importante na área de saneamento, é necessário um diagnóstico preciso sobre o município, percebendo o que está bom e o que precisa ser melhorado. Cabe à gestão municipal ter ciência dos problemas passados e atuais e, na maioria dos municípios, estes problemas já são questões alarmantes, e caso não haja um correto planejamento para aquisição e aplicação de recursos financeiros de maneira ordenada, o município pode entrar em colapso. Isso pode acarretar a falta de água para abastecimento, lançamento inadequado de esgoto doméstico ou mesmo transbordamento deste; pode permanecer resíduos domiciliares nas ruas ou mesmo não ter local adequado para dispô-lo; enchentes e alagamentos; enfim, trata-se de uma questão intrínseca à saúde pública. A falta de água potável, incorreto lançamento de esgoto sanitário, falta de sistema de coleta de resíduos sólidos e enchentes podem acarretar doenças para a população e, infelizmente, essa é uma realidade existente em vários municípios brasileiros.

O Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento - SNIS apurou e divulgou, em fevereiro de 2019, em seu relatório 'Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto', com dados do ano 2017, informações acerca do sistema de abastecimento brasileiro com representatividade de 98,0% da população urbana em relação ao Brasil (172,1 milhões de habitantes), abrangendo 5.126 municípios. Para o esgotamento sanitário, a representatividade foi de 91,9% da população urbana em relação ao Brasil (161,4 milhões de habitantes).

As informações do SNIS (BRASIL, 2019) mostram um elevado índice de contingente de população urbana atendida com redes de água, chegando a uma média nacional de 93,0%, sendo a região sudeste com índice de 95,9% de atendimento. Para o esgotamento sanitário, os resultados não são muito satisfatórios, sendo o índice médio de atendimento nacional na ordem de 60,2% nas áreas urbanas das cidades brasileiras, destacando-se a macrorregião Sudeste, com média de 83,2%. Para o tratamento dos esgotos, os índices médios mostram que apenas 73,7% dos esgotos coletados são tratados, contra apenas 46,0% para a estimativa dos esgotos gerados em todo país.

Relativamente ao consumo de água, o SNIS (BRASIL, 2019) apresenta que a média no país é de 153,6 litros por habitante ao dia, volume diário este que caiu cerca de 4,5% em relação aos últimos 3 anos avaliados (2014, 2015 e 2016). Para o

sudeste, o consumo médio é da ordem de 180,3 l/hab.dia contra 113,6 l/hab.dia no Nordeste. Vale destacar, ainda, o elevado índice de perdas que os sistemas sofrem na distribuição de água, com uma média nacional que alcança 38,3%.

Avaliando o cenário brasileiro, cabe destacar que ainda há muito a se fazer para a proteção dos mananciais e corpos d'água relativamente à diminuição do lançamento de esgotos de tratamento algum, bem como com os desperdícios de água, que se torna um tema de muita importância diante dos cenários de escassez hídrica e dos altos custos de energia elétrica, além de, conforme relatado pelo SNIS (2019), “da sua relação direta com a saúde financeira dos prestadores de serviços, uma vez que podem representar desperdício de recursos naturais, operacionais e de receita.”

Quanto ao cenário dos resíduos sólidos, recorreu-se ao Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2017, divulgado pelo ABRELPE em setembro de 2018, que é a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, um programa reconhecido e mantido pela ONU através da UNCRD – Comissão das Nações Unidas para o Desenvolvimento Regional, que divulga desde 2013 o panorama dos resíduos sólidos no país.

A ABRELPE (2018) apresenta os números referentes à geração de Resíduos Sólidos Urbanos – RSU, que revelam um total anual de 78,4 milhões de toneladas no país, sendo que cerca de 91,2% destes resíduos foram coletados, o que evidencia que 6,9 milhões de toneladas de resíduos não foram objeto de coleta e, conseqüentemente, tiveram destino impróprio. A região Sudeste responde por cerca de 53% do total de resíduos coletados, e apresenta o maior percentual de cobertura dos serviços de coleta do país (98,06%).

Ainda no relatório da ABRELPE (2018), a disposição final adequada de RSU (encaminhado para aterros sanitários) registrou um índice anual de 59,1%. Este índice é preocupante uma vez que as unidades inadequadas, como lixões e aterros controlados, ainda estão presentes em todas as regiões do país e receberam mais de “80 mil toneladas de resíduos por dia, com um índice superior a 40%, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde”.

Para os serviços de drenagem urbana, não há um panorama que possa demonstrar estatisticamente o cenário brasileiro, entretanto, podem-se observar as recorrentes enchentes nas diversas cidades brasileiras, o que demonstra o avanço necessário em planejamento e desenvolvimento urbano associado a este tema.

Diante dos números e apontamento realizados sobre o saneamento, pode-se verificar que ainda são necessários grandes avanços para que a “universalização ao acesso” possa se tornar realidade em todos os municípios brasileiros, conforme preconiza a Lei de Saneamento nacional.

Conforme divulga o Instituto Trata Brasil (2017), a previsão de custos para universalizar o acesso às quatro áreas de serviços do saneamento (água, esgotos, resíduos e drenagem) chega a cerca de R\$ 508 bilhões, no período de 2014 a 2033.

Desta forma, devem ser adotadas medidas para a universalização ao acesso ao saneamento nos três níveis de governo (Municipal, Estadual e Federal) para que, assim, toda população possa ter direito ao abastecimento de água tratada, coleta e tratamento de esgoto, limpeza urbana, manejo de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais, com qualidade. Neste sentido, conforme já mencionado, vê-se de grande avanço a promulgação Política Nacional do Saneamento Básico, Lei Federal nº 11.445 de 2007, e o Decreto n. 7.217 de 2010, responsável por regulamentá-la, que contribui para o regimento do saneamento básico nacional.

Diante das incursões sobre o saneamento brasileiro, resta dizer que o Plano de Saneamento Básico não resolve os problemas, mas aponta quais são e indica os caminhos que devem ser percorridos para a sua resolução. Por esse motivo, os Planos de Saneamento são importantes ferramentas de gestão em todo o mundo.

Devido ao trabalho aqui apresentado ser voltado para a temática de abastecimento de água, em específico para os resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água – ETA's, torna-se necessária a apresentação focada no assunto, a qual será iniciada pelas tecnologias de tratamento de água mais utilizadas no Brasil, passando posteriormente para o enquadramento legal sobre o tema.

3.2. ENQUADRAMENTO LEGAL E DESAFIOS PARA POTABILIDADE DA ÁGUA

Pesa sobre os brasileiros uma grande responsabilidade visto que o país detém o maior volume de água doce do mundo em suas três principais bacias hidrográficas – Amazonas, São Francisco e Paraná-, o que lhe confere uma obrigação legal e moral no que diz respeito à conservação e adequado manejo de tal patrimônio.

Neste viés, em 1997, no Brasil, foi sancionada a Lei das Águas, buscando, de uma maneira geral, uma eficácia na gestão de seus recursos hídricos e instituindo a Política Nacional de Recursos Hídricos.

No Brasil, a água a ser distribuída para a população deve atender ao padrão de potabilidade para consumo humano, de modo a não oferecer riscos à saúde, estabelecido pela Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, que através do Art. 864, inciso CXXXIII, revoga a Portaria nº 2914/2011, e mantém seu conteúdo geral no anexo XX.

Segundo a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 357/2015, os mananciais de água doce podem ser classificados como especial, classe I, classe II, classe III e classe IV, e sugere diferentes usos para cada classe. A escolha do manancial é uma decisão estratégica importante, deve-se levar em consideração a proximidade aos centros urbanos, a qualidade da água bruta, os riscos de poluição nas proximidades do manancial e seu volume deve atender a um horizonte de projeto de no mínimo 25 anos.

Conforme aponta Achon & Vale (2016), a tecnologia de tratamento mais utilizada no País para conferir à água características físico-químicas e biológicas em conformidade com os padrões legais de potabilidade é a de ciclo completo ou convencional.

As atividades humanas levam a usos múltiplos dos recursos hídricos, tais como abastecimento público, irrigação, uso industrial, navegação, recreação, aquicultura, dentre outros. Embora essas atividades variem de acordo com a população na bacia de drenagem e com a organização econômica e social da região, essas atividades geram impactos e deterioração da qualidade da água, assim como interferem na quantidade de água disponível.

Para fornecer água potável e de qualidade para a população, é necessário que a água a ser consumida não somente atenda aos padrões mínimos de qualidade que exigem a legislação pertinente, como, por exemplo, o CONAMA 357/2005 e a Portaria de Consolidação nº 5/2017, mas que também a garantia de uma segurança sanitária possa ser assegurada para toda população.

Cada manancial de recursos hídricos, seja subterrâneo ou superficial, possui suas características próprias, podendo estas características sofrerem alterações de ordem natural com potencial a alterações pela ocorrência antrópica, na qual a bacia hídrica está submetida. Assim, evidenciam-se os desafios para o tratamento de

águas, em que, preliminarmente, são necessários o conhecimento das características físico-químicas e biológicas do manancial a ser explorado, não de forma pontual, mas com informações suficientes, dando representatividade às sazonalidades às quais este corpo hídrico está sujeito.

Além de obter subsídios de ordem qualitativa do manancial, é necessário o conhecimento do comportamento quantitativo, ou seja, é necessária a obtenção de informações da quantidade de água possível de ser explorada de tal manancial (vazão), garantindo que esta exploração não cause impactos negativos à bacia na qual está inserida (DI BERNARDO & SABOGAL PAZ, 2008).

O conhecimento prévio do manancial a ser explorado tem como objetivo principal fornecer elementos técnicos para a escolha de uma ou mais tecnologias para o tratamento da água a ser captada.

3.2.1. Desafios no Tratamento das Águas Contaminadas

Ao obter sobre as tecnologias de tratamento para fornecimento de água com qualidade desejável para a população, é importante também a menção sobre os desafios quanto ao emprego das tecnologias disponíveis para o tratamento de água, no tocante à remoção dos diversos contaminantes existentes, sejam estes principalmente induzidos ou mesmo acentuados por ação antrópica. Dentre estes contaminantes, é possível citar Microalgas; Cianobactérias e Toxicinas; Agroquímicos; Subprodutos orgânicos halogenados; Hormônios, antibióticos e outros fármacos; Nitrogênio amoniacal.

3.2.1.1. Microalgas; Cianobactérias e Toxicinas

Os impactos causados nos ecossistemas aquáticos levam à ocorrência de acelerados processos de eutrofização, causando um enriquecimento artificial desses ecossistemas pelo aumento das concentrações de nutrientes na água, principalmente compostos nitrogenados e fosfatados, o que resulta num aumento dos processos naturais da produção biológica nos corpos d'água. As principais fontes desse enriquecimento têm sido identificadas como sendo as descargas de esgoto doméstico e industriais dos centros urbanos e das regiões agricultáveis.

A principal preocupação com o aumento da ocorrência de florações de cianobactérias em mananciais de abastecimento de água é a capacidade desses microrganismos produzirem e liberarem toxinas (cianotoxinas) para o meio líquido, as quais podem afetar a saúde humana por ingestão de água ou por contato em atividades de recreação no ambiente aquático, bem como por consumo de peixes contaminados, podendo acarretar não somente o aumento no custo do tratamento da água de abastecimento, como consequências relacionadas à saúde pública. A principal via de intoxicação é pelo consumo oral da água sem tratamento adequado para a remoção dessas toxinas (AZEVEDO, 1998; RICHITER, 2009; DI BERNARDO & SABOGAL PAZ, 2008).

As medidas corretivas de controle de algas, cianobactérias e toxinas na água de abastecimento, podem envolver tanto o manejo da captação de água bruta quanto a remoção desses organismos e compostos no sistema de tratamento de água, podendo esta remoção implicar até uma possível alteração da tecnologia empregada para o tratamento.

3.2.1.2. Agroquímicos

Os agroquímicos (agrotóxicos) assumem caráter destacado enquanto contaminantes pela intensidade e uso indiscriminado em todo país. Sua presença nos mananciais pode trazer dificuldades para o tratamento da água em virtude da eventual necessidade de tecnologias mais complexas do que aquelas normalmente usadas, como, por exemplo, em sistema de tratamento convencional (PASCHOALATO et al., 2009, DANTAS, 2009).

A Portaria de Consolidação nº 5/2017 elenca diversos agrotóxicos dos quais estes e outros possíveis devem ser analisados principalmente na fase dos estudos de tratabilidade, no intuito de adotar uma tecnologia adequada para sua remoção.

3.2.1.3. Subprodutos orgânicos halogenados

A formação de subprodutos é resultante, principalmente, da reação entre substâncias químicas utilizadas no tratamento oxidativo com cloro livre e matéria orgânica, tais como os ácidos húmicos e fúlvicos, naturalmente presentes em

mananciais de superfície utilizados para o abastecimento. Os precursores dos subprodutos podem variar de acordo com o manancial de exploração e podem se intensificar nas bacias de intensa ocupação humana e industrial, principalmente pelo lançamento de resíduos, se adequado tratamento (PÁDUA, 2009; DI BERNARDO et al., 2012).

Importância deve ser desprendida acerca destes subprodutos devido à comprovação da causa de câncer em estudos realizados em animais.

Algumas alternativas têm sido propostas para evitar a formação deles, destacando-se o uso de oxidantes e desinfetantes alternativos, tais como ácido peracético, permanganato de potássio, peróxido de hidrogênio, dióxido de cloro, ozônio e radiação ultravioleta. Vale ressaltar que a eficiência dos oxidantes aplicados fica em função da dosagem aplicada e do tempo de contato.

3.2.1.4. Hormônios, antibióticos e outros fármacos

Observa-se a preocupação dada pelos pesquisadores diante da diversidade de produtos farmacêuticos disponibilizados no mercado, agravada pela possível geração de subprodutos, no âmbito de mineralizar e/ou eliminá-los com a aplicação de tecnologias de tratamento, juntamente com a incerteza dos efeitos que estas substâncias podem causar no ecossistema e, por consequência, à saúde humana. Faz-se necessário a aplicação de uma legislação relacionada ao tema que aponte limites de concentração e toxicidade adequados para o lançamento destas substâncias no meio ambiente (PÁDUA, 2009; SACAMOTO, 2014; DI BERNARDO et al., 2012).

Considerando alguns estudos, observa-se a necessidade da aplicação de tratamento terciário no sistema de tratamento de esgotamento para reduzir a concentração de fármacos nas águas a serem lançadas, proporcionando segurança à saúde humana quando da captação delas para abastecimento. Assim, é notório que a melhor condição é remover estes compostos antes de seu lançamento no corpo d'água.

Para a remoção destes contaminantes emergentes na água, os processos oxidativos, tais como cloração, foto-oxidação e ozonização, são eficazes para reduzir as concentrações de várias classes de contaminantes. No entanto, a eficiência de remoção depende da estrutura química do contaminante alvo, bem

como da quantidade de oxidante utilizada, e, como já mencionado, haverá geração de subprodutos que podem ser prejudiciais à saúde humana.

3.2.1.5. Nitrogênio amoniacal

Há sérios problemas quando se identifica a presença de nitrogênio amoniacal na água a ser captada para abastecimento: certamente há lançamentos de águas residuárias à montante da captação; não há tecnologias usuais disponíveis para o tratamento desta água contaminada para abastecimento.

A principal questão é que águas com concentrações consideráveis de nitrogênio amoniacal não deveriam ser utilizadas para abastecimento (pode ser atribuído a esta questão um reuso de esgoto indireto caso fosse utilizada para abastecimento), e, sobretudo, estas águas não deveriam ser lançadas nos corpos d'água sem tratamento prévio e remoção destes contaminantes (DI BERNARDO et al., 2012).

Uma das maneiras apontadas para a remoção do nitrogênio amoniacal é a oxidação com cloro. Entretanto, seriam necessárias altas concentrações na dosagem de cloro para primeiramente oxidar as cloraminas formadas numa primeira etapa reacional a fim de, então, obter o cloro livre na água (*break point*), atendendo o residual de cloro livre a que a legislação determina.

Assim, recai-se sobre uma questão ambiental na qual seriam necessários grandes volumes de cloro disponível em uma instalação de uma ETA, porém dificilmente algum órgão ambiental aprovaria estas instalações perante o grau de risco empregado diante de algum possível vazamento (acidente), principalmente se a ETA em questão estiver instalada próxima às comunidades.

Diante das considerações feitas, verifica-se a grandeza dos desafios atualmente enfrentados para o fornecimento de água potável e com segurança sanitária para a população a partir de um manancial que foi degradado, principalmente por ação antrópica, no qual os contaminantes apontados anteriormente estão presentes, e necessariamente devem ser removidos.

3.3. SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO

A água é o recurso natural mais importante encontrado na Terra, sem ela não existiria vida, pois todos os seres vivos dependem dela para a sua sobrevivência. Apesar de ser encontrada em abundância em nosso planeta, a maior parte é água salgada imprópria para o consumo humano e apenas 0,03% representa água disponível em rios e lagos. Entretanto, a sua degradação e escassez tem se tornado realidade nos últimos anos devido ao crescimento populacional, ao uso excessivo e à poluição dos mananciais, principalmente pelo lançamento de efluentes sem tratamento nos corpos hídricos.

Segundo Miranda e Monteggia (2007), o abastecimento com água de boa qualidade é um dos fatores mais importantes para o desenvolvimento das sociedades, estando diretamente relacionado ao controle e eliminação de doenças e também no aumento da qualidade de vida da população. É direito de todo cidadão o acesso à água potável.

Conforme apontado supra, a Portaria de Consolidação nº 5/2017 estabelece os padrões de potabilidade da água, de modo a ser distribuída para a população sem prejuízo à saúde humana.

Para remover as impurezas presentes na água e satisfazer os padrões de potabilidade estabelecidos na Portaria de Consolidação nº 5/2017, a água deve ser submetida a vários processos e operações de tratamento, constituindo uma Estação de Tratamento de Água – ETA.

É importante evidenciar que a caracterização e a qualidade da água bruta são importantes ferramentas para realizar o diagnóstico de uma ETA, indicando quais as melhores técnicas de tratamento para um determinado tipo de manancial. Para tanto, é necessário a realização de um Estudo de Tratabilidade da água a ser submetida ao tratamento, a fim de verificar as reais condições físico-químicas e bacteriológicas das quais esta água é composta, bem como determinar o mecanismo mais adequado para o tratamento e a potabilização da mesma (DI BERNARDO, 2008; RICHTER; 2009).

Diante dos desafios para tornar a água potável, é necessário garantir que os padrões de potabilidade sejam assegurados.

Para tanto, Di Bernardo & Sabogal Paz (2008) esclarece que é preciso, juntamente com a realização de estudos de tratabilidade na água bruta a ser tratada (em instalação de laboratório ou piloto para obtenção de parâmetros de projeto e de operação), realizar:

- Levantamento de dados socioeconômicos da comunidade, com objetivo de se conhecer a real disponibilidade de recursos financeiros, bem como sua capacidade de endividamento e mão de obra disponível. Está é uma questão ligada à tecnologia que será adotada para o tratamento de água e dos resíduos gerados, garantindo sua operacionalização continuada;

- Levantamento dos dados de qualidade da água bruta e efetuar estudos estatísticos que levem em conta as variações climáticas;

- Tomadas de água em diferentes profundidades quando a captação for feita em lagos, garantindo a representatividade do manancial explorado;

- Medidas preventivas ou corretivas na captação, levando em consideração a qualidade da água a ser captada e suas alterações durante o ano;

- Verificações da necessidade de pré-tratamento, como forma de auxílio ao sistema de tratamento a ser implementado.

Após os estudos preliminares, é necessário definir tecnicamente as tecnologias viáveis de tratamento, o que requer um conhecimento profundo das diferentes tecnologias de tratamento de água e suas aplicações.

É necessário ressaltar que não existem tecnologias robustas, e sim tecnologias apropriadas às características da água a ser tratada, independentemente da sua qualidade em qualquer época do ano e condição socioeconômica da comunidade.

Richter (2009) define que, na escolha da tecnologia de tratamento, é necessário também:

- Definir os critérios de projeto especialmente com relação à mecanização de processos e operações e do grau de automação pretendido;

- Definir os laboratórios e equipamentos necessários à operação da Estação de Tratamento de Água e dos Resíduos gerados;

- Efetuar comparações técnicas, econômicas e financeiras das diferentes tecnologias de tratamento de água e dos resíduos gerados, abrangendo a comparação no efeito da comunidade na qual será implantada;

- Elaboração de projetos hidráulicos e construtivos otimizados, além dos manuais de operação dos sistemas;

Com estas necessidades apresentadas, é de equivalente importância a realização de treinamento de pessoal que atuará na operação e na manutenção dos sistemas implantados.

Para a escolha da tecnologia a ser empregada para tornar a água captada potável, conforme mencionado, mostra-se imprescindível o conhecimento das características da água bruta, no âmbito de se escolher uma tecnologia de tratamento adequada, que, dependendo destas características, pode haver ou não a necessidade da coagulação química.

São apresentadas, no Quadro 1, as etapas de um sistema de abastecimento de água, composto por cinco unidades principais.

Quadro 1. Etapas do sistema de abastecimento de água - SAA

Captação	Dar condições para que a água seja retirada do manancial em quantidade capaz de atender à demanda;
Adução	Condução da água desde a captação até a comunidade abastecida;
Tratamento	Eliminação de impurezas e/ou correção das condições impróprias;
Reservação	Atendimento às diversas necessidades tais como: consumo, demandas de emergência (incêndio e outros imprevistos), manutenção da pressão necessária na rede;
Distribuição	Condução da água através de tubulações para diversos pontos de consumo;

Fonte: adaptado de Richter, 2009.

Dentre as tecnologias de tratamento de água mais empregadas no país, destaca-se a ETA de ciclo completo, pela qual a água bruta passa pelas seguintes etapas (ACHON & VALE, 2016):

- Coagulação, desestabilização das partículas em suspensão presentes na água bruta para posterior remoção nas etapas subsequentes;

- Floculação, pela qual a água coagulada é submetida a uma agitação lenta para que os flocos aumentem seu tamanho e massa específica para posterior remoção na etapa subsequente;

- Clarificação por decantação ou Flotação, sendo que os decantadores podem ser convencionais ou de alta taxa;

- Filtração, em que a água clarificada é filtrada em unidade de escoamento descendente, contendo materiais granulares com granulometria apropriada (areia, antracito). Dependendo do modelo operacional adotado, os filtros podem operar com taxa de filtração constante ou taxa de filtração variável. A lavagem do meio filtrante é geralmente realizada com água em contracorrente ou com ar e água.

- Desinfecção e fluoretação e estabilização, para atendimento da Portaria de Consolidação nº 5/2017, visto que é necessário que a água a ser fornecida à população apresente concentrações mínimas de cloro e flúor.

- Pode haver pré-oxidação, que precede esta etapa de coagulação, ou inter-oxidação, entre as etapas de tratamento, que devem ser empregadas em conformidade com as características da água bruta e da água que se deseja produzir, geralmente empregadas para oxidação de matéria orgânica e remoção de cor.

O propósito do processo de desinfecção é eliminar, de modo econômico, os microrganismos patogênicos presentes na fase líquida. A eficiência dos oxidantes aplicados fica em função da dosagem aplicada (Concentração – C) e do tempo de contato (T), resultando em uma eficiência de inativação destes microrganismos de acordo com este produto CxT.

Atualmente, verificam-se limitações quanto ao uso de coliformes como indicador de presença de microrganismos, uma vez que, por exemplo, a giárdia e o criptosporidio são resistentes à ação do cloro (oxidante mais utilizado), sendo estes microrganismos infectantes e prejudiciais à saúde humana. A indicação seria para a utilização de outros oxidantes mais fortes (dióxido de cloro ou ozônio ou combinação) com intuito de inativar estes microrganismos e garantir mais segurança sanitária à água a ser consumida (DI BERNARDO et al., 2012).

As ETA's convencionais de Ciclo Completo (CC) são denominadas 'tecnologias robustas', entretanto, são limitadas e podem não produzir água potável, dependendo das características da água bruta e também dependendo destas características, podendo-se recorrer a concepções de sistemas mais simples tanto

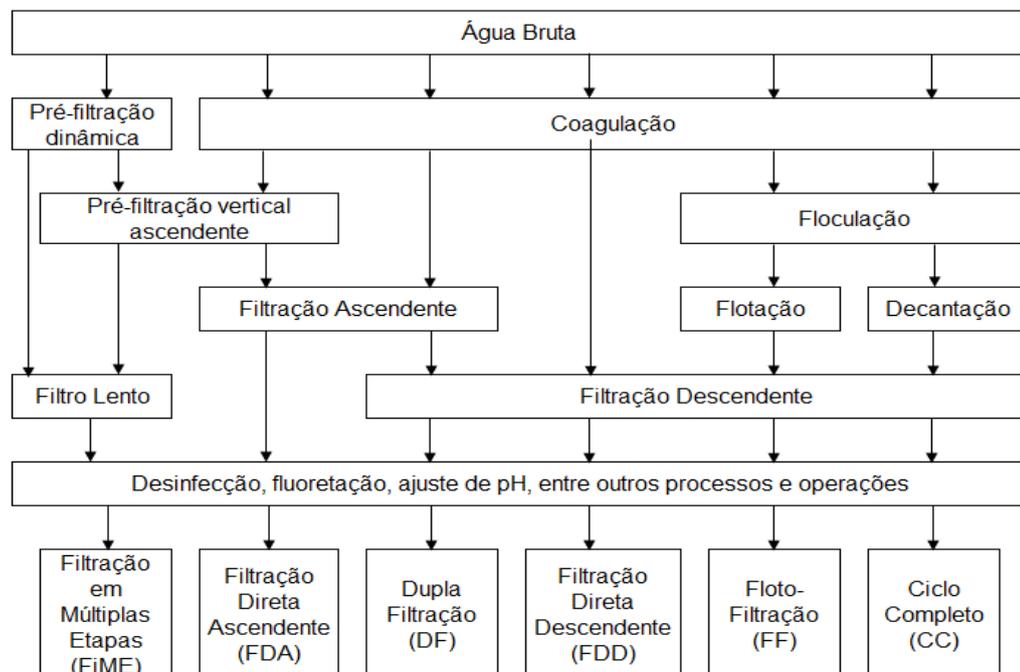
no sentido construtivo como operacional. Como exemplo, pode-se citar águas com baixa turbidez que, após verificação dos resultados dos ensaios de tratabilidade, se pode chegar à conclusão que um sistema de filtração direta pode atender aos parâmetros de potabilidade exigidos.

No Brasil, as ETA's se dividem basicamente em seis diferentes tecnologias conforme Figura 1.

Outras tecnologias também devem ser avaliadas para o tratamento da água, como por exemplo:

- Filtração direta, podendo ser ascendente ou descendente;
- Filtração direta com floculação;
- Dupla filtração;
- Floto-Filtração;
- Filtração lenta;
- Filtração em múltiplas etapas;
- Separação por membranas.

Figura 1. Principais tecnologias de tratamento de água para abastecimento público, adotadas no Brasil.



Fonte: Adaptado de SAGOBAL PAZ (2007).

Outras etapas no processo de tratamento de água, e não menos importantes, são as etapas de tratamentos dos resíduos gerados, resíduos estes que devem ser

condicionados e dispostos de forma ambientalmente correta, tema este abordados nos capítulos seguintes.

Desta forma, fica evidente que para a operação de sistemas de tratamento de água ou para a concepção de novos sistemas, são necessários profissionais capacitados, alinhados com o desenvolvimento da ciência e tecnologia, com o intuito de sempre produzir água com qualidade e acima de tudo, com segurança sanitária e proteção ao meio ambiente (DI BERNARDO et al., 2012).

Para tanto, é importante o conhecimento das tecnologias de tratamento disponíveis de forma a proporcionar um dimensionamento economicamente viável, estruturalmente adequado, hidraulicamente funcional e compatível com as condições socioeconômicas locais, garantindo assim a sustentabilidade operacional do sistema e abrangendo as possíveis oscilações sazonais aos quais os recursos hídricos estão sujeitos.

3.4. ASPECTOS LEGAIS DA DESTINAÇÃO E DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETA

Conforme apontado em capítulo anterior, a Lei Federal de Saneamento, Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, atualizada recentemente pela Medida Provisória nº 868, de 27 de dezembro de 2018, foi de grande avanço para a regulação, inclusive para o setor de resíduos sólidos, pois estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico considerando este como um conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de:

- a) abastecimento de água potável, constituído pelas atividades, pela disponibilização, pela manutenção, pela infraestrutura e pelas instalações necessárias ao abastecimento público de água potável, desde a captação até as ligações prediais e os seus instrumentos de medição;
- b) esgotamento sanitário, constituído pelas atividades, pela disponibilização e pela manutenção de infraestrutura e das instalações operacionais de coleta, transporte, tratamento e disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até a sua destinação final para a produção de água de reuso ou o seu lançamento final no meio ambiente;
- c) limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, constituídos pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente

adequada dos resíduos sólidos domiciliares e dos resíduos de limpeza urbanas; e

d) drenagem e manejo das águas pluviais urbanas, constituídos pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes (BRASIL, 2018);

A NBR 10.004/2004, dentro do compêndio de normas NBR 10.004 a 10.007, também apresenta uma definição para resíduos sólidos:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os **lodos provenientes de sistemas de tratamento de água**, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT NBR 10.004, 2004, grifo nosso).

De acordo com o ressaltado pela NBR 10.004/2004, estão incluídos como resíduos sólidos “os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água”.

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010, os municípios devem desenvolver um plano de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, os resíduos de serviços públicos de saneamento básico são os gerados nessas atividades, excetuando-se os domiciliares e de limpeza urbana.

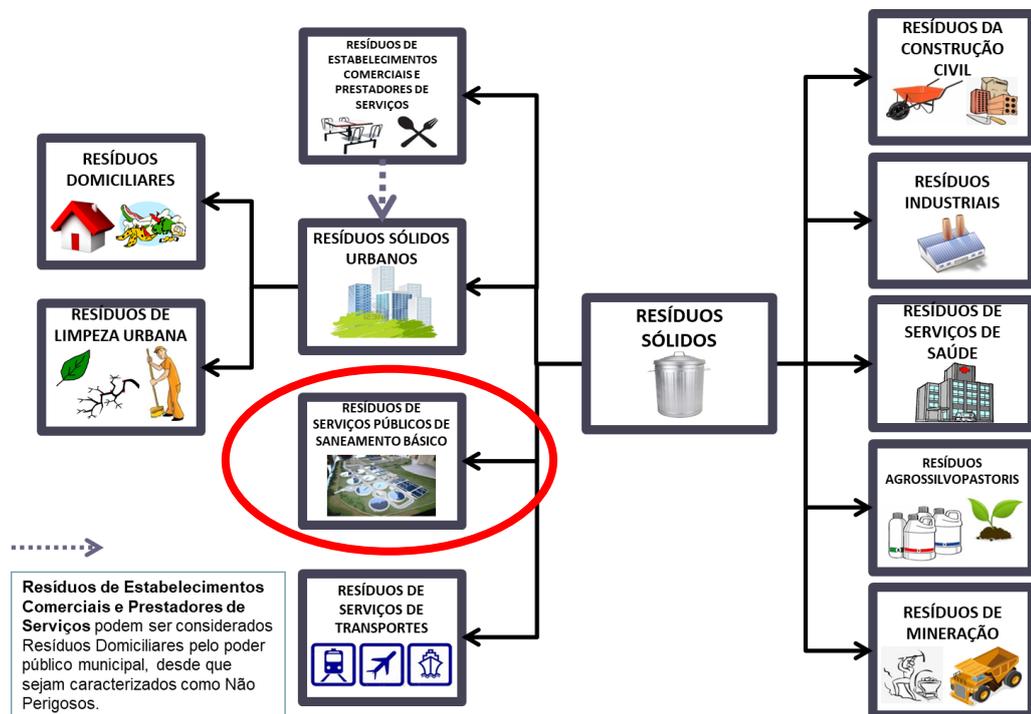
A PNRS define no Artigo 3º os resíduos sólidos da seguinte forma:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou

economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

O Artigo 13 da PNRS apresenta a definição dos resíduos sólidos quanto à sua origem, em que se incluem os resíduos de saneamento, conforme se apresenta na Figura 2.

Figura 2. Divisão em áreas quanto à origem dos Resíduos Sólidos - Art. 13. da PNRS



Fonte: SCHALCH et al. (2015)

Desta forma, verifica-se que os resíduos gerados em estações de tratamento de água – ETA's se incluem na definição de resíduos sólidos dada pela Lei de Saneamento e na PNRS, incluída na área de resíduos de saneamento, bem como na norma brasileira, devendo estes resíduos, portanto, receber adequada gestão e gerenciamento para uma correta destinação do lodo e disposição final dos rejeitos.

Segundo a PNRS, a destinação final ambientalmente adequada pode ser definida como a:

[...] destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras

destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. (BRASIL, 2010 – Art. 3º)

A Política Nacional de Resíduos Sólidos traz como premissa os objetivos apresentados em seu sétimo artigo, inciso segundo: “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”. Conforme ressaltado pelo Schalch et al. (2015), todos estes objetivos devem ser alcançados até que sejam esgotadas suas possibilidades de enquadramento, em prol primeiramente da não geração, ou, ao menos, a redução dos resíduos, sendo este o cenário ideal de uma boa estratégia de gestão dos resíduos sólidos, conforme ilustrado pela Figura 3.



Fonte: SCHALCH et al. (2015)

A geração dos resíduos nas ETA's ocorre, em geral, nos processos de sedimentação e filtração. Estes resíduos são compostos basicamente de partículas de solo, material orgânico carregado para a água bruta, subprodutos gerados da adição de produtos químicos e água (ANDREOLI, 2001). A função de uma ETA é basicamente remover estes resíduos e garantir a potabilidade de água, devendo os

resíduos gerados ser dispostos de forma segura e adequada para evitar impactos ambientais negativos.

Achon & Cordeiro (2015) descrevem que, no Brasil, a maioria das Estações de Tratamento de Água foi implantada antes da Lei 9.433/1997, Lei 9.605/1998 e Resolução do CONAMA Nº 237/1997, que exige o licenciamento ambiental das atividades potencialmente poluidoras. Desta forma, os projetos das plantas de tratamento não contemplavam o sistema de destinação e disposição do final do lodo gerado nas ETA's. Ressalta-se que atualmente há exigência legal para implantação de sistema de destinação e disposição do final do lodo gerado nas ETA's para os novos projetos e ampliações.

De forma geral, a grande maioria das ETA's brasileiras não realiza a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos, os quais são classificados como Classe II-A (não perigoso e não inerte) pela NBR 10.004/04. Com esta classificação dada pelo mencionado ato normativo, estes resíduos são os chamados não inertes, tendo baixa periculosidade, mas ainda oferecem capacidade de reação química em certos meios. Na maioria dos casos, eles são lançados diretamente nos corpos hídricos, procedimento este dado como irregular do ponto de vista ambiental, operacional e legal (PAGANINI, 2009).

A Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011, que dispõe acerca das condições e padrões de lançamento de efluentes, a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, da Política Nacional dos Recursos Hídricos, Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, de crimes ambientais, e Lei Estadual nº 12.300, de 16 de março de 2006, que Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, fundamentam a ilegalidade da inadequada disposição final dos resíduos gerados em ETA's, exigindo, portanto, uma mudança de paradigma dos dirigentes dos sistemas de saneamento em geral.

Conforme apresentado, o lodo de ETA é enquadrado como resíduo sólido e/ou semissólido, portanto, deve ser gerenciado de tal forma a garantir as premissas da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS.

Apesar disso, a maioria das estações de tratamento de água do Estado de São Paulo não dimensiona a quantidade de resíduos gerados e lança-os *in natura* em corpos d'água (ACHON & CORDEIRO, 2015). Essa prática pode ser enquadrada como crime ambiental segundo a Lei 9.605/98 (BRASIL, 1998), sendo atribuída aos

produtores do resíduo a responsabilidade pelos problemas ocasionados pelo destino inadequado.

Em atendimento à Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecida pela Lei Federal 12.305/2010 e à Política Estadual de Resíduos Sólidos, dada pela Lei Estadual 12.300/2006, a CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo estabelece instrumentos específicos para auxílio à correta gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos. Dentre estes instrumentos, destaca-se o CADRI, que é um Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental.

O lodo de ETA se enquadra dentro destes resíduos de interesse ambiental, conforme definido no artigo 57 do Regulamento da Lei Estadual 997/76, aprovado pelo Decreto Estadual 8.468/76 e suas alterações: “Lodo de sistema de tratamento de efluentes líquidos industriais ou de sanitários gerados em fontes de poluição”.

O CADRI é instrumento exclusivo para o estado de São Paulo, que aprova o encaminhamento de resíduos de interesse a locais de reprocessamento, armazenamento, tratamento ou disposição final, licenciados ou autorizados pela CETESB.

A CETESB poderá exigir a apresentação do laudo de caracterização qualitativa e/ou quantitativa do resíduo, com informações sobre a sua classificação, de acordo com a NBR 10.004, da ABNT e/ou com informações dos contaminantes e suas concentrações, em situações em que há dúvida em relação à classificação do resíduo ou quando há alguma restrição de operação do sistema de tratamento/destinação do resíduo (CETESB, 2011).

3.5. QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETA'S

Conforme descrito por Di Bernardo et al. (2012) e por Achon & Vale, (2016), em uma ETA de ciclo completo, que é a tecnologia mais empregada no Brasil para tratamento de água para abastecimento público, basicamente, os resíduos gerados são provenientes das limpezas ou descargas de decantadores (ou flotadores) e das lavagens dos filtros.

Em termos volumétricos, a maior quantidade de resíduos é proveniente das lavagens dos filtros. No entanto, em termos mássicos, a maior quantidade de resíduo é gerada no sistema de separação sólido/líquido que, em uma estação de ciclo completo, é basicamente efetuada nos decantadores (ou flotadores). Cada

linha geradora de resíduos apresenta características distintas em termos de vazão e concentração de sólidos, razão pela qual diferentes concepções de tratamento devem ser consideradas (DI BERNARDO et al., 2012).

As limpezas periódicas manuais de decantadores convencionais são realizadas, geralmente, 3 a 12 vezes por ano, portanto os sólidos tendem a compactar-se e adensar-se na base das unidades, entre limpezas sucessivas, resultando numa estratificação dos mesmos (os mais pesados situam-se no fundo).

A quantidade de água usada para auxiliar a limpeza irá influenciar o volume final de lodo resultante.

A quantificação do lodo gerado por uma ETA é um desafio para projetistas e operadores pelo fato de não existirem fórmulas e métodos eficientes. A falta de estudos científicos e a defasagem dos dados a respeito do tema é outro fator. Di Bernardo e Dantas (2005) mencionam que:

[...] a melhor prática para o dimensionamento dos sistemas de tratamento de lodos é a baseada a realização de testes em estações-piloto ou, no mínimo, ensaios em escala de laboratório, por pelo menos um ano, com a água bruta do manancial a ser explorado pela futura ETA. Devido aos custos de se aderir a essa prática, muitos projetos são realizados tomando-se como parâmetro estimativas de produção obtidas através de fórmulas empíricas. (DI BERNARDO E DANTAS, 2005)

Segundo Di Bernardo et al (2012), há diversas fórmulas empíricas propostas na literatura para a estimativa de sólidos em ETA's, dentre elas:

- **CETESB**

$$P = (0,23 \cdot A_s + 1,5 \cdot T_u) \cdot 10^{-3}$$

Equação 1

$$W = 86400 \cdot P \cdot Q$$

Equação 1a

Onde,

P – Produção de sólidos (kg de matéria seca / m³ de água bruta tratada);

A_s – Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L);

T_u – Turbidez da água bruta;

W – Quantidade de sólidos secos (kg/dia);

Q – Vazão de água bruta tratada (m³/ s);

- **KAWAMURA (1991)**

$$P = (D \cdot F_{c1}) + (Tu \cdot F_{c2})$$

Equação 2

Onde,

P – Produção de sólidos (g de matéria seca / m³ de água bruta tratada);

D – Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L);

Tu – Turbidez da água bruta;

F_{c1} – Fator que depende do número de moléculas de água associadas a cada molécula de sulfato de alumínio; usualmente varia entre 0,23 a 0,26;

F_{c2} – Razão entre a concentração de sólidos suspensos totais presentes na água bruta e turbidez da mesma; geralmente na faixa de 1,0 a 2,0.

- **AWWA (1999)**

$$P_{SS} = Q \cdot (D \cdot Dai + SST + DP + Dcap + 0,1 \cdot Dcal) \cdot 10^{-3}$$

Equação 3

Onde,

P_{SS} - produção de SST (Kg/d);

Q - Vazão de água bruta a ser tratada (m³/d);

D - 4,89.DAI ou 2,9.DFe;

Dal - Dosagem de sulfato de alumínio (mg Al/L);

DFe - Dosagem de cloreto férrico anidro (mgFe/L);

SST - Concentração de sólidos suspensos totais na água a ser tratada (mg/L);

DP - Dosagem de polímero seco (mg/L);

Dcap - Dosagem de carvão ativado pulverizado (mg/L);

Dcal - Dosagem de cal hidratada (mg/L).

- **AWWA (1978)**

$$P = 3,5 \cdot Tu^{0,66}$$

Equação 4

Onde,

P – Produção de sólidos, dado em gramas de matéria seca por metro cúbico de água bruta tratada; e

Tu – Turbidez da água bruta, dado em Unidade de Turbidez (uT).

Conforme apontado por Di Bernardo et al. (2012), é preciso conhecer os aspectos relacionados à água bruta e ao funcionamento das unidades de

tratamento. Para a elaboração de projetos de sistemas de tratamento dos resíduos gerados nas ETA's, é necessário consultar os registros operacionais das plantas de tratamento, bem como realizar o levantamento de parâmetros visando à obtenção de dados, pelo menos, dos últimos dois ou três anos. Apresenta-se, no Quadro 2, a relação de dados operacionais recomendados para realização de projetos de sistemas de tratamento de resíduos de ETA.

Quadro 2. Relação de dados operacionais recomendados para realização de projetos de sistemas de tratamento de resíduos de ETA

FREQUÊNCIA/ ATRIBUTO	DADOS
Diária	Vazão de água afluyente à ETA;
Diária	Paralisações do funcionamento da ETA;
Diária	Características da água bruta (valores máximo e mínimo);
Diária	Consumo de produtos químicos (máximos e mínimos);
Verificação	Tipo e método de lavagem dos filtros;
Feita de forma representativa	Volume da lavagem de um filtro da bateria e o número de filtros;
Verificação	Forma da retirada do lodo de decantadores/flotadores (manual, mecanizada ou hidráulica);
Feita de forma representativa	Volume de uma descarga do decantador/flotador (ou limpeza) e o número destas unidades;
Verificação	Frequência de lavagem dos filtros;
Verificação	Frequência das descargas (ou limpezas) dos decantadores/flotadores;
Feita de forma representativa	Coleta de amostras da água de lavagem dos filtros e caracterização (coleta de amostras em pelo menos dois filtros da bateria) – as amostras individuais poderão ser usadas para obtenção de uma amostra composta, a qual deverá ser devidamente caracterizada;
Feita de forma representativa	Coleta de amostras das descargas (ou limpezas) dos decantadores/flotadores e caracterização (coleta de amostras em pelo menos duas unidades) – as amostras individuais poderão ser usadas para obtenção de uma amostra composta, a qual deverá ser devidamente caracterizada;

Fonte: Adaptado de DI BERNARDO et al. (2012).

O volume de uma descarga do decantador pode ser obtido medindo-se o tempo e a vazão de descarga por meio de vertedores instalados em cana (se existir na ETA) ou medindo-se a vazão afluyente do decantador em estudo e o rebaixamento do nível d'água durante a descarga (se a vazão de descarga for maior que a vazão afluyente à unidade); caso contrário, é necessário fechar a entrada ao decantador e medir o rebaixamento devido à descarga de lodo.

O volume de água usado para a lavagem dos filtros poderá ser determinado por meio de medidor de vazão instalado na tubulação do recurso hídrico que liga o reservatório de água de lavagem dos filtros, ou pela medição volumétrica neste reservatório, ou, ainda, pelas características da bomba, caso esta lavagem dos filtros seja por bombeamento.

Di Bernardo et al. (2012) apresentam dados de um projeto para tratamento dos resíduos gerados em uma ETA de ciclo completo, o qual também tinha uma flexibilidade operacional para operar com a tecnologia de filtração direta descendente em épocas de estiagem, realizado pela empresa Hidrosan Engenharia (2011). A quantidade total de sólidos gerados na ETA foi estimada por meio da equação empírica apresentada anteriormente (Equação 03), sendo que para determinação da massa seca de lodo crítica diária foi necessário adotar um valor médio de sólidos suspensos totais (SST) da água bruta em um dia de chuva intensa, situação em que será máxima a geração de resíduos, a qual servirá para dimensionar a ETR (estação de tratamento de resíduos).

Como a concentração de SST da água bruta afluyente à ETA não era monitorada, foram usados os dados operacionais de turbidez da água bruta para estimar a concentração de SST nela.

A concentração de SST pode ser estimada pela turbidez através da Equação 5:

- **AWWA (1999)**

$$\text{SST} = a \cdot Tu$$

Equação 5

Onde,

a – Coeficiente que varia de 0,5 a 2,0 (determinado experimentalmente); e

Tu – Turbidez em uT.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados do estudo feito por Di Bernardo et al. (2012) para a estimativa de geração de lodo (estimativa de massa seca).

Tabela 1. Estimativa da massa seca diária e anual gerada em uma ETA de ciclo completo

Faixa de turbidez (Ut)	Valor médio de turbidez adotado (uT)	SST Bruta (mg/L)	Frequência de ocorrência no ano (d)	Dosagem de sulfato de alumínio	Dosagem de cal hidratada	Massa seca calculada (Kg/dia)		
						Q = 500 L/s	Q = 600 L/s	Q = 700 L/s
Até 20	20	20	180	25	10	965,1	1.158,1	1.351,1
21 a 75	50	50	110	35	12	2.175,1	2.610,1	3.045,2
75 a 150	100	100	50	45	14	4.141,2	4.969,4	5.797,6
150 a 250	200	200	15	47	15	7.939,7	9.526,4	11.114,1
251 a 500	350	350	10	50	15	13.629,2	16.355,0	19.080,9
Total (t/ano)						875,4	1.050,5	1.225,6

Fonte: Adaptada de Di Bernardo et al.

Di Bernardo et al. (2012) descreve que, tanto a quantidade (volume e massa) de lodo gerados nos decantadores (flotadores) quanto a de água de lavagem dos filtros (volume e massa) variam consideravelmente. Embora o uso de equações empíricas forneça a massa seca total de sólidos gerada na ETA não há dados para o dimensionamento de unidades de regularização de vazão, de adensamento e de desaguamento, levando ao projetista a adotar parâmetros de projeto e, conseqüentemente, incorrer em erros de concepção e dificultar sobremaneira a operação.

3.6. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETA'S

O volume e a concentração de SST da água de lavagem de filtro variam em função da qualidade do afluente (e do efluente), do método de lavagem e da forma de operação dos filtros. Geralmente, a concentração de SST varia entre 100 e 600mg/L e o volume resulta entre 4 e 12m³ por m² de área filtrante.

Em um estudo apresentado por Di Bernardo et al. (2012), é possível verificar os resultados físico-químicos e bacteriológicos para diversos parâmetros de quatro ETA's distintas. Com os resultados apresentados, pode-se inferir que não é possível

adotar um padrão para os parâmetros, sendo necessária a caracterização das águas para cada planta de tratamento.

No Quadro 3 observa-se a tecnologia de tratamento, o método de lavagem dos filtros e coagulantes usados para cada ETA. Na Tabela 3, apresentam-se as características da águas de lavagens de filtros destas ETA.

Quadro 3. Tecnologia de tratamento e características do sistema de lavagem, método de filtração e coagulantes utilizados nas ETA's A, B, C e D

ETA	Lavagem	Método de Filtração	Coagulante
A (Ciclo Completo)	Insuflação de ar, seguida da lavagem com água no sentido ascensional	Filtração de água decantada com taxa declinante	Cloreto Férrico
B (Ciclo Completo)			Cloreto Férrico
C (Ciclo Completo)	Lavagem com água no sentido ascensional	Filtração de água decantada com taxa constante	Sulfato de Alumínio
D (Filtração Direta Ascendente)		Filtração direta ascendente com taxa constante	Sulfato de Alumínio

Fonte: DI BERNARDO et al. (2012).

No trabalho apresentado por Souza & Almeida (2017), são demonstradas algumas concentrações típicas para alguns parâmetros dos resíduos de ETA. Na Tabela 2 são apresentados, em suma, estes parâmetros e resultados.

Tabela 2. Concentrações típicas para alguns parâmetros dos resíduos de ETA

Parâmetros	Método Referência	Amostras	
		Lavagem de Filtros	Decantadores
pH	APHA, AWWA, WEF, 1995	Montgomery (1985): 6 – 8; Neubauer (1968): 6 – 7,6	
Cor	POP-FQ-016, Rev03 - Método HACH n.º 8.025	Scalizer e Di Bernardo (2000): 290 – 1.400	
Turbidez (uT)	APHA, AWWA, WEF, 1995	Scalizer (1997): 58 - 60	Cordeiro (1993): 3.800
DQO	APHA, AWWA, WEF, 1995	Singer (1974): 30 – 5.000	
Sólidos totais, fixos e voláteis	APHA, AWWA, WEF, 1995	Richter (2001): 40 – 1.000	Richter (2001): 1.000 – 40.000

Fonte: adaptado de SOUZA & ALMEIDA (2017).

Tabela 3. Características de águas de lavagens de filtros de ETA's

Parâmetro	Estações de Tratamento de Água			
	ETA A	ETA B	ETA C	ETA D
Turbidez (uT)	130	171	58	76
Cor aparente (uC)	200	2690	310	400
DQO(mg/L)	40,8	52	35	48
pH	7,1	8,04	6,9	7,25
Alcalinidade (mq/L CaCO ₃)	37	NM	17	12,6
Dureza (mg/L CaCO ₃)	40,8	NM	12	NM
Condutividade (µS/cm)	95	NM	38	37,1
Sólidos totais (mg/L)	367	NM	88	130
Sólidos totais fixos (mg/L)	157	NM	65	NM
Sólidos totais voláteis (mg/L)	210	NM	23	NM
Sólidos suspensos totais (mq/L)	250	3'13	59	95
Sólidos suspensos fixos (mg/L)	2'10	230	42	NM
Sólidos suspensos voláteis (mg/L)	40	83	17	NM
Sólidos sedimentáveis (ml/L)	74	41	3,4	8
Nitrogênio total (mg/L N)	NM	NM	4	NM
Fosfato (mg/L PO ₄ ⁻³)	0,037	NM	0,022	NM
Carbono orgânico total (mq/L)	11,8	NM	6,26	6,44
Coliformes totais (NMP/100mL)	241920	17329	1640	1095
<i>Esclierichia coli</i> (NMP/100mL)	'17820	20	72	3
Ferro (mq/L)	700	170	6,9	6,5
Alumínio (mg/L)	NM	NM	0,3	0,8
Manganês (mg/L)	2,19	1,17	0,1	0,1
Zinco (rnq/L)	2	0,1	0,64	NM
Cobre (mg/L)	0,35	0,84	0,06	NM
Chumbo (mg/L)	0,58	ND	ND	NM
Níquel (mg/L)	0,35	ND	ND	NM
Cromo (mg/L)	0,09	ND	ND	NM
Cádmio (mg/L)	0,01	ND	ND	NM
Cálcio (mg/L)	95,6	NM	NM	NM
Magnésio (mg/L)	22,8	NM	NM	NM

ND=Não Detectado; NM=Não Medido.

Fonte: DI BERNARDO et al. (2012)

Richter (2001) descreve que a quantidade de sólidos totais presentes no lodo de ETA varia de 0,1 a 4% da massa total. Afirma, ainda, que como a água de lavagem dos filtros possui, em geral, um reduzido teor de sólidos (0,004 a 0,1%) e cerca de 5% de todos os sólidos precipitados na coagulação, este líquido pode ser recirculado para o início da cadeia de processos sem que seja alterada consideravelmente a qualidade da água bruta. Esta recirculação não diminui a eficiência do tratamento e ainda pode reduzir as perdas no processo, além de trazer certos benefícios como, por exemplo, a redução no consumo de coagulante. Na Tabela 4 são apresentados os aspectos (aparência) do lodo cujo tratamento de água foi submetido a coagulantes à base de sulfato de alumínio.

Tabela 4. Aspectos do lodo - coagulantes a base de sulfato de alumínio

Concentração de sólidos (%)	Aparência do resíduo
0 a 5	Líquido
8 a 12	Esponjoso, semissólido
18 a 25	Argila ou barro suave

Fonte: RICHTER (2001)

Há divergência quanto à recirculação das águas de lavagem dos filtros para o início do processo de tratamento, conforme afirma Richter (2001). Di Bernardo e Sagobal Paz (2008) afirmam que a recirculação da água de lavagem de filtros sem o devido tratamento apresenta sérios riscos de contaminação e é preciso sua desinfecção segura. Grande parte dos organismos presentes na água bruta são retidos nos filtros e, conseqüentemente, a água de lavagem possui grande quantidade desses organismos, alguns deles patogênicos e de difícil inativação com o cloro. Ademais, vale ressaltar o efeito cumulativo da recirculação.

No Projeto PROSAB (1999) são apresentados os principais parâmetros físico-químicos usualmente utilizados para caracterização dos lodos de ETA's, valendo citar, dentre outros, os exames e determinações físico-químicos e biológicos: sólidos totais (ST); sólidos voláteis (SV); sólidos suspensos totais (SST); sólidos suspensos voláteis (SSV); pH; demanda bioquímica de oxigênio ($DBO_{5,20}$); demanda bioquímica de oxigênio (DQO); concentração dos principais íons metálicos de interesse (exemplo: alumínio, ferro, manganês, cádmio, mercúrio, chumbo, cromo, cobre, dentre outros); concentração de fósforo total, nitrogênio total Kjeldahl (NTK); além de índices bacteriológicos de interesse sanitário (exemplo: coliformes totais e fecais, contagem de ovos de helmintos, dentre outros).

3.7. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETA'S

Di Bernardo et al. (2012) explicam que a quantidade e a qualidade dos resíduos produzidos em uma ETA dependem de vários fatores, destacando-se:

- Qualidade da água bruta e tecnologia de tratamento;
- Vazão média diária tratada;
- Características da coagulação: tipo e dosagem de coagulante e de alcalinizante ou de acidificante;

- Uso, característica e dosagem do auxiliar de coagulação (floculação ou filtração);
- Uso de oxidante e adsorvente (carvão ativado pulverizado);
- Método de limpeza dos decantadores (ou flotadores) e técnica de lavagem dos filtros – maior geração de resíduos em termos mássicos nos decantadores e maior geração em termos volumétricos nos filtros;
- Habilidade dos operadores;
- Automação de processos e operações na ETA e
- Reuso da água recuperada no sistema de tratamento.

É possível recorrer a equações empíricas para a determinação da quantidade total de sólidos suspensos gerados em determinado processo de tratamento em função, principalmente, da vazão de água bruta a ser tratada e da dosagem de químicos utilizada (RICHITER, 2009).

Em sistemas de tratamento contendo decantadores (ou flotadores) e filtros, é indicado, na concepção de sistemas de tratamento dos resíduos gerados, a inserção de tanque de regularização de vazão das águas de lavagem dos filtros e tanque de regularização de vazão para a descarga dos decantadores. Esta separação é indicada principalmente pela diferenciação entre as concentrações de sólidos totais de uma etapa e outra, onde, nos decantadores, a concentração de sólidos é maior. Pode-se também operar com único tanque de regularização de vazão, destacando que a decisão deve ser tomada diante de estudos de viabilidade técnica e financeira.

Di Bernardo et al. (2012, p.129), em seu livro dedicado ao tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água – ETA, realça a necessidade de se obter os parâmetros de funcionamento das unidades operacionais de uma Estação de Tratamento de Água, de modo a efetuar um diagnóstico para cada caso, enfatizando o tempo de funcionamento diário, as vazões de água tratada durante o período diário de funcionamento, as características da água bruta, dentre outras, sendo necessário levantar os dados de operação das unidades que geram resíduos, especialmente dos filtros, decantadores ou flotadores.

O lodo possui um alto teor de umidade, o que dificulta sua destinação adequada e pode aumentar a ocorrência de impactos ambientais; o tratamento consiste em sua desidratação, diminuindo, assim, seu volume. A desidratação ou

remoção da parcela de água tem por objetivo a redução do volume, podendo utilizar meios mecânicos ou manuais. (REALI, 1999).

A definição do tipo de tratamento a ser utilizado depende de vários fatores, tais como a área necessária para implantação, custo de implantação, operação, preparo de mão-de-obra, necessidade de condicionamento, entre outros, conforme apresentado nos tópicos sequenciais. (REALI, 1999; DI BERNARDO, 2012).

3.7.1. Recepção dos Resíduos

Os resíduos gerados em ETA's devem ser reunidos em tanque de recepção e regularização – TRR, provido de agitador para homogeneização, constituindo o resíduo a ser tratado, com vazão constante bombeada continuamente. A frequência de descargas dos decantadores e o volume correspondente a cada uma destas devem ser conhecidos, assim como o volume da água de lavagem dos filtros e a frequência com que elas ocorrem na planta de tratamento de água (SABOGAL PAZ et al., 2003).

A partir do TRR (tanque de recepção e regularização), pode-se ter bombeamento direto para a rede coletora do sistema de esgotamento sanitário para tratamento em conjunto na estação de tratamento de esgoto – ETE, por exemplo. Outra opção é o tratamento por clarificação/adensamento, desaguamento e disposição final, ou mesmo o aproveitamento da torta de lodo. A água recuperada nas diferentes etapas do tratamento dos resíduos pode ser acumulada em um tanque – TAR (Tanque de Água Recuperada) e bombeada para o início da planta de tratamento de água, com uma vazão já regularizada.

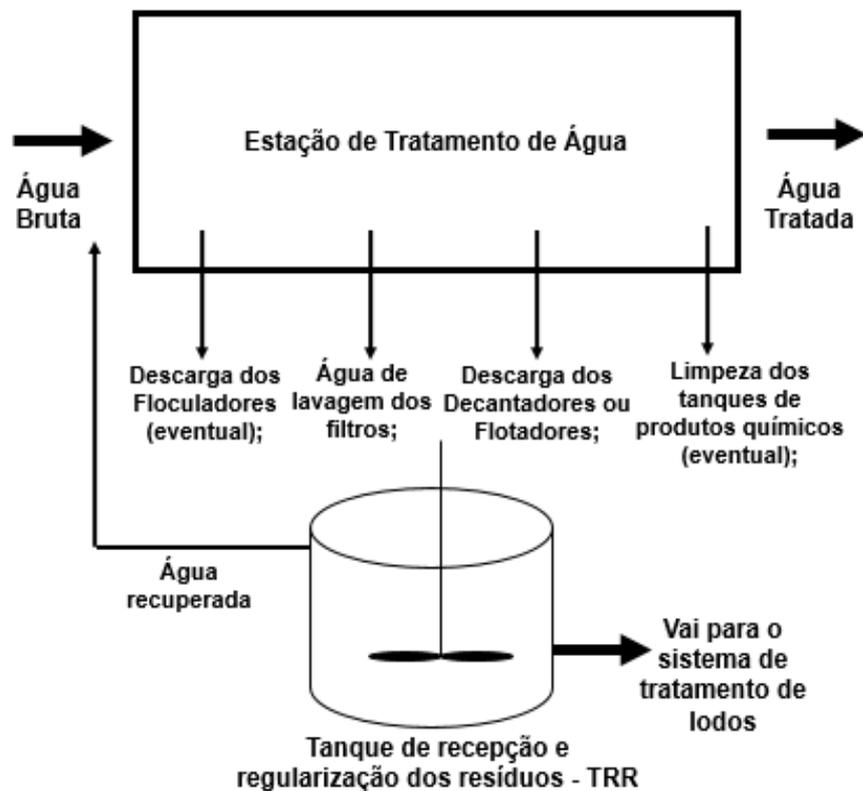
A Figura 4 ilustra esquematicamente o tanque de recepção e regularização – TRR no qual os resíduos gerados em ETA's devem ser reunidos.

Conforme esclarece Di Bernardo et al. (2012), o projetista deve estar atento às características de operação do sistema, pois, em termos volumétricos, a maior quantidade de resíduos gerados é proveniente dos sistemas de filtração, sendo que para a maior quantidade em termos mássicos (quantidade em massa), a geração é proveniente dos decantadores e flotadores.

Desta forma, ao invés de um único tanque de recepção e regularização – TRR, conforme apontado anteriormente, podem-se conceber tanques em separado, devido às características de geração dos resíduos em cada uma das linhas

geradoras (filtros e decantadores/flotadores). Assim, deve-se projetar um Tanque de Recebimento de Descarte dos Decantadores/Flotadores – TRDD e um Tanque de Recebimento da água de lavagem dos filtros – TRALF.

Figura 4. Tanque de recepção e regularização – TRR de uma ETA



Fonte: Adaptado de Di Bernardo et al. 2012.

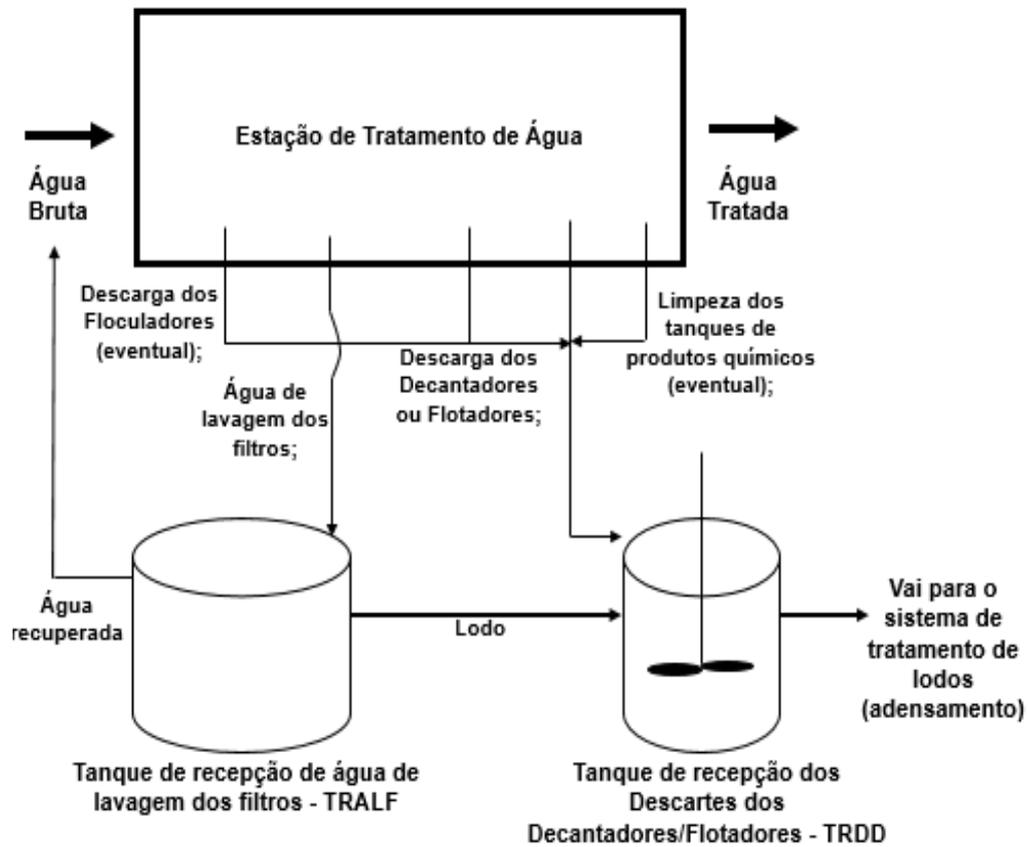
A Figura 5 ilustra esquematicamente a separação das linhas de geração de resíduos.

Após a reunião dos resíduos gerados na ETA, o objetivo da equalização e regularização de vazão é uniformizar os resíduos a serem enviados à tecnologia escolhida para a destinação dos resíduos gerados na ETA. É necessário manter o tanque com agitação a fim de uniformizar a concentração de sólidos para posterior envio de uma vazão regularizada.

3.7.2. Condicionamento

O condicionamento dos resíduos gerados nas ETA's pode ser, em geral, químico ou físico.

Figura 5. Tanque de Recebimento de Descarte dos Decantadores/Flotadores – TRDD e Tanque de Recebimento da água de lavagem dos filtros – TRALF



Fonte: Adaptado de Di Bernardo et al. 2012.

O condicionamento químico é o mais utilizado no Brasil, realizando-se através do emprego de polímero catiônico, aniônico ou não-iônico. Já o condicionamento físico pode se dar através do uso de terra diatomácea, por congelamento/descongelamento, ou pelo uso de altas temperaturas (Di Bernardo et al., 2012).

O condicionamento dos resíduos gerados nas ETA's deve ser realizado conforme suas características, sendo fundamental para o sucesso das etapas subsequentes de adensamento e do desaguamento, gerando as condições necessárias para liberação da água, especialmente se forem utilizadas unidades mecanizadas de tratamento. No caso dos métodos naturais de secagem, tais como lagoa de lodos e leitos de secagem, geralmente dispensa-se o condicionamento.

3.7.3. Adensamento

O adensamento ou espessamento é a primeira etapa do tratamento dos lodos gerados em ETA's, sendo uma das operações mais importantes para o tratamento da fase sólida, em que ocorre o aumento da concentração de sólidos e diminuição do volume para posterior desaguamento e disposição final.

Esta etapa influencia diretamente o desempenho das operações de desidratação dos resíduos.

O adensamento de lodos proporciona o aumento da concentração de sólidos e conseqüente redução do volume total a ser desaguado, o que traz resultados satisfatórios principalmente para os equipamentos de desaguamento mecanizados, como, por exemplo, as centrífugas.

Sabogal Paz et al. (2003) esclarecem que a correta concepção do sistema de desaguamento é de vital importância no sucesso operacional das estações de tratamentos dos resíduos – ETR's, especialmente aquelas que utilizam desaguamento mecânico, porque garantem concentrações de sólidos superiores a 20g/L, necessária para o adequado funcionamento da unidade e desaguamento. O adensamento também é importante quando se pretende extrair o clarificado obtido no tratamento dos resíduos, com o intuito de recirculação para o início do tratamento da ETA. No caso de ETA's com clarificação por flotação, o lodo raspado geralmente se apresenta com concentração de Sólidos Suspensos Totais - SST que permite sua mistura ao sedimento da Água de Lavagem dos Filtros – ALF para ser conduzido à unidade de desaguamento.

De forma geral, o adensamento pode ser realizado de forma gravitacional, por flotação ou de forma mecanizada, em que cada tipo possui suas vantagens e desvantagens, conforme algumas destas apresentadas no Quadro 4.

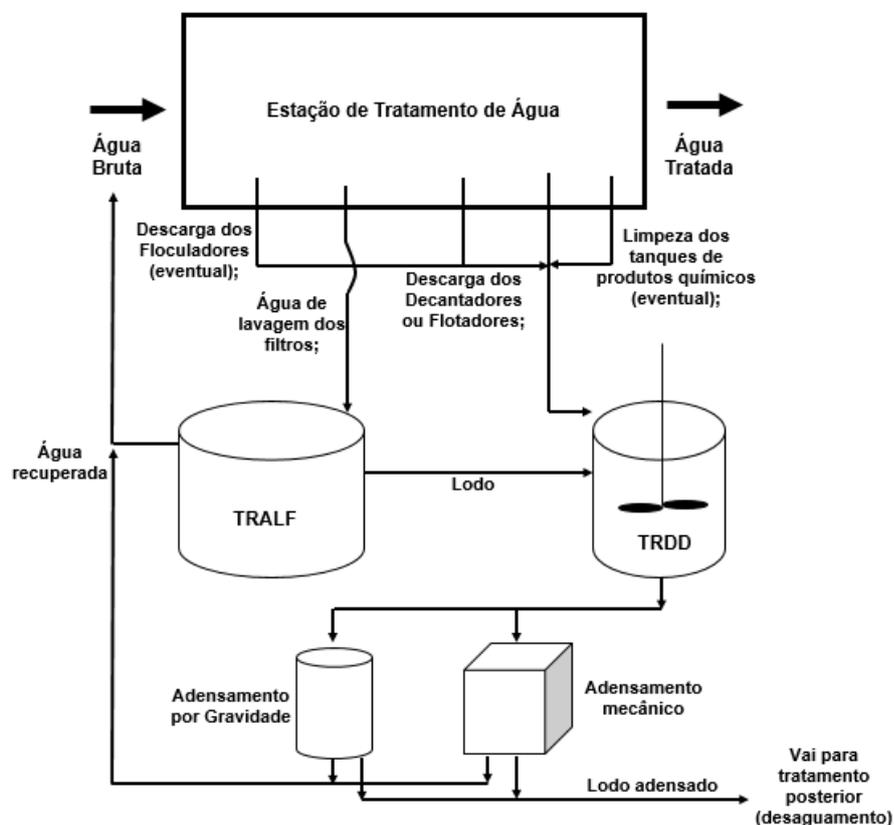
A Figura 6 ilustra, esquematicamente, a recepção dos resíduos com recuperação do sobrenadante, após clarificação da água de lavagem dos filtros e adensamento do lodo.

Quadro 4. Algumas vantagens e desvantagens para os tipos mais comuns de adensadores de lodo

Vantagem	Desvantagem
Adensamento por gravidade	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Não requer mão de obra qualificada; 2. Recomendada para lodo proveniente do abrandamento da água, o qual sedimenta com facilidade. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Maiores áreas de implantação;
Adensamento por Flotação	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Eficiente na remoção de <i>Cryptosporidium</i> e <i>Giardia</i>; 2. Permite maior taxa de aplicação de sólidos. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Não foi verificado em ETA's brasileiras; 2. Apresenta alta taxa de recirculação; 3. Gastos elevados de implantação, operação e manutenção.
Adensamento mecânico	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Menores áreas de implantação; 2. Baixo custo operacional, reduzido uso de condicionante químico e adensa rapidamente o resíduos. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Necessita de energia elétrica e de manutenção especializada; 2. Gastos elevados de implantação; 3. Requer limpezas frequentes; 4. Requer rigoroso controle de condicionante químico.

Fonte: Adaptado de Sabogal Paz, 2007.

Figura 6. Sistema de recepção de resíduos gerados em ETA's seguido de adensamento por gravidade ou mecanizado



Fonte: Adaptado de Di Bernardo et al. 2012

3.7.4. Desaguamento do Lodo

O desaguamento ou desidratação do lodo adensado é uma operação na qual se aumenta o teor de SST (Sólidos Suspensos Totais), diminuindo seu volume. As técnicas de desidratação do lodo podem ser por meios mecanizados, como a centrífuga, filtro prensa de esteira, filtro prensa de placas, prensa desaguadora tipo parafuso; naturais, como lagoas de lodo, leitos de drenagem, filtração em leitos de secagem; e também podem ser em tecidos especiais, como as mantas geotêxtis. Segundo o autor, cada técnica de desaguamento possui suas peculiaridades, vantagens, bem como desvantagens, para isso, devem-se levar em consideração os custos de implantação, operação e manutenção (DI BERNARDO, 2012).

A Figura 7 ilustra as tecnologias mais utilizadas para desaguamento de lodos em estações de tratamento de resíduos gerados em ETA's.

Figura 7. Tecnologias mais utilizadas para desaguamento de lodos de ETA's



Fonte: Autor, 2019

Na sequência, apresentam-se especificidades para algumas tecnologias mais utilizadas no país para tratamento dos resíduos gerados em ETA e, em

especial, sobre o sistema de secagem natural, sobre o qual são focados os estudo do presente trabalho.

3.7.4.1. Centrífugas

A centrifugação é uma operação unitária de separação de fases através da ação do campo de forças centrífugas na ação rotacional de um recipiente cilíndrico (tambor) contendo o material que se deseja separar. Diversos setores das indústrias alimentícias, farmacêuticas e de bebidas, a utilizam. A aplicação de tal alternativa foi mais recente na remoção de água dos resíduos de saneamento, iniciando-se na desidratação de resíduos de Estações de Tratamento de Esgotos - ETE's e, posteriormente, com experiências no tratamento de resíduos de ETA's.

Em função da influência do tamanho das partículas, as maiores atingem mais rapidamente as paredes das centrífugas onde são capturadas e removidas; caso contrário, quando os resíduos apresentam partículas muito finas, a eficiência torna-se baixa, daí a justificativa para um correto condicionamento dos resíduos gerados, de forma a melhor ajuste e eficiência do processo de desaguamento (REALI et al., 1999; SABOGAL PAZ, 2007).

A Figura 8 ilustra centrífugas utilizadas para desaguamento de lodos de ETA's.

Figura 8. Modelo de Decanter Centrífugo para desaguamento de lodos



Fonte: Gruppo Peralisi, 2019.

Para um adequado funcionamento do sistema de centrífuga se reputa necessário que a alimentação seja feita com resíduo adensado e com uma concentração de SST de, no mínimo, 2% em massa/massa. Geralmente, a quantidade de polímero utilizado varia de 2 a 5g/kg de SST (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008).

3.7.4.2. Membrana geotêxtil

A membrana geotêxtil foi introduzida no Brasil há alguns anos e consiste em eliminar o excesso de água do lodo através da drenagem do líquido pelos pequenos poros do geotecido, ocorrendo desidratação progressiva e redução do volume original do lodo (Di Bernardo et al. 2012).

Nas instalações de desaguamento de lodos com esta tecnologia geotêxtil, inserem-se *Bag's* de geotecido, conforme a capacidade de resíduos gerados, os quais sofrem enchimentos frequentes seguidos de diminuição de volume até atingir sua capacidade máxima. Após sua vida útil (enchimento por completo), o saco (*bag*) é deixado em repouso para melhor secagem e posterior disposição adequada.

Segundo Hernandes et al. (2006), o lodo nos bags pode atingir teores de sólidos na faixa de 20 a 50%.

A Figura 9 ilustra bag de geotecido utilizados em sistemas de tratamento de resíduos gerados em ETA's.

Figura 9. Filtração em geotêxtil para desaguamento de Lodos



Fonte: DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008.

3.7.4.3. Lagoa de lodo

No sistema de desaguamento de Lagoa de Lodo, a desidratação ocorre em três fases: drenagem, evaporação e transpiração. Esta técnica mostra-se uma alternativa atraente para regiões onde a taxa de evaporação é superior à de precipitação para que não reste efluente líquido no resíduo quando este for removido (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008).

A técnica é viável em ETA's de pequena capacidade, em local onde haja disponibilidade de área e quando o custo da terra não for elevado. O projeto de lagoas se constitui de sistema de tubulações de entrada de lodo e de saída do clarificado, sistema de bombeamento do clarificado (se necessário) e equipamentos de remoção do resíduo (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008).

Conforme apontado por Di Bernardo et al. (2012), conhecendo-se a concentração média de SST nos resíduos gerados diariamente em uma ETA, fixando-se o número de lagoas e o tempo entre limpezas sucessivas, é possível calcular o volume das lagoas de lodo.

A Figura 10 ilustra lagoas de lodos utilizadas para desaguamento de resíduos gerados em ETA's.

Figura 10. Lagoas de Lodo



Fonte: SABOGAL PAZ (2007).

3.7.4.4. Secagem natural: leitos de secagem e leitos de drenagem

Sendo o mais antigo e mais usado no tratamento de resíduos, o leito de secagem é um dos métodos de desaguamento em que, normalmente, os lodos são

descarregados no leito sem nenhuma adição de condicionantes. Os mecanismos de remoção de água dos resíduos se dão através da decantação, percolação (drenagem) e evaporação, e durante as primeiras 72 horas, a drenagem é a responsável pela eliminação da maior parte da água (água livre) – mecanismo que cessa quando o resíduo atinge umidade de aproximadamente 80%. Após esse período, o lodo adquire uma consistência pastosa e menor umidade devido à evaporação superficial (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008).

Os leitos de secagem, que na sua essência funcionam como filtros granulares de bateladas, são constituídos por tanques rasos, sistema de drenagem e duas ou três camadas de areia com granulometrias diferentes com cerca de 30 cm de espessura.

O desaguamento nos leitos depende de diversos fatores, dentre eles a temperatura e umidade do ar, viscosidade do lodo adensado e ação de ventos. No caso de ETA's que empregam sulfato de alumínio na coagulação, quando tais condições são favoráveis para um bom funcionamento do sistema, recomenda-se o preenchimento do leito até atingir uma espessura de camada de resíduos de 50 cm (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008).

Os leitos de drenagem surgiram da otimização de leitos de secagem com o emprego de uma manta de geotêxtil sobre a camada filtrante. Essa nova configuração dada aos leitos possibilita a remoção efetiva da água livre dos lodos com melhoria na sua qualidade e menor tempo de drenagem (BARROSO et al., 2006).

Conforme apresentado no trabalho de Oliveira (2010), além da secagem do lodo através de centrífugas, foram estudadas as alternativas de leitos de secagem pilotos convencionais e alternativos (geotêxtil não tecido bidim e geotecido). Como resultado, após 30 dias para os leitos convencionais, foram obtidos teores de sólidos totais – ST de até 40%. Para o mesmo período, os leitos alternativos com bidim atingiram valores de ST 17 a 27% e os leitos alternativos com geotecido conseguiram 5 a 7% de ST. As características da água drenada nos leitos mostraram que o sistema possui excelente condição de clarificação.

Achon et al. (2008) apresentam sistemas e ensaios de secagem através de leitos de secagem e relatam que em 7 dias foram obtidos resultados com lodo desaguado com cerca de 30% de SST e, com 21 dias, foram atingidos valores da ordem de 80 a 90% de SST. Descrevem, ainda, que apesar de não terem sido

apresentadas características microbiológicas da água drenada, é possível inferir que a água recuperada poderia ser recirculada para o início da ETA.

A Figura 11 ilustra sistemas de leitos de drenagem e leitos de secagem para desaguamento de lodos de ETA.

Figura 11. Leitos de drenagem (a) e Leito de secagem (b)



Fonte: SABOGAL PAZ (2007).

Em trabalho realizado em uma instalação experimental em leitos de secagem com e sem cobertura, Lopes et al. (2004) utilizaram lodo proveniente da limpeza de decantadores da ETA Bolonha, que empregava sulfato de alumínio como coagulante primário. Os ensaios foram realizados durante 21 dias de secagem em camadas de lodo de 0,3 e 0,6m nos leitos de secagem com base de meio granular de areia, seixo e tijolos. A taxa de aplicação de SST por área do leito de secagem foi entre 0,4 e 0,6 Kg SST/m², com lodo a uma concentração de SST na ordem de 0,14 a 0,51%. A conclusão obtida pelos autores foi que a redução da umidade se deu de forma mais rápida para a lâmina de 30cm do que para a de 60cm, nos leitos descobertos. Nos leitos cobertos não houve alteração significativa. O lodo final apresentou teor de SST entre 17,1 e 28,3% (massa/massa).

Bisogenin et al. (1999) realizaram experimento em leitos de secagem pilotos em nove células individuais de 1,0 x 1,0 m² com camadas drenantes de 10cm de areia e brita. Os leitos foram preenchidos com lodo de decantadores da ETA Guariroba com alturas de 0,2m, 0,3m e 0,4m. A concentração do resíduo foi da ordem de 4,7g ST/L. Após 5 dias, o lodo da célula que recebeu uma camada de

20cm resultou num teor de ST de 51,7%; no leito de 30cm de lodo, um teor de ST de 39,6%; e no leito de 40cm de lodo, um teor de sólidos de 27%.

3.7.4.4.1. Secagem solar de lodos: experiência internacional

A secagem solar é uma das mais antigas técnicas de secagem em que a radiação solar é usada, isto é, secagem sob luz solar direta, utilizada desde a antiguidade para preservar alimentos e outros produtos. Ela não requer energia produzida pelo homem, podendo ser aplicada no mundo todo. No entanto, a fim de aumentar a eficiência da secagem de lodo usando radiação solar, são necessários os estudos de novas formas de aplicação, inovando esse processo de secagem natural de lodos. As maneiras atualmente utilizadas para aumentar a sua eficiência requerem a utilização de combustíveis fósseis ou energia elétrica que, por sua vez, são limitadas e podem ser nocivas ao meio ambiente. Desta forma, a secagem por irradiação solar torna-se uma opção viável para substituir os secadores térmicos mecânicos (Hii et al., 2012).

A energia solar tem sido utilizada para fins de desidratação de lodo, tendo como exemplo de sistemas de secagem tradicionais os sistemas constituídos de leitos de secagem pavimentados com concreto ou asfalto, e com camadas de areia para formar leitos drenantes. Se as propriedades de sedimentação forem boas, é possível remover 20 a 30% de umidade dos lodos, em que o período de secagem depende das condições climáticas. Por exemplo, em uma região árida, um leito de lama com 30 cm de espessura pode atingir 40 a 50% de Sólidos Totais em cerca de 30 a 40 dias (EPA, 1987).

O leito de secagem de areia são leitos constituídos por canais de drenagem onde o lodo é colocado em camadas, por exemplo, de 200 a 300 mm de espessura, e deixado secar ao sol de forma natural. Estes sistemas de leitos de secagem drenantes com areia podem facilmente secar lodo além de 25-40% de Sólidos Totais, podendo chegar a até 60% de teor de sólidos secos, dado o tempo de detenção adequado. São geralmente usados para pequenas e médias empresas de tratamento de águas residuais ou industriais. Embora o método seja simples e requeira pouca atenção operacional, apresenta desvantagens devido à grande exigência na área e dependência das condições climáticas. Condições climáticas e

baixa taxa de drenagem também podem causar odor e baixa remoção de patógenos para lodos de tratamentos de esgoto. (Al-Muzaini, 2003; Ögleni et al., 2010).

Devido ao seu custo de implantação e operacional, a secagem solar tem se tornado uma opção estudada e implantada para substituir as tecnologias de secadores térmicos (Mathioudakis et al., 2013). Ela utiliza energia renovável (sol) e é aplicável em muitas partes do mundo. Tradicionalmente, tem sido aplicada na forma de leitos de secagem expostos ao sol. Recentemente, estes leitos são convertidos em Estufas de Secagem, onde a área de secagem é coberta, sendo dispostos lodo sob ventilação.

A secagem térmica é um método comum para atingir resultados acima de 90% de teor de Sólidos Totais secos (ST) no lodo, no entanto, requer alta demanda de energia, o que pode encarecer o processo. Uma estufa de secagem solar pode ser um substituto econômico, cujo desempenho de secagem pode atingir tipicamente 70% ST, podendo este percentual ser aumentado por adição de mais calor (Mathioudakis et al., 2013).

Mayis Kurt et al. (2015) relata, em seus estudos na Turquia, que as legislações locais restringem o teor de matéria seca do lodo para diferentes tipos de manejo. Por exemplo, para a disposição final em Aterro de Resíduos, os lodos devem conter no mínimo um teor de sólidos secos de 50%.

Ainda no trabalho apresentado por Mayis Kurt et al. (2015), foram utilizados Painéis Solares como fonte de energia adicional, em substituição a outras fontes de energia não renováveis, para secagem do lodo na estufa e a fim de possibilitar o atingimento dos 90% ST para aplicação no solo, conforme exigência da legislação local, ou, então, para minimizar a área de secagem de lodo necessária.

A estufa de secagem torna-se uma opção mais barata, representando operação mais fácil, não havendo necessidade de mão de obra qualificada em comparação com secadores térmicos (Ritterbusch e Bux, 2012).

A secagem em leitos de secagem e estufas são sistemas ecologicamente corretos e com emissões de CO₂ muito baixas, em comparação com os secadores cuja energia provém de combustíveis fósseis, bem como o consumo de energia elétrica é bastante reduzido, sendo esta energia usada apenas para ventilação e mistura (Bux e Baumann, 2003).

No entanto, estes sistemas podem não atingir 90% do ST em períodos de tempo razoáveis em comparação com secadores térmicos, embora bons resultados

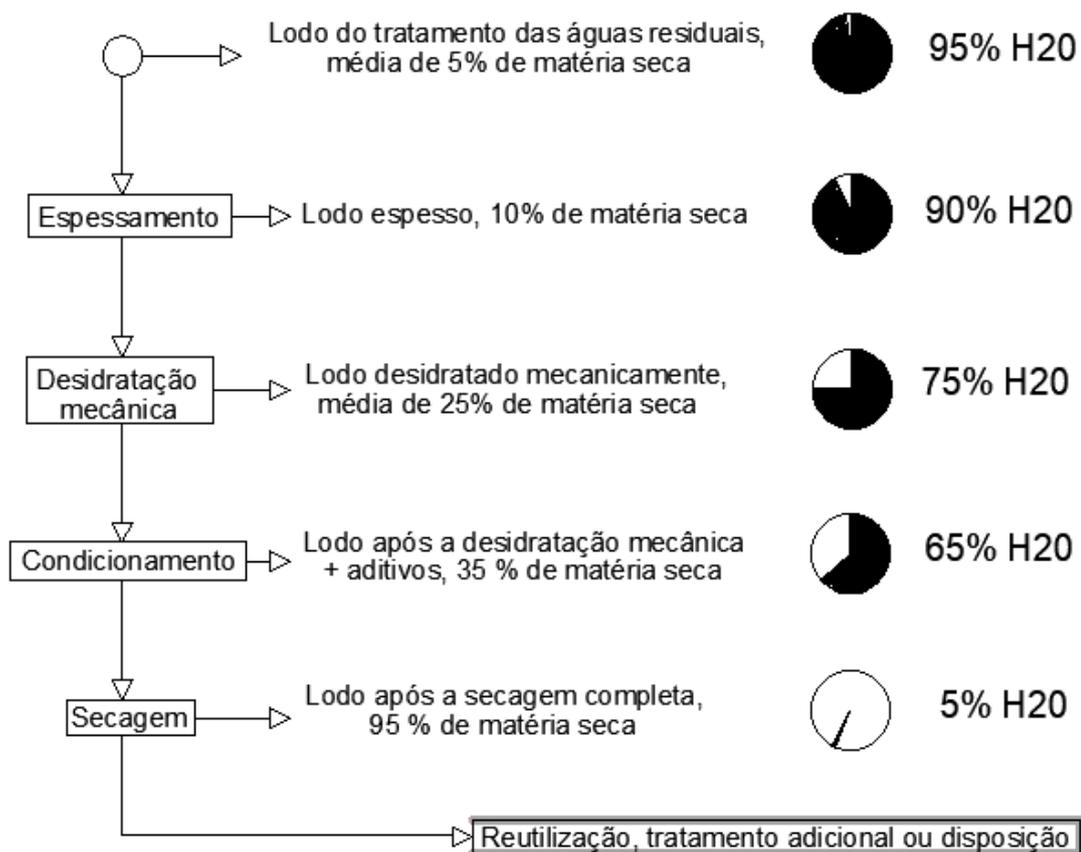
tenham sido relatados em regiões de climas quentes (Seginer et al., 2007; Bennamoun, 2012).

Outro fato importante, mencionado por Fonda e Lynch (2009), é que a capacidade de um sistema de Estufa de Secagem de lodos depende da localização geográfica e da estação do ano.

Conforme descrito por Flaga (2007), o Adensamento, o Desaguamento Mecânico e a Secagem são três técnicas para remover a água dos lodos.

A Figura 12 ilustra os processos de remoção de água de lodos.

Figura 12. Processos de remoção de água de lodos



Fonte: adaptado de Werthera et al., 1999

A secagem tem várias vantagens em comparação com a desidratação e espessamento, podendo remover mais água do que desidratação e espessamento, o que resulta em um volume reduzido de lodo, e conseqüentemente, diminuindo o custo de transporte para disposição final. Além disso, lodo seco com secagem

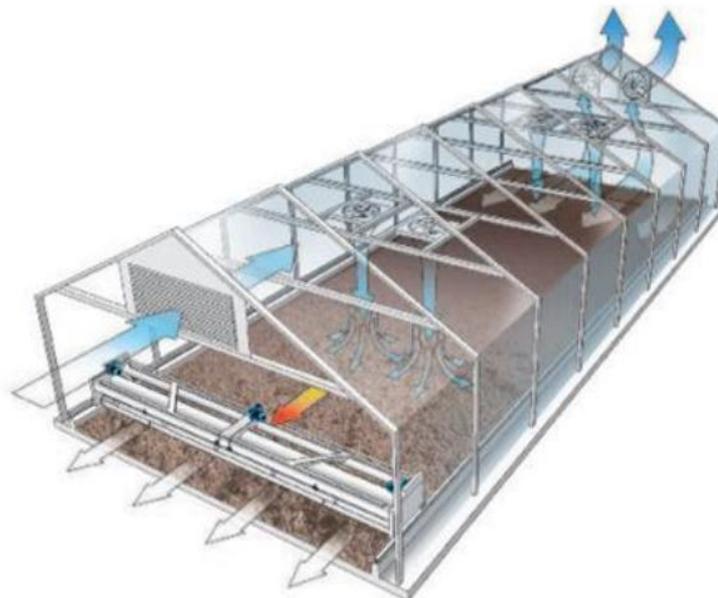
térmica não precisa de qualquer estabilização ou remoção de patógenos. O lodo seco pode ser armazenado com facilidade e segurança (Flaga, 2007).

Conforme apresentado por Bennamoun (2012), uma instalação com sistemas de secagem solar de lodos em estufa pode ser construída com características do tipo túnel, podendo ser totalmente fechada com grossas folhas transparentes de policarbonato para fornecer transmissão de luz, podendo também ser coberta com vidro.

A aeração interna é realizada com um ventilador para que a umidade interna seja removida e mantida estável. O lodo é periodicamente misturado para que possa ser seco de forma homogênea. Um estudo mostrou que na Grécia, 8 kg de lodo desidratada foi colocado em um secador solar em estufa com 20-25 cm de profundidade. O teor de umidade do lodo diminuiu de 85% para 6% em 7 a 15 dias no verão e para 10% em 9 a 33 dias no outono. Se o mesmo sistema fosse alimentado com alguma fonte de calor auxiliar, o processo de secagem poderia levar de 1 a 9 dias no inverno (Bennamoun, 2012).

As Figuras de 13 a 17 ilustram os sistemas de secagem solar através de estufas de secagem e seus componentes operacionais.

Figura 13. Esquema de estufa de secagem solar



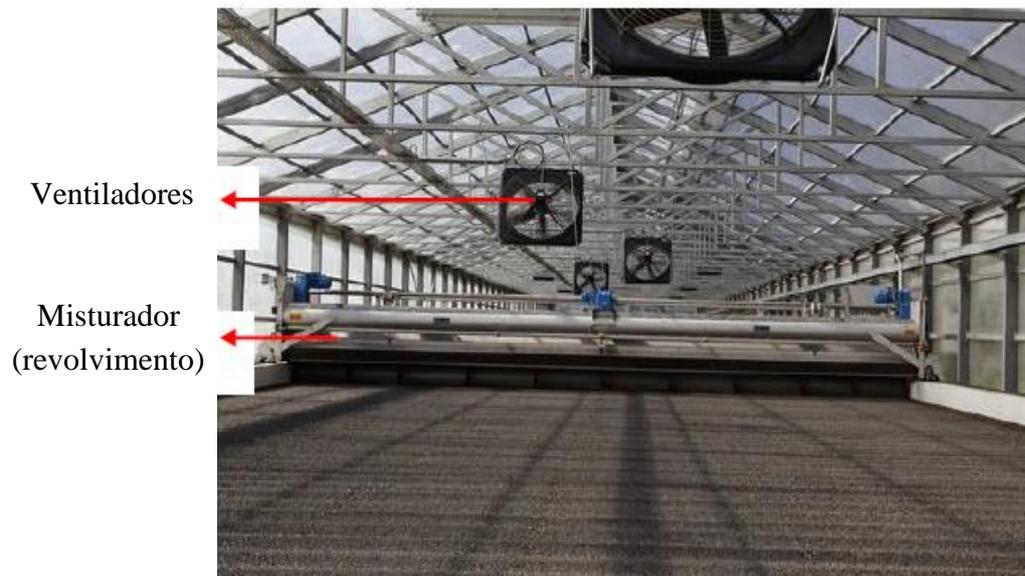
Fonte: Huber, 2007

Figura 14. Planta de secagem solar na Manágua / Nicarágua.



Fonte: Scharenberg et al. (2010)

Figura 15. Vista interna de unidade de secagem solar – sistema Huber.



Ventiladores

Misturador
(revolvimento)

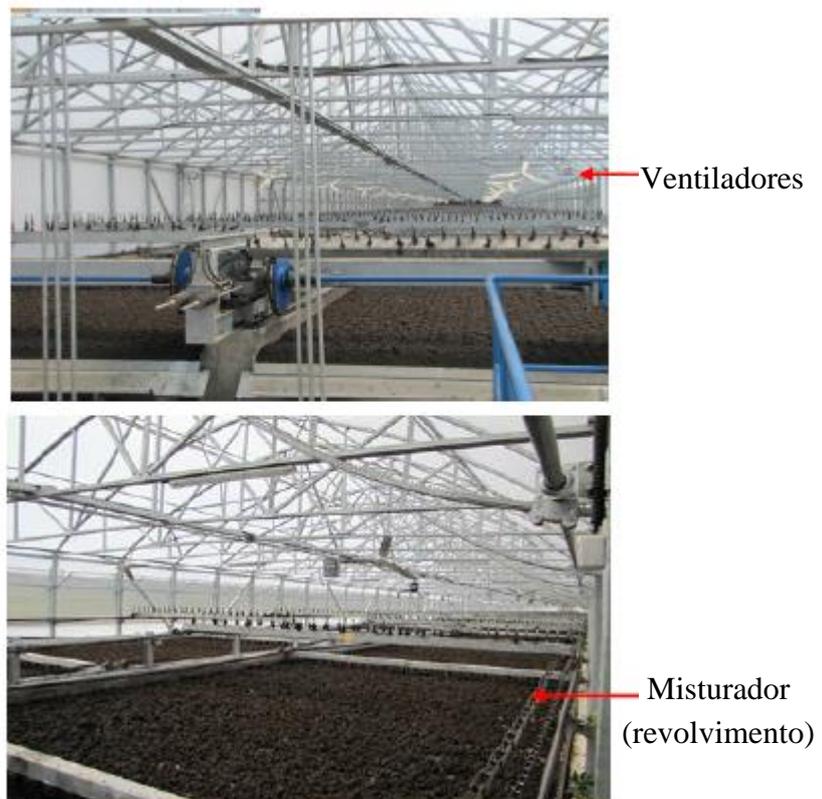
Fonte: Huber, 2007

Figura 16. Vista interna de unidade de secagem solar – Palma de Mallorca/ Espanha.



Fonte: Ritterbusch et al. (2012).

Figura 17. Unidade de secagem solar da ETE de Fethiye/ Turquia.



Fonte: Mayıs Kurt et al. (2015).

Liming Shao (2015) relata, em seus estudos em Shanghai, na China, que a secagem faz parte dos processos usados para tratamento de lodo, utilizando-se mais comumente a secagem térmica de lodo através da geração de calor por combustível fóssil ou energia elétrica. Descreve, ainda, que uma solução alternativa para reduzir os custos do processo de secagem de lodos é a secagem natural através da luz e calor solar.

Salihoglu et al. (2007) investigou o uso da energia solar em sistemas de secagem abertos e cobertos. O teor de umidade do lodo no primeiro sistema diminuiu de cerca de 80% para aproximadamente 50% em 22 dias de secagem, com evaporação média da água a taxa de 6,8 kg/m².d; nenhuma redução adicional foi observada após o 22º dia. O teor de umidade do lodo para os cobertos diminuiu gradualmente para aproximadamente 15% no 58º dia, com evaporação média da água a taxa de 3,3 kg/m².d. Em ambos os casos, os ensaios foram realizados com espessura de 25 cm de lodo, com revolvimento duas vezes por dia.

Liming Shao (2015) realizou estudos para verificação dos efeitos das condições climáticas (energia solar, temperatura e umidade) e a espessura da mistura de lodo/palha, em processo de secagem solar natural. No referido estudo foram utilizadas palhas de arroz, devido à disponibilidade na região de estudo, Shanghai, na China, realizando-se misturas no lodo na proporção de 15:1.

O experimento realizado por Liming Shao (2015) mostra resultados nos quais o teor de umidade do lodo misturado com palha de arroz diminuiu de 75,2 para 45,1% no 23º dia de secagem ao sol, com revolvimento da camada de lodo uma vez por dia; a taxa de água média da evaporação associada a este processo foi de 7,2 kg/m².d., taxa de evaporação superior à observada por Salihoglu et al. (2007), com metade da frequência de revolvimento (6,8 kg/m².d).

Nas conclusões oferecidas por Liming Shao (2015), apresenta-se que à medida que a espessura da leira de lodo aumenta com o acréscimo de palha, ocorre um aumento significativo da taxa de remoção de água por unidade de área. Outras observações feitas são quanto à taxa de remoção de água, a qual aumentou à medida que o acúmulo de energia solar também, mas a mesma taxa de remoção de água foi diminuída com o aumento da umidade. Após 23 dias de experimento, o teor de umidade do lodo desaguado misturado com palha cortada diminuiu de 75,2 para 45,1%, em uma espessura de leito de 30 cm, com uma taxa média de evaporação de água de 7,2 kg/m².d.

Nos estudos de Krokida e Maroulisa (1997) são apresentados que, em sistemas que utilizam energia solar para secagem de lodo, podem ocorrer o encrostamento na superfície do lodo, o que limita a evaporação da água na parte interna, diminuindo, desta forma, a taxa de secagem. No entanto, agentes de volume, como palha, serragem ou resíduos sólidos urbanos, podem ser adicionados ao lodo aumentando a sua porosidade, evitando, assim, a formação de crostas na superfície. Salientam, ainda, que uma maior porosidade aumenta a transferência de calor, o que é benéfico para o processo de secagem.

Nesta perspectiva de acréscimo de 'agentes de incremento ao volume', Adani et al. (2002) ressaltam que 'agentes de volume' são amplamente utilizados no lodo como parte do processo de biodegradação; no entanto, os agentes de volume são raramente usados nos processos de secagem natural de lodo.

Os estudos realizados por Bennamoun (2012), na cidade Oum El Bouaghi, na Argélia, demonstram que a secagem constitui um importante processo para gestão do lodo de águas residuais, como redução de massa e volume do produto e, conseqüentemente, do custo de armazenamento, manipulação e transporte. A velocidade de secagem é um parâmetro de extrema importância que deve ser conhecido para um melhor entendimento e controle do processo. A análise mostrou que ventiladores e um sistema de ventilação adequado podem ser adicionados para uma melhor distribuição da entrada de ar na superfície das camadas. A ventilação também é utilizada para a evacuação do ar saturado que será substituído por ar fresco. Geralmente, a mistura do lodo, seja ela manual ou mecânica, efetuada uma ou várias vezes, permite que haja uma harmonizada distribuição do lodo seco. O sistema de secagem solar coberto apresentou melhores resultados do que o sistema de secagem solar aberto, todavia, a origem do lodo das águas residuais afetou os resultados obtidos.

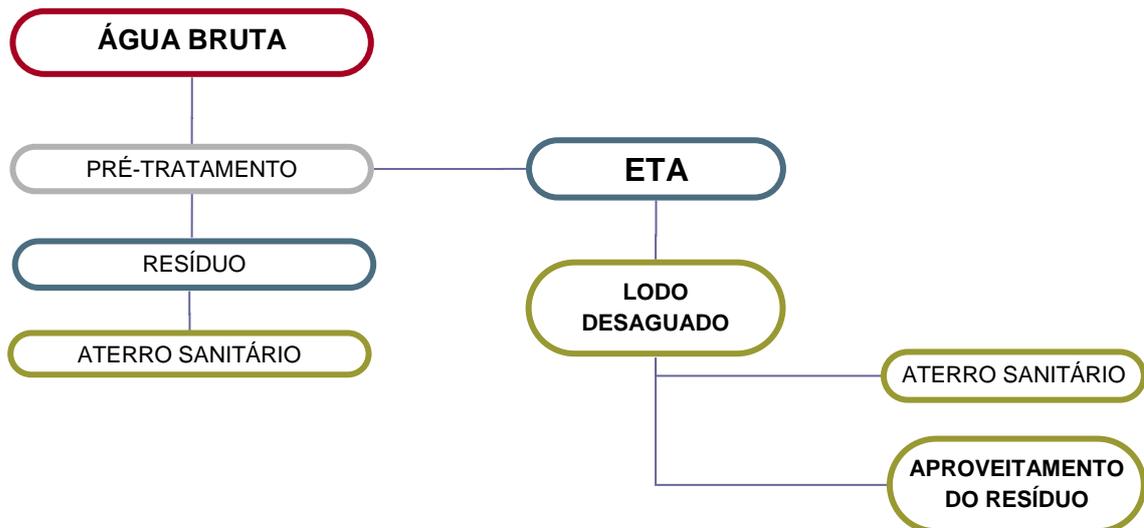
Outros materiais foram adicionados com o objetivo de aumentar a eficiência dos sistemas de secagem, como bombas de calor, lâmpadas infravermelhas, aquecimento do chão da estufa e uma adição de uma cama de rochas aquecidas. De acordo com os resultados obtidos e considerando o custo de operação, estes processos não se provaram tão benéficos. Não obstante, também devem ser considerados os fatores climáticos, geográficos e também referentes à origem das águas residuárias (BENNAMOUN, 2012).

3.8. DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO

Houveram grandes avanços no setor de saneamento básico no Brasil, o que diretamente proporciona melhores condições de vida à população. Contudo, mesmo em meio à crise hídrica que os Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) no Brasil enfrentam, principalmente no Estado de São Paulo, verifica-se o descaso e incipiência da gestão dos resíduos gerados, sendo estas fontes de poluição das águas com a comum disposição *in natura* no ambiente (ACHON & VALE, 2016; SAKAMOTO, 2013).

Um fluxograma de blocos pode ser observado na Figura 18, na qual se retrata um modelo de gestão para os resíduos gerados em ETA's frequentemente utilizado no país.

Figura 18. Modelo de gestão para os resíduos gerados em ETA's.



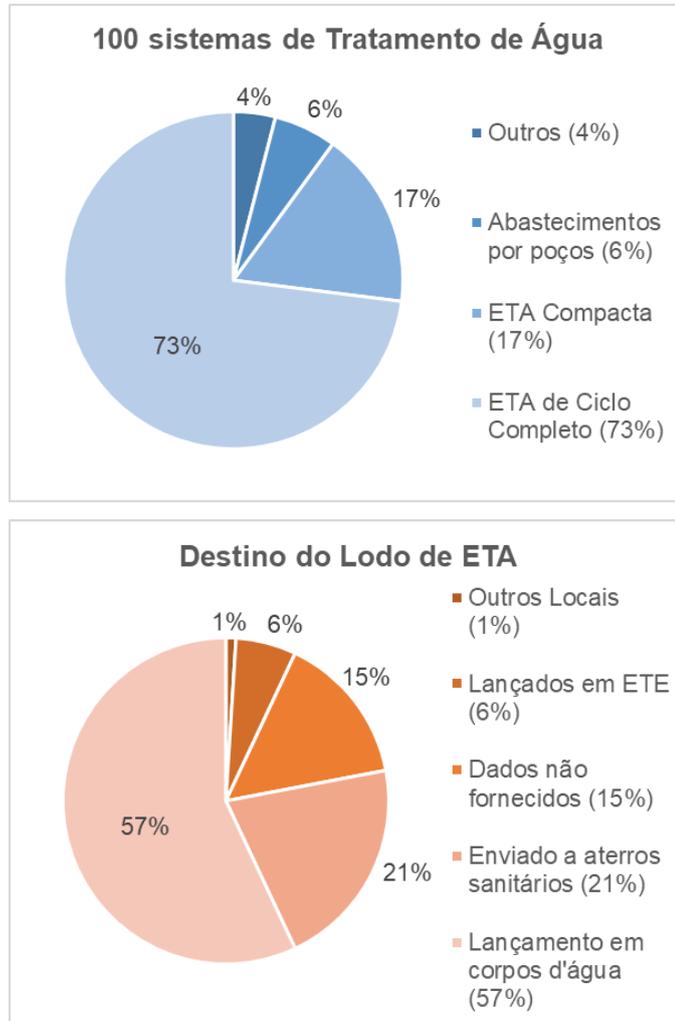
Fonte: SCHALCH (2015).

O trabalho realizado pela Agência PCJ, localizada no estado de São Paulo, que contempla as bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), demonstra resultados dos tipos de sistemas de saneamento dos municípios aos quais estão inclusos nesta bacia. Foi extraído deste trabalho um resumo dos principais sistemas de tratamento de água, bem como o destino do lodo gerado nestas ETA's dentro das Bacias PCJ, conforme se observa na Figura 19.

No trabalho realizado pela Bacia PCJ de 2011 verifica-se que cerca de 73% dos sistemas de tratamento de água avaliados são do tipo Ciclo Completo

(convencionais), mas o dado alarmante é quanto ao destino do lodo de ETA que em 57% dos sistemas, os lodos são lançados em corpos d'água sem o devido tratamento.

Figura 19. Sistemas de tratamento de água e de esgoto nas Bacias PCJ.



Fonte: CBH-PCJ (2011).

Após o processo de tratamento de água através de captação superficial, independente da tecnologia, haverá a geração de resíduos ao longo do processo que deverão ser tratados adequadamente, neste caso desaguados, para a disposição final ambientalmente adequada.

Paganini (2009) aponta que a maioria das ETA's brasileiras não realiza a disposição adequada dos resíduos gerados – classificados como Classe II-A pela NBR 10.004/2004, em que, na maioria dos casos, são lançados diretamente nos

corpos hídricos. Evidencia-se que este procedimento é inadequado do ponto de vista ambiental, operacional e legal.

Di Bernardo et al. (2012) descrevem, em seus trabalhos, que a disposição final dos resíduos gerados em ETA's ainda é um desafio no Brasil. Pode-se citar, dentre as várias opções para destinação, os aterros sanitários e industriais, a fabricação de tijolos, utilização em artefatos de cimento, disposição no solo, cultivo de grama, recuperação de áreas degradadas, produção de solo para pavimentação de estradas, descarga em redes coletoras de esgotos ou encaminhadas para tratamento nas ETE's (Estações de tratamento de esgoto) via tubulação.

Achon et al. (2008) apontam que o aproveitamento do lodo gerado em ETA's, em outras atividades, poderia ser uma interessante estratégia no sentido de minimizar os impactos ambientais gerados pelo lançamento in natura desses resíduos, podendo, ainda, propiciar um aumento na receita dos serviços de água e esgoto.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos na busca das alternativas mais adequadas a serem adotadas no aproveitamento e disposição final dos resíduos de ETA's, considerando a viabilidade técnica, econômica e ambiental.

As opções de destinação dos resíduos delas, após o tratamento, vão desde a incorporação na fabricação de cimento, concreto, tijolos e blocos cerâmicos, aplicação no solo para fins agrícolas e até como cobertura de aterros.

Comumente, as técnicas de disposição empregadas no país para lodos são a disposição em aterro sanitário e o encaminhamento para estações de esgoto ou para o manancial mais próximo. Cabe ressaltar que este último caso apontado fica sujeito ao enquadramento legal, podendo ser caracterizado como crime ambiental em caso de descumprimento dos parâmetros previstos para o seu correto lançamento e/ou disposição final.

PROSAB (1999) e Di Bernardo et al. (2012) apontam que a busca de soluções economicamente viáveis e ambientalmente vantajosas para a disposição dos resíduos continua a ser um grande desafio no Brasil. Entre as várias opções para a disposição final, vale destacar:

- Aterro específico constituído junto a ETR;
- Aterro industrial coletivo;
- Fabricação de tijolos, concreto, cimento e artefatos de cimento;
- Disposição no solo;

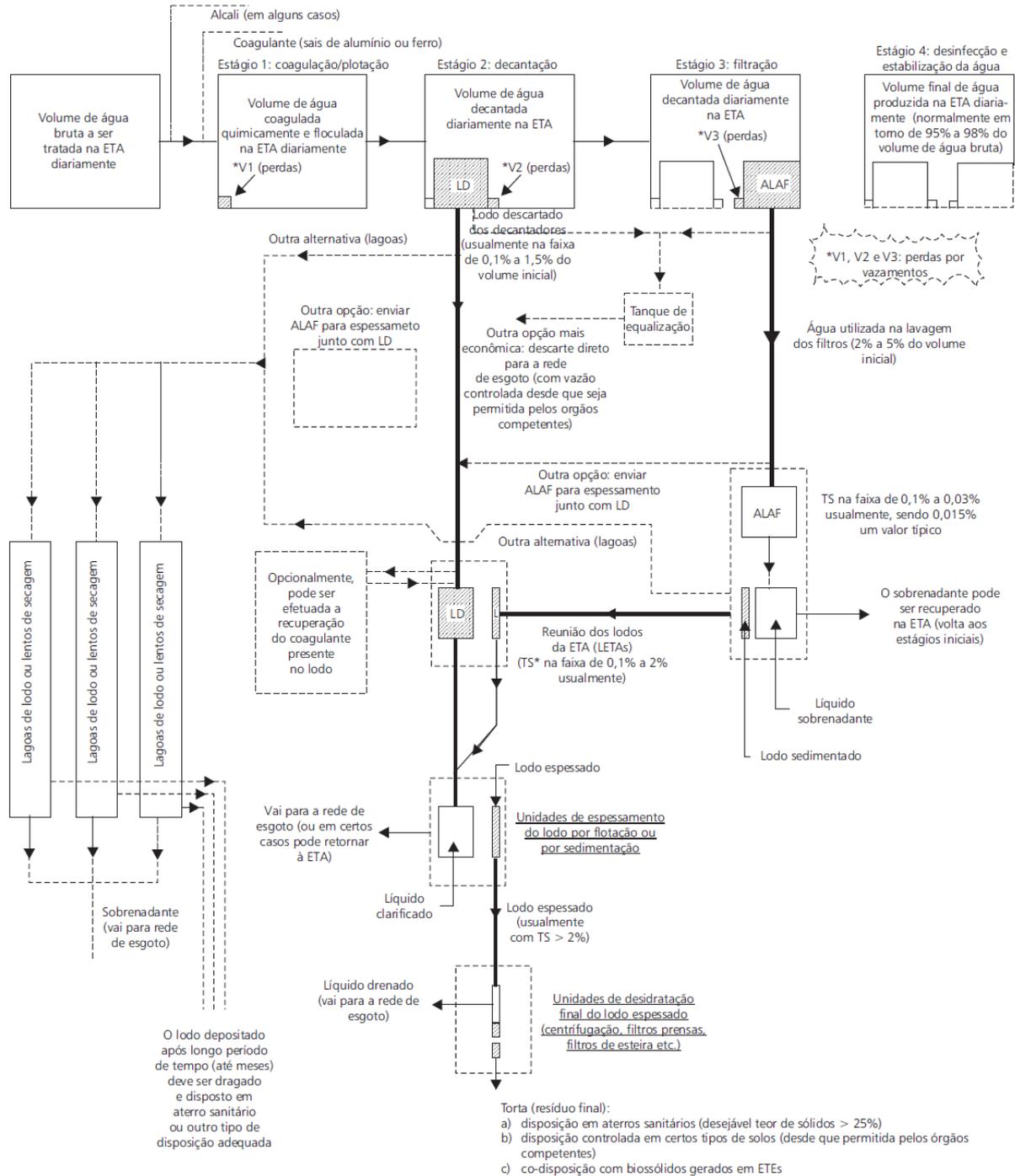
- Cultivo de grama;
- Recuperação de área degradadas;
- Produção de solo para pavimentação de estradas;
- Descarga em redes coletoras de esgoto ou encaminhamento direto por meio de tubulação específica, para tratamento conjunto em ETE's;
- Recuperação de coagulante;
- Remoção de fósforo do efluente de ETE's;
- Remoção de cianobactérias do efluente de ETE's que utilizam lagoas de estabilização;
- Melhoria na sedimentação de água com baixa turbidez em ETA's de ciclo completo;
- Remoção de sulfetos.

Cabe aos gestores e projetistas analisar as alternativas possíveis em cada caso particular, de forma a avaliar técnica e economicamente os custos de implantação, operação e manutenção. Ressalta-se que algumas especificidades podem contribuir para a determinação da alternativa de disposição final, tais como a influência do clima, grau de desenvolvimento socioeconômico da região, disponibilidade de mão de obra especializada, legislação federal, estadual e municipal, distância da ETR ao local de disposição, custos de energia, dentre outros.

Na Figura 20, apresentam-se esquematicamente os principais fluxos de água e lodos para uma Estação de Tratamento de Água Convencional, bem como algumas alternativas de destinação e disposição do lodo.

O próximo capítulo (Capítulo 4) apresenta-se a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 20. Diagrama conceitual dos volumes de água e de lodos produzidos em uma ETA de ciclo completo que utiliza sais de alumínio ou ferro como coagulante e algumas opções de tratamento do lodo e disposição final dos resíduos



Observação:

**TS: teor de sólidos totais presentes no lodo ou na torta.

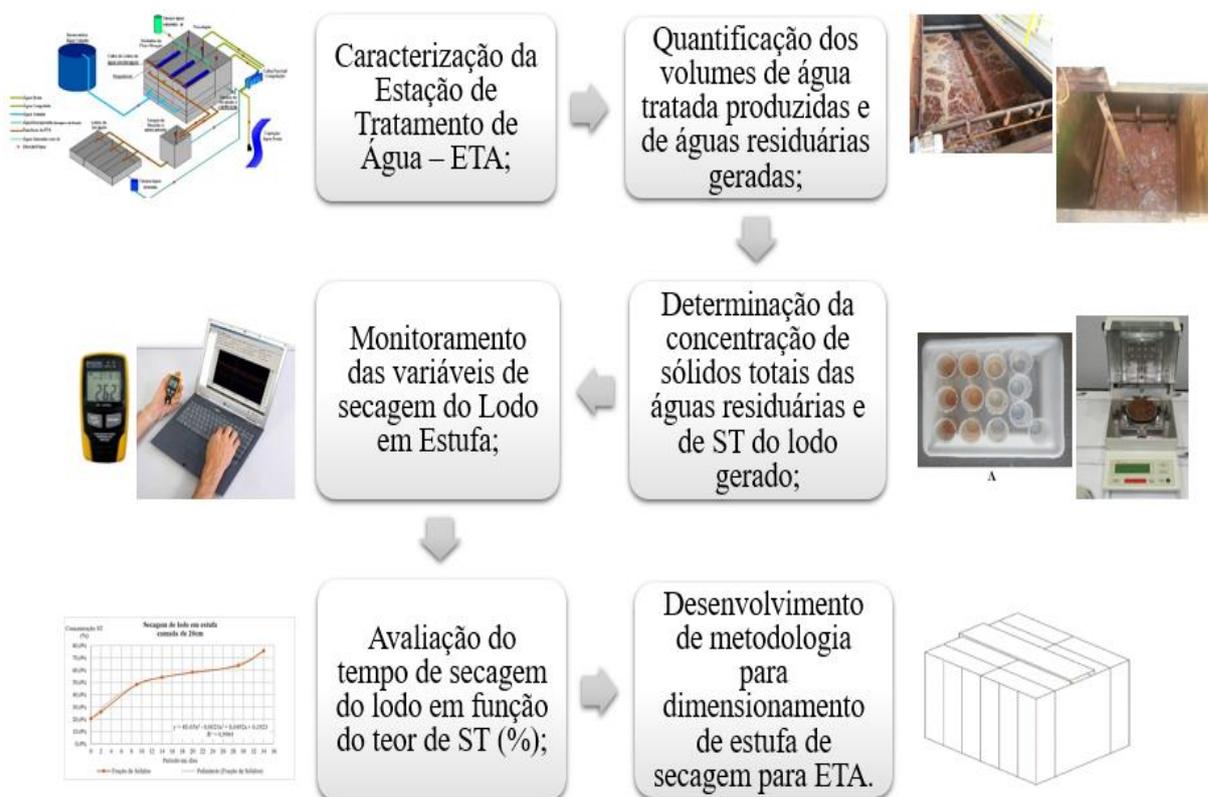
Fonte: PROSAB (1999).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Quanto à metodologia, inicialmente foi realizada uma pesquisa descritiva de natureza exploratória, com o objetivo de aprofundar a revisão bibliográfica acerca dos conceitos e trabalhos realizados sobre resíduos gerados em estações de tratamento de água, tratamento e destinação de lodos; passando, posteriormente, para a realização de pesquisa-ação, na qual se realizaram ensaios em escala piloto para avaliação do tempo de secagem do lodo gerado na ETA de estudo, objetivando a determinação de uma metodologia para dimensionamento de estufa de secagem de lodo a ser aplicada para a ETA de estudo, bem como para outras ETA's cujas características possam se assemelhar.

A Figura 21 ilustra as etapas da metodologia realizada para a obtenção de parâmetros para dimensionamento de unidade de secagem de resíduos gerados em estações de tratamento de água.

Figura 21. Etapas da metodologia utilizada neste trabalho



Fonte: Autor, 2019.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Para caracterizar o sistema de tratamento de água de estudo através de seus parâmetros operacionais e de qualidade, procedeu-se, inicialmente, à descrição da tecnologia de tratamento da referida ETA de estudo, com as respectivas apresentações das unidades do processo de tratamento de água propriamente dito, volumes produzidos, mecanismos de operação e qualidade da água bruta e tratada. Posteriormente, passou-se para a descrição dos resíduos gerados no processo de tratamento de água, bem como a descrição das tecnologias de tratamento e disposição empregadas no local.

Para coletar as informações em campo na ETA em estudo, foram realizadas as seguintes etapas:

- Encaminhou-se um e-mail para a direção da Estação de Tratamento de Água em estudo para explicar o interesse em desenvolver o presente trabalho;
- Marcou-se uma reunião com o diretor da unidade de tratamento onde foram apresentados os objetivos do presente trabalho e foi obtida autorização para iniciar o trabalho;
- Pegou-se os contatos com os responsáveis pela operação e manutenção da ETA e foram agendadas reuniões em campo para conhecer o sistema;
- Foram cadastrados todos os pontos de operação, especificadamente quanto ao sistema de geração de lodo;
- Foram levantados todos os relatórios técnicos existentes na ETA, tanto nos aspectos quantitativos como qualitativos.

4.2. QUANTIFICAÇÃO DOS VOLUMES DE PRODUÇÃO DE ÁGUA TRATADA E DE RESÍDUOS GERADOS, E DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS E DO LODO GERADO

A quantificação dos volumes de água tratada e de resíduos gerados foram realizadas através do controle operacional da referida ETA de estudo, na qual, especificamente para os volumes de água tratada, são mensurados através de equipamentos de medição de vazão do tipo eletromagnéticos e registrados diariamente por supervisor e pelos operadores da unidade.

Para os resíduos gerados no tratamento da água, no caso da planta em estudo, para o descarte dos resíduos raspados no flotor e da água de lavagem dos filtros, a quantificação dos volumes se procedeu através da medição do volume dos tanques que recebem estes resíduos gerados após as etapas de descarte do mesmo.

Os experimentos para a quantificação dos 'volumes de água tratada', dos 'volumes de resíduos gerados', bem da 'concentração de sólidos totais' destes resíduos, foram divididos em 3 etapas (fases), conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5. Fases da realização experimental realizada na ETA Floto-filtração

Fase do Experimento	Descrição	
Fase 01	Quantificação dos resíduos gerados na ETA Floto-Filtração;	Volume da água de lavagem dos filtros;
		Volume de lodo gerado na raspagem dos flotores;
Fase 02	Determinação da concentração de sólidos dos resíduos gerados;	Concentração de ST da água lavagem dos filtros;
		Concentração de ST do lodo dos flotores;
Fase 03	Cálculo da Massa de Lodo Seco;	A partir da água lavagem dos filtros;
		A partir do lodo dos flotores;

Fonte: Autor, 2019.

4.2.1. Volume da Água Filtrada, Volume de Água de Lavagem dos Filtros e Volume do Descarte Sobrenadante do Flotor

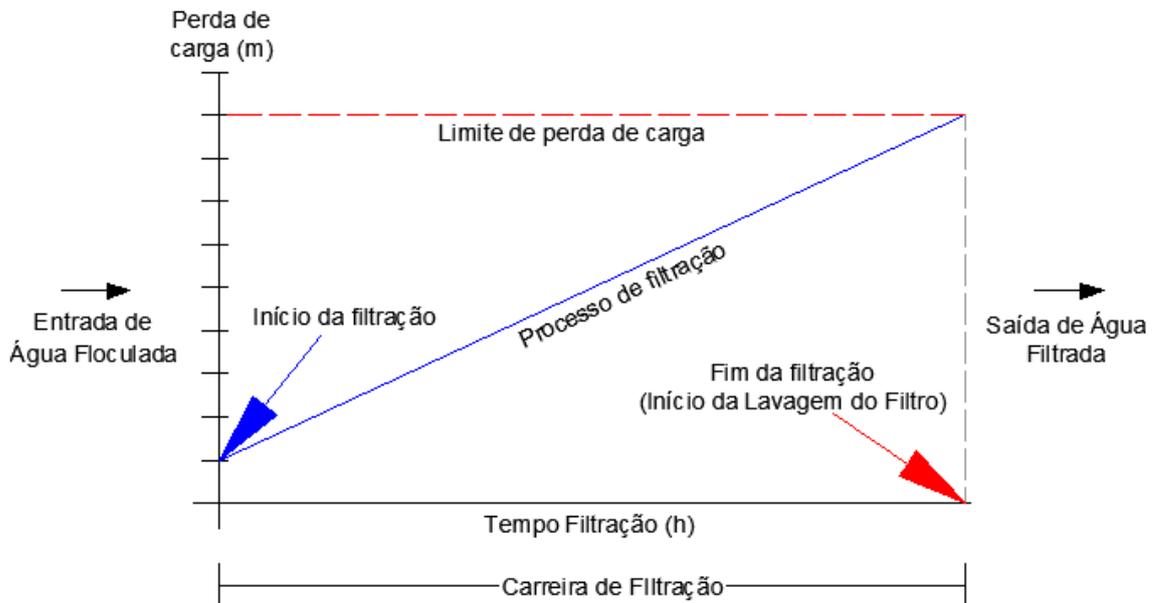
Em geral, nas condições operacionais atuais da ETA em estudo e características quantitativas e qualitativas da água bruta, a geração dos resíduos é dada a partir do fim da carreira de filtração (24h em média).

A carreira de filtração é o intervalo de tempo dado a partir do início da filtração propriamente dita, até o momento em que é interrompido o fluxo de água floculada para este, dando início ao processo de lavagem deste filtro (Figura 22). A partir da lavagem do filtro, ele está pronto para reiniciar o processo de filtração novamente.

A interrupção da filtração, conforme apontado, é dada a partir da perda de carga no filtro, parâmetro este definido pelo operador para que não haja

transbordamento da unidade. A perda de carga nos filtros ocasiona a elevação do nível de água nos filtros, devido à dificuldade da passagem de água pelo meio filtrante (areia e antracito), a medida em que este vai se colmatando pelas partículas de impurezas formadas nas unidades precedentes.

Figura 22. Esquema de filtração com interrupção por perda de carga em uma ETA



Fonte: Autor, 2019.

4.2.1.1. Volume da água filtrada no módulo de filtração

Para estimar o volume de água filtrada nos módulos de filtração foram monitorados os tempos de lavagem dos filtros. A vazão de entrada de cada filtro foi obtida através do medidor de vazão do tipo Calha Parhall situado na entrada da ETA. Assim, como são três módulos de filtros, considerou-se no presente trabalho que a vazão individual em cada filtro é igual a vazão na entrada da ETA dividida por três.

Logo, adotou-se a seguinte equação para calcular o volume de água filtrada em cada filtro.

$$V_{AF} = Q_M \cdot TF$$

Equação 6

Onde,

V_{AF} – Volume da Água Filtrada (m^3);

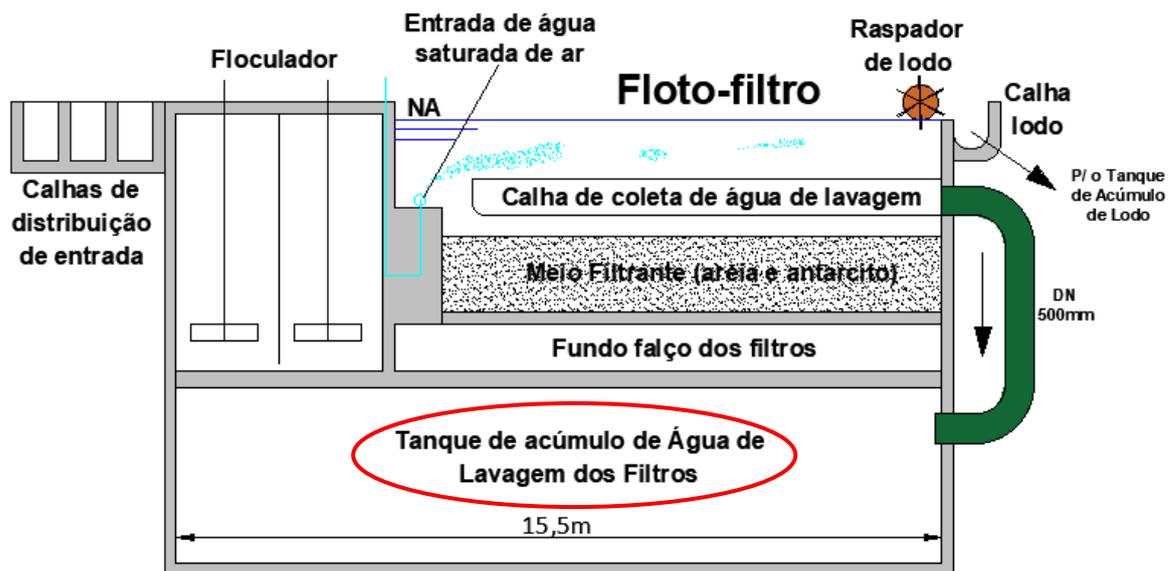
Q_M – Vazão média do módulo de filtração (m^3/h), sendo esta igual a Vazão média de entrada na ETA dividida pelo número de módulo (por 3, neste caso);

TF – Tempo de Filtração ou Carreira de Filtração (h).

4.2.1.2. Volume de água de lavagem dos filtros

Os resíduos gerados durante o processo de lavagem dos filtros (água de lavagem dos filtros) foram quantificados a partir do tempo de lavagem e da medição do nível do tanque de recepção e clarificação (antes e após o processo) situado abaixo das unidades de floto-filtros. A Figura 23 ilustra o Tanque de Água de Lavagem dos filtros.

Figura 23. Perfil esquemático do módulo de Floto-filtração da ETA em estudo



Fonte: Autor, 2019.

Para realizar a lavagem dos filtros foram estabelecidos os seguintes procedimentos operacionais no módulo de Floto-filtração (Figura 24):

I - Interrupção de 50% da saída de água tratada no filtro a ser lavado (Água floculada continua a entrar, desta forma, o nível de água no módulo começa a se elevar fazendo com que o lodo acumulado na superfície (flotado) seja arrastado para a calha de coleta);

II – Início da remoção dos resíduos flotados (Liga raspador rotativo de superfície) (Figura 25); Os resíduos removidos nesta etapa segue para o Tanque de Acúmulo localizado na lateral à ETA (Figura 26).

Duração etapas I e II = entre 8 e 9 minutos.

III – Interrupção da entrada da água floculada (fechamento da adufa de água bruta da linha em processo de lavagem) (Figura 27);

IV – Abertura total da saída de água filtrada (nível de água no módulo irá abaixar até nível abaixo da calha de coleta de água de lavagem);

V – Fechamento da válvula de saída de água filtrada;

VI – Início da “lavagem” somente com ar (compressor de ar ligado por 3 minutos) (Figura 28);

VII – Desligamento da lavagem com ar;

VIII – Início do bombeamento de água para lavagem em contracorrente – bombeamento para lavagem (cerca de 8 a 12 minutos) e abertura da comporta da calha de coleta (Figura 29);

IX – Cessa-se lavagem, fechamento da comporta da calha de coleta e inicia-se filtração novamente.

Figura 24. Módulo de Floto-filtração da ETA de estudo – momento antes da lavagem do filtro



Fonte: Autor, 2019.

Figura 255. Floto-filtro da ETA de estudo – vista para o raspador de lodo flotado



Fonte: Autor, 2019.

Figura 26. Vista lateral do Tanque de Acúmulo de Lodo flotado da ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Figura 27. Canais de divisão de fluxo de água coagulada para os 03 módulos de tratamento da ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Figura 28. Lavagem do filtro da ETA de estudo – momento da injeção de ar no meio filtrante



Fonte: Autor, 2019.

Figura 29. Lavagem do filtro da ETA de estudo – momento da abertura da calha de coleta de água de lavagem



Fonte: Autor, 2019.

A quantificação dos resíduos gerados na flotação e na lavagem dos filtros foi a partir do tempo de descarte de cada operação e da medição do nível do tanque de reunião e do tanque de recepção/clarificação, antes e após o descarte destes resíduos.

O processo de lavagem possui, em geral, duração de 8 a 12 minutos, podendo variar de acordo com a qualidade da água bruta a ser tratada e conseqüentemente, com carreira de filtração em cada módulo. A Figura 30 ilustra o momento da lavagem em um dos módulos de tratamento da ETA estudada.

Os ensaios de quantificação dos volumes dos resíduos da lavagem dos filtros (água de lavagem) foram realizados no filtro do Módulo A e no filtro do Módulo C da ETA. Assim, no presente trabalho os ensaios foram realizados em dois módulos de filtração, não sendo realizado no módulo B, uma vez que os três são operados nas mesmas condições e desta forma não se justifica realizar os ensaios em todos os módulos.

Para a quantificação do volume utilizado para retrolavar cada filtro, procedeu-se com a medição física do tanque que recebe toda água que verte pela calha coleta

após o procedimento de lavagem. A altura da lâmina líquida é variável conforme volume de água utilizado para lavagem do filtro, que especificamente varia com o tempo de lavagem (8 a 12 minutos), pois a vazão de lavagem em contracorrente é constante, possuindo variação desprezível.

Figura 30. Momento da lavagem do filtro em um dos módulos de tratamento da ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

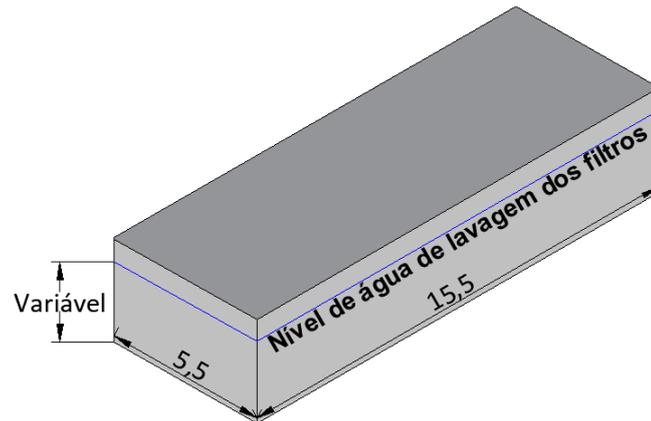
Assim, o fundo do tanque da água de lavagem possui formato retangular, sendo comprimento igual a 15,5 m e largura igual a 5,5 metros, conforme ilustrado na Figura 31. Logo, para quantificar o volume de água, procedeu-se no presente trabalho a medição da altura da lâmina d'água através do uso de uma trena. Para tanto, foram realizadas as medições de altura da lâmina d'água após a lavagem individual dos módulos A e C.

4.2.2.1. Volume de lodo gerado na raspagem dos flotoadores

Os resíduos flotados nas unidades de Floto-filtração são lançadas por gravidade para um tanque (tanque de recepção ou tanque de acúmulo de lodo), localizado na lateral destas unidades, na qual fica constantemente em agitação. Na

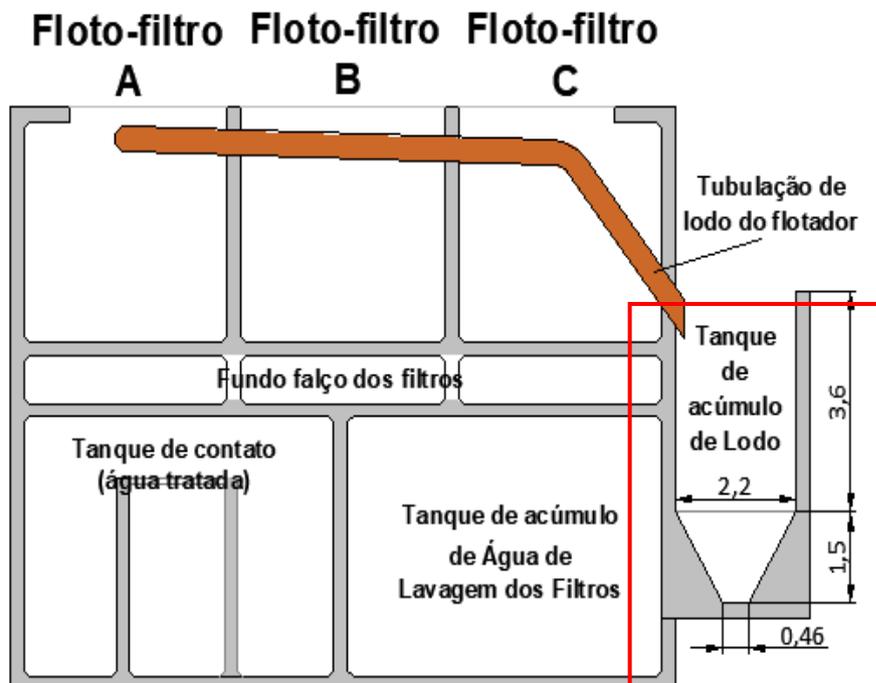
sequência é ilustrado a localização do tanque de acúmulo na ETA (Figura 32) e apresentada vista superficial desta unidade, onde observa-se o agitador do tanque (Figura 33) (ver também Figura 26).

Figura 31. Perspectiva esquemática do Tanque de Água de Lavagem dos Filtros da ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Figura 32. Localização do Tanque de Acúmulo de Lodo da ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

A quantificação dos volumes de resíduos gerados pela etapa de flotação foi através da medição física do tanque de recepção destes resíduos, realizando posteriormente a medição da altura da lâmina líquida de resíduos após cada descarte, determinando assim o volume gerado. Para realizar as medições da lâmina de resíduo gerado foi utilizada uma trena manual.

Figura 33. Vista do Tanque de Acúmulo de Lodo da ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

2.2.1. Quantificação da Massa Seca dos Resíduos da Lavagem dos Filtros e do Lodo Sobrenadante dos Flotadores

Os procedimentos para a obtenção das concentrações de sólidos totais nas unidades de filtração e flotação da ETA de estudo são descritos na sequência.

2.2.1.1. Quantificação da massa seca dos resíduos da lavagem dos filtros

Conforme apresentado, o volume dos resíduos gerados durante o processo de lavagem dos filtros foi quantificado a partir da medição do nível do tanque de recepção e clarificação, situado abaixo das unidades de floto-filtros.

Para a determinação da massa seca desses resíduos gerados, procedeu-se com a coleta de amostras, minuto a minuto, durante o processo de retrovagem dos filtros. A amostra consiste de água de lavagem que verteu pela calha de coleta do filtro durante a lavagem.

A lavagem do 'filtro A' teve duração de 12 minutos e do 'filtro C', duração de 9 minutos.

Com as amostras coletadas, foram realizadas análises de turbidez em cada uma, em aparelho 'Turbidímetro' (Figura 34), e registradas em planilha.

Figura 34. Turbidímetro utilizado para análise de turbidez das amostras de água de lavagem dos filtros da ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Como a concentração de sólidos suspensos totais não pôde ser medida no laboratório de qualidade da unidade de tratamento, devido à pouca sensibilidade da balança determinadora de umidade, estas concentrações foram estimadas através de equação $SST = a \times Tu$, sendo que 'a' é um coeficiente que varia de 0,5 a 2,0 e 'Tu', a turbidez em uT, conforme apresentado por AWWA (1999), onde os valores são estimados em mg/L.

O coeficiente 'a' foi adotado com base em amostras de resíduos mais concentrados (preparadas no laboratório com os resíduos da ETA), cuja concentração de ST pôde ser na medida balança determinadora de umidade, onde, por exemplo, a partir de uma amostra cuja turbidez foi de 900uT, seca-se 100,0 mL desta amostra (secagem a 105°C por 90 minutos e pesagem novamente da amostra seca), resultando em 0,09g de massa seca, ou seja, 0,09g/100,0mL ou 900mg/L (relação de 1:1 – 900uT para 900mg/L).

Paralelamente, foram feitas medições de turbidez de amostras conhecidas, bem mais concentradas, como forma de determinar a relação $Tu/SST = 'a'$.

A partir da quantificação do volume de água de lavagem dos filtros e da determinação da concentração de sólidos secos (ST), pode-se, portanto, calcular a quantidade total de resíduos gerados no processo de lavagem dos filtros da ETA em estudo, através do produto: Concentração de ST x Volume água de lavagem.

Para se obter a média de resíduos (massa seca) pelo volume de água filtrada, foi realizado a divisão da massa seca total em cada filtro (MSS) pelo volume total de água filtrada (VAF): MSS / VAF .

A partir dos resultados obtidos para os quantitativos de resíduos gerados somente com a lavagem dos filtros, é possível obter a massa total diária (resíduos de lavagem dos filtros) gerada a partir da capacidade média de produção da ETA (600m³/h ou 14.400m³/dia), através do produto: vazão x concentração de sólidos por volume filtrado.

2.2.1.2. Quantificação da massa seca dos resíduos dos flotores

Foram realizadas medições de turbidez nos resíduos sobrenadantes dos flotores, homogeneizados no Tanque de Acúmulo de Lodo, e de forma análoga à determinação das concentrações dos resíduos da lavagem dos filtros, as concentrações dos resíduos gerados na unidade de flotação foram estimadas através de equação $SST = a \times Tu$, sendo 'a' o coeficiente de valor 1,0 e 'Tu' a turbidez (uT).

A partir da quantificação do volume de lodo flotado descartado no Tanque de Acúmulo e da determinação da concentração de sólidos secos (ST), pode-se, portanto, calcular a quantidade total de resíduos gerados no processo de flotação da

ETA em estudo, através do produto: Concentração de ST x Volume resíduos flotados.

Para se obter a média de resíduos flotados (massa seca) pelo volume de água filtrada, foi realizado a divisão da massa seca total em cada flotador (MSS) pelo volume total de água filtrada (VF): MSS / VF .

A partir dos resultados obtidos para os quantitativos de resíduos gerados somente na unidade de flotação, foi possível obter a massa total diária (resíduos de flotação) gerada a partir da capacidade média de produção da ETA ($600\text{m}^3/\text{h}$ ou $14.400\text{m}^3/\text{dia}$), através do produto: vazão x concentração de sólidos por volume filtrado.

2.2.2. Cálculo da Massa de Lodo Seco Total

A partir da determinação da massa seca dos resíduos gerados na água de lavagem dos filtros e no descarte do sobrenadante dos flotações, procede-se com a soma destas duas grandezas, obtendo-se desta forma, a massa total de lodo seco gerado na planta de tratamento em estudo.

A partir da determinação da massa seca de resíduos gerados nos flotações e na lavagem de filtros, foi possível obter a massa total diária gerada a partir da capacidade média de produção da ETA ($600\text{m}^3/\text{h}$ ou $14.400\text{m}^3/\text{dia}$), através do produto: vazão x concentração total de sólidos por volume filtrado.

Como no presente trabalho foi realizado o cálculo da produção de SST gerados na ETA em estudo, foi realizada uma comparação com equações existentes na literatura que também estimam a produção de SST em função de outros parâmetros operacionais do tratamento. Assim, os resultados obtidos em campo foram comparados com a equação empírica obtida por AWWA (1999), sendo esta (Equação 3):

$$P_{SS} = Q \cdot (4,89 \cdot D_{Al} + SST + D_P + D_{CAP} + 0,1 \cdot D_{CAL}) \cdot 10^{-3}$$

Onde,

P_{SS} = produção de SST (Kg/d);

Q = vazão de água bruta a ser tratada (m^3/d);

D_{Al} = dosagem de sulfato de alumínio ($\text{mg}/\text{Al}/\text{L}$);

SST = concentração de sólidos suspensos totais na água a ser tratada (mg/L);
 D_P = dosagem de polímero seco (mg/L);
 D_{CAP} = dosagem de carvão ativado pulverizado (mg/L);
 D_{CAL} = dosagem de cal hidratada (mg/L).

Como no processo da ETA floto-filtração estudada é dosado apenas o coagulante a base de alumínio, a Equação 3 pôde ser simplificada como:

$$P_{SS} = Q \cdot (4,89 \cdot D_{Al}) \cdot 10^{-3} \quad \text{Equação 7}$$

Onde,

P_{SS} = produção de SST (Kg/d);
 Q = vazão de água bruta a ser tratada (m³/d);
 D_{Al} = dosagem de sulfato de alumínio (mgAl/L);

A massa de ST calculada a partir da equação empírica foi comparada com os resultados determinados com os experimentos realizados na ETA em estudo, sendo calculado o erro relativo entre os dois procedimentos (cálculo a partir dos volumes e concentrações de ST medidos e cálculo com equação empírica).

O erro relativo entre a quantificação da massa, realizada com ensaios práticos de determinação de volume e concentração de ST e o cálculo da massa através de equação empírica pode ser determinado:

$$\%ERRO = (| M_{determinada} - M_{calculada} | / M_{calculada}) \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde,

%ERRO – Erro relativo

M_{determinada} – Massa a partir de ensaios práticos de determinação de volume e concentração de ST;

M_{calculada} - Massa calculada através de equação empírica (Kg).

2.3. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS FATORES TEMPERATURA E TEMPO NA SECAGEM DO LODO DA ETA EM ESTUFA DE POLIPROPILENO

O lodo gerado na ETA em estudo é desaguado em Decanter centrífugo, sendo o lodo armazenado em caçamba estacionária, e após o enchimento desta, feito a disposição final por empresa terceirizada.

Para o cumprimento do objetivo de realizar avaliação de parâmetros de secagem deste lodo em estufa (lodo pré-desaguado em centrífuga), procedeu-se com a construção de uma estufa piloto nas instalações da ETA, de modo a possibilitar a obtenção dos parâmetros que permitem tal avaliação. Dentre os parâmetros que regem os mecanismos de secagem de lodo em estufa, foram estudados a temperatura e umidade externa à estufa de secagem, bem como a variação de umidade do lodo (concentração de ST) durante a permanência deste dentro da estufa, em diferentes alturas de camadas de lodo.

Os parâmetros de temperatura e umidade foram medidos de forma a avaliar a influência destes parâmetros durante a secagem.

A medição de umidade do lodo, dada através da determinação da concentração de ST nas amostras de lodo, teve o objetivo de avaliar o tempo necessário para secagem do lodo dentro da estufa, em diferentes alturas de camadas de lodo (diminuição da umidade ao longo do tempo).

O monitoramento da temperatura e umidade externa da estufa de secagem são importantes para a determinação da relação destas variáveis em relação ao tempo de secagem do lodo na estufa de polipropileno.

2.3.1. Construção da Estufa de Secagem Piloto

Para possibilitar a realização experimental deste trabalho, foi construída, nas imediações da ETA em estudo, uma estufa para secagem de lodo centrifugado.

A estufa foi construída com o objetivo de permitir a passagem de luz solar, principalmente pela cobertura, e para proteção contra chuvas.

A princípio, para determinação do tamanho da estufa a ser construída, foi considerado o volume de 7,0m³ de lodo produzido, que é o volume de 01 (uma) caçamba estacionária utilizada na ETA em estudo para acúmulo do lodo centrifugado, antes da disposição final por empresa terceirizada.

Os ensaios de secagem natural foram realizados com variação de altura das leiras de lodos. As alturas determinadas para o dimensionamento da estufa a ser

construída foram de 0,10m, 0,30m e 0,60m. Portanto, de forma a realizar o estudo de secagem utilizando o volume de 01 caçamba de lodo centrifugado para a variação de 3 alturas em concomitantes, realizou-se o seguinte cálculo para determinação da área de secagem necessária:

$$(h_1 \times A_1) + (h_2 \times A_2) + (h_3 \times A_3) = \text{Volume de Lodo} \quad \text{Equação 9}$$

Onde,

h_1 , h_2 e h_3 – são as alturas de leiras (leitos) de secagem pré-definidas;

A_1 , A_2 e A_3 – são as áreas de secagem para cada leira (leito) de secagem;

Volume de Lodo – volume de lodo a ser utilizado = volume da caçamba.

Definiu-se que as áreas de secagem seriam iguais, portanto $A_1 = A_2 = A_3$.

Desta forma, a Equação 9 pôde ser simplificada:

$$A \times (h_1 + h_2 + h_3) = \text{Volume de Lodo} \quad \text{Equação 10}$$

Onde,

h_1 , h_2 e h_3 – são as alturas de leiras (leitos) de secagem pré-definidas;

A – é a área de secagem para cada leira (leito) de secagem;

Volume de Lodo – volume de lodo a ser utilizado = volume da caçamba.

Como as alturas das leiras definidas preliminarmente foram de 0,10m, 0,30m e 0,60m, e o volume de lodo também foi definido como o volume da caçamba estacionária de 7,0m³, a área total de secagem para 3 leiras de alturas variadas pode ser calculada:

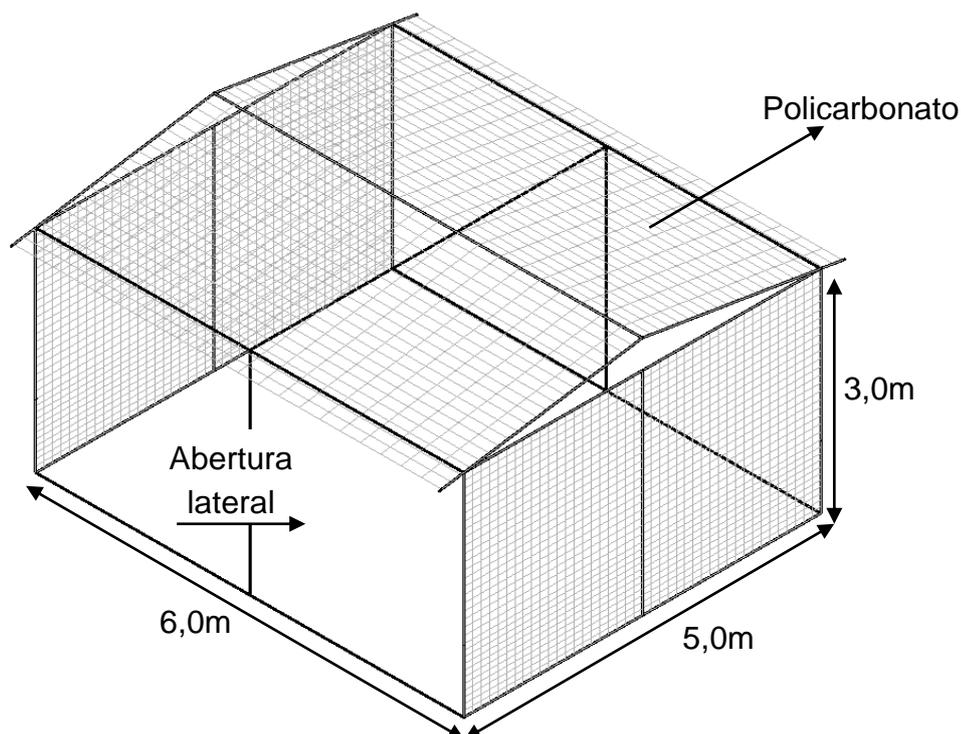
$$A = 7,0\text{m}^3 \text{ de lodo} / (0,1 + 0,3 + 0,6)\text{m de leito.}$$

$$A = 21,0\text{m}^2$$

Desta forma, foi considerado uma estufa de secagem de 30m², área maior que a calculada, para que os leitos fiquem cerca de 0,30m adentro dos limites internos da estufa. As dimensões da estufa piloto construída foram de 5,0m de largura por 6,0m de comprimento e 3,0m de altura, conforme ilustrado na Figura 35.

A estufa foi construída em estrutura metálica, com cantoneiras de 3/4" para a estrutura vertical (sustentação do telhado), e cantoneiras de 1/8" nos demais pontos de amarração e telhado. Todos os elementos metálicos foram soldados com soldador elétrico e eletrodos.

Figura 35. Projeto da estufa piloto para secagem de lodo da ETA em estudo



Fonte: Autor, 2019.

O telhado e as laterais com largura de 5,0m foram fechadas com Placas de Policarbonato, sendo as laterais de 6,0 m deixadas abertas para favorecer a ventilação interna.

Utilizou-se placas de Policarbonato devido a sua resistência mecânica, boa translucidez e durabilidade atribuída. As Placas de policarbonato utilizadas possuem as dimensões de fábrica: 1,3m x 6,0m, com espessura de 4,0mm.

Conforme informações de fabricantes de placas de policarbonatos (Figura 36), este material têm como principal característica a transparência similar ao vidro com excelente resistência, além de ter a possibilidade de serem dobradas, usinadas, coladas, entre outros processos de transformação. Em geral possuem 10 anos de garantia. São bastante empregadas para coberturas e toldos de proteção. Neste estudo, foram utilizadas placas de policarbonato “cristal” – Alveolar.

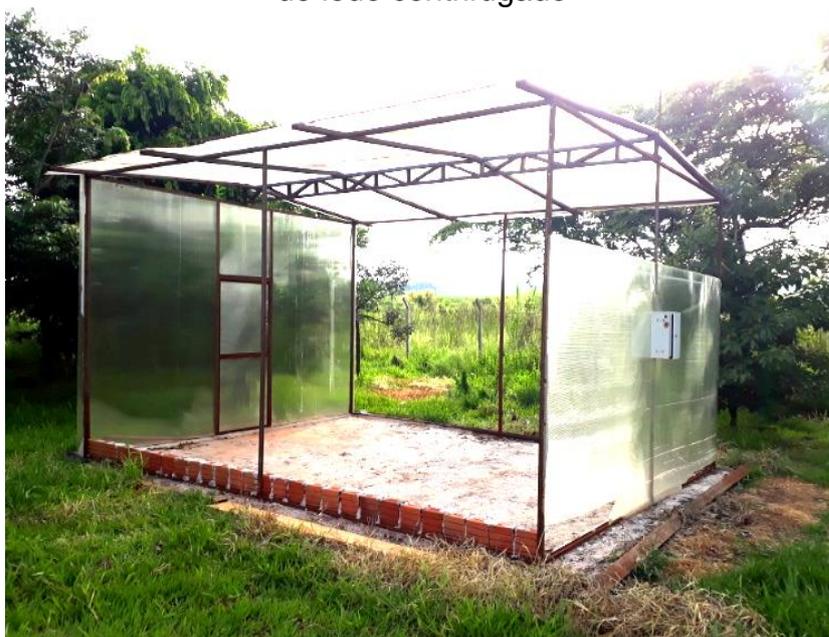
Figura 36. Modelo de placa de policarbonato utilizada na estufa piloto para secagem natural do lodo da ETA de estudo



Fonte: Acriplas, 2019.

O pavimento da estufa constitui-se de concreto (camada de 5,0cm), na qual foi assentada uma fiada de tijolos no sentido do comprimento, de forma a evitar que eventual água de chuva que escoasse pela proximidade, pudesse adentrar na estufa. A Figura 37 ilustra a estufa construída nas instalações da ETA em estudo.

Figura 37. Estufa piloto construída na ETA em estudo, para avaliação da secagem de lodo centrifugado



Fonte: Autor, 2019.

2.3.1.1. Leiras de secagem internas à estufa

Para melhor aproveitamento do tempo dos experimentos que levam em consideração o tempo secagem de lodo dentro da estufa, foram dispostas 03 (três) leiras de secagem com alturas variáveis (0,20m, 0,30m e 0,60m).

A estufa de secagem foi dividida em 03 leitos de mesma área, dispostas lado a lado, com variação de altura. Os limites de cada leito foram realizados com chapas de madeira “leve”, cortada com as respectivas alturas pré-definidas das leiras.

O enchimento das leiras com o lodo desaguado na centrífuga da ETA em estudo, foi através do transporte da caçamba (utilizando caminhão tipo munck), contendo o lodo desaguado (após centrifuga), para próximo da estufa, e a transferência do lodo da caçamba estacionária para os leitos, realizado de forma manual, com enxadas e pás. As Figuras 38 a 40 ilustram os procedimentos de transporte e descarregamento do lodo centrifugado na estufa piloto.

Figura 38. Momento do descarregamento de lodo centrifugado na estufa de secagem piloto da ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Após o descarregamento e nivelamento das leiras com as alturas dos leitos pré-definidos, o lodo foi mantido em processo de secagem natural na estufa piloto.

Figura 39. Preenchimento e nivelamento das leiras de secagem dentro da estufa piloto, com altura pré-definidas, na ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Figura 40. Transporte da caçamba estacionária com uso de caminhão munck e descaramento do lodo centrifugado na estufa piloto na ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Vale destacar que não houve revolvimento das leiras durante o processo de secagem natural do lodo na estufa.

2.3.2. Monitoramento de Temperatura e Umidade do Ar

O monitoramento das variáveis de secagem do lodo foi realizado através das medições de temperatura e umidade do ar externo à estufa de secagem, bem como realizadas medições da variação da umidade (ST) dos resíduos gerados na ETA após o processo de centrifugação, durante determinado período. Os resíduos pré-desaguados em centrífuga foram dispostos em leitos de secagem internamente à estufa de placas de polipropileno.

Para o monitoramento da temperatura e umidade, foi instalado um instrumento de medição fora da estufa piloto para um monitoramento sincronizado com a concentração de ST do lodo, conforme ilustrado na Figura 41. A Figura 42 ilustra o instrumento instalado na parte externa da estufa de secagem. O instrumento de medição é do tipo Datalogger, para o registro simultâneo destas duas variáveis (temperatura e umidade) externo à estufa.

Figura 41. Local de instalação do instrumento de medição de temperatura e umidade fora da estufa piloto na ETA de estudo

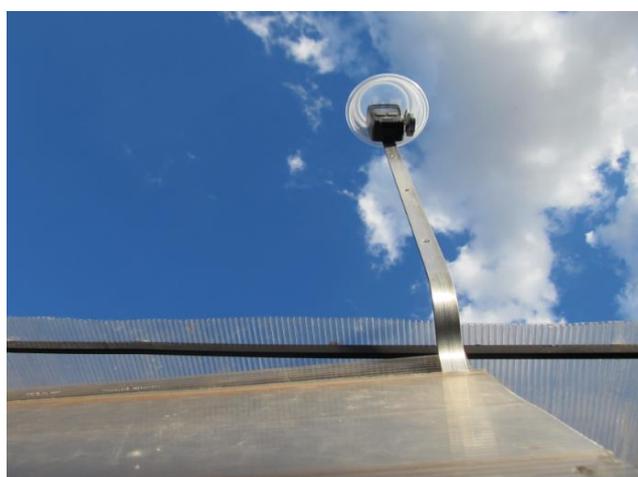


Fonte: Autor, 2019.

Conforme apresentado pelo fabricante, o registrador de umidade e temperatura Impac IP-747RH é um coletor de dados destinado a medir e armazenar os valores de umidade relativa do ar e temperatura ambiente de maneira a se ter um

monitoramento completo da umidade e temperatura. É baseado em um circuito microprocessado que é conectado a um mostrador de cristal líquido multifuncional, permitindo selecionar e visualizar a medição da umidade, a medição da temperatura e os máximos e mínimos tanto da umidade como da temperatura bem como a data e hora e o número atual de medições já registradas em sua memória de dados (IMPAC, 2019).

Figura 42. Instrumento de medição de temperatura e umidade instalado do lado externo da estufa piloto de secagem de lodo na ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

É apresentado no Quadro 6 algumas características do instrumento registrador de temperatura e umidade utilizado na estufa de secagem, ilustrado na Figura 43.

Figura 43. Instrumento registrador de temperatura e umidade utilizado na estufa piloto da ETA de estudo



Fonte: Impac, 2019.

Quadro 6. Características do instrumento de medição de temperatura e umidade utilizado na estufa de secagem piloto na ETA de estudo

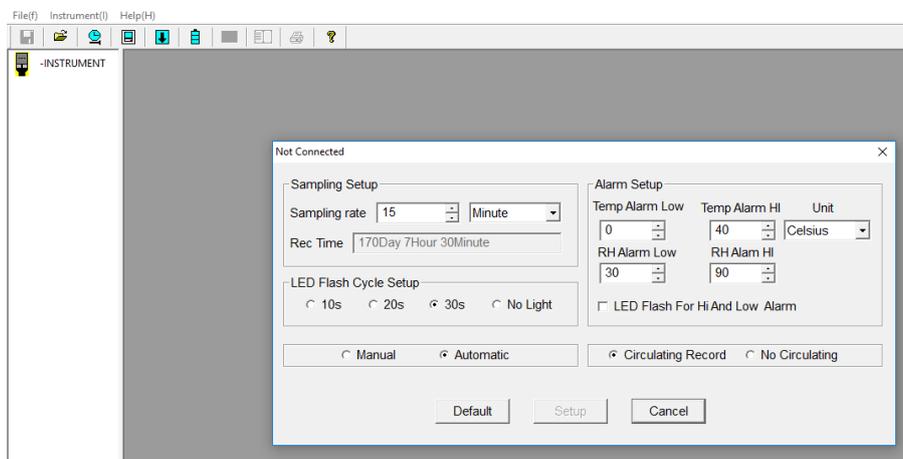
Mostrador	LCD multifunção 3 ½ dígitos
Faixa de medição da Umidade	0 ~ 100%
Faixa de medição da Temperatura	-40 ~ 70°C
Resolução Umidade	0,1%
Resolução Temperatura	0,1°C
Precisão Umidade (0 ~ 20 e 80 ~ 100%)	± 5%
Precisão Umidade (20 ~ 40 e 60 ~ 80%)	± 3,5%
Precisão Umidade (40 ~ 60%)	± 3%
Precisão Temperatura (-40 ~ -10 e 40 ~ 70°C)	± 2°C
Precisão Temperatura (-10 ~ 40°C)	± 1°C
Unidades de medida de Temperatura	°C e °F
Função Datalogger	Sim, armazena até 32700 medições
Saída de dados	USB
Software datalogger	Compatível com Windows 2000 / XP / Vista
Função Máximo e Mínimo	Sim, com alarme
Temperatura de operação	0°C ~ 40°C
Temperatura de armazenamento	-10°C ~ 60°C
Umidade de operação	<70%
Umidade de Armazenamento	<80%
Alimentação	1 bateria de 3,6V
Duração da bateria	de 2 a 3 meses
Dimensões	92 x 50 x 29 mm

Fonte: Impac, 2019.

O instrumento de medição de temperatura e umidade utilizado na estufa piloto permite a parametrização do tempo de registro e alarmes para temperatura e umidade a determinado nível desejado (Figura 44), através de software específico do instrumento, instalado em microcomputador. Para o estudo, foi apenas realizada a parametrização do tempo de coleta de dados de temperatura e umidade externa da estufa piloto, para um intervalo de 15 minutos.

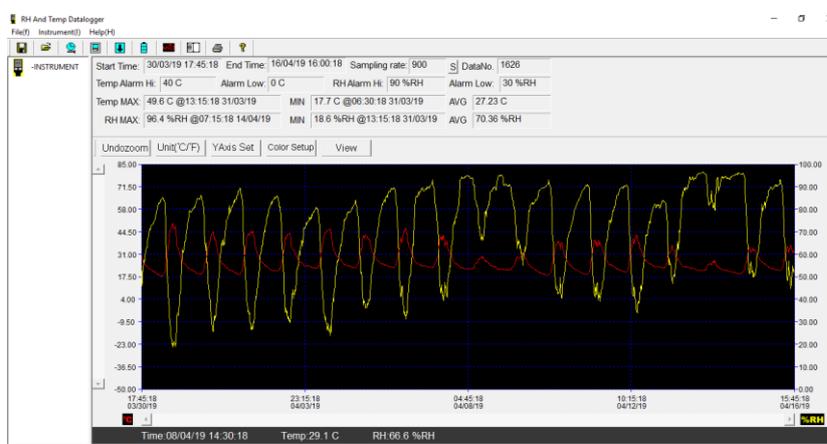
Com o instrumento instalado fora da estufa piloto, foi possível o registro da variação de temperatura e umidade durante os ensaios de secagem de lodo centrifugado. Os dados registrados podem ser extraídos a partir da conexão via cabo do instrumento ao microcomputador e utilização do software específico do instrumento, fornecido pelo fabricante. O software permite o armazenamento dos dados registrados, possibilitando a geração de gráficos (Figura 45) e/ou exportação para planilhas eletrônicas, do tipo Excel®.

Figura 44. Captura da tela de programação dos parâmetros de registro do instrumento de medição de temperatura e umidade utilizado na estufa piloto da ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Figura 45. Captura de tela de registro de dados de temperatura e umidade pelo instrumento instalado na estufa piloto da ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

2.3.3. Monitoramento da Concentração Sólidos Totais do Lodo em fase de secagem.

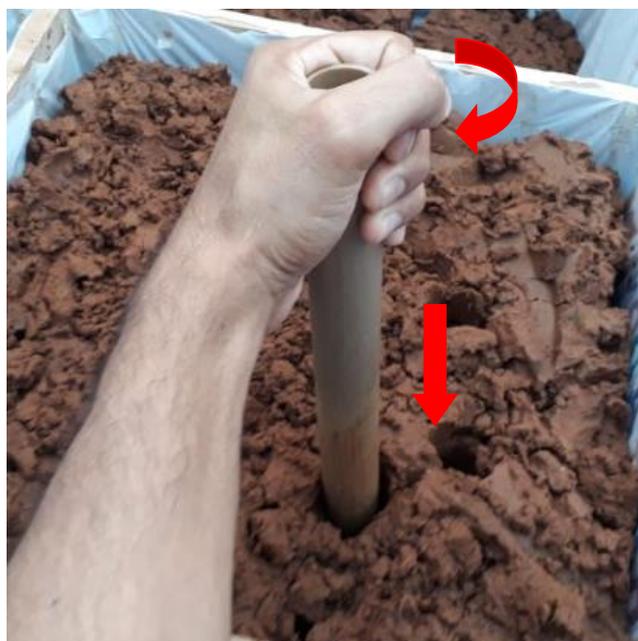
A avaliação o tempo de secagem do lodo na estufa ocorreu através de medições consecutivas (diárias e semanais) de ST do lodo, após o preenchimento de leitos de secagem com lodo centrifugado, em alturas variadas, na qual permaneceu por determinado período nestas condições impostas.

Os ensaios para determinação da concentração de Sólidos Totais (ST) foram realizados em balança determinadora de umidade, com amostras de lodo coletadas diretamente e semanalmente nos leitos em processo de secagem. O objetivo foi identificar a variação do tempo de secagem do lodo da ETA em condições climáticas distintas e em função da variação teor de sólidos totais.

Para haver representatividade na amostra de lodo a ser coletada diretamente no leito de secagem, a coleta foi realizada através da inserção de tubo PVC $\frac{3}{4}$ ", de forma vertical à camada de lodo, obtendo desta forma uma amostra representativa da camada de lodo, de forma que as coletas não fossem somente na superfície do leito ou mesmo que não representassem a camada posta em secagem.

A inserção do tubo PVC amostrador na camada de lodo foi realizada de forma giratória, a medida em que se aprofundava o tubo na camada de lodo (Figura 46). Este procedimento evita a compactação do lodo, o que poderia acarretar, portanto, na extração de uma amostra não representativa.

Figura 46. Procedimento de inserção de tubo PVC $\frac{3}{4}$ " para extração de amostra de lodo na leira de secagem da estufa implantada na ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Após a retirada do tubo PVC (tubo amostrador), a amostra de lodo era retirada dentro do tubo, sendo necessário a inserção de tubo com diâmetro ligeiramente

inferior, para extrair a amostra de dentro do amostrador. Verifica-se na Figura 47 o “vazio” deixado na leira de lodo após a inserção do tubo amostrado, tendo desta forma, uma amostra representativa da camada de lodo.

Figura 47. Tubo amostrador retirado da leira de lodo da estufa implantada na ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

As amostras de lodo variaram de 20 a 50 gramas, de acordo com a altura da leira e tempo de secagem. As amostras extraídas possuíam forma cilíndrico, mesmo formato do tubo PVC amostrado, conforme ilustrado na Figura 48. Após a extração, a amostra foi espalhada em pratos de alumínio de diâmetro útil de 80mm e 5mm de profundidade conforme Figura 49.

Figura 48. Amostras de lodo extraídas com o tubo amostrador de PVC na estufa implantada na ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Figura 49. Espalhamento da amostra no prato de alumínio para determinação da umidade e fração de sólidos em balança determinadora de umidade



Fonte: Autor, 2019.

Vale evidenciar que ao passo que a secagem do lodo avançava (diminuição da umidade do lodo dentro da estufa), a aderência do lodo no tudo amostrador ficava prejudicada, sendo necessário substituir este método de amostragem por ‘tubo PVC’ para a coleta de uma pequena região da leira de lodo (com uma espátula), abrangendo toda sua altura, fazendo-se posteriormente a homogeneização desta amostra em um recipiente (um Becker) colocando-a em quantidade suficiente no prato de alumínio (cerca de 30g) para determinação da concentração de ST na balança determinadora de umidade.

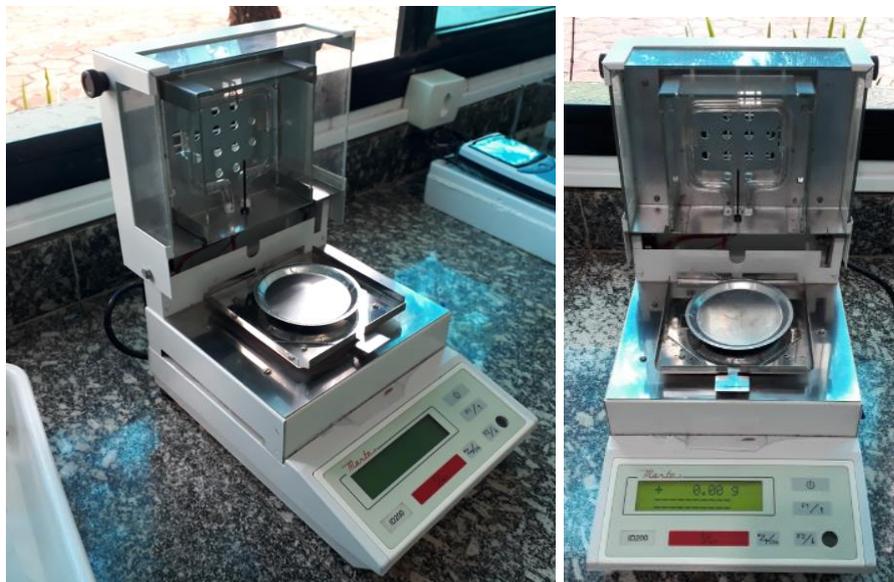
Com a amostra de lodo preparada no prato de alumínio, a mesma era posta em secagem na balança determinadora de umidade, esta já ‘tarada’ (Figura 50).

A balança determinadora de umidade possui com fonte de calor infravermelho produzido por resistência encapsulada em quartzo e display LCD matriz de pontos iluminados.

As características técnicas do equipamento ‘MEDIDOR DE UMIDADE ID200’ são apresentadas no Quadro 7 e os elementos do equipamento na Figura 51.

No equipamento determinador de umidade, na função de secagem “Auto”, a secagem é efetuada a uma temperatura fixa e o processo se cessará quando a variação de peso no intervalo de 30s for menor que um valor estabelecido (em %). Neste caso, a temperatura fixada para secagem foi de 180°C e % de variação de 0,05%.

Figura 50. Balança determinadora de umidade utilizada nos ensaios de análise de secagem do lodo seco pela estufa piloto. À direita, balança ‘tarada’ e pronta para procedimento



Fonte: Autor, 2019.

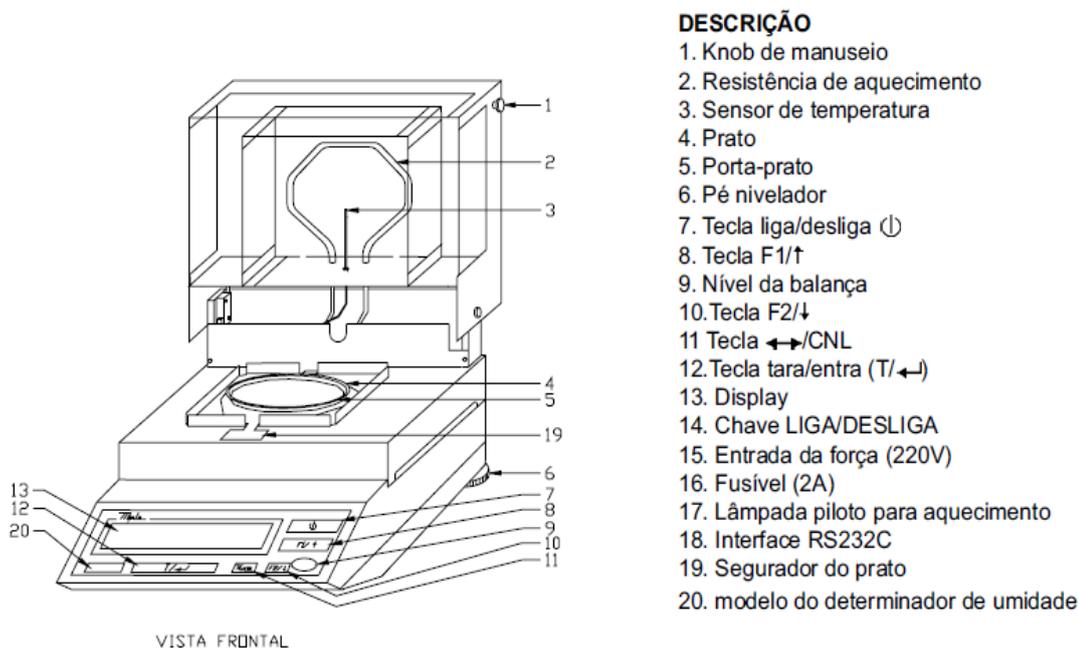
Quadro 7. Dados Técnicos do equipamento medidor de umidade utilizados nos ensaios de determinação de ST do lodo na ETA de estudo

CARACTERÍSTICA	MODELO ID 200
Carga máxima (g)	210
Sensibilidade (g)	0,01
Reprodutibilidade (g)	0,01
Campo de tara (g)	210
Faixa de temperatura (°C)	60 a 180
Incremento de Temperatura (°C)	1
Faixa de umidade (%)	0 a 100
Tempo de estabilização (s)	3
Potência do resistor (W)	250
Diâmetro do prato (mm)	90
Dimensões da balança CxLxA (mm)	292x210x190
Peso (Kg)	6,4
Voltagem (V)	220
Consumo (W)	7

FONTE: MARTE (2019).

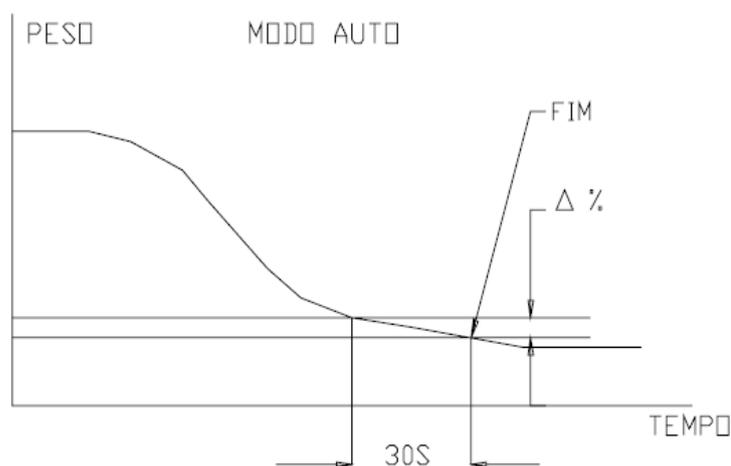
A Figura 52 ilustra o procedimento de secagem do equipamento medidor de umidade ID200, no modo “auto” (modo automático).

Figura 51. Vista frontal de determinador de umidade e elementos do equipamento



FONTE: MARTE (2019).

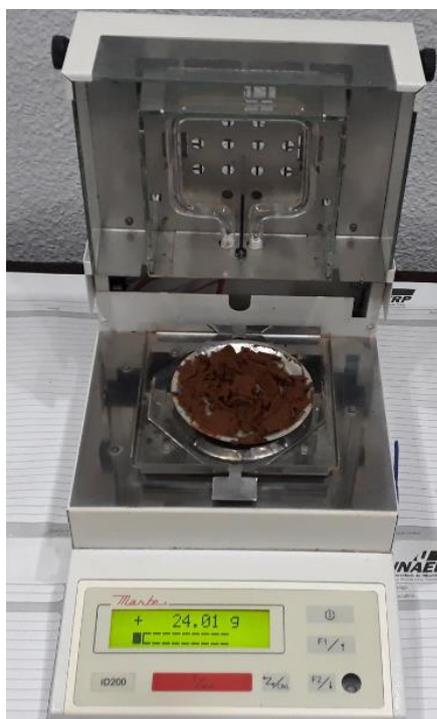
Figura 52. Esquema de secagem do equipamento medidor de umidade ID200, no modo “auto”



FONTE: MARTE (2019).

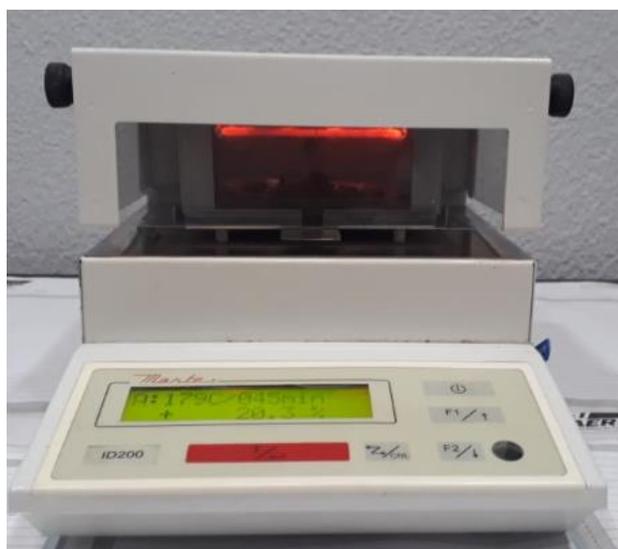
A programação utilizada para secagem foi no modo “automático”, onde a amostra colocada na balança (Figura 53) é seca até que não haja mais variação de peso. Verifica-se na Figura 54 a equipamento em operação.

Figura 53. Amostra de lodo colocada na balança determinadora de umidade na ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

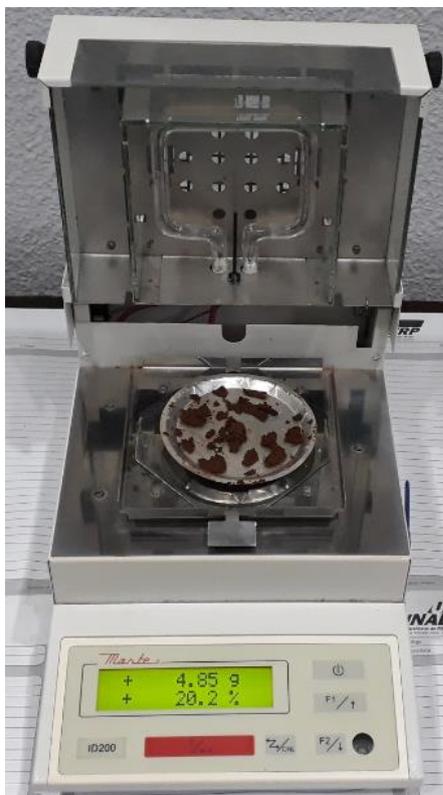
Figura 54. Balança determinadora de umidade em operação



Fonte: Autor, 2019.

Ao final do procedimento, o equipamento apresenta resultado de secagem em grama (g) e o percentual relativo ao peso inicial (fração de sólidos totais) (Figura 55).

Figura 55. Final do processo de determinação da fração de sólidos da amostra de lodo, na balança determinadora de umidade



Fonte: Autor, 2019.

Todos os resultados obtidos com a determinação de ST do lodo foram anotados em planilha eletrônica.

Desta forma, foi possível acompanhar o desempenho de secagem do lodo, em diferentes camadas, na estufa piloto. Ressalta-se que o experimento foi paralizado quando a variação da umidade e do teor de sólidos apresentou uma taxa de redução bem inferior à observada durante todo o experimento, mostrando que a partir deste tempo não mais teria vantagem de permanecer com o resíduo na estufa, podendo este ser encaminhado para uma disposição final.

2.4. DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTUFA DE SECAGEM PARA ETA

A partir da avaliação dos tempos de secagem dos resíduos gerados na ETA de estudo, combinados com os dados operacionais da planta, relativamente ao volume captado/produzido e qualidade da água bruta, buscou-se desenvolver uma

metodologia para o dimensionamento de estufa de secagem de lodo para aplicação na ETA em questão, de forma a atender a geração total de lodo desta planta.

O desenvolvimento da metodologia para o dimensionamento da estufa de secagem consiste na organização e tratamento das informações e dados obtidos através dos experimentos e observações realizadas, para possibilitar que, através de dados operacionais da ETA, seja possível a determinação da área de secagem para a implantação de uma estufa de secagem de lodo pré-desaguado.

Assim, foi necessária a estruturação das seguintes informações (variáveis de processo) obtidas através de registros operacionais e dados obtidos experimentalmente:

- Vazão da Água Bruta;
- Turbidez Média da Água Bruta;
- Dosagem dos produtos químicos (coagulação);
- Volume de água filtrada na unidade de filtração;
- Tempo de lavagem dos filtros;
- Volume de água de lavagem dos filtros;
- Volume de lodo flotado e removida da unidade de flotação;
- Tempo de descarte de lodo flotado;
- Concentração de ST da água de lavagem dos filtros;
- Concentração de ST do lodo flotado removido;
- Concentração de ST do lodo desaguado (centrífuga);
- Construção de estufa piloto com área de secagem pré-definida;
- Tempo de secagem em relação à variação da altura da camada de lodo na estufa piloto;
- Concentração de ST do lodo das leiras, durante processo de secagem na estufa piloto;
- Temperatura média externa da estufa piloto durante experimentos de secagem;
- Umidade média externa da estufa piloto durante experimentos de secagem;

Logo, a partir dos dados obtidos em campo, estimou-se uma equação para calcular o tempo de secagem em função das variáveis operacionais do tratamento.

Ts = f (parâmetros operacionais)

Equação 11

Onde:

Ts = tempo ótimo de secagem;

f = função matemática

As variáveis operacionais do sistema de tratamento de água são: vazão, dosagens de produtos químicos, turbidez média e a concentração de sólidos da saída de lodo da ETA e concentração de sólidos desejada para o lodo seco.

De posse do tempo ótimo de secagem, foi possível estimar uma outra equação para obter a área útil da estufa a ser implantada.

$$\mathbf{Au = f (Ts)}$$

Equação 12

Onde:

Au = área útil da estufa a ser implantada;

Ts = tempo ótimo de secagem.

A partir das equações desenvolvidas, torna-se possível o dimensionamento de estufa de secagem para o lodo gerado na ETA em estudo.

O Capítulo 5 apresentado na sequência é dedicado à apresentação da caracterização da área de estudo e dos resultados experimentais obtidos através dos ensaios de secagem na estufa piloto construída na ETA de estudo, juntamente com a discussão deste.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

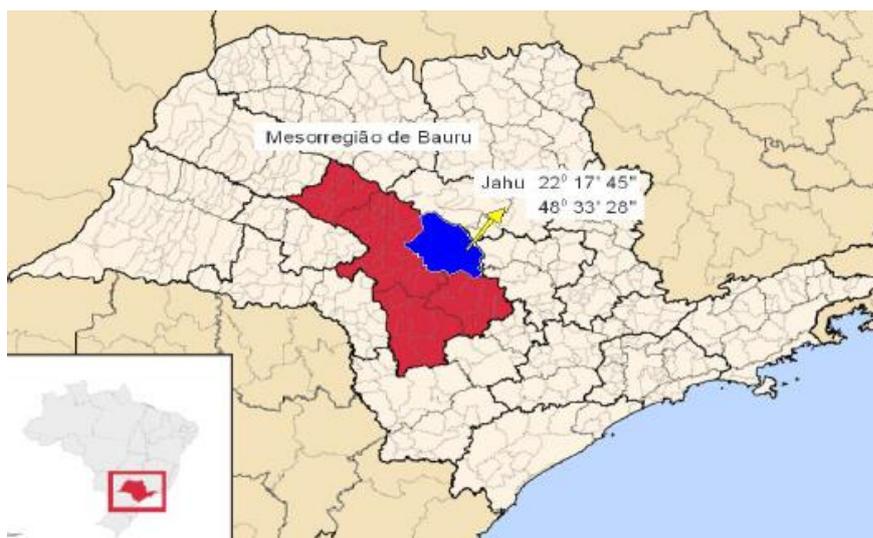
Este capítulo é dedicado à apresentação de todos os resultados verificados no estudo realizado, iniciando-se pela caracterização da área de estudo e região onde localização a ETA avaliada. Posteriormente é demonstrado o desenvolvimento experimental realizado com a secagem em estufa, em escala piloto, apresentando e discutindo os respectivos resultados alcançados.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O trabalho realizado de obtenção de parâmetros para secagem de lodo de ETA se procedeu em uma Estação de Tratamento de Água localizada no município de Jahu, interior de São Paulo.

Conforme ilustrado na Figura 56 o município de Jahu localiza-se na mesorregião de Bauru, região central do Estado de São Paulo, distante 296 km da capital. Faz limite com os municípios de Bocaina, Dourado, Dois Córregos, Pederneiras, Itapuú, Bariri, Barra Bonita, Mineiros do Tietê e Macatuba. Além da sede municipal, o Município de Jahu possui o distrito administrativo de Potunduva.

Figura 56. Localização do município de Jahu no estado de São Paulo - Brasil



Fonte: Plano Diretor (2019).

O centro geográfico do município é estabelecido pelas seguintes coordenadas geográficas médias:

- Latitude: 22°17'44" Sul
- Longitude: 48°33'28" Oeste

Jahu encontra-se em uma localização privilegiada, em um raio de até 250 km, é possível atingir, por meio de rodovias duplicadas ou em vias de duplicação, diversas cidades que são referência econômica em suas respectivas regiões, como Campinas, Ribeirão Preto, Araraquara, Bauru, Rio Claro e São Carlos.

O clima na cidade de Jahu é do tipo Tropical Aw, de acordo com a classificação climática de Koeppen, cujas características são estação seca de inverno e verão chuvoso. As temperaturas médias mensais variam de 16,5 a 28,5°C, com valor médio anual de 22,7°C, como pode ser visualizado no gráfico da Figura 57.

Figura 57. Classificação climática de Koeppen do Estado de São Paulo



- Af** = Clima equatorial
Am = Clima monçônico
Aw ou As = Clima savânico
Cwa = Clima subtropical úmido influenciado pelas monções
Cwb = Clima subtropical de altitude
Cfb = Clima oceânico temperado
Cfc = Clima oceânico subpolar

Fonte: CEPAGRI (2018).

Em relação à pluviometria, as precipitações anuais ficam em torno de 1.200 a 1.500 mm com variações mensais médias mínimas e máximas, respectivamente de

22,5 mm e 220,8 mm. A umidade relativa do ar média anual é de 70% e a altitude média é de 522 metros, com limite máximo de 606 metros. A insolação anual média é de 2.670 horas, apresentando 60% do período de claridade ensolarado. Os ventos predominantes são os alíseos do anticiclone semi-fixo do Atlântico Sul, com direção SE, responsáveis pelo tempo seco no outono e inverno.

O município de Jahu localiza-se dentro dos limites da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê/Jacaré - UGRHI 13 (Figura 58), conforme proposta do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (Lei 9.034/94) que divide o estado em 22 UGRHI's.

Figura 58. Localização da UGRHI 13 no Estado de São Paulo



Fonte: DAEE (2014)

Segundo o IBGE (2019), a população estimada para o município de Jauú é de 148.581 pessoas, sendo que o último censo realizado em 2010, contava uma população de 131.040 pessoas e uma densidade demográfica de 191,09 hab/km².

Conforme apresentado na minuta do plano municipal de saneamento básico de Jauú (2019) a população projetada para 2019 é de 143.639 habitantes, número inferior à estimativa dada pelo IBGE.

A sede do município de Jahu explora atualmente tanto os mananciais superficiais quanto os subterrâneos para o abastecimento público. A operação dos

serviços de saneamento se faz através de duas concessionárias, sendo que a Concessionária Águas de Jahu é a responsável pela maior parte do sistema de abastecimento de água do município, e a Concessionária Águas de Mandaguahy, responsável pela produção de parcela menor.

Jahu é dividido fisicamente por um rio (Rio Jaú) que corta o município, sendo que o abastecimento da margem esquerda do Rio Jaú é composto por quatro captações superficiais (Córregos Santo Antônio, João da Velha, São Joaquim e Rio Jaú), os quais são responsáveis pelo fornecimento da água bruta para a ETA I. Juntamente com três dos nove poços profundos existentes na sede do município, respondem, majoritariamente, pelo abastecimento desta área. Por sua vez, a margem direita é provida da captação superficial do Ribeirão Pouso Alegre, sendo a água bruta tratada na ETA II, e o abastecimento complementado com a exploração de seis poços profundos. Ressalta-se que no presente trabalho os estudos foram desenvolvidos na ETA II (Águas de Mandaguahy).

O município de Jahu é abastecido atualmente por cinco mananciais superficiais, denominados: Rio Jaú, Córrego Santo Antônio, Córrego João da Velha, Córrego São Joaquim e Ribeirão Pouso Alegre.

As captações dos Córregos Santo Antônio, João da Velha e São Joaquim e Rio Jaú são aduzidas através de recalque para tratamento na ETA I. O volume total disponibilizado ao município é completado pela água tratada da empresa Águas de Mandaguahy, responsável por explorar a captação no Ribeirão Pouso Alegre e operar a ETA II.

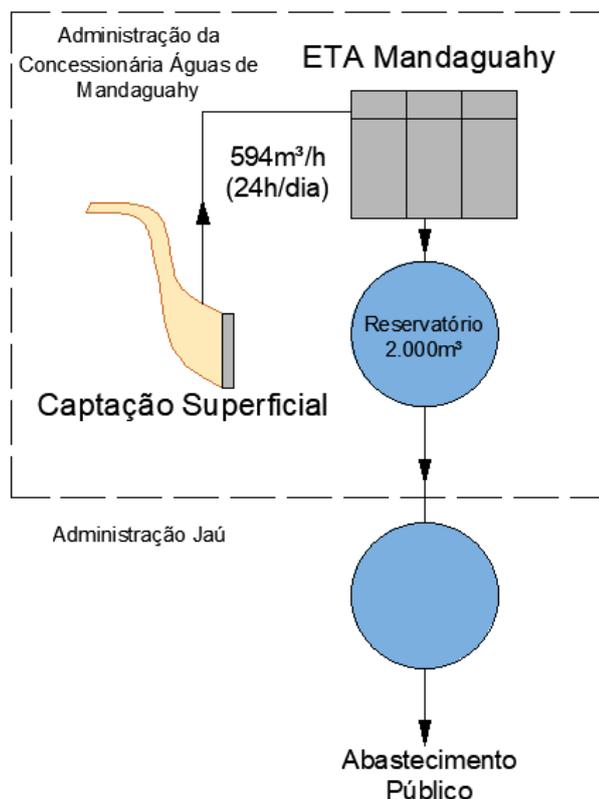
A Figura 59 ilustra o limite operacional do sistema de captação de tratamento de água superficial operado pela concessionária Águas de Mandaguahy, sendo a distribuição desta água produzida, de responsabilidade de outra concessionária.

Conforme Plano Diretor (2019), a população urbana do município de Jahu (143.639 habitantes) demanda uma produção média de água de cerca de 600L/s (ou 2.160m³/h), considerando um índice de perdas de água de 43,6%.

A produção de água da ETA em estudo (Águas de Mandaguahy) é de cerca de 600m³/h, o que representa cerca de 27,8% do total demandado de água de abastecimento para atendimento da população urbana.

Quanto ao esgotamento sanitário no município de Jahu, dados do IBGE (2019) apontam para um índice de atendimento de 98,4% sendo considerado pelo instituto adequado.

Figura 59. Sistema operacional de captação e tratamento de água superficial da ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

5.1.1. Descrição da ETA de Estudo

A Estação de Tratamento de Água estudada, operada pela Concessionária Privada Águas de Mandaguahy, está localizada no município de Jahu, interior de São Paulo, na confluência das Rodovias Comandante João Ribeiro de Barros (SP 255) e Engenheiro Paulo Nilo Romano. A imagem de satélite extraída do Google Earth da Figura 60 ilustra a ETA Águas de Mandaguahy.

Neste trabalho será chamada de ETA Mandaguahy, ETA Floto-Filtração ou simplesmente ETA de estudo.

A captação da ETA Mandaguahy está localizada no Ribeirão Pouso Alegre, onde a água é captada através de um sistema composto por barragem de nível, tomada d'água com grades para a retenção de sólidos grosseiros e dois canais que servem como poço de sedimentação de areia.

Figura 60. Localização da ETA de estudo no município de Jaú



Fonte: Google Earth, 2018.

A água captada na barragem é encaminhada através dos canais citados anteriormente para um poço de sucção contíguo ao prédio da estação elevatória de água bruta. No interior desse prédio existem dois conjuntos moto bomba do tipo centrífugos, bipartidos, de eixo horizontal instalados em um poço seco. Esses dois conjuntos operam no esquema 1 + 1 de reserva, sendo cada um com capacidade para 600 m³/h.

A água captada é então aduzida por recalque até a ETA através de uma adutora de ferro fundido dúctil com diâmetro de 500 mm, extensão de cerca de 2,5 km e um desnível geométrico de cerca de 130m. A Figura 61 ilustra o local de captação de água bruta e o caminhamento da adutora que leva água a ser tratada para a ETA.

A ETA estudada é do tipo floto-filtração com remoção superficial mecanizada de lodo flotado e lavagem dos filtros com ar e água.

Esta ETA de floto-filtração foi construída no de 1.997 com a exploração de manancial superficial e é constituída por uma estação compacta, construída em concreto, que promove o tratamento da água mediante coagulação através da desestabilização das partículas coloidais, promovida com agitação rápida em calha Parshall, e a separação por processo sequencial de floculação e floto-filtração, esta última caracterizada pela associação das etapas de flotação a ar dissolvido e filtração em um mesmo tanque. O sistema é composto por 3 módulos que operam

de forma independente nas operações de floculação, flotação e filtração (módulos A, B e C). É apresentada na Figura 62, de forma esquemática, a ETA Mandaguahy, alvo do estudo.

Figura 61. Local de captação de água bruta e o caminhamento da adutora que leva água a ser tratada para a ETA de estudo



Fonte: Google Earth, 2018, adaptado pelo autor.

O sistema de tratamento é constituído de um prédio de concreto com calha Parshall, 3 câmaras de floculação com volume total de 138,5 m³ e 3 câmaras de floto-filtração com volume total de 248,6 m³.

De forma sucinta, o tratamento é composto pelas seguintes etapas:

- Sistema de dosagem de produtos químicos
- Coagulação (dosagem de PAC - Calha Parshall);
- Floculação mecanizada (Tanque com 3 câmaras de floculação);
- Flotação a ar dissolvido (na mesma câmara de filtração);
- Filtração em leitos de areia;
- Correção final de pH; Desinfecção (cloro gás); Fluoretação;
- Armazenamento da água potável (Reservatório de 2.000m³);
- Sistema de recuperação de águas de lavagem dos filtros e flotadores;
- Sistema de desaguamento do lodo (tratamento do resíduo sólido por leitos de secagem);

- Sistema de automação para supervisão e controle da ETA, composto de computador com sistema central supervisorio;
- Laboratório de análises para controle operacional;
- Prédio de administração e controle operacional e Oficina mecânica;

A estação de tratamento de água apresenta capacidade nominal de tratamento de 600 m³/h, através de três módulos em paralelo, ou seja, cerca de 200 m³/h por módulo. O processo de tratamento é baseado na concepção de flotação por ar dissolvido, sendo formado pelas seguintes etapas:

- Mistura rápida hidráulica através de calha Parshall;
- Floculação mecânica dotada de três câmaras em série, cada uma equipada com floculadores do tipo turbina de fluxo axial;
- Unidade de saturação de água recirculada formada por vaso de pressão e conjunto de compressor do tipo rotativo;
- Flotador associado a filtro de fluxo descendente (Floto-filtro). O material flotado é removido mecanicamente e o filtro é lavado à contracorrente com ar e água;
- Condicionamento químico da água final em câmara de contato;
- Armazenamento da água tratada em um reservatório de 2000 m³ capacidade.

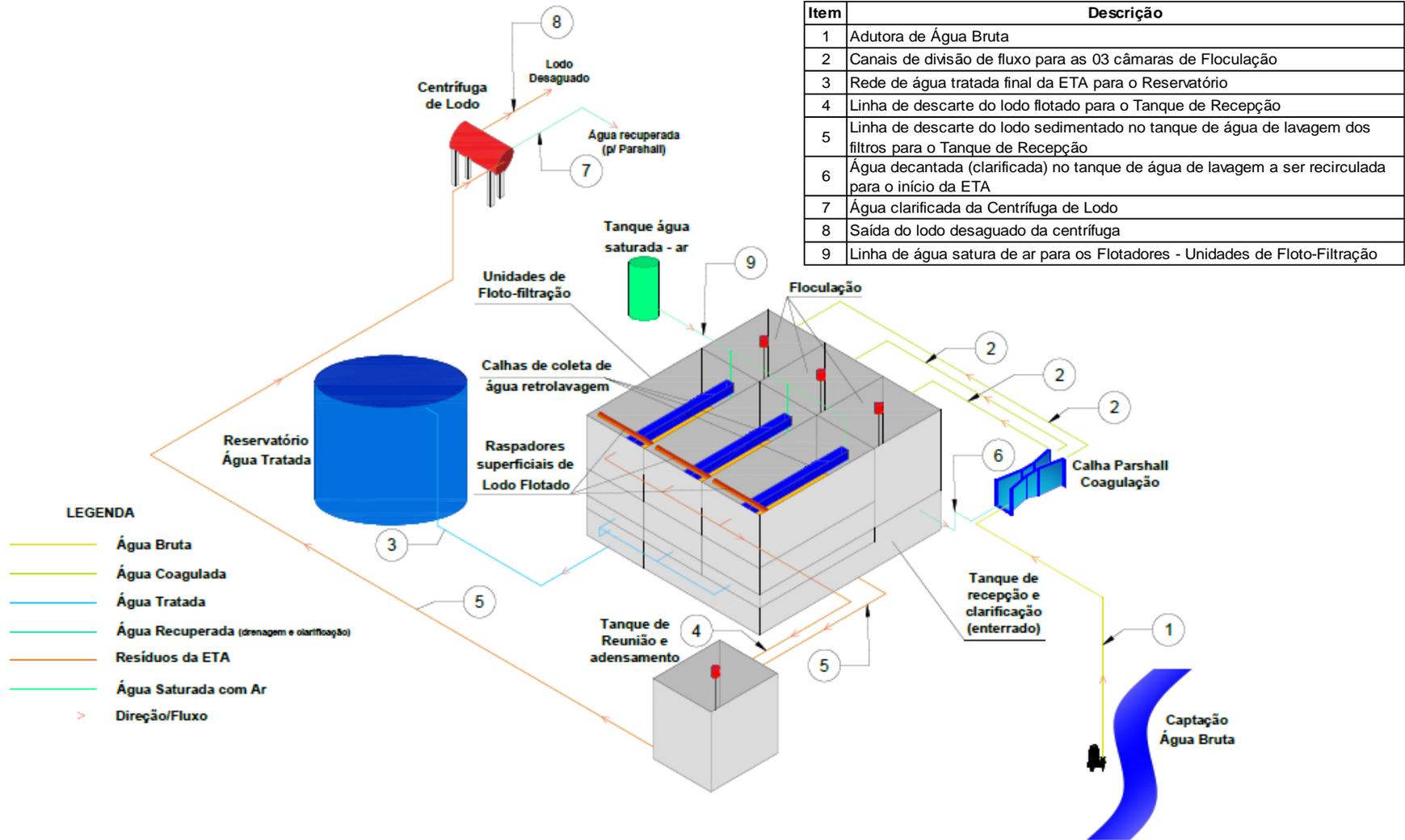
Adicionalmente, essa estação possui sistema de tratamento dos efluentes descartados (lodos flotados e águas de lavagem dos filtros) através de tanque de recebimento e regularização de fluxo, bem como sistema de desaguamento mecanizado do lodo através de centrífuga.

Os produtos químicos utilizados são:

- PAC – Policloreto de alumínio para a coagulação;
- Cal hidratada para a correção inicial e final de pH;
- Cloro para pré-oxidação e desinfecção;
- Ácido fluossilícico para fluoretação;
- Polímero para condicionamento do lodo a ser desaguado na centrífuga.

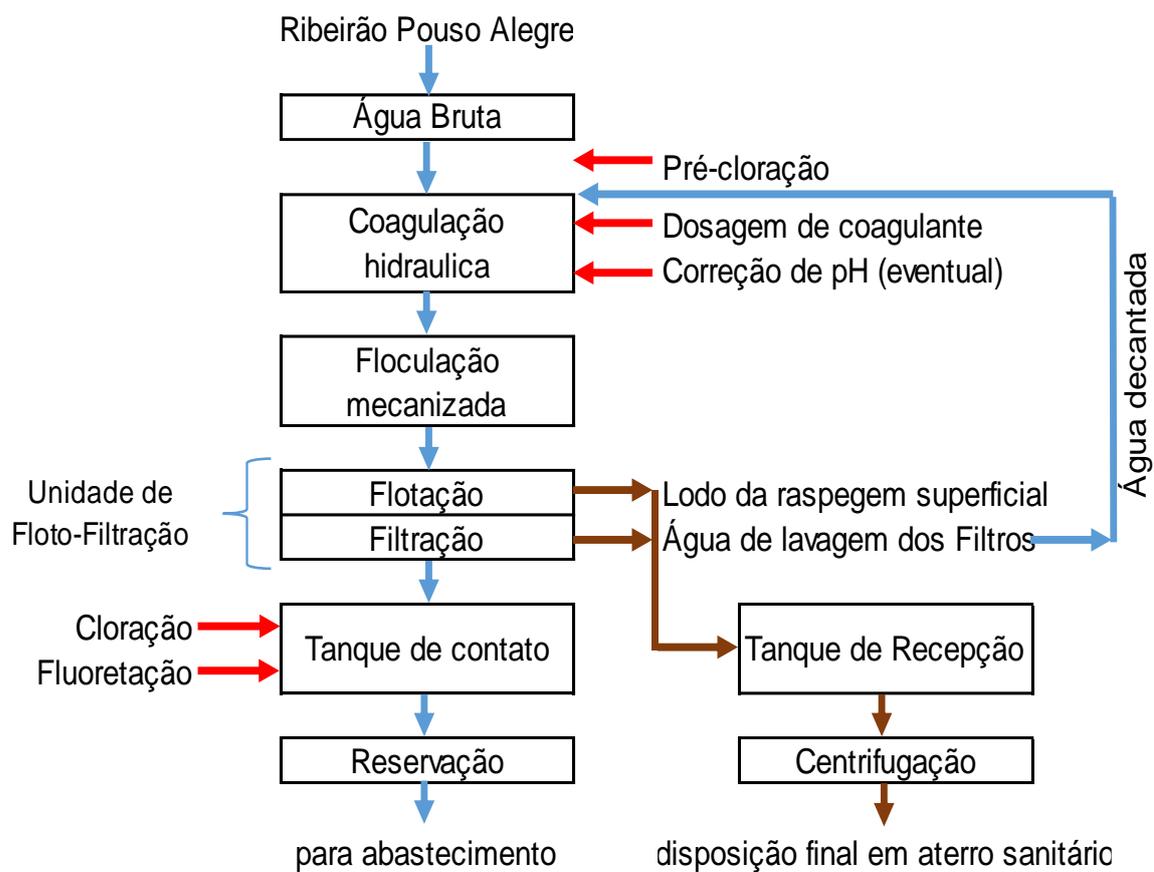
A seguir apresenta-se na Figura 63 o fluxograma simplificado desse sistema de tratamento e na Figura 64 planta e cortes esquemáticos da ETA Floto-filtração.

Figura 62. Disposição geral esquemática e linhas de fluxo da ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Figura 63. Fluxograma simplificado da ETA Floto-Filtração de estudo

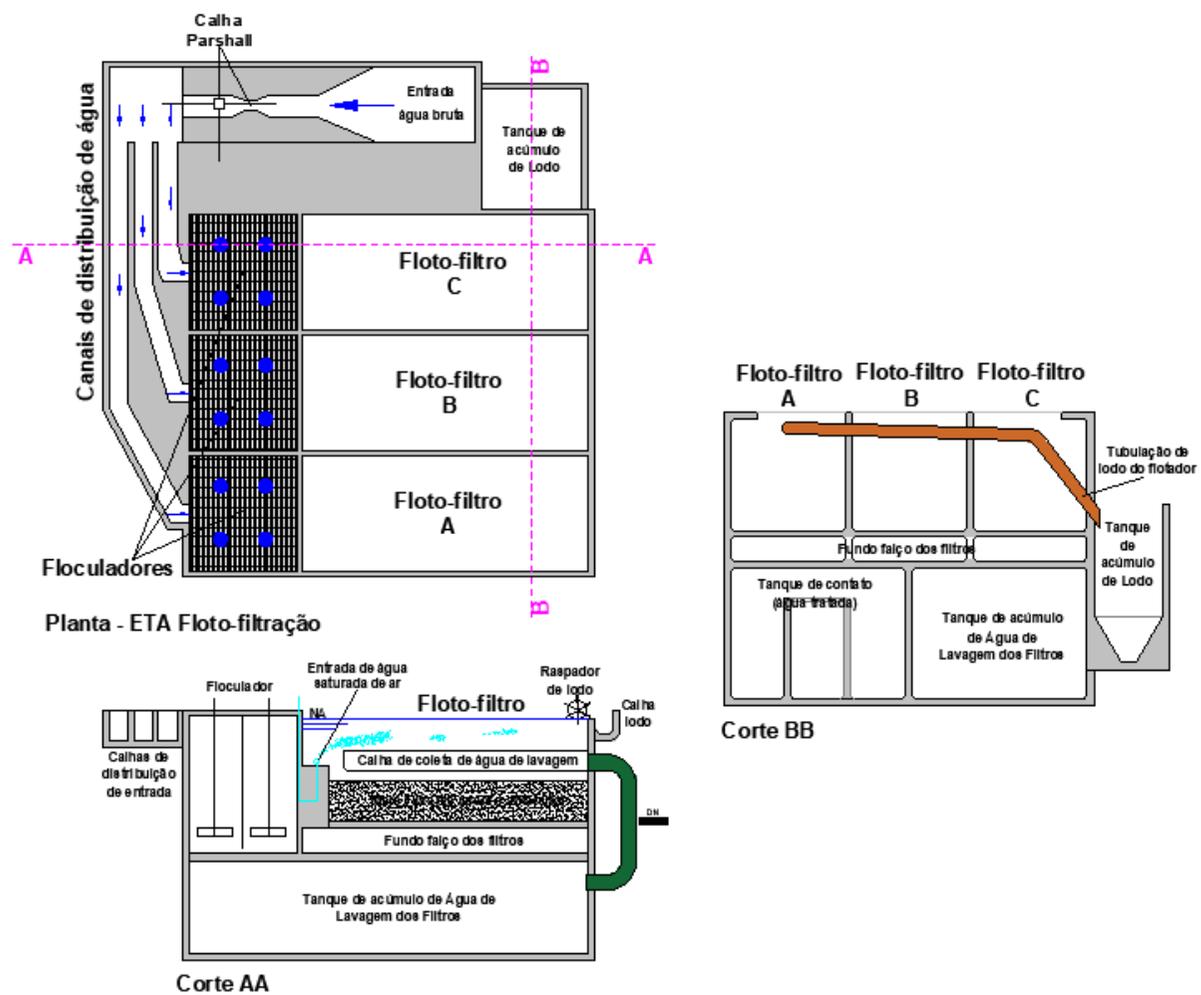


LEGENDA

- Linha de produtos químicos
- Linha de água bruta ou tratada
- Linha dos resíduos gerados

Fonte: Autor, 2019.

Figura 64. Planta esquemática da ETA Floto-filtração de estudo



Fonte: Autor, 2019.

5.1.1.1. Canal de chegada de água bruta e mistura rápida

O canal de chegada de água bruta tem a função de receber as águas captadas e dar condições hidráulicas adequadas para a aplicação dos produtos químicos empregados nessa etapa, ou seja, alcalinizante (cal hidratada), para a correção inicial do pH, e coagulante (PAC), para a coagulação da água e dar início ao processo de formação de flocos.

Tendo em vista a presença de ferro na água bruta com concentrações acima dos limites do padrão de potabilidade, no canal de chegada de água bruta também é feita a aplicação de cloro com a finalidade de pré-oxidação desse elemento, alterando seu estado originalmente solúvel em complexo insolúvel e passível de remoção nas etapas de flotação e filtração posteriores. Tendo em vista as concentrações médias observadas desse elemento (em torno de 1,9 mg/L), observa-se que a pré-oxidação com cloro é adequada para a redução de concentração abaixo do limite de potabilidade (0,3 mg/L).

O canal apresenta adequadas condições hidráulicas para a chegada da água bruta, sendo que a aplicação da cal hidratada ocorre à montante do ponto de aplicação do PAC. A aplicação da cal é facultativa, sendo necessária apenas quando a necessidade de correção do pH para uma boa coagulação da água bruta.

Com relação à mistura rápida, a utilização de calha Parshall é adequada quando a aplicação do coagulante é feita na garganta da mesma, onde ocorre o ressalto hidráulico.

Para o processo de tratamento convencional, que é baseado em decantação após a floculação, a mistura rápida em calhas Parshall é bastante eficiente. Entretanto, para o processo de tratamento baseado em flotação, tal como o caso em questão, é mais recomendada à mistura rápida mecanizada para que seja proporcionada energia de mistura ainda mais elevada; isso, a princípio, pode indicar um leve comprometimento do desempenho do processo de coagulação e posterior floculação.

5.1.1.2. Floculadores

Cada um dos três módulos de tratamento possui um floculador dotado de três câmaras em série. Para a vazão nominal de cada módulo igual a 200 m³/h, o tempo de detenção hidráulico nas 3 câmaras é de cerca de 13 minutos, sendo que para a formação de flocos adequados para a flotação esse valor é adequado.

A existência de três câmaras em série, equipadas com floculadores mecânicos, permite o estabelecimento de gradientes de velocidade (energias de mistura) diferentes (decréscenas ao longo do escoamento), o que deve contribuir para a formação de flocos melhores, principalmente em estações de tratamento em que os flocos devem ser removidos por sedimentação. A existência de três câmaras em série, confere à etapa de floculação, flexibilidade operacional, permitindo definir gradientes de velocidade iguais ou decréscenas, em função das características da água bruta e condições de coagulação que podem variar ao longo do tempo.

5.1.1.3. Flotação por ar dissolvido

A flotação por ar dissolvido precede a floculação e tem a finalidade de remoção dos flocos formados na etapa anterior.

No caso em questão a flotação não segue o modelo clássico, pois em um mesmo tanque são associados o flotador e o filtro, caracterizando, portanto, a variante de floto-filtração. Na porção superior do tanque ocorre a flotação e na porção inferior ocorre a filtração, destinada à retenção dos flocos remanescentes da flotação, ou seja, os flocos que não foram carregados para a superfície pela flotação. Neste diagnóstico as duas etapas (flotação e filtração) são abordados em itens separados.

Na porção inicial da câmara de flotação observa-se aspecto de boa distribuição da água saturada no início da câmara de flotação, tendo em vista a nuvem uniforme e bem distribuída de microbolhas que chegam à superfície, também foi observado o caminhamento adequado da nuvem de microbolhas ao longo do comprimento da câmara havendo distribuição uniforme por toda a superfície.

Os flocos flotados se acumulam na superfície e o lodo formado apresenta bom aspecto, indicando boas condições de adensamento. A remoção do lodo flotado é feita por dispositivo mecânico que age somente na porção final do tanque de

flotação, pois o lodo que se acumula em toda a superfície do tanque tende a ser encaminhado naturalmente em direção ao local do raspador de superfície devido ao escoamento da água no interior desse tanque.

Observa-se que no caso em questão a forma de remoção do lodo flotado não é usual, pois em geral, flotadores com remoção mecanizada do lodo possuem raspadores que atuam em toda a superfície do tanque, ou em parte do mesmo e seu funcionamento é contínuo, ou ocorre de forma bastante frequente através de dispositivo temporizador.

A princípio, a ação do raspador limitada somente na saída do tanque de flotação, poderia causar problemas com relação à remoção do lodo flotado e consequente comprometimento do desempenho dos filtros que estão posicionados abaixo da zona de flotação. Entretanto, segundo informado pelos operadores, no caso em questão, a remoção tem sido feita de forma adequada, sendo que, por experiência prática dessa estação, a ação de raspagem superficial durante a flotação tem sido negativa desestabilizando o manto de lodo flotado. Dessa forma, atualmente o acionamento do dispositivo de remoção é feito apenas momentos antes de iniciar a lavagem dos filtros.

5.1.1.4. Filtração

Como citado anteriormente, a filtração ocorre simultaneamente à flotação em um mesmo tanque. A porção inferior desse tanque é formada por um fundo falso, onde estão instalados os difusores responsáveis pela captação da água filtrada, bem como à distribuição do ar e da água utilizados para a lavagem. Acima dos difusores existe a camada suporte de pedregulho e, na sequência duas camadas sobrepostas de areia, a primeira sobre o pedregulho com espessura de cerca de 0,15 m com granulometria de tamanho específico igual a 1,4 mm, conhecida como camada torpedo ou de transição e a segunda com espessura de cerca de 1,0 m com grãos de tamanho específico de 0,8 mm que é efetivamente responsável pela filtração.

A filtração ocorre segundo fluxo descendente e com taxa de aplicação superficial de 195 m³/m².dia considerando as dimensões em planta dos três tanques de flotofiltração e a capacidade nominal do sistema de tratamento. Considerando leito simples de areia, a taxa dos filtros em questão é adequada e as camadas torpedo e filtrantes também apresentam configuração adequada em termos de

espessura e granulometria, pois embora com valores maiores que os usuais, as maiores espessuras compensam a maior granulometria, proporcionando ao meio filtrante uma melhor condição de retenção e distribuição dos flocos ao longo do trajeto pela camada filtrante.

A lavagem dos filtros é feita por fluxo a contracorrente, ou seja, ascendente, com o emprego de ar e água. A taxa de aplicação de ar é da ordem de 17 NL/s de ar por metro quadrado de filtro e a velocidade ascensional de água no momento da lavagem é da ordem de 0,8 m/minuto. O ar é fornecido por sopradores do tipo rotativos e a água é captada da câmara de contato e recalçada para os filtros através de conjuntos moto bomba do tipo centrífugos de eixo horizontal.

Segundo informado pelos operadores da ETA, em situação de operação normal as carreiras de filtração duram cerca de 18 a 20 horas, o que pode ser considerado adequado. Entretanto, nos eventos críticos de piora da qualidade da água bruta (chuvas intensas), as carreiras de filtração são reduzidas a cerca de 5 a 6 horas.

5.1.1.5. Casa de química e condicionamento final da água filtrada

As instalações da casa de química são adequadas e os equipamentos se encontram em bom estado de conservação, destaca-se a limpeza da sala de preparo de suspensão de cal, fato raro de ocorrência em estações de tratamento de água que se utilizam desse produto e um indicador positivo dos procedimentos operacionais relacionados ao preparo e dosagem de produtos químicos.

Os produtos químicos empregados para o condicionamento final da água filtrada são aplicados adequadamente na câmara de contato, com volume útil de, aproximadamente, 170 m³, sendo cloro gasoso para a desinfecção, cal hidratada para a correção final de pH e ácido fluossilícico para a fluoretação de forma a atender aos padrões de potabilidade.

5.1.1.6. Reservatório de água tratada

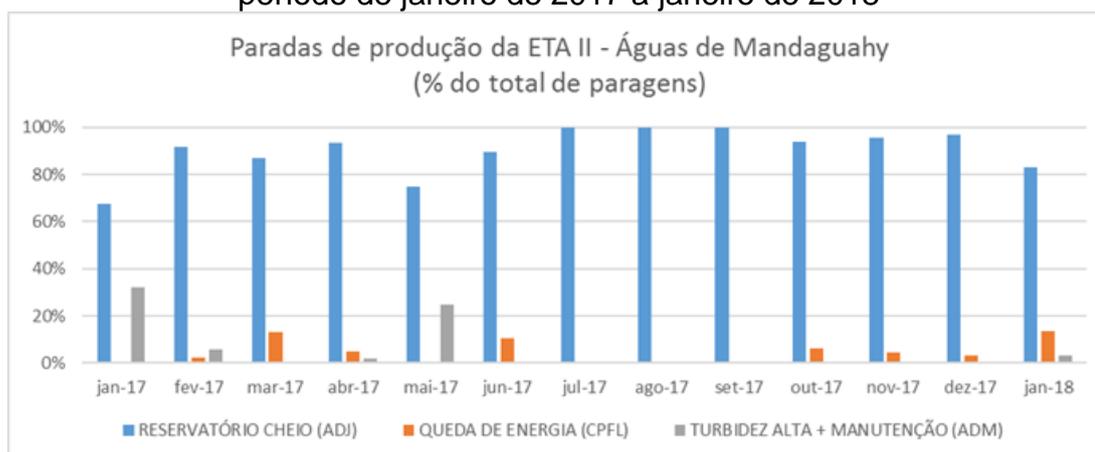
A água tratada é aduzida por recalque para um reservatório circular com capacidade de 2000 m³, sendo que, devido à lavagem dos filtros, essa adução é intermitente, fazendo que esse reservatório tenha uma importante função, qual seja,

de regularizar o fluxo de água tratada de forma a não causar a paralisação do fornecimento de água tratada ao sistema de distribuição operado pelo por outra concessionária do município.

A questão da reservação com o objetivo de amortecer os efeitos da queda de produção no abastecimento da comunidade é ainda mais relevante nos momentos extremamente críticos de turbidez da água bruta, pois foi relatado pelos técnicos da empresa Águas de Mandaguahy a necessidade de paralisação do sistema de tratamento de água para evitar o colapso de suas unidades e a produção de água fora dos limites estabelecidos no padrão de potabilidade.

Conforme registrado nas planilhas de controle operacional de Águas de Mandaguahy, no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018, ocorreram paradas da ETA II, num total de 976 horas e 40 minutos. A grande causa de paragem foi o reservatório R10 estar cheio (90,74%), seguido pelas interrupções de alimentação de energia elétrica (4,15%), turbidez da água bruta alta (3,99%) e manutenção (1,12%). No mesmo período existiram reduções de vazão, devido a turbidez elevada, que no total são equivalentes a 4 horas e 36 minutos de paragem. No Figura 65, estão representadas as paragens no período referido.

Figura 65. Paradas de produção da planta de tratamento de água em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018



Fonte: Autor, 2019.

5.1.1.7. Tratamento dos resíduos gerados na ETA

Para o tratamento dos efluentes gerados, que se constituem basicamente no lodo flotado e nas águas utilizadas para a lavagem dos filtros, o sistema considera a segregação dos mesmos para um tanque de armazenamento (tanque de recepção),

onde ocorre sedimentação do material sólido, que é posteriormente é homogeneizado e encaminhado ao desaguamento mecânico através de centrífuga, enquanto que o líquido sobrenadante é encaminhado a outro tanque de armazenamento que recebe as águas de lavagem dos filtros.

No tanque de armazenamento das águas de lavagem dos filtros também ocorre sedimentação, ainda que menos pronunciada devido à menor concentração de sólidos, sendo que o material sólido sedimentado é encaminhado ao tanque de armazenamento de lodo citado anteriormente (tanque de recepção), juntamente com o lodo raspado da superfície dos flotores do sistema Floto-filtro, sendo posteriormente submetido ao desaguamento pela centrífuga. O líquido recuperado pela centrífuga e o efluente clarificado no tanque de água de lavagem dos filtros é recirculado ao início do processo de tratamento (ver Figura 62).

A linha (tubulação) de lodo que chega na centrífuga recebe dosagem de polímero, preparado em tanque de 2m³ e dosagem através de bomba dosadora. A Figura 66 ilustra os tanques de preparo de polímero e bombas dosadoras acopladas, e as Figura 67 e 68 ilustram a centrífuga em operação na ETA em estudo.

Figura 66. Sala de preparação de polímero para dosagem na linha de lodo que chega à centrífuga na ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Figura 67. Vista da centrífuga de lodo da ETA em estudo



Fonte: Autor, 2019.

Figura 68. Vista frontal da centrífuga de lodo da ETA em estudo



Fonte: Autor, 2019.

O lodo desaguado pela centrífuga é armazenado em caçamba estacionária de 7m³ para posterior disposição, realizado por empresa terceiriza (em aterro).

Destaca-se ainda que as principais operações do processo de tratamento de água da ETA são automatizadas e apresenta medição de parâmetros em tempo real.

Uma amostra representativa do lodo centrifugado foi coletada e enviada para análise em laboratório externo. Foram analisados, além da concentração de ST, os

demais parâmetros previstos na NBR 10.004 para classificação de resíduos sólidos. O boletim analítico completo é apresentado no ANEXO A.

Os principais resultados da caracterização do lodo submetido ao método de secagem na estufa piloto são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Caracterização do Resíduo (lodo centrifugado) da ETA em estudo, segundo NBR 10.004

NBR 10004:2004 - Massa Bruta			
Parâmetros	Unidade	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
pH (Suspensão 1:1)	-	7,14	2,0 - 12,5 (b)
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	< 5	500 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	19,9	
Cianeto (como HCN)	mg/kg	1,3	250 (c)
NBR 10006:2004 – Solubilizado			
Parâmetros	Unidade	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
Alumínio	mg/L	0,71	0,2
Bário	mg/L	0,061	0,7
Ferro	mg/L	0,236	0,3
Manganês	mg/L	0,907	0,1
Sódio	mg/L	9,2	200
Zinco	mg/L	0,077	5,0
Índice de fenóis	mg/L	0,075	0,01
Nitrato (como N)	mg/L	0,2	10
Cloreto	mg/L	12,3	250
Sulfato	mg/L	0,9	250

VMP**:

Valores Máximos Permitidos pela Norma ABNT NBR 10004:2004.

Massa Bruta - Observações dos parâmetros:

(b) = Avaliação da Corrosividade - Item "a" do tópico 4.2.1.2 da NBR 10004:2004

(c) = Avaliação da reatividade - Item "e" do tópico 4.2.1.3 da NBR 10004:2004.

Fonte: Autor, 2019.

5.1.2. Parâmetros Operacionais e de Qualidade da ETA

Na sequência são apresentadas as características de qualidade da água bruta e da água tratada.

5.1.2.1. Água bruta

Com relação à exploração de manancial superficial, observa-se que o Ribeirão Pouso Alegre apresenta regime de escoamento do tipo lótico, ou seja, trata-

se de um corpo hídrico com regime de escoamento e características de ocupação de sua bacia de drenagem que induzem a grandes variações sazonais de qualidade de suas águas, principalmente com relação ao material sólido em suspensão que é carregado em maior quantidade durante os eventos de chuvas de maior intensidade, refletindo diretamente nos parâmetros de turbidez e cor aparente da água bruta captada.

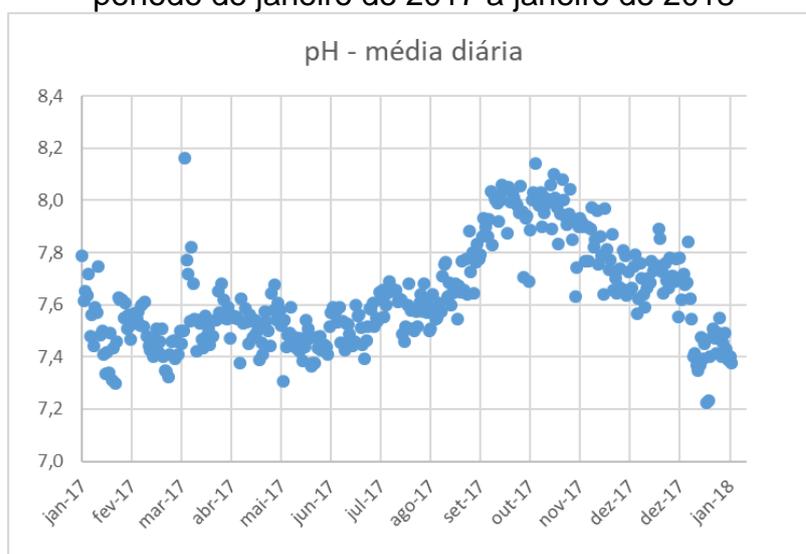
Nas Figuras 69 a 71 são apresentadas as variações de pH, cor aparente e turbidez da água bruta captada, segundo os registros operacionais relativos ao período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018.

Conforme pode ser observado nos gráficos (Figura 69 a 71), durante o ano de 2017 a variação dos valores de cor aparente e turbidez da água bruta indica picos bastante pronunciados principalmente no período de janeiro a março, bem como no mês de maio. Exceto os valores de rara incidência, os picos de turbidez atingem valores da ordem de 200 a 250 uT enquanto que a cor aparente apresenta picos da ordem de 350 mg Pt /L.

Fora dos eventos de pico, os valores de cor aparente e turbidez respectivamente ficam abaixo de 150 mg Pt/L e 50 uT.

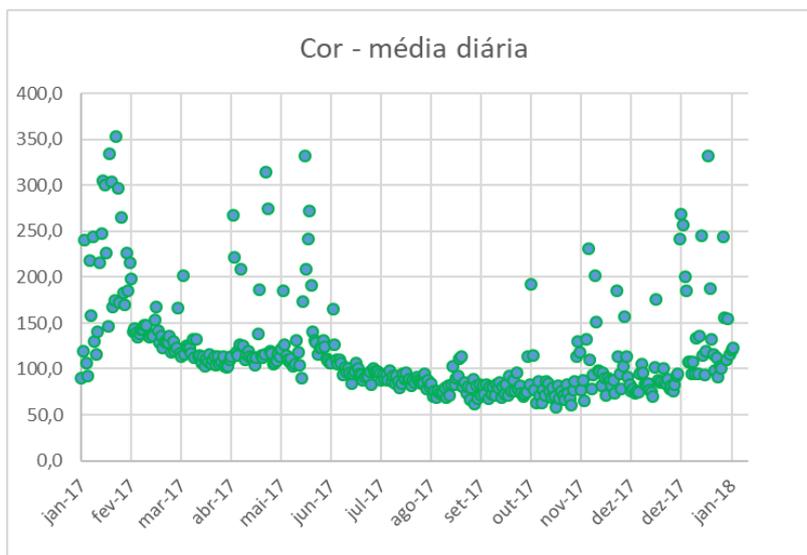
Os valores de pH obtidos ao longo do período de 2017, apresentam amplitude de 7,2 a 8,2, e majoritariamente, estão entre 7,4 e 7,6, caracterizado o caráter neutro, levemente alcalino, da água bruta.

Figura 69. Média diária do pH medido para a água bruta da ETA em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018



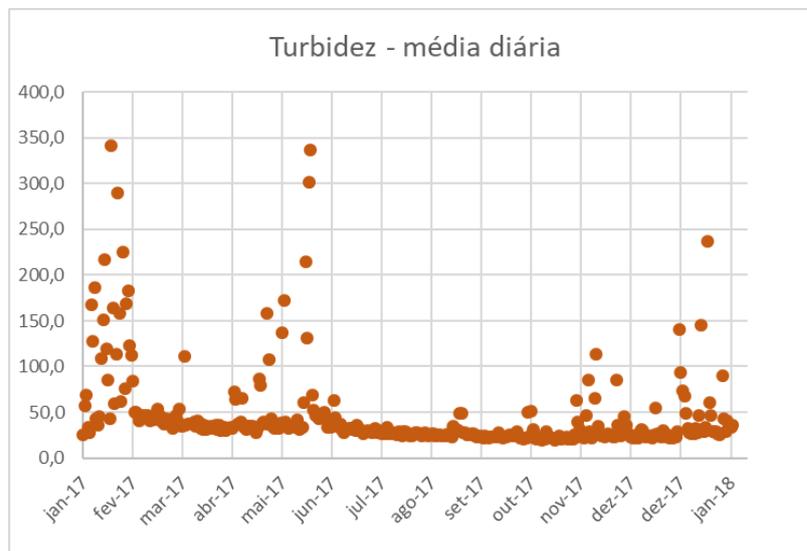
Fonte: Autor, 2019.

Figura 70. Média diária da cor medida para a água bruta da ETA em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018



Fonte: Autor, 2019.

Figura 71. Média diária da turbidez medida para a água bruta da ETA em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018

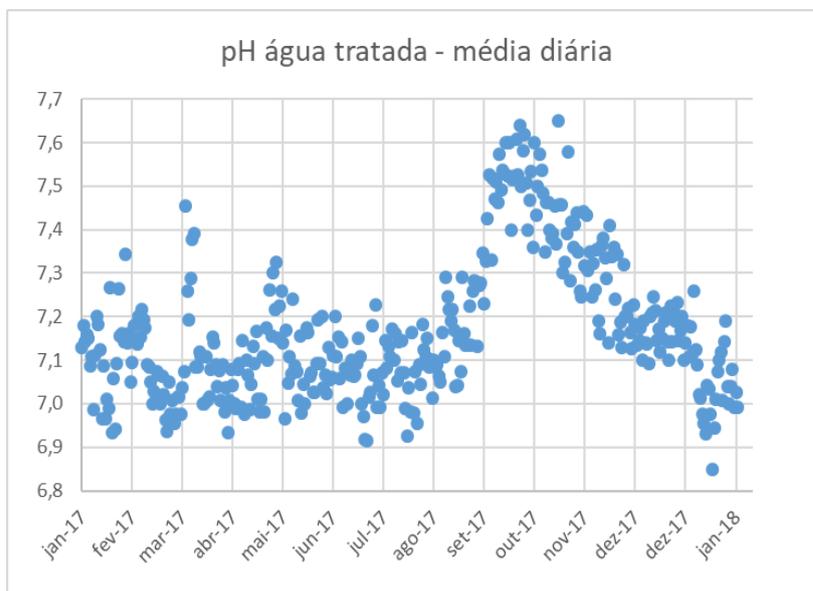


Fonte: Autor, 2019.

5.1.2.2. Água tratada

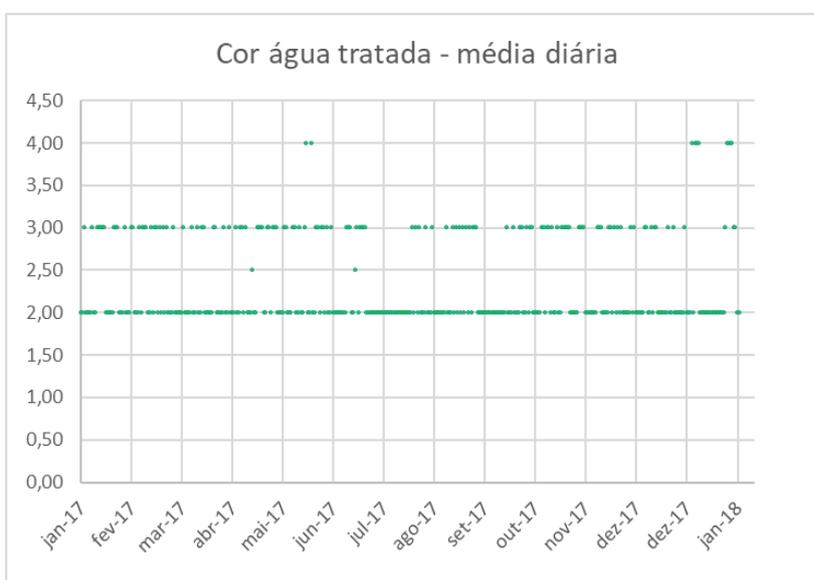
São apresentadas nas Figura 72 a 74 as variações de pH, cor e turbidez da água tratada na ETA de estudo o período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018.

Figura 72. Média diária do pH medido para a água tratada da ETA em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018



Fonte: Autor, 2019.

Figura 73. Média diária da cor medida para a água tratada da ETA em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018

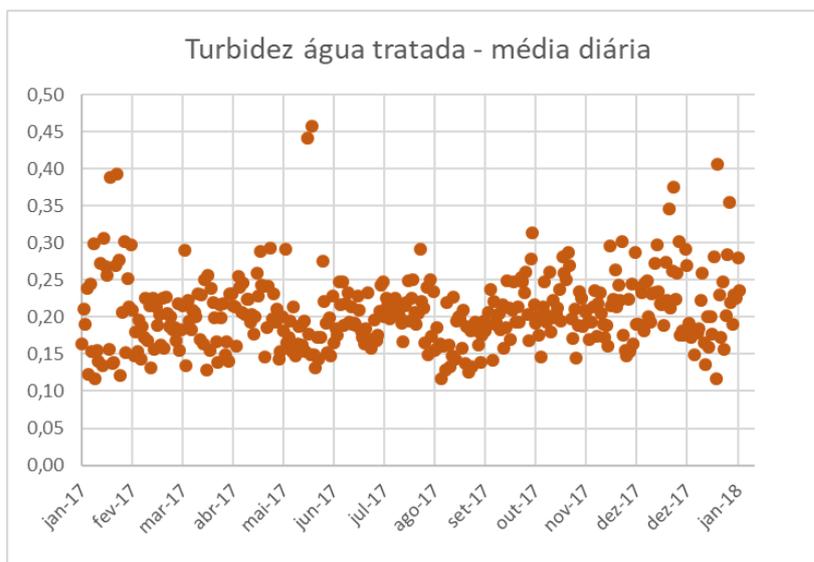


Fonte: Autor, 2019.

A Portaria da Consolidação nº05/2017 estabelece que o valor máximo permitido de turbidez na água distribuída deve ser de 0,5 uT. Excluindo valores de

rara incidência, os picos de turbidez atingem valores de 0,45 uT, com maior incidência entre a faixa de 0,15 a 0,25 uT, considerados adequados.

Figura 74. Média diária da turbidez medida para a água tratada da ETA em estudo no período de janeiro de 2017 a janeiro de 2018



Fonte: Autor, 2019.

Conforme Figura 72, os valores de pH obtidos ao longo do período de 2017, apresentam amplitude de 7,6 a 6,9, e majoritariamente, estão entre 7,1 e 7,2, caracterizado o caráter neutro da água tratada.

Nos registros operacionais da ETA em estudo verifica-se também a cor aparente da água tratada predominantemente na faixa entre 2,0 e 3,0 UC. De acordo com a Portaria da Consolidação nº05/2017, o valor máximo na cor da água distribuída é de 15,0 UC.

Em termos qualitativos, conforme observado no laudo de controle de qualidade mensal de 2018, fornecido pela empresa Águas de Mandaguahy, a água potável produzida e fornecida para a sede do município de Jahu atendeu, com segurança e regularidade, aos padrões de potabilidade estabelecido na Portaria da Consolidação nº05/2017. São apresentados na Tabela 6 os valores observados na água produzida em cada sistema, confrontados com os limites estabelecidos no padrão de potabilidade.

Tabela 6. Resumo do controle qualitativo da água potável produzida pela ETA de estudo no período de 2017– mensal

Parâmetro	Unidade	Número de amostras no período	Água Potável Produzida			Limite Portaria ¹
			Médio	Mínimo	Máximo	
Cor Aparente	mg Pt-Co/L	372	2,9	2,0	4,0	≤ 15,0
Turbidez	uT	744	0,26	0,16	0,41	≤ 0,5
pH	-	744	7,06	6,88	7,29	6,0 a 9,5
Ferro	mg/L	124	0,01	0,01	0,01	≤ 0,3
Cloro residual livre	mg/L	372	1,0	0,63	1,53	≤ 0,2 ≤ 2
Fluoreto	mg/L	372	0,72	0,65	0,78	≤ 0,6 ² ≤ 1,5
Coliformes termo tolerantes	NMP/100mL	9	ausente	ausente	ausente	ausente

¹ Portaria da Consolidação nº05/2017 - Anexo XX

² Valor mínimo estabelecido pela Resolução Estadual SS-250/95

Fonte: Autor, 2019.

5.2. QUANTIFICAÇÃO DOS VOLUMES DE PRODUÇÃO DE ÁGUA TRATADA E DE RESÍDUOS GERADOS, E DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS E DO LODO GERADO

Conforme apresentado, os resíduos gerados no tratamento da água da ETA em estudo, são provenientes do flotador e da água de lavagem dos filtros. Os volumes quantificados, bem como as concentrações de ST são apresentados a seguir.

5.2.1. Volume da Água Filtrada, Volume de Água de Lavagem dos Filtros e Volume do Descarte Sobrenadante do Flotador

Foram feitas determinações do volume de água efetivamente filtrada no intervalo de operação do filtro em estudo. Posteriormente foi determinado o volume de água de lavagem dos filtros. Por fim, foram determinados os quantitativos dos resíduos gerados pela lavagem dos filtros e pela raspagem de lodo dos flotadores.

5.2.1.1. Volume da água filtrada no módulo de filtração

Inicialmente, recorreu-se aos registros de qualidade da água bruta no período de operação dos filtros 'A' e 'C' em estudo, utilizados posteriormente para a quantificação dos resíduos gerados.

As Tabela 7 e 9 retratam os parâmetros de qualidade da água bruta que foi submetida ao tratamento na unidade de tratamento, medidos no período de operação dos filtros 'A' e 'C', utilizados nos ensaios para quantificação dos resíduos gerados na ETA floto-filtração.

Tabela 7. Qualidade da água bruta que foi tratada no Módulo A da ETA, no período de realização dos estudos

Data e Hora da análise		Água Bruta - Filtração módulo A				
		pH	Turbidez uT	Fe mg/L	Cor mg/L	Alcal. mg/LcaCO ₃
12/10/2018	20:00	6,9	22,2	-	117	-
12/10/2018	22:00	7,4	21,6	-	116	-
12/10/2018	23:00	7,4	21,4	-	-	-
13/10/2018	01:00	7,4	17,6	1,77	110	78
13/10/2018	03:00	7,4	17,2	-	-	-
13/10/2018	05:00	7,4	16,2	-	107	-
13/10/2018	10:00	7,5	22,8	1,97	129	72
13/10/2018	11:00	7,5	22,1	-	-	-
13/10/2018	12:00	7,4	20,9	-	129	-
13/10/2018	14:00	7,5	22,2	-	127	-
Média		7,4	20,4	1,9	119,3	75,0

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 8. Qualidade da água bruta que foi tratada no Módulo C da ETA, no período de realização dos estudos

Data	Hora	Água Bruta - Filtração Módulo C				
		pH	Turbidez uT	Fe mg/L	Cor mg/L	Alcal. mg/LcaCO ₃
14/10/2018	09:00	7,6	18,6	-		-
14/10/2018	11:00	7,1	17,2	-		-
14/10/2018	13:00	7,1	16,6	-		-
14/10/2018	14:00	7,2	19,8	-		-
14/10/2018	15:00	7,2	18,6	-		-

...continua.

Tabela 8. Qualidade da água bruta que foi tratada no Módulo C da ETA, no período de realização dos estudos (continuação)

Data	Hora	Água Bruta - Filtração Módulo C				
		pH	Turbidez uT	Fe mg/L	Cor mg/L	Alcal. mg/LcaCO3
14/10/2018	16:00	7,2	20,6	-		-
14/10/2018	18:00	7,1	20,8	-		-
14/10/2018	19:00	7,2	21,2	-	115	-
14/10/2018	21:00	7,4	21,3	-		-
14/10/2018	22:00	7,5	21,1	-	112	-
15/10/2018	00:00	7,5	21	2,71	114	75
15/10/2018	02:00	7,5	21,1	-	115	-
15/10/2018	04:00	7,5	20,2	-	111	-
15/10/2018	06:00	7,6	19	-	106	-
15/10/2018	09:00	7,7	17,5	-	117	-
15/10/2018	11:00	7,7	18,1	-	114	-
15/10/2018	12:00	7,7	17	-	-	-
15/10/2018	14:00	7,7	17,3	-	115	-
Média		7,4	19,3	2,7	113,2	75,0

Fonte: Autor, 2019.

São apresentadas nas Tabela e Tabela os dados médios operacionais do processo de filtração de cada módulo, nas quais observa-se que o 'filtro A' foi submetido à filtração em um intervalo (carreira de filtração) de 18,9h e o 'filtro C' a um intervalo de 28,4h.

Tabela 9. Dados médios operacionais do processo de filtração do módulo A da ETA em estudo

Carreira de Filtração – Módulo A			
Parâmetro		Unid.	Valor
Filtro A	Vazão média na entrada da ETA	m³/h	570
	Vazão média no módulo A durante filtração	m³/h	190
	Carreira de Filtração	h	18,9
	Volume Filtrado no período	m³	3.594

Início Filtração	Fim Filtração
12/10/2018 20:20	13/10/2018 15:15

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 10. Dados médios operacionais do processo de filtração do módulo C da ETA em estudo

Carreira de Filtração – Módulo C			
Parâmetro		Unid.	Valor
Filtro C	Vazão média na entrada da ETA	m ³ /h	662,6
	Vazão média no módulo C durante filtração	m ³ /h	220,9
	Carreira de Filtração	h	28,4
	Volume Filtrado no período	m ³	6.276

Início Filtração	Fim Filtração
14/10/2018 09:50	15/10/2018 14:15

Fonte: Autor, 2019.

A explicação dada pelos operadores da ETA em estudo sobre diferença entre o período de filtração entre o ‘filtro A’ e o ‘filtro C’ (carreiras de filtração), é pelo fato das camadas dos meios filtrantes estarem diferentes entre os filtros, o que causa diferença para o alcance da perda de carga do mesmo. Foi mencionado que os filtros passaram por recomposição para sanar esta questão. Este fato não interfere na qualidade da água final uma vez, atingido a perda de carga (em mais ou menos tempo em cada módulo), os filtros são colocados para lavagem, não havendo ocorrência de transpasse (aumento da turbidez na água filtrada).

Outro dado que também questionado, é quanto diferença de vazão na entrada da ETA, justificada pela tentativa em manter o reservatório de abastecimento sempre cheio, aumentando a vazão quando o mesmo está em esvaziamento e reduzindo quando atinge um nível elevado. Entretanto é relatado que a vazão média diária fica em torno de 600m³/h.

A água filtra pelos módulos é lançada em Tanque de Contato, logo abaixo dos filtros, que após a desinfecção com cloro e fluoretação é aduzida para o reservatório de 2.000m² para posterior distribuição. Vale evidenciar que no intervalo de filtração estudado, a água filtrada apresentou turbidez abaixo de 0,5 uT durante todo o tempo.

Conforme dados apresentados, realizou-se a somatório dos volumes de água filtrada nos módulos A e C, que resulta em um volume de 9.870m³ (5.597m³ de A + 6.276m³ de C). A somatória dos tempos de filtração dos módulos A e C resulta em 47,3h (19,8h de A + 28,4h de C). Assim, a vazão média de filtração resulta em 209m³/h (9.870m³ / 47,3h).

5.2.1.2. Volume de água de lavagem dos filtros

Os resíduos gerados durante o processo de lavagem dos filtros (água de lavagem dos filtros) foram quantificados a partir do tempo de lavagem e da medição do nível do tanque de recepção e clarificação (antes e após o processo) situado abaixo das unidades de floto-filtros.

Desta forma, procedeu-se com a medição da altura da lâmina líquida do tanque após as lavagens do filtro A e do filtro C. Posteriormente calculou-se o volume de água de lavagem para cada lavagem a partir do produto: (comprimento x largura x altura lâmina líquida em cada lavagem). Apresenta-se nas Tabela 9 e Tabela 10 as alturas de lâmina líquida em cada lavagem com o respectivo volume e vazão de lavagem calculados.

Tabela 9. Dimensões do tanque, volume e vazão de água de lavagem calculado para o Filtro A da ETA em estudo

Tanque de Água de Lavagem do Filtro - A		
Descrição	Dimensão	Unid.
Comprimento:	15,5	m
Largura:	5,5	m
Altura lâmina líquida:	2,34	m
Volume de água de lavagem:	199,5	m³
Tempo de lavagem:	12,0	min
Vazão de lavagem calculada:	997,4	m ³ /h

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 10. Dimensões do tanque, volume e vazão de água de lavagem calculado para o Filtro C da ETA em estudo

Tanque de Água de Lavagem do Filtro - C		
Descrição	Dimensão	Unid.
Comprimento:	15,5	m
Largura:	5,5	m
Altura lâmina líquida:	1,76	m
Volume de água de lavagem:	149,6	m³
Tempo de lavagem:	9,0	min
Vazão de lavagem calculada:	997,4	m ³ /h

Fonte: Autor, 2019.

Conforme apresentado nas tabelas anteriores (Tabela 9 e Tabela 10), o volume de água de lavagem do filtro 'A' foi de $199,5\text{m}^3$ e para o filtro 'C' de $149,6\text{m}^3$. A partir destes volumes e do tempo de lavagem em cada filtro (12 e 9 minutos respectivamente), foi possível o cálculo da vazão de lavagem (volume/tempo), que para ambos os módulos foi de $997,4\text{m}^3/\text{h}$.

A vazão de lavagem, calcula pela divisão do 'volume de água no tanque' pelo 'tempo na qual ocorreu a lavagem do filtro', é compatível com a vazão dos conjuntos moto bombas de lavagem, informada pelo fabricante, que é de $1.000\text{m}^3/\text{h}$, conforme apresenta-se na Figura 75.

Figura 75. Conjunto moto bomba de lavagem dos filtros da ETA em estudo – detalhe para a placa de identificação – vazão de $1.000\text{m}^3/\text{h}$



Fonte: Autor, 2019.

5.2.1.3. Volume de lodo gerado na raspagem dos flotoadores

Os resíduos flotados nas unidades de Floto-filtração são lançadas por gravidade para um tanque (tanque de recepção ou tanque de acúmulo de lodo), localizado na lateral destas unidades, na qual fica constantemente em agitação. A quantificação dos volumes de resíduos gerados pela etapa de flotação foi através da medição física do tanque de recepção destes resíduos, realizando posteriormente a medição da altura da lâmina líquida de resíduos após cada descarte, determinando assim o volume gerado.

Para o caso em estudo (lavagem dos filtros A e C), a duração da raspagem de lodo flotado do Flotador A teve duração de 9,0 minutos, e do Flotador C, duração de 8,5 minutos.

Após cada descarte, os volumes foram quantificados pela medição física do tanque e da lâmina líquida de lodo. A concentração de ST também foi determinada, obtendo-se os seguintes resultados apresentados nas Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11. Quantitativos do lodo gerado na unidade de flotação da ETA em estudo – Floto-filtro A

Tanque de Acúmulo de Lodo - Flotador A		
Descrição	Dimensão	Unid.
Tempo de raspagem:	9,0	min.
Volume de lodo medido:	6,6	m ³
Concentração de ST:	9,6	g/L

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 12. Quantitativos do lodo gerado na unidade de flotação da ETA em estudo – Floto-filtro C

Tanque de Acúmulo de Lodo - Flotador C		
Descrição	Dimensão	Unid.
Tempo de raspagem:	8,5	min.
Volume de lodo medido:	6,3	m ³
Concentração de ST:	17,5	g/L

Fonte: Autor, 2019.

Verifica-se que na unidade em que houve um maior volume de água filtrada (unidade C), a concentração de sólidos foi 50% maior, entretanto, a raspagem de lodo da superfície foi com tempo ligeiramente menor (0,5 minutos), o que também contribui para manter uma concentração de ST maior, devido ao fato de que a concentração de sólidos é muito reduzida ao final do tempo de raspagem de lodo do flotador (lodo mais “aguado”), e quanto mais tempo o raspador de lodo ficar em funcionamento, maior será o volume de água lançada para o Tanque de Acúmulo, diminuindo a concentração média de ST.

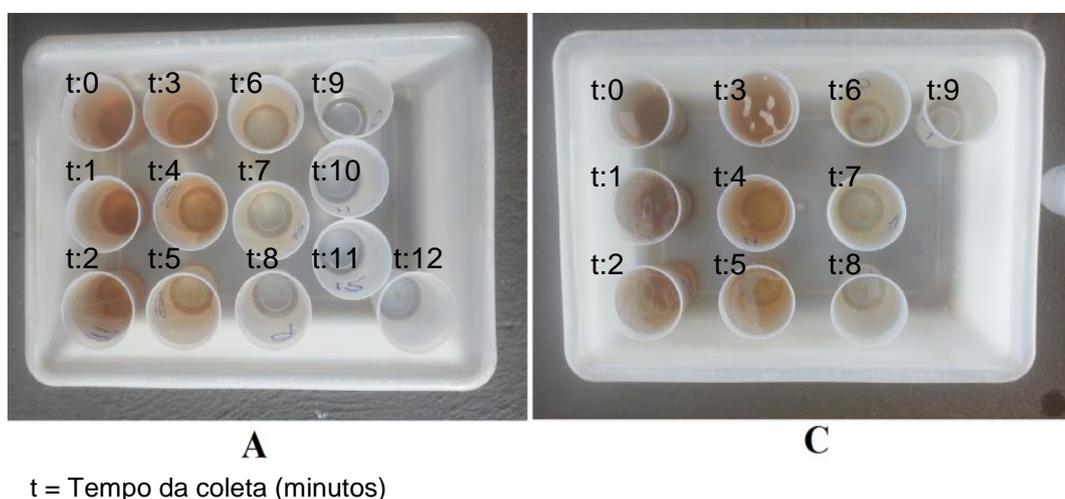
5.2.2. Quantificação da Massa Seca dos Resíduos da Lavagem dos Filtros e do Lodo Sobrenadante dos Flotadores

Após quantificados os volumes de resíduos gerados nas etapas de flotação e de lavagem dos filtros, procedeu-se com a quantificação da concentração de ST (massa seca de resíduos), conforme apresentado na sequência.

5.2.2.1. Quantificação da massa seca dos resíduos da lavagem dos filtros

Na Figura 76 são apresentadas as amostras coletadas minuto a minuto durante o processo de lavagem dos filtros, sendo realizadas análises de turbidez em cada uma destas. Apresenta-se na Figura 77 os resultados da medição de turbidez em cada amostra, bem como o gráfico com a curva representativa destes.

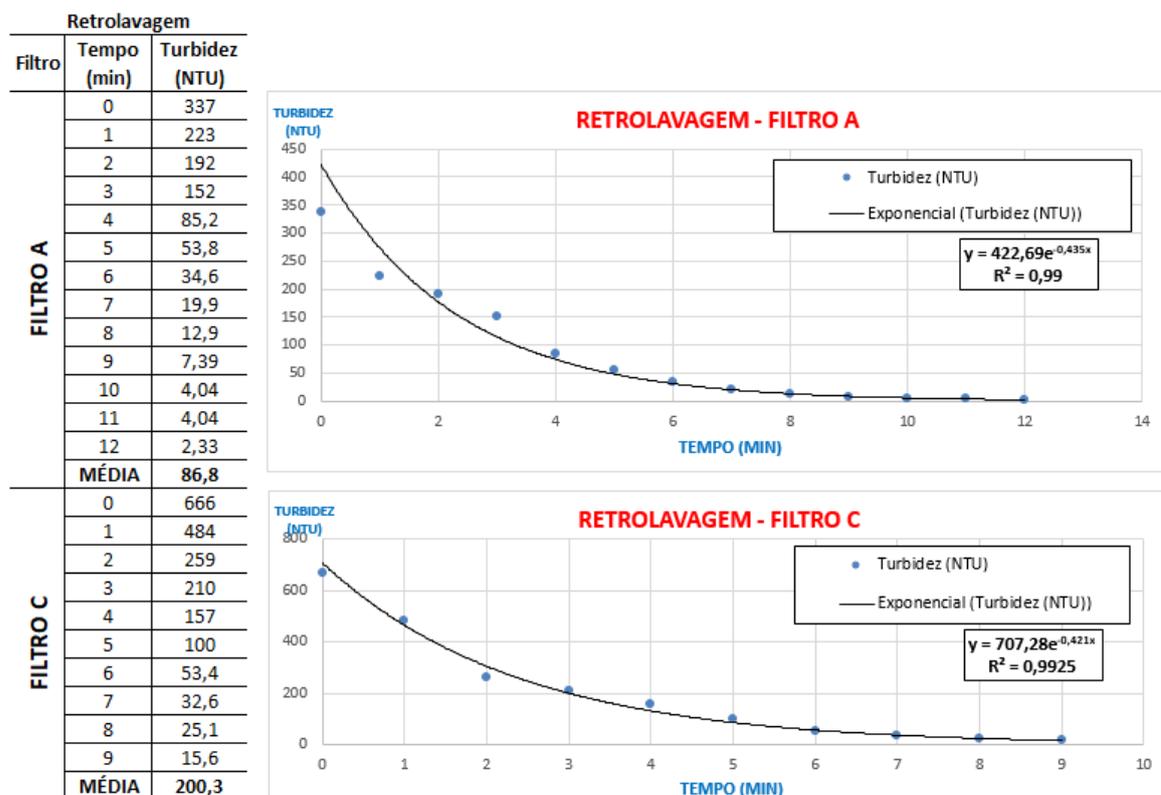
Figura 76. Amostras coletadas minuto a minuto durante o processo de lavagem dos filtros da ETA em estudo



Fonte: Autor, 2019.

Paralelamente, foram feitas medições de turbidez de amostras mais concentradas, como forma de determinar a relação $T/SST = 'a'$. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

Figura 77. Resultados da amostragem minuto a minuto do processo de lavagem dos filtros a vazão constante da ETA em estudo



Fonte: Autor, 2019.

Tabela 13. Relação entre a Turbidez e a concentração de ST (coeficiente 'a') de amostras de lodo coletadas na ETA em estudo

Turbidez NTU	ST mg/L	Coefficiente 'a'
3540	3500	0,99
3290	3700	1,12
3610	3900	1,08
4140	4110	0,99
Média		1,04
Coefficiente 'a' adotado		1,0

Fonte: Autor, 2019.

Desta forma, considerando que o valor do coeficiente 'a' adotado foi 1,0, tem-se, em termos médios, a concentração de sólidos suspensos totais para os filtros A e C nos ensaios realizados, que resulta respectivamente 86,8 e 200,3 mg/L (ver Figura 77).

Segundo Di Bernardo et al. (2012), nas ETA's de floto-filtração, a concentração de SST na água de lavagem dos filtros resulta em geral entre 200 a 600 mg/L. Portanto a concentração de sólidos totais verificado na lavagem dos filtros encontra-se em intervalo inferior ao apresentado pelo autor.

A partir da quantificação do volume de água de lavagem dos filtros e da determinação da concentração de sólidos secos (ST), pode-se, portanto, calcular a quantidade total de resíduos gerados no processo de lavagem dos filtros da ETA em estudo, através do produto: Concentração de ST x Volume água de lavagem. Assim, a quantidade (em massa seca total) de resíduos gerados foi de:

- Filtro A: $86,8\text{mg/L} \times 199,5\text{m}^3 = 17,3\text{Kg}$ de massa seca.
- Filtro B: $200,3\text{mg/L} \times 149,6\text{m}^3 = 30,0\text{Kg}$ de massa seca.

Para se obter a média de resíduos (massa seca) pelo volume de água filtrada, foi realizado a divisão da massa seca total em cada filtro pelo volume total de água filtrada, MSS / VAF:

- Filtro A: $17,3\text{Kg} / 3.594\text{m}^3 = 4,82\text{g/m}^3$ de massa seca.
- Filtro C: $30,0\text{Kg} / 6.276\text{m}^3 = 4,77\text{g/m}^3$ de massa seca.

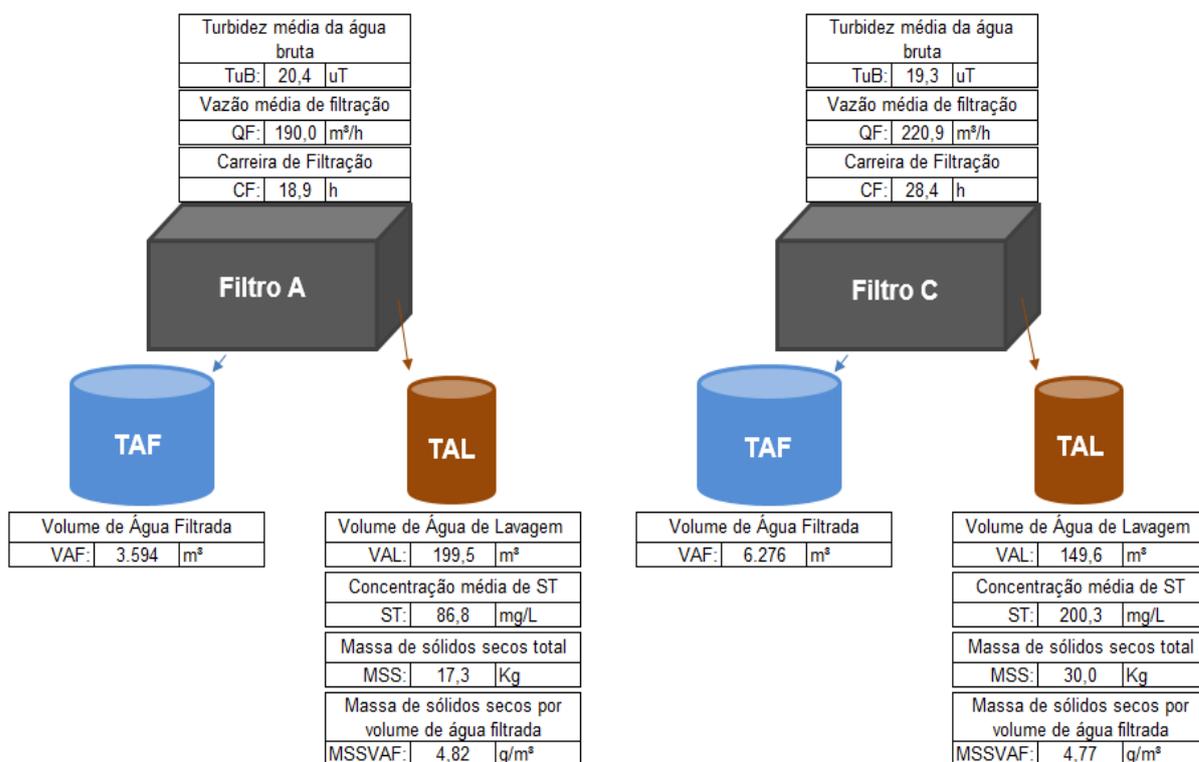
São ilustrados na Figura 78 os resultados obtidos a partir dos dados de filtração em cada unidade avaliada (A e C), bem como os quantitativos dos resíduos gerados na lavagem dos filtros.

A partir dos resultados obtidos para os quantitativos de resíduos gerados somente com a lavagem dos filtros, é possível obter a massa total diária (resíduos de lavagem dos filtros) gerada a partir da capacidade média de produção da ETA ($600\text{m}^3/\text{h}$ ou $14.400\text{m}^3/\text{dia}$), através do produto: vazão x concentração de sólidos por volume filtrado:

- $14.400\text{m}^3/\text{dia} \times 4,8\text{g/m}^3 = 69,12\text{Kg}/\text{dia}$ de massa seca.

Os resíduos oriundos da lavagem dos filtros são conduzidos para o Tanque de Água de Lavagem, em compartimento abaixo da unidade de Floto-filtração, conforme já esclarecido, e, após cerca de 1,0h em repouso, o sobrenadante é retornado para o início do tratamento e, o lodo sedimentado, bombeado para o Tanque de Acúmulo, juntamente com o lodo do flotador.

Figura 78. Quantitativos dos resíduos gerados na lavagem de filtros na ETA em estudo



Fonte: Autor, 2019.

5.2.2.2. Quantificação da massa seca dos resíduos dos flotores

De forma análoga à determinação das concentrações dos resíduos da lavagem dos filtros, as concentrações dos resíduos gerados na unidade de flotação foram estimadas através de equação $SST = a \times T$, sendo 'a' o coeficiente de valor 1,0 e 'T' a turbidez (uT).

As concentrações de ST do lodo flotado para as unidades de flotação 'A' e 'C' foram apresentadas nas Tabela 11 e Tabela 12.

- Resíduos Flotador A (ST) = 9,6 g/L
- Resíduos Flotador C (ST) = 17,5 g/L

A partir da quantificação do volume de lodo flotado descartado no Tanque de Acúmulo e da determinação da concentração de sólidos secos (ST), pode-se, portanto, calcular a quantidade total de resíduos gerados no processo de flotação da

ETA em estudo, através do produto: Concentração de ST x Volume resíduos flotados. Assim, a quantidade (em massa seca total) de resíduos gerados foi de:

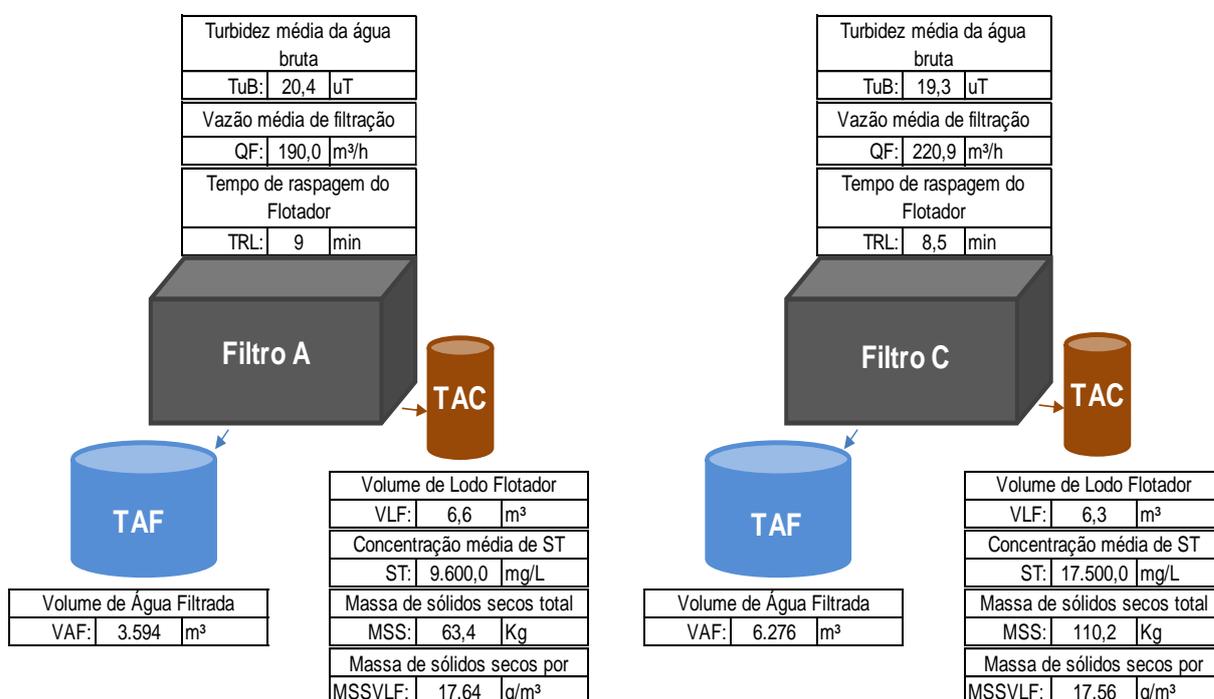
- Filtro A: $9,6/L \times 6,6m^3 = 63,4$ Kg de massa seca.
- Filtro B: $17,5g/L \times 6,3m^3 = 110,2$ Kg de massa seca.

Para se obter a média de resíduos flotados (massa seca) pelo volume de água filtrada, foi realizado a divisão da massa seca total em cada filtro pelo volume total de água filtrada, MSS / VF:

- Filtro A: $63,4 \text{ Kg} / 3.594m^3 = 17,64 \text{ g/m}^3$ de massa seca.
- Filtro C: $110,2 \text{ Kg} / 6.276m^3 = 17,56 \text{ g/m}^3$ de massa seca.

São ilustrados na Figura 79 os resultados obtidos a partir dos dados de filtração em cada unidade avaliada (A e C), bem como os quantitativos dos resíduos gerados nos flotadores.

Figura 79. Quantitativos dos resíduos gerados no flotador da ETA em estudo



Fonte: Autor, 2019.

A partir dos resultados obtidos para os quantitativos de resíduos gerados somente na unidade de flotação, é possível obter a massa total diária (resíduos de flotação) gerada a partir da capacidade média de produção da ETA (600m³/h ou

14.400m³/dia), através do produto: vazão x concentração de sólidos por volume filtrado:

- $14.400\text{m}^3/\text{dia} \times 17,6\text{g}/\text{m}^3 = 253,44 \text{ Kg}/\text{dia}$ de massa seca.

5.2.3. Cálculo da Massa de Lodo Seco Total

Conforme verifica-se a massa seca por volume de água filtrada foi de cerca de 4,8g/m³ nos dois ensaios (Floto-filtro A e C) de quantificação dos resíduos gerados na lavagem dos filtros, com diferença de cerca de 1% nos resultados.

Para os resíduos gerados nos flotadores, a massa seca gerada foi cerca de 17,6g/m³ nos dois ensaios (Floto-filtro A e C) de quantificação dos resíduos gerados na lavagem dos filtros, com diferença menor que 1% nos resultados.

Os resultados verificados nos ensaios entre os Floto-filtros 'A' e 'C' são convergentes, devido à Turbidez média da água bruta, que foi submetida à filtração nos dois módulos, ter pequena variação neste estudo (Turbidez média da água Bruta no Floto-filtro A = 20,4uT; para o Floto-filtro C = 19,3uT).

Outra verificação que vêm de encontro com as notas de Di Bernardo et al. (2012), é que em termos volumétricos, a maior quantidade de resíduos é proveniente das lavagens dos filtros. No entanto, em termos mássicos, a maior quantidade de resíduo é gerada no sistema de separação sólido/líquido que, em uma estação de ciclo completo, é basicamente efetuada nos decantadores (ou flotadores). Cada linha geradora de resíduos apresenta características distintas em termos de vazão e concentração de sólidos.

A partir da determinação da massa seca de resíduos gerados nos flotadores e na lavagem de filtros, é possível obter a massa total diária gerada a partir da capacidade média de produção da ETA (600m³/h ou 14.400m³/dia), através do produto: vazão x concentração total de sólidos por volume filtrado:

- $14.400 \text{ m}^3/\text{dia} \times (4,8 + 17,6) \text{ g}/\text{m}^3 = 322,56 \text{ Kg}/\text{dia}$ de massa seca.

5.2.3.1. Cálculo da massa de lodo seco total através de equação empírica

De acordo com Di Bernardo (2012), é possível obter uma indicação da massa seca de resíduos gerados a partir de equação empírica. Na ETA floto-filtração estudada é utilizado com agente coagulante o PAC – Policloreto de Alumínio, portanto, a determinação da quantidade total de sólidos suspensos gerados, quando a coagulação é realizada no mecanismo de varredura com coagulante a base de alumínio, é dada pela Equação 03 apresentada anteriormente:

$$P_{SS} = Q \cdot (4,89 \cdot D_{Al} + SST + D_P + D_{CAP} + 0,1 \cdot D_{CAL}) \cdot 10^{-3}$$

Onde,

P_{SS} = produção de SST (Kg/d);

Q = vazão de água bruta a ser tratada (m³/d);

D_{Al} = dosagem de coagulante (alumínio) (mgAl/L);

SST = concentração de sólidos suspensos totais na água a ser tratada (mg/L);

D_P = dosagem de polímero seco (mg/L);

D_{CAP} = dosagem de carvão ativado pulverizado (mg/L);

D_{CAL} = dosagem de cal hidratada (mg/L).

Como no processo da ETA floto-filtração estudada é dosado apenas o coagulante a base de alumínio, a Equação 3 pôde ser simplificada:

$$P_{SS} = Q \cdot (4,89 \cdot D_{Al} + SST) \cdot 10^{-3}$$

Onde,

P_{SS} = produção de SST (Kg/d);

Q = vazão de água bruta a ser tratada (m³/d);

D_{Al} = dosagem de sulfato de alumínio (mg/Al/L);

SST = concentração de sólidos suspensos totais na água a ser tratada (mg/L).

Portanto, simulando as condições de tratamento para a vazão média, pode calcular a produção diária de massa de lodo seco pela Equação 3, conforme apresentado na Tabela 8.

TABELA 8 - Produção teórica de massa de lodo seco para as condições operacionais médias de acordo com o período de estudo na ETA

Produção teórica de Lodo Seco		
Parâmetro	Valor	Unidade
Vazão	600	m ³ /h
	14.400	m ³ /dia
Dosagem de PAC	40	mg/L
% de Al ₂ O ₃	8%	%
D _{AL}	0,8471	mg/L de Al
SST água Bruta	20	mg/L
Pss	347,6	Kg/dia

Fonte: Autor, 2019.

A massa de lodo seco gerada, calculada de acordo com os ensaios de quantificação volumétrica dos resíduos gerados na ETA Floto-filtração é 322,6Kg/dia, conforme mencionado anteriormente. A produção de lodo calculada pela equação empírica resulta em 347,6Kg/dia. Na Tabela 14 é apresentada e comparação do resultado dos dois métodos apresentados, com respectivo erro relativo entre eles.

Tabela 14. Comparação dos cálculos de massa seca total, dos resíduos sólidos gerados na ETA em estudo, realizados através de ensaios em campo e de equação empírica

Massa seca calculada a partir de ensaios práticos de determinação de volume e concentração de ST.	Massa seca calculada através de equação empírica.
322,6 Kg	347,6 Kg
Erro relativo = 7,2%	

Fonte: Autor, 2019.

Pode-se observar, portanto, que a quantificação realizada da massa de resíduos gerados na ETA em estudo é bem próxima à massa calculada pela equação empírica, a partir das mesmas condições operacionais, com erro de cerca de 7%.

Estes resultados de massa seca por volume filtrado contribuem para verificação de que, a partir da água bruta, é possível realizar o cálculo da massa

seca dos resíduos gerados na ETA, a partir de equações empíricas das pela literatura específica, conforme apresentado no Capítulo 3 (item 3.5).

5.3. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS FATORES TEMPERATURA E TEMPO NA SECAGEM DO LODO DA ETA, APÓS CENTRIFUGAÇÃO, EM ESTUFA DE POLIPROPILENO

A partir da estufa de secagem construída e das leras (leitos) preenchidas com lodo centrifugado (leras de secagem com alturas variáveis - 0,20m, 0,30m e 0,60m), procedeu-se com as medições de temperatura e umidade externa à estufa, e com determinações de concentração de ST nas amostras de lodo realizadas diariamente e/ou semanalmente.

Foram realizados dois ensaios de secagem de lodo na estufa piloto ('período de secagem 01' e 'período de secagem 02'), ambos de 70 dias consecutivos. O primeiro ensaio de secagem foi realizado do dia 30/11/2018 ao dia 08/02/2019. O segundo ensaio de secagem foi realizado do dia 10/02/2019 ao dia 21/04/2019.

5.3.1. Monitoramento de Temperatura e Umidade do Ar

O monitoramento da temperatura e umidade externa à estufa piloto, foi realizado concomitante aos experimentos de secagem do lodo.

A partir dos registros de temperatura e umidade do instrumento instalado fora da estufa piloto, apresenta-se na Figura 80, o gráfico dos registros de temperaturas máxima, média e mínima diária, e na Figura 81, o gráfico dos registros de umidade máxima, média e mínima diária, no período de secagem do lodo do ensaio de secagem 01.

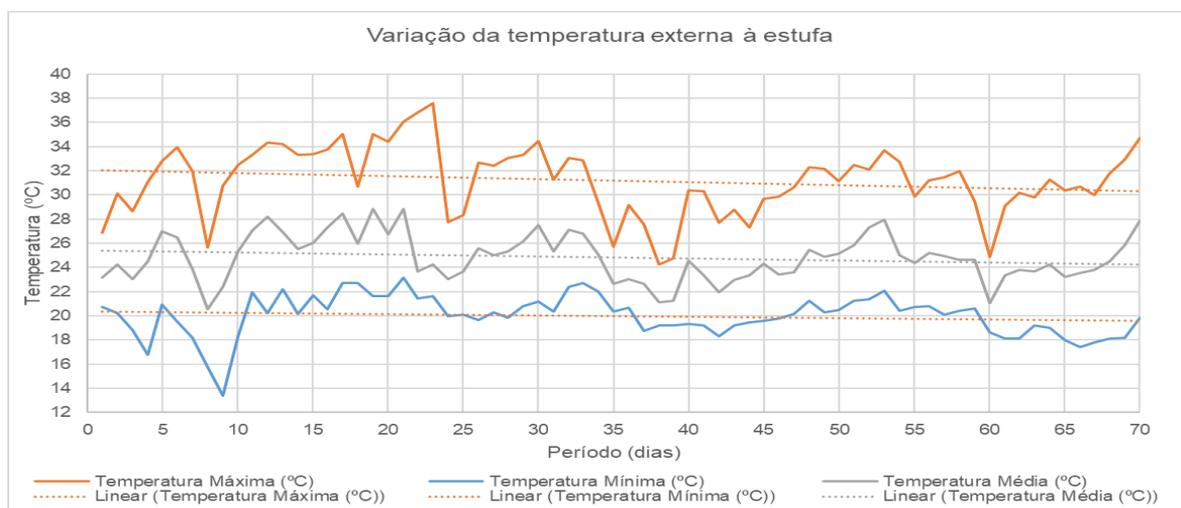
Realizou-se o cálculo dos valores médios das temperaturas e umidades máxima, média e mínima diária, no período de estudo 01, conforme apresentado na Tabela 15. Conforme verifica-se, A temperatura média no período de estudo de secagem do lodo (70 dias) foi de 24,8°C e a umidade relativa do ar média de 78,0%.

Tabela 15. Valores médios das temperaturas e umidades máxima, média e mínima diária, monitorados no lado externo da estufa piloto implantada na ETA de estudo no período de secagem 01

Umidade Média no Período			Temperatura Média no Período		
U Máx. (%)	U Mín. (%)	U Méd. (%)	T Máx. (°C)	T Mín. (°C)	T Méd. (°C)
98,2	50,3	78,0	31,2	20,0	24,8

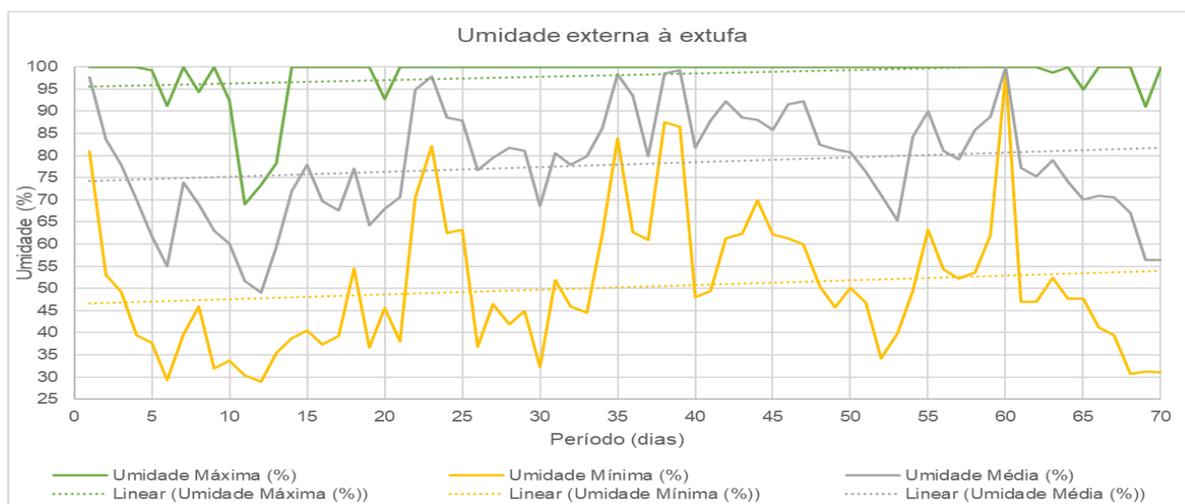
Fonte: Autor, 2019.

Figura 80. Média das temperaturas máxima, média e mínima diária, externa à estufa piloto implantada na ETA de estudo, durante o ensaio de secagem 01



Fonte: Autor, 2019.

Figura 81. Média das Umidades máxima, média e mínima diária, externa à estufa piloto implantada na ETA de estudo, durante o ensaio de secagem 01



Fonte: Autor, 2019.

Para os ensaios de secagem 02, realizou-se o cálculo dos valores médios das temperaturas e umidades máxima, média e mínima diária, no período de estudo 01, conforme apresentado na Tabela 15. Conforme verifica-se, A temperatura média no período de estudo de secagem do lodo (70 dias) foi de 27,1°C e a umidade relativa do ar média de 64,7%.

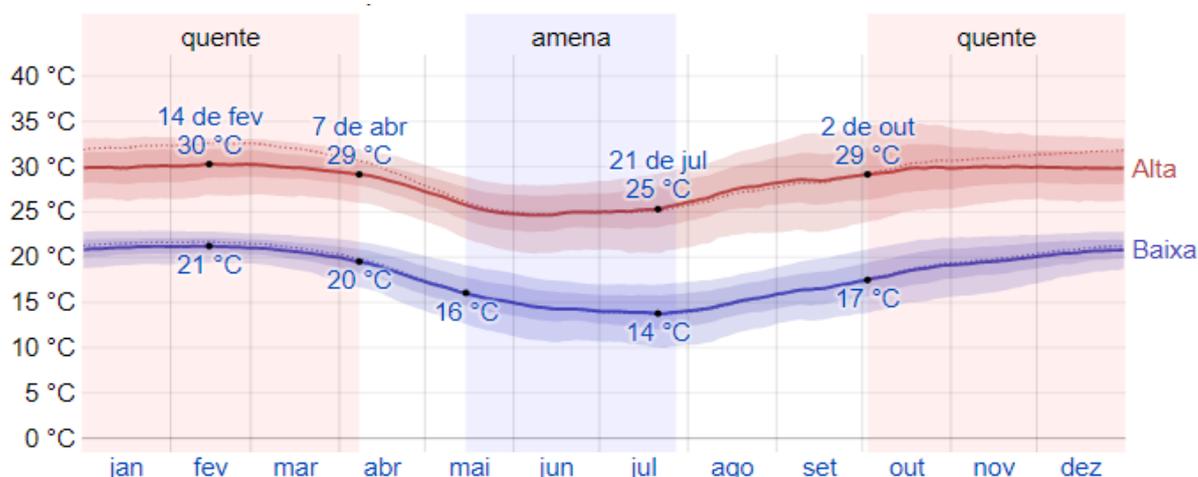
Tabela 16. Valores médios das temperaturas e umidades máxima, média e mínima diária, monitorados no lado externo da estufa piloto implantada na ETA de estudo no período de secagem 02

Umidade Média no Período			Temperatura Média no Período		
U Máx. (%)	U Mín. (%)	U Méd. (%)	T Máx. (°C)	T Mín. (°C)	T Méd. (°C)
92,7	44,0	64,7	35,7	18,4	27,1

Fonte: Autor, 2019.

As temperaturas máximas e mínimas registradas durante os estudos de secagem do lodo na estufa são convergentes com as máximas e mínimas médias da série histórica do município (Figura 82), apresentada pela aplicação WeatherSpark.com, que disponibiliza condições meteorológicas características de Jaú e de mais 150.165 localidades distribuídas pelo mundo, com base em uma análise estatística de relatórios horários históricos e reconstruções de modelo de 1 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2016.

Figura 82. Temperaturas máximas e mínimas médias do município de Jahu – série histórica 1980 a 2016



Fonte: Weather Spark (2019).

A determinação da umidade média no período de estudo de secagem do lodo, devido à possibilidade da sorção de umidade pelo material seco quando em contato com o ar ambiente. De acordo com David (2002), a velocidade de sorção de umidade é maior quando maior for a umidade relativa do ambiente onde se encontra o material seco. Entretanto, a estabilização da umidade do sólido ocorre em tempo maior, à medida que cresce a umidade relativa do meio.

5.3.2. Monitoramento da Concentração Sólidos Totais do Lodo em Fase de Secagem

Após o descarregamento da caçamba estacionária contendo o lodo centrifugado e nivelamento das leiras, com as alturas pré-definidas, o lodo foi mantido em processo de secagem natural na estufa piloto por 70 (setenta) dias.

O fator que limitou a experimentação em 70 dias foi a diminuição significativa da taxa de secagem do lodo na leira de menor camada (20 cm), em relação à taxa de secagem observado durante todo o experimento, mostrando que a partir deste tempo não mais teria vantagem de permanecer com o resíduo na estufa, podendo este ser encaminhado para uma disposição final.

A Figura 83 ilustra uma amostra de lodo desaguado em centrífuga, submetido à secagem na estufa piloto (lodo inicial). Na sequência, as Figura 84 à Figura 87 ilustram os aspectos do lodo em processo de secagem na estufa piloto.

Os resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo durante o 'período de secagem 01' são apresentados nas Tabelas de 20 a 22. No gráfico da Figura 88 é apresentada a variação da concentração de ST no período de secagem avaliado para as 3 camadas de lodo (0,2m, 0,3m e 0,6m).

Observa-se na Tabela 17 e Figura 88 que para a camada de lodo de 20cm, ocorreu uma diminuição significativa da taxa de secagem nos últimos 5 dias do período total avaliado (70 dias). A concentração de sólidos verificada ao final de 70 dias foi de 91,5%.

Figura 83. Aspecto do lodo centrifugado (~21% de ST) e encaminhado para secagem na estufa piloto implantada na ETA de estudo



Fonte: Autor, 2019.

Figura 84. Aspecto do lodo após 10 dias de secagem na estufa piloto implantada na ETA de estudo (~38% de ST)



Fonte: Autor, 2019.

Figura 85. Aspecto do lodo na leira de secagem (camada de 20cm) após 15 dias de secagem na estufa piloto implantada na ETA de estudo (~46% de ST)



Fonte: Autor, 2019.

Figura 86. Aspecto do lodo após 20 dias de secagem na estufa piloto implantada na ETA de estudo (~52% de ST)



Fonte: Autor, 2019.

Figura 87. Aspecto do lodo na leira de secagem (camada 20cm) após 50 dias de secagem na estufa piloto implantada na ETA de estudo (~80% de ST)



Fonte: Autor, 2019.

Tabela 17. Concentrações de ST do lodo no 'período de secagem 01' na estufa piloto implantada na ETA de estudo, com uma camada de 20cm

Secagem de lodo – estufa piloto – Camada de 20 cm				
Período (dias)	P Amostra (g)	P final (g)	Fração de Sólidos	Umidade Total
0	12,93	2,68	20,7%	79,3%
2	45,84	11,99	26,2%	73,8%
9	49,47	18,80	38,0%	62,0%
14	57,78	26,58	46,0%	54,0%
20	56,81	29,77	52,4%	47,6%
29	51,73	31,04	60,0%	40,0%
34	60,03	41,18	68,6%	31,4%
47	31,18	24,13	77,4%	22,6%
53	18,77	15,60	83,1%	16,9%
60	20,23	17,90	88,5%	11,5%
65	13,47	12,30	91,3%	8,7%
70	21,42	19,60	91,5%	8,5%

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 18. Concentrações de ST do lodo no 'período de secagem 01' na estufa piloto implantada na ETA de estudo, com uma camada de 30cm

Secagem de lodo - estufa piloto - Camada de 30 cm				
Período (dias)	P Amostra (g)	P final (g)	Fração de Sólidos	Umidade Total
0	12,93	2,68	20,7%	79,3%
2	25,31	6,15	24,3%	75,7%
9	16,70	5,36	32,1%	67,9%
14	22,49	8,32	37,0%	63,0%
20	22,03	10,20	46,30%	53,7%
29	28,54	15,21	53,3%	46,7%
34	24,93	14,36	57,6%	42,4%
47	14,00	9,68	69,2%	30,9%
53	14,25	10,30	72,3%	27,7%
60	11,22	8,65	77,1%	22,9%
65	12,03	9,60	79,8%	20,2%
70	9,65	7,90	81,9%	18,1%

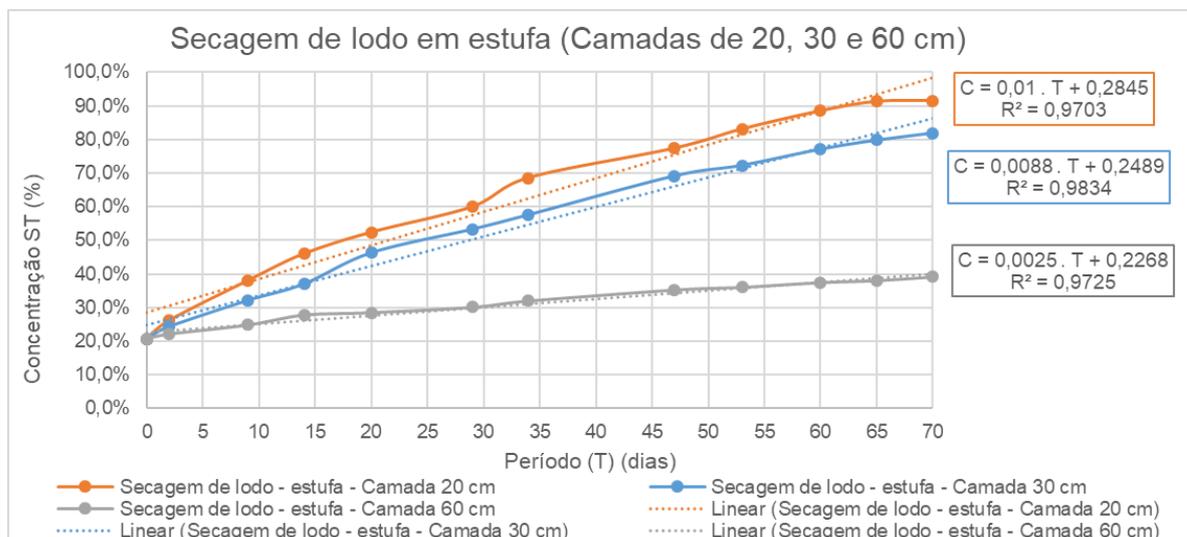
Fonte: Autor, 2019.

Tabela 19. Concentrações de ST do lodo no 'período de secagem 01' na estufa piloto implantada na ETA de estudo, com uma camada de 60cm

Secagem de lodo - estufa piloto - Camada de 60 cm				
Período (dias)	P Amostra (g)	P final (g)	Fração de Sólidos	Umidade Total
0	12,93	2,68	20,7%	79,3%
2	31,58	6,98	22,1%	77,9%
9	33,71	8,36	24,8%	75,2%
14	16,87	4,69	27,8%	72,2%
20	33,68	9,60	28,5%	71,5%
29	27,31	8,22	30,1%	69,9%
34	28,06	8,98	32,0%	68,0%
47	21,36	7,54	35,3%	64,7%
53	25,76	9,30	36,1%	63,9%
60	15,15	5,68	37,5%	62,5%
65	20,66	7,87	38,1%	61,9%
70	20,15	7,90	39,2%	60,8%

Fonte: Autor, 2019.

Figura 88. Concentrações de ST do lodo no 'período de secagem 01' na estufa piloto implantada na ETA de estudo, para as camadas de 20, 30 e 60cm



Fonte: Autor, 2019.

Os resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo durante o 'período de secagem 02' são apresentados nas Tabelas de 23 a 25. No gráfico da Figura 88 é apresentada a variação da concentração de ST no período de secagem avaliado para as 3 camadas de lodo (0,2m, 0,3m e 0,6m).

Tabela 20. Concentrações de ST do lodo no 'período de secagem 02' na estufa piloto implantada na ETA de estudo, com uma camada de 10cm

Secagem de lodo - estufa - camada 10 cm				
Período (dias)	P Amostra (g)	P final (g)	Fração de Sólidos	Umidade Total
0	27,4	6,09	22,2%	77,8%
8	29,57	8,96	30,3%	69,7%
22	61,59	31,84	51,7%	48,3%
27	57,53	33,52	58,3%	41,7%
35	47,50	32,37	68,1%	31,9%
42	38,90	28,78	74,0%	26,0%
49	42,90	35,62	83,0%	17,0%
56	51,00	45,96	90,1%	9,9%
63	53,20	48,62	91,4%	8,6%
70	46,70	42,56	91,1%	8,9%

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 21. Concentrações de ST do lodo no período de secagem 02 na estufa piloto implantada na ETA de estudo, com uma camada de 30cm

Secagem de lodo - estufa - camada 30 cm				
Período (dias)	P Amostra (g)	P final (g)	Fração de Sólidos	Umidade Total
0	28,28	6,28	22,2%	77,8%
8	44,69	13,72	30,7%	69,3%
22	48,45	20,90	43,1%	56,9%
27	47,36	22,90	48,4%	51,6%
35	53,80	29,52	54,9%	45,1%
42	48,90	28,31	57,9%	42,1%
49	47,92	32,68	68,2%	31,8%
56	51,11	37,54	73,4%	26,6%
63	45,70	36,41	79,7%	20,3%
70	45,95	39,64	86,3%	13,7%

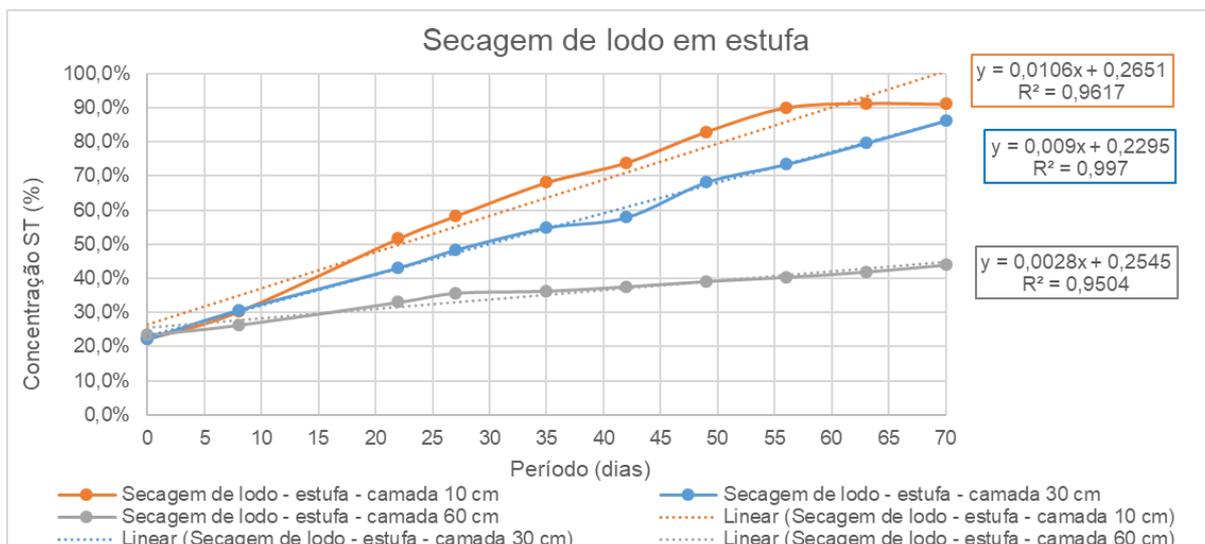
Fonte: Autor, 2019.

Tabela 22. Concentrações de ST do lodo no período de secagem 02 na estufa piloto implantada na ETA de estudo, com uma camada de 60cm

Secagem de lodo - estufa - camada 60 cm				
Período (dias)	P Amostra (g)	P final (g)	Fração de Sólidos	Umidade Total
0	30,9	7,23	23,4%	76,6%
8	41,44	10,90	26,3%	73,7%
22	50,10	16,54	33,0%	67,0%
27	53,17	18,98	35,7%	64,3%
35	49,86	18,11	36,3%	63,7%
42	51,12	19,23	37,6%	62,4%
49	55,37	21,69	39,2%	60,8%
56	61,80	24,97	40,4%	59,6%
63	58,71	24,63	42,0%	58,0%
70	49,32	21,70	44,0%	56,0%

Fonte: Autor, 2019.

Figura 89. Concentrações de ST do lodo no período de secagem 02 na estufa piloto implantada na ETA de estudo, para as camadas de 20, 30 e 60cm



Fonte: Autor, 2019.

Observa-se na Tabela 23 e Figura 89 que para a camada de lodo de 10cm, ocorreu uma diminuição significativa da taxa de secagem nos últimos 10 dias do período total avaliado (70 dias). A concentração de sólidos verificada ao final de 70 dias foi de 91,1%.

Conforme apresentado nos estudos de David (2002), se um material for completamente seco e depois exposto a um ambiente com umidade relativa de 75%, este vai absorver umidade do ar até se equilibrar em teor de sólidos de 92% em 4 dias de exposição.

Desta forma, como observou-se que a umidade média durante os experimentos (umidade externa da estufa) foi de cerca de 78,0% (mínima de 50,3% e máxima de 98,2%) para o ensaio de secagem 01 e de 64,7% (mínima de 44,0% e máxima de 91,7%) para o ensaio de secagem 02, pode-se considerar que a fração de sólidos totais em torno de 90%, é um limite de secagem adequado para não possibilitar a absorção de umidade, o que tornaria a operação de secagem ineficiente.

Verifica-se que na Figura 88 e Figura 89, a partir das curvas traçadas com a concentração de ST (%) em relação ao Tempo de Secagem (em dias), pôde-se efetuar a linearização das mesmas (linha de tendência), com o auxílio de planilha eletrônica (Excel). Foi apresentado a equação linear e coeficiente de determinação (R^2), com um bom ajuste estatístico do modelo linearizado (acima de 95%).

Na Tabela 23 é apresentada as diferentes Taxas de secagem em cada altura de leira de lodo (ver Figura 88 e 89).

Tabela 23. Taxas de secagem obtidas a partir da linearização das curvas de secagem de lodo na estufa piloto implantada na ETA de estudo para as camadas de 10, 20, 30 e 60cm

Camada de Lodo (cm)	Taxa (%ST / dia)	
	Ensaio de secagem 01	Ensaio de secagem 02
20 e 10	1,00	1,06
30	0,88	0,90
60	0,25	0,28

Fonte: Autor, 2019.

Verifica-se que as taxas de secagem para o ensaio de secagem 02 são ligeiramente superiores que as taxas de secagem para o ensaio 01. Desta forma, para maior segurança no dimensionamento do sistema de secagem de lodo em estufas, foram adotadas as menores taxas calculadas a partir dos experimentos, que neste caso são as taxas de secagem do ensaio de secagem 01.

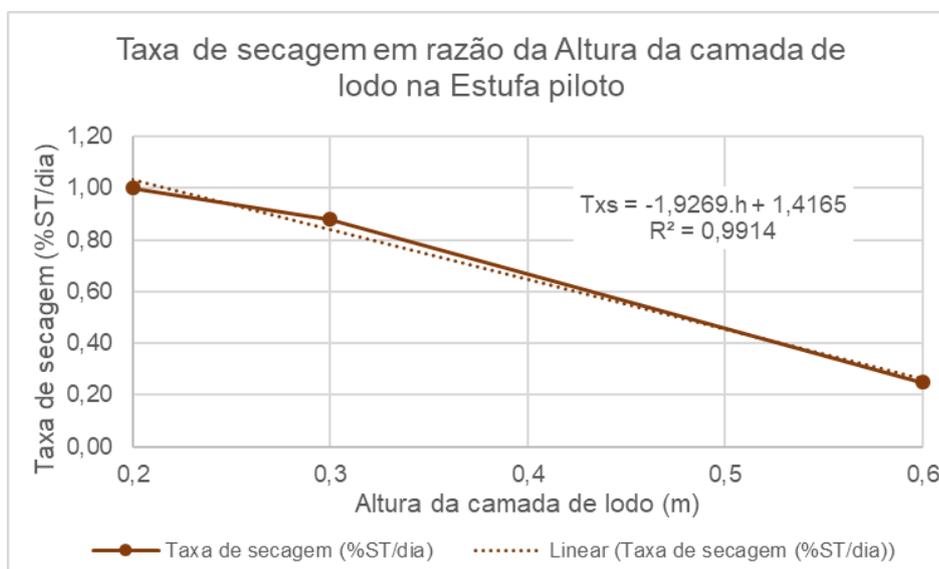
Um das justificativas encontradas para o aumento das taxas de secagem na realização do experimento 02, é devido a uma maior temperatura média e uma menor umidade média em comparação ao ensaio de secagem 01, que contribuiu para uma maior velocidade de secagem na estufa (diminuição da umidade do lodo em um menor tempo).

A Figura 90 ilustra graficamente as taxas de secagem para o ensaio de secagem 01, que são as taxas adotadas para os estudos apresentados na sequência.

Verifica-se desta forma, que forma que a 'velocidade de secagem' diminuiu à medida em que se aumenta a altura da camada de lodo posta em secagem. Assim, quanto maior a camada de lodo, maior é o tempo de secagem necessário para o atingimento de uma concentração final de ST almejada.

Constatou-se que há uma tendência linear na diminuição da taxa de secagem (%ST/dia) com o aumento das camadas de lodo (Figura 90).

Figura 90. Taxas de secagem obtidas a partir da linearização das curvas de secagem de lodo na estufa piloto implantada na ETA de estudo para as camadas de 20, 30 e 60cm



Fonte: Autor, 2019.

Foi possível efetuar a linearização das taxas verificadas em cada altura, obtendo-se desta forma, uma relação desta diminuição da 'velocidade de secagem' com o 'aumento da camada de lodo' na estufa. Observou-se um bom ajuste estatístico do modelo linearizado (acima de 99%).

A partir da 'taxa de secagem' em razão da 'altura da camada de lodo' na estufa piloto (Figura 90), obteve-se a equação 13 a partir do ajuste linear, conforme apresenta-se:

$$\mathbf{Txs = -1,93 \cdot h + 1,4}$$

Equação 13

Onde:

Txs – é a taxa de secagem de lodo, expressa em %ST / dia;

h – é a altura da camada de lodo para secagem em estufa.

Extrapolando as concentrações obtidas no processo de secagem com a estufa piloto para as camadas de 30 e 60cm, (pois o processo de secagem foi interrompido a medida em que foi atingida a estabilidade de secagem para a camada de 20cm) pôde-se obter o período necessário teórico para que os lodos

destas camadas pudessem atingir a mesma concentração de ST obtida na camada de 20cm, ou seja, de cerca de 90% de ST, conforme apresentado na Tabela 24.

Período necessário de secagem = $\Delta ST / Txs$

Equação 14

Onde,

ΔST – (%ST desejada na secagem - %ST inicial);

Neste caso, $\Delta ST = (90 - 20) = 70\%ST$;

Txs – é a taxa de secagem de lodo, expressa em %ST / dia;

Tabela 24. Período calculado para o atingimento da concentração de ST para as camadas de 20, 30 e 60cm de lodo na estufa piloto, com base nas taxas de secagem de cada camada

Camada de Lodo (m)	Taxa de secagem (%ST/dia)	%ST inicial	%ST final	Dif. %ST	Dias
0,2	1,00	20,0	90,0	70,0	70,0
0,3	0,88	20,0	90,0	70,0	79,5
0,6	0,25	20,0	90,0	70,0	280,0

Fonte: Autor, 2019.

5.4. DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTUFA DE SECAGEM PARA ETA

Com base nos resultados dos procedimentos experimentais foi possível desenvolver uma equação para o cálculo da área útil de secagem de lodo na estufa. Para o desenvolvimento da referida equação, foram considerados:

- o cálculo da Produção de Sólidos Secos Totais (Kg/dia) para a ETA; através da equação empírica, simplificada, para o cálculo da massa seca de lodo dada por AWWA (1999) – equação 03; ($P_{ss} = Q \cdot (4,89 \cdot D_{Al} + SST) \cdot 10^{-3}$).
- a definição de parâmetros da concentração de ST do lodo a ser seco na estufa (Concentração ST na saída desaguamento - C_i (%)), e da eficiência de secagem esperada (Concentração ST desejada – C_f (%)); para o caso de estudo, foram considerados: $C_i = 20\%$ e $C_f = 90\%$;

- o cálculo do Volume de Lodo Desaguado (V_{LD} (m³/dia)) para a ETA; através da Concentração ST do lodo na saída do sistema de desaguamento (C_i (%)) e da massa específica do lodo desaguado ($\gamma = 1.200\text{Kg/m}^3$); ($V_{LD} = P_{ss} \div C_f \div \gamma$)
- a definição da Altura da Camada de Lodo (h (m)) na estufa;
- o cálculo do Tempo de Secagem necessário (T_s (dias)), a partir dos parâmetros de concentração de ST para o lodo (C_i e C_f) e da Taxa de Secagem do Lodo (T_{xs} (%ST/dia)); ($C_f - C_i$) / T_{xs})
- a 'Taxa de Secagem do Lodo' (T_{xs}), calcula em razão da 'Altura da Camada de Lodo' (h) na estufa, dada pela equação 13, desenvolvida a partir das taxas de secagem para cada altura de lodo estudada; ($T_{xs} = -1,93 \cdot h + 1,4$)
- o cálculo da Área Útil de secagem do lodo na estufa (A_{SL} (m²)), a partir da altura da camada de lodo na estufa (h (m)) e no Tempo de Secagem do Lodo (T_s (dias)). ($A_{SL} = V_{LD} \div h \cdot T_s$)

5.4.1. Cálculo da Produção de Sólidos Secos Totais

O cálculo da massa seca diária de lodo gerado na ETA, pode ser realizado através da equação empírica simplificada, dada por AWWA (1999). Foi admitindo a concentração média de SST da água bruta, por faixas de turbidez, conforme registros operacionais de 12 meses (2018) da medição de turbidez da água bruta da ETA em estudo, apresentado na Tabela 25.

Conforme observado na Tabela 25 a estimativa da média diária anual dos resíduos gerados na ETA em estudo é de 651 Kg/dia. Em cerca de 28% dos dias do ano (103 dias/ano) a média diária de massa seca gerada é de 348 Kg/dia, e em cerca de 1% dos dias do ano (4 dias/ano) a massa seca gerada é de 5.506 Kg/dia. Esta variação de turbidez, e conseqüentemente de massa seca de resíduos ocorre devido a eventos de chuvas no manancial de captação de água para tratamento na ETA.

Tabela 25. Estimativa da massa seca diária e anual gerada na ETA em estudo, no período de 2018

Faixa de Turbidez (uT)	Valor médio de turbidez adotado (uT)	SST Bruta (mg/L)	Frequência de ocorrência no ano ¹ (dias)		Dosagem de Coagulante (base alumínio - DAL) (mg/L)	Massa seca calculada ² (Kg/dia)	Massa seca total (Kg/ano)
até 20	20	20	103	28,2%	0,85	348	35.829
21 a 40	30	30	185	50,7%	0,90	495	91.644
41 a 75	60	60	56	15,3%	1,00	934	52.327
76 a 150	115	115	12	3,3%	1,15	1.737	20.844
151 a 250	200	200	5	1,4%	1,30	2.972	14.858
251 a 500	375	375	4	1,1%	1,50	5.506	22.022
Total (Kg/ano)							237.524
Média diária (Kg/dia)							651

¹ Considerando 12 meses - de janeiro a dezembro de 2018;

² Equação de AWWA (1999), considerando a vazão de 14.400m³/dia

Fonte: Autor, 2019.

5.4.2. Cálculo do Volume de Lodo Desaguado

A partir da média diária (anual) de geração de resíduos sólidos secos, 651Kg/dia, da concentração de ST de saída do sistema de desaguamento (centrífuga) de 20%ST e da massa específica do lodo após o desaguamento de 1.200Kg/m³, calcula-se o volume de lodo gerado diariamente na ETA:

$$V_{LD} = P_{ss} \div C_i \div \gamma$$

Onde,

V_{LD} - Volume de Lodo;

P_{ss} - Massa seca ou Produção de Sólidos Secos Totais;

C_i - Fração de ST Lodo desaguado

γ - Massa específica do Lodo desaguado

$$V_{LD} = 651\text{Kg/dia} \div 0,2 \div 1.200\text{Kg/m}^3$$

$$V_{LD} = 2,71\text{m}^3/\text{dia}$$

5.4.3. Cálculo do Tempo e da Área útil de Secagem do Lodo na Estufa

Conforme já apresentado, para o cálculo do Tempo de Secagem do lodo são necessários os parâmetros de concentração de ST para o lodo (C_i e C_f) e da Taxa de Secagem do Lodo, sendo que a 'Taxa de Secagem do Lodo' (T_{xs}) é calcula em razão da 'Altura da Camada de Lodo' (h) na estufa, dada pela Equação 13, desenvolvida a partir das taxas de secagem para cada altura de lodo estudada.

$$(T_{xs} = -1,93 \cdot h + 1,4)$$

O Tempo de Secagem do Lodo (T_s (dias)) é calculado através da fração de umidade a ser removida do lodo na estufa ($C_f - C_i$), dividida pela Taxa de Secagem do Lodo (T_{xs}).

$$(T_s = (C_f - C_i) \div T_{xs})$$

Para o cálculo da Área Útil de secagem do lodo na estufa (A_{SL}) deve realizar a divisão do Volume de Lodo Desaguado (V_{LD}) pela altura da camada de lodo (h) na estufa a ser adotada, multiplicado pelo Tempo de Secagem do Lodo (T_s).

$$(A_{SL} = V_{LD} \div h \cdot T_s)$$

De forma a avaliar a Área útil necessária para secagem de lodo na ETA em estudo, fixou-se a concentração de ST desejada do Lodo seco na Estufa (C_f) em 90% e adotou-se as variáveis de processo da ETA, conforme apresentado na Tabela 26. A partir destes dados de entrada, procedeu-se com os cálculos da Área útil para alturas de leiras variando a cada 5cm (iniciando em 10cm), bem como realizou-se os cálculos dos Tempos de Secagem necessários para cada altura da camada de lodo, conforme apresentado na Tabela 27.

A Figura 91 ilustra graficamente a variação da área útil necessária para secagem de lodo em estufa e razão da variação altura da leira de lodo. Na mesma figura, verifica-se a variação do Tempo de Secagem necessário em cada camada de lodo arbitrada.

Tabela 26. Variáveis de processo de tratamento de água da ETA em estudo

Variáveis de entrada	Valor	Unidade
Concentração ST na saída desaguamento	20,0	%
Vazão Água Bruta	14.400,0	m ³ /dia
Dosagem de Coagulante (base de Alumínio)	0,85	mg/L
SST (médio) água Bruta ¹	40,7	mg/L

¹ Média ponderada para o ano de 2018 (ver Tabela 25).

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 27. Variação da Taxa de Secagem e da Área Útil de secagem em relação à altura da camada de Lodo para a ETA em estudo

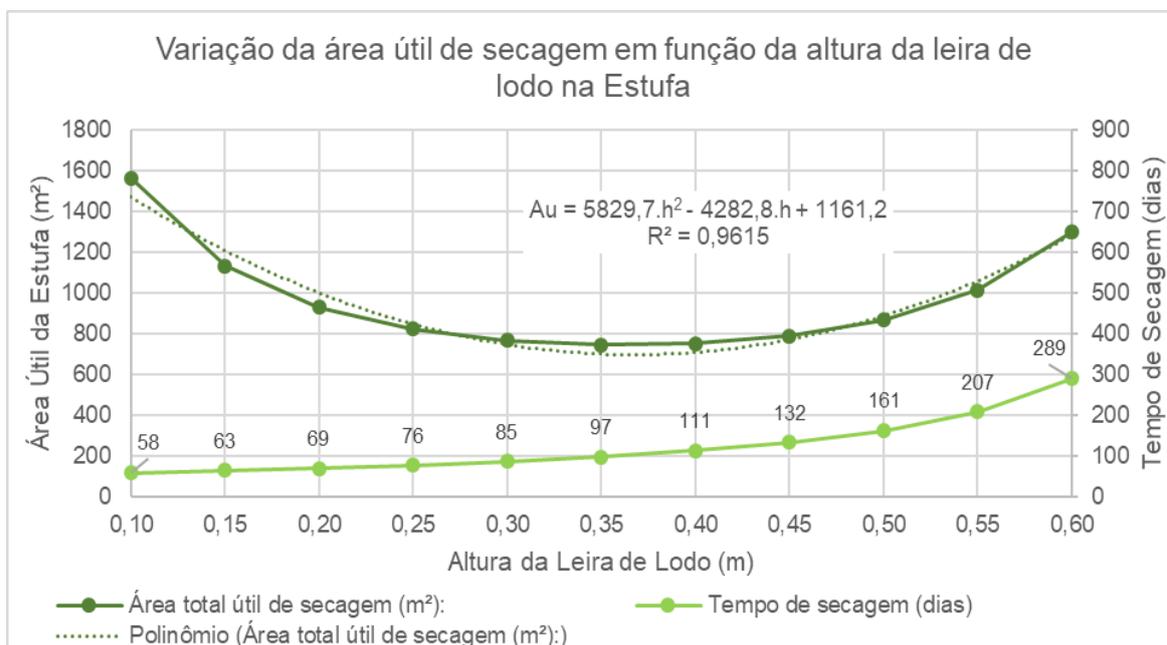
Altura da leira de lodo (m)	Taxa de secagem (%ST/dia)	Tempo de secagem calculado (dias)	Área total útil de secagem (m ²)
0,10	1,21	58	1.561
0,15	1,11	63	1.131
0,20	1,01	69	929
0,25	0,92	76	821
0,30	0,82	85	765
0,35	0,72	97	743
0,40	0,63	111	750
0,45	0,53	132	788
0,50	0,44	161	866
0,55	0,34	207	1.012
0,60	0,24	289	1.298

Fonte: Autor, 2019.

Em análise gráfica (Figura 91), verifica-se que a leira de 35cm é a altura de lodo que demanda a menor área útil para secagem na estufa. É evidente que quanto menor a altura (h) da leira de lodo, maior seria a área de secagem. Entretanto, a área útil da estufa também é função do tempo de secagem do lodo, e quanto maior a altura da leira (h) maior o tempo de secagem.

Conforme apresentado na Tabela 27 e Figura 91, para uma leira de 0,35m são necessários 97dias de secagem.

Figura 91. Variação da Área Útil e do Tempo de Secagem em relação à altura da camada de Lodo para a ETA em estudo



Fonte: Autor, 2019.

5.4.4. Desenvolvimento de Equação Geral para o Cálculo da Área Útil de Secagem de Lodo em Estufa

Após o procedimento sistemático para o cálculo da Área Útil de Secagem do lodo gerado na ETA em estudo, procedeu-se com a junção das etapas de cálculo apresentadas:

- Cálculo da Produção de Sólidos Secos Totais para a ETA;
- Definição de parâmetros da concentração de ST do lodo a ser seco na estufa;
- Cálculo do Volume de Lodo Desaguado para a ETA;
- Definição da Altura da Camada de Lodo na estufa;
- Cálculo do Tempo de Secagem necessário;
- Cálculo da Área Útil de secagem.

O resultado da junção das equações utilizadas no procedimento sistemático para o cálculo da Área Útil de Secagem do lodo gerado na ETA em estudo resulta na seguinte equação geral:

$$A_{SL} = \left(\frac{Q \cdot (4,89 \cdot D_{AL} + C_{AB})}{C_i \cdot \gamma \cdot h \cdot 10} \right) \cdot \left(\frac{C_f - C_i}{-1,93 \cdot h + 1,4} \right)$$

Equação 15

Onde,

A_{SL} – Área Total Útil de Secagem (m^2);

Q – Vazão Água Bruta (m^3/d);

D_{AL} - Dosagem de Coagulante (a base de Alumínio) (mg/L);

C_{AB} - SST (médio) Água Bruta (mg/L);

C_i - Concentração ST do Lodo na saída desaguamento (%);

C_f - Concentração ST desejada do Lodo seco na Estufa (%);

γ – Massa específica do Lodo desaguado (Kg/m^3) – em geral, $1.200Kg/m^3$;

h - Altura da Leira de Lodo (m).

Conforme observa-se na equação desenvolvida, as variáveis de entrada são parâmetros operacionais de uma ETA, com exceção da concentração de ST desejada do lodo seco na estufa (C_f) e da altura da leira de lodo (h), que são parâmetros a serem adotados no âmbito do dimensionamento da área útil de secagem da estufa.

Conforme observado, a altura de leira (h) de lodo que resulta na menor Área Útil de secagem da estufa (A_{SL}) para a ETA em estudo é $h = 35cm$, que resulta em uma $A_{SL} = 743,0m^2$, com um Tempo de Secagem de 97 dias.

5.4.5. Estimativa da Área Total de Operação da Estufa

Como exemplo de operacionalidade para a estufa a ser construída a partir da área útil (A_{SL}) calculada para secagem do lodo produzido na ETA em estudo, adotou-se a projeção de 1 leira por dia. Para o dimensionamento da área total de operação da estufa, a partir do deste critério adotado, realizou-se os seguintes procedimentos:

- Cálculo da área da leira para o volume de lodo gerado em 1 dia de operação;
- Cálculo da Área para cada leira;
- Cálculo da geometria de cada leira;
- Cálculo do número de leiras necessárias em virtude do tempo de secagem necessário para a altura de leira adotado.

A partir do Volume de Lodo desaguado igual a $2,71\text{m}^3/\text{dia}$, calculado no item 5.2.2 e admitindo uma altura de $0,35\text{m}$ para as leiras da estufa, seriam necessários $7,74\text{m}^2$ de área útil na estufa, por dia ($2,71\text{m}^3/\text{dia} \div 0,35$).

Desta forma, seriam necessárias 97 leiras de lodo (1 leira por dia x 97 dias de secagem), com $7,74\text{m}^2$ cada uma, com operação diária de preenchimento destas leiras como o lodo desaguado.

Admitindo a largura de $1,0\text{m}$ para cada leira de lodo, seria necessário um comprimento de $7,8\text{m}$.

A Figura 92 ilustra de forma esquemática a disposição das leiras de secagem planejadas para $0,35\text{m}$ de altura de lodo, com 97 dias de secagem. Foi admitido o espaçamento de $1,0\text{m}$ a cada duas leiras, como forma de facilitar a operação de preenchimento das mesmas, bem como portões de acesso para entrada de caminhões, caso necessário. Desta forma, seria necessária uma área total da unidade de secagem (estufa) na ordem de 1.530m^2 , ou seja, o dobro da área útil de secagem de lodo calculada.

No planejamento realizado esquematicamente, verifica-se que seria necessária uma área total de cerca de 1.529m^2 ($26\text{m} \times 58,8\text{m}$) para a operacionalização na estufa de secagem. Desta forma, a Área Total necessária para a estufa de secagem é de cerca de duas vezes a área útil calculada ($1.529\text{m}^2 \div 743\text{m}^2 = 2,05$):

$$A_T = 2 \cdot A_{SL}$$

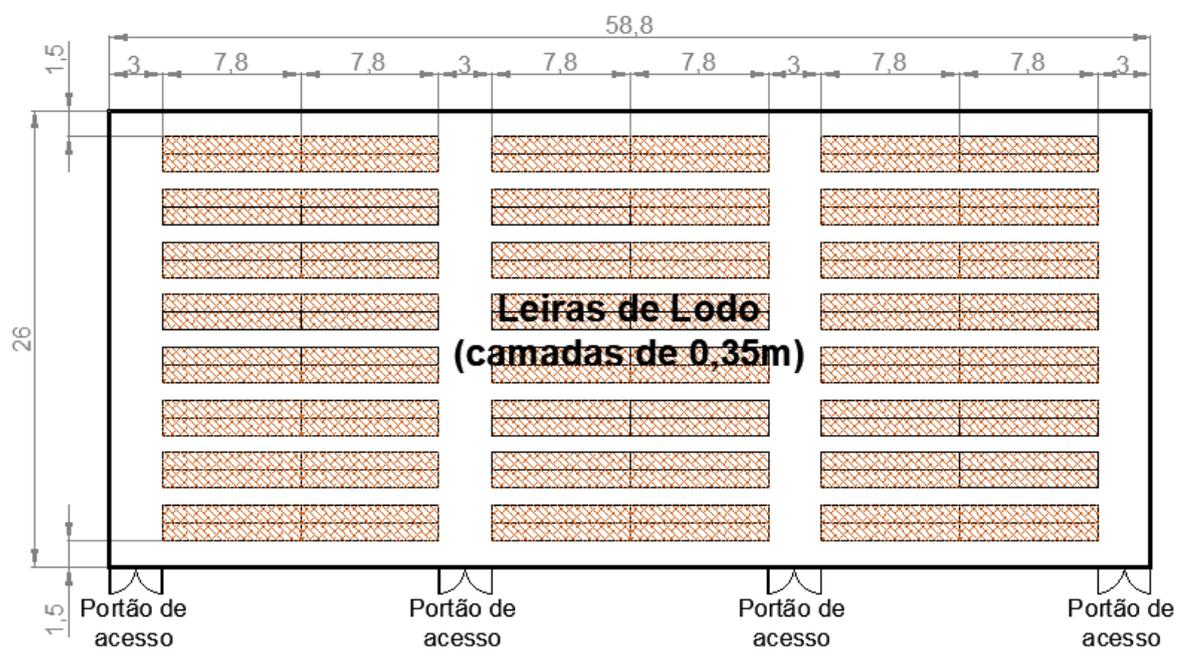
Equação 16

Onde,

A_T - Área Total da Estufa (m^2)

A_{SL} - Área Total Útil de Secagem (m^2)

Figura 92. Disposição esquemática das leiras de secagem na estufa para a ETA em estudo (leiras de 0,35m de altura de lodo desaguado e 97 dias de secagem)



Fonte: Autor, 2019.

6. CONCLUSÕES

De posse dos resultados são apresentadas na sequência as conclusões do presente trabalho.

As informações monitoradas em estações de tratamento de água, tais como turbidez, volume de água descartada durante os processos de lavagem dos filtros e raspagem dos flotadores, e, volume de água produzido, são essenciais para estimativa do volume de resíduos sólidos gerado no tratamento.

A equação empírica (AWWA, 1999) para estimativa dos sólidos secos totais gerados nos resíduos em ETA's apresentou um erro relativo igual a 7,2% em relação aos dados monitorados na ETA em estudo, sendo considerado um desvio relativamente baixo em virtude de ser uma estimativa empírica. Portanto, para os locais onde não se tem como quantificar os sólidos secos totais, recomenda-se a estimativa pela referida equação.

O monitoramento da concentração de sólidos totais (ST) do lodo seco na estufa piloto possibilitaram a determinação da taxa de secagem para as diferentes alturas das leiras de lodo estudadas, sendo que quanto maior a camada de lodo na estufa, maior será o tempo de secagem.

A 'taxa de secagem' em razão da 'altura da camada' de lodo na Estufa piloto possui uma relação linear, o que possibilita o cálculo do tempo de secagem do lodo na estufa para diferentes alturas das camadas de lodo.

O monitoramento da umidade externa à estufa de secagem (umidade média de cerca de 78,0%) permitiu verificar que, a fração de sólidos totais em torno de 90%, é um limite de secagem adequado para não possibilitar a absorção de umidade, o que tornaria a operação de secagem ineficiente.

A estufa de secagem natural é uma tecnologia que permite o alcance de cerca de 90% de ST do lodo de estações de tratamento de água, o que reduz de forma significativa o volume e o peso final dos resíduos gerados pela ETA.

A partir do estudo das variáveis de secagem do lodo em estufa piloto e do cálculo da massa seca de lodo gerado na ETA em estudo, dada partir da equação empírica dada por AWWA (1999), foi possível desenvolver uma equação geral para o cálculo da área útil necessária para a secagem natural do lodo em estufa:

$$A_{SL} = \left(\frac{Q \cdot (4,89 \cdot D_{AL} + C_{AB})}{C_i \cdot \gamma \cdot h \cdot 10} \right) \cdot \left(\frac{C_f - C_i}{-1,93 \cdot h + 1,4} \right)$$

Equação 15

Onde,

A_{SL} – Área Total Útil de Secagem (m²);

Q – Vazão Água Bruta (m³/d);

D_{AL} - Dosagem de Coagulante (a base de Alumínio) (mg/L);

C_{AB} - SST (médio) Água Bruta (mg/L);

C_i - Concentração ST do Lodo na saída desaguamento (%);

C_f - Concentração ST desejada do Lodo seco na Estufa (%);

γ – Massa específica do Lodo desaguado (Kg/m³) – em geral, 1.200Kg/m³;

h - Altura da Leira de Lodo (m).

Foi possível o desenvolvimento de uma metodologia para o dimensionamento de estufa de secagem natural de lodo para ETA a partir dos dados operacionais da unidade de tratamento tais como vazão, dosagens de produtos químicos, turbidez média e a concentração de sólidos da saída de lodo da ETA e concentração de sólidos desejada para o lodo seco.

Para a ETA Floto-filtração em estudo, cuja a vazão é de 600 m³/h, calculou-se uma geração de resíduos sólidos secos de 651 Kg/dia e um volume de lodo desaguado igual a 2,71m³/dia com concentração de 20% de sólidos totais.

Através da equação e metodologia desenvolvidas, foi previsto para a ETA em estudo uma área útil de secagem de 743,0m² para uma estufa de polipropileno, com leiras de 0,35m. O tempo de secagem previsto é de 97 dias.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros o desenvolvimento de pesquisas relacionadas a estufas de secagem natural, conforme apresentado na sequência.

7.1. ENSAIOS COM OS RESÍDUOS DIRETAMENTE DA ETA, OU SEJA, SEM DESAGUAMENTO PRÉVIO EM CENTRÍFUGA

Sugere-se que sejam desenvolvidos novos ensaios de secagem em estufa piloto com o lodo adensado da lavagem dos filtros e flotor (ou mesmo decantador para outras tecnologias de ETA), a invés do lodo já desaguado, conforme feito no trabalho aqui apresentado.

7.2. ENSAIOS EM ESTUFAS PILOTO COM REALIZAÇÃO DE REVOLVIMENTO DO LODO NAS LEIRAS DE SECAGEM, BEM COMO A UTILIZAÇÃO DE VENTILAÇÃO INTERNA

Conforme apontado nos trabalhos da literatura referenciada neste trabalho, especificamente da área de secagem natural de lodos (ETA e ETE), foram verificados melhores resultados (menor tempo de secagem) em processos de secagem com ventilação interna força da estufa, bem como com o revolvimento do lodo nas leiras de secagem. Desta forma, sugere-se que os ensaios de secagem natural de lodo em estufa sejam feitos sob ventilação forçada e revolvimento das leiras para obtenção de novos parâmetros do processo de secagem.

7.3. ESTUDO DE NOVOS MÉTODOS DE DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS SECOS EM ESTUFA, QUE NÃO SEJA A DISPOSIÇÃO EM ATERRO SANITÁRIO

Neste trabalho é apresentado uma metodologia para secagem de lodo, que garante a diminuição substancial do volume de lodo a ser disposto de forma ambientalmente correta, por exemplo, em aterros sanitários. Sugere-se novas pesquisas voltadas ao emprego deste lodo gerado para fabricação de tijolos, telhas e outros artefatos de cimento; utilização para fertilização de solos; recuperação de área degradadas; utilização como recobrimentos das células de resíduos nos aterros sanitários; e demais utilizações cujas características físicas, químicas e bacteriológicas do lodo de ETA sejam economicamente viáveis.

7.4. VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO DESENVOLVIDA PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTUFAS DE SECAGEM NATURAL PARA LODOS DE ETA

Conforme apresentado, foi possível desenvolver uma equação geral para o cálculo da Área Total Útil de Secagem para estufa de secagem natural para lodos de estações de tratamento de água. Sugere-se a realização de novos trabalhos em estações de tratamento de água de diferentes tecnologias, com a aplicação da metodologia aqui definida, de forma a validar a equação desenvolvida neste trabalho (equação 15).

REFERÊNCIAS

Abastecimento de Comunidades de Pequeno e Médio Porte. Pesquisa de Pós-Doutorado. Informe Científico Final. FAPESP. São Paulo/SP. Fevereiro.

ABRELP. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2017.** São Paulo, Publicação: Setembro, 2018. 74 p, 2018.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Leito de Drenagem: Sistema Natural para Redução de Volume de Lodo de Estação de Tratamento de Água.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 13, n. 1, p. 54-62, 2008.

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. **Destinação e disposição final de lodo gerado em ETA - Lei 12.305/2010.** In: 45ª Assembleia Nacional do ASSEMAE - Saneamento Ambiental: políticas integradas com participação social, Poços de Caldas - MG, 2015.

ACHON, C. L.; VALE, M. N. **Estudo da aplicabilidade de indicadores para a Gestão de Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** Cidades Verdes, v.04, n.10, 2016, pp. 39-49

ACHON, C.L.; CORDEIRO, J.S. (2013). **Riscos da destinação de lodos de ETAs - Leis 9.605/1998 e 12.305/2010.** In: XVII Exposição de Experiências Municipais em Saneamento. 43º Assembléia nacional do ASSEMAE, de 19 a 24 de maio de 2013, Vitória, ES, Brasil, VII-28, 2013. 13p.

ACRIPLAS (2019). Disponível em: <<http://www.acriplas.com.br/>>. Acesso em: março de 2019.

ADANI, F.; BAIDO, D.; CALCATERRA, E.; GENEVINI, P. **The influence of biomass temperature on biostabilization–biodrying of municipal solid waste.** Bioresource Technology 2002, 83(3), 173–179.

AL-MUZAINI, S. (2003). **Performance Of Sand Drying Beds For Sludge Dewatering.** The Arabian Journal for Science and Engineering. Volume 28, Number 2B

ANDREOLI, C.V. (2001) **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Projeto PROSAB 2. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 282p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004:2004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71p.

AZEVEDO, S.M.F.Q. **Toxinas de cianobactérias: causas e consequências para a saúde pública**. Medicina on Line, v.1, p.1-24. 1998.

AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. (1999) **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies** . New York: McGraw-Hill.

BARROSO, M. M.; ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. (2006). **Eficiência do Leito de Drenagem para Desaguamento de Lodo de ETA que Utiliza Sulfato de Alumínio como Coagulante**. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 30., 2006, Punta del Este. Anais... Montevideo: AIDIS.

BENAMOUN, L. (2012). **Solar drying of wastewater sludge: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 16, Issue 1, pp. 1061– 1073.

BISOGENIN, J.L.B.; IDE, C.N.; IMOLENE, L.M. (1999). **Secagem de lodo de ETA em leitos convencionais**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 20., Rio de Janeiro. ABES.II-074

BRASIL. Lei n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico**; altera as Lei n. 6.766, de 19 de dezembro de 1979, n. 8.036, de 11 de maio de 1990, n. 8.666, de 21 de junho de 1993, e n. 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei n. 6.528, de 11 de maio de 1978. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ano 144, n. 8, 8 jan. 2007. Seção 1, p. 3-7. Retificada no Diário, 11 jan. 2007, Seção 1, p.1. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/Cci/Vil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm>. Acesso em: set. 2018.

BRASIL. Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, **Lei de Crimes Ambientais**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e

atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 fev. 1998. Seção 1, p. 1.

BRASIL. Lei n.º 9433, de 08 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 08 de jan. 1997.

BRASIL. Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001. **Regulamenta os Art. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.**

BRASIL. Ministério da Saúde. (2011). **Portaria MS n. 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Diário Oficial da União,

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. (2006). **Boas práticas no abastecimento de água: procedimentos para a minimização de riscos à saúde. Série A - (Normas e Manuais Técnicos).** Brasília: Ministério da Saúde. 252 p.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2017.** Brasília: SNS/MDR. 226 p, 2019.

BRASIL. Resolução CONAMA n.º 430, DE 13 DE MAIO DE 2011. **Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes**, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA”. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 mai. 2005, p. 89. Brasília, DF, 14 dez. 2011.

BUX, M., & BAUMANN, R. (2003). Performance, Energy **Consumption and Energetic Efficiency Analysis of 25 Solar Sludge Dryers.** Proceedings of the

Water Environment Federation, WEFTEC 2003: Session 1 through Session 10, pp.522-534(13).

CBH-PCJ. Oficina de lançamento dos resultados da 1º Etapa: **Estudo de viabilidade para instalação e operação de centrais de lodos nas Bacias PCJ.**

Consórcio das Bacias Hidrográficas PCJ - Piracicaba, Capivari e Jundiá, 7 p.

Disponível em <<http://www.agua.org.br/apresentacaoarquivos.aspx?id=73>>. Acesso em: dez. 2018.

CETESB. Licenciamento Ambiental – CADRI, 2011. Disponível em:

<<https://www.cetesb.sp.gov.br/?s=CADRI>>, acesso em dezembro de 2018.

DANTAS, A. D. B.; PASCHOALATO, C. F. P. R.; BALLEJO, R. R.; DI BERNARDO, L. **Pré-oxidação e adsorção em carvão ativo granular para remoção dos herbicidas diuron e hexazinona de água subterrânea.** Engenharia sanitária e ambiental, v. 14, n. 3. p. 373-380, jul./set. 2009.

DAVID, Airton Checoni. Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da

Universidade de São Paulo. 2002. Disponível em: <

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-30042003.../Revisada.PDF>>

Acesso em: 02/04/2019.

DECRETO N. 8.468, DE 8 DE SETEMBRO DE 1976 Aprova o Regulamento da Lei n. 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B; VOLTAN, P. E. N. (2012). **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** São Carlos: Ldibe.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** 2 ed. São Carlos: Rima Editora, v. 2. 1584 p, 2005.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTRAN, P.E.N. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** São Carlos: LDiBe, 540 p, 2012.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2008. v. 1.

EPA. (1987). **Innovations In Sludge Drying Beds A Partical Technology**.

FLAGA, A. (2007). **Sludge Drying**. Institute of Heat Engineering and Air Protection, Cracow University of Technology, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland.

FONDA, KENNETH D., LYNCH, EIAN (2009). **Going for the Green in Thermal Drying: Evaluation of Innovative New Technologies and Industry Trends**. Proceedings of the Water Environment Federation, Residuals and Biosolids, WEF, pp. 1019-1043(25).

HELLER, L. **Saneamento e saúde**. Organização Panamericana de Saúde da Organização Mundial da Saúde. Representação do Brasil. Brasília, 1997.

HII, C., JANGAM, S., ONG, S., MUJUMDAR, A. (2012). **Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations**.

HUBER. **Solar Active Dryer SRT Brochure**, (2007). Huber, M. M., Gobel, A., Joss, A., Hermann.

IMPAC (2019). Disponível em: <<https://www.impact.com.br/coletor-dados/registrator-umidade-ip747rh-coletor-de-dados-temperatura.html>>. Acesso em: março de 2019.

KORNIS, Mônica Almeida. **O Brasil de JK - Sociedade e cultura nos anos 1950**. Disponível em: <<http://cpdoc.fgv.br/producao/dossies/JK/artigos/Sociedade/Anos1950>>. Acesso em: 24 de jan. de 2014.

KROKIDA, M.K.; MAROULISA, Z.B. **Effect of drying method on shrinkage and porosity**. Drying Technology 1997, 15(10), 2441–2458.

LIMING Shao, TIANFENG Wang, LING ZHAO, Guanzhao Wang, FAN LU", and PINJING He. **The Effect of Adding Straw on Natural Solar Sludge Drying**. Drying Technology, 33: 414–419, 2015.

LOPES, L.N.A.; MACHADO, R.C.; PEREIRA, J.A.R. (2004). Desagumamento de lodo de ETA em leito de secagem com e sem cobertura. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, SILBESA, 11., Natal, RN, Brasil.

MAGLIO, Ivan Carlos. **A Sustentabilidade Ambiental: Novo Desafio para o Plano Diretor**. Disponível em:

<http://www.belem.pa.gov.br/planodiretor/pdfs/Plano_Diretor_e_Sustentabilidade_Urbana.pdf>. Acesso em: 19 de dez. de 2018.

MARTE CIENTÍFICA (2019). Disponível em: <<http://www.marte.com.br/produto/375/medidor-de-umidade-id-200>> Acesso em: Março de 2019.

MATHIOUDAKIS, V.L., KAPAGIANNIDIS, A.G., ATHANASOULIA, E., DIAMANTIS, V.I., MELIDIS, P. VE AIVASIDIS, A. (2009). **Extended Dewatering of Sewage Sludge in Solar Drying Plants**. Desalination, Volume 248, Issues 1–3, pp. 733–739.

MATHIOUDAKIS, V.L., KAPAGIANNIDIS, A.G., ATHANASOULIA, E., PALTZOGLU, A.D., MELIDIS, P., AIVASIDIS, A., 2013. **Sewage sludge solar drying: experiences from the first pilot-scale application in Greece**. Dry. Technol. 31 (5), 519e526.

MAYIS Kurt, AYS, EGU" I AKSOY*, F. DILEK Sanin. **Evaluation of solar sludge drying alternatives by costs and area requirements**. Water Research 82 - 47 e 57. (Ankara, Turkey - 2015)

ÖĞLENI, N., ÖZDEMİR, S. (2010). **Pathogen reduction effects of solar drying and soil**. Tubitak Turk J Agric For 34, pp. 509-515.

OLIVEIRA, N. S. (2010). **Estudo da Secagem de Lodo de Estação de Tratamento de Água**. 208p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

PÁDUA, V. L. (Coord.). **Remoção de microorganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

PAGANINI, W. S. (2009). **Alternativas para a Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água e Estações de Tratamento de Esgotos**. SANEAS, São Paulo, n.32, p.13-19, 2009.

PASCHOALATO, C. F. P. R.; DANTAS, A. D. B.; ROSA, I. D. A.; FALEIROS, R. J. R.; DI BERNARDO, L.; **Uso de carvão ativado para remoção dos herbicidas diuron e hexazinona**. Revista DAE, São Paulo, n. 179, p. 34-41, jan. 2009.

PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO. Prefeitura do município de Jahu. Dezembro de 2013. Disponível em: < <http://www.jau.sp.gov.br/>> acesso em dezembro/2018.

PROSAB. Reali, Marco Antônio Penalva (coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. ABES, 1999. Rio de Janeiro. 240 p.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodo de estação de tratamento de água**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2009.

RITTERBUSCH S., BUX M. (2012). "Solar **Drying of Sludge - Recent Experiences in Large Installations**. 3rd European Conference on Sludge Management, September 6-7, Leon, Spain.

SABOGAL PAZ, L. P.; Oliveira, R. H.; Carrijo, B. I.; Prado, S. G. (2003). **Lodos gerados em Estações de Tratamento de Água – Situação no Brasil. Encontro Latino Americano de Resíduos Sólidos. São Paulo**. Brasil.

SACAMOTO, Peterson Henrique, **Avaliação dos processos fenton e fotofenton aplicado no tratamento de um efluente sintético contendo o antibiótico amoxicilina**. Dissertação (mestrado) - universidade de ribeirão preto, UNAERP, Tecnologia ambiental. Ribeirão Preto, 2014.

SAKAMOTO, Jaqueline Akiko. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água para Pequenas e Médias Comunidades Brasileiras Considerando Aspectos Ambientais**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

SALIHOGU, K.N.; PINARLI, V.; SALIHOGU, G. **Solar drying in sludge management in Turkey**. *Renewable Energy* 2007, 32(10), 1661–1675.

SCHALCH, Valdir. **Resíduos Sólidos**: curso do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – UNAERP, setembro de 2015. 18f. Notas de Aula. PDF.

SCHALCH, Valdir; Soares de Castro, Marco Aurélio; Córdoba, Rodrigo Eduardo. **Tratamento e Disposição Final Ambientalmente Adequada de Resíduos Sólidos Urbanos**. Apostila do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP – Núcleo de Estudo e Pesquisa em Resíduos Sólidos – Neper – 1ª edição. São Carlo – 2015.

SCHARENBERG U.M., PÖPPKE M. (2010). **Large-scale Solar Sludge Drying in Managua/Nicaragua**. *Water and Waste*

SILVA JÚNIOR, Jeconias Rosendo da, PASSOS, Luciana Andrade dos. **O negócio é participar: a importância do plano diretor para o desenvolvimento municipal**. – Brasília DF: CNM, SEBRAE, 2006. 32 p.

SOUZA JÚNIOR, J. R. **Das Infrações Administrativas Ambientais. Sistema nacional de proteção ambiental: polícia administrativa ambiental** (pp. 158-185). (2007) Belo Horizonte: Del Rey.

SOUZA T. M. M. de; ALMEIDA A. de F.; **Caracterização Físico-Química do Resíduo (Lodo) de ETA, no período de seca, em Várzea Grande – MT**. *E&S – Engineering and Science*, (2017), 6:1.

TRATA BRASIL. Instituto Trata Brasil - Principais estatísticas – Universalização. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/universalizacao>>. Acesso em: set. 2018.

WEATHERSPARK (2019). Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/30068/Clima-caracter%ADstico-em-Ja%BA-Brasil-durante-o-ano>> Acesso em: Março de 2019.

WERTHERA, J., OGADAB, T. (1999). **Sewage sludge combustion**. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 25, Issue 1, pp 55–116.

ANEXO

ANEXO A - RESULTADOS ANALITICOS DA AMOSTRA – LODO DA ETA

Caracterização de Resíduo segundo NBR 10.004



RESULTADOS ANALITICOS DA AMOSTRA

Lodo

Coletor da Amostra: Thiago Picoli (Bioagri-Pira) - Bioagri Ambiental Ltda. A amostragem foi realizada com base na NBR 10007:2004 – Amostragem de Resíduos Sólidos

⇒NBR 10004 - Massa Bruta

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
Líquidos Livres			Presentes	
Oleos e Graxas	% p/p	0,25	< 0,25	

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
pH (Suspensão 1:1)		2 a 13	7,14	2,0 - 12,5 (b)
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	5	< 5	500 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0,05	19,9	
Cianeto (como HCN)	mg/kg	0,5	1,3	250 (c)

⇒NBR 10005 - Lixiviado

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Bário	mg/L	0,01	0,554	70,0
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Chumbo	mg/L	0,01	0,052	1,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Mercurio	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,1
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Selênio	mg/L	0,008	< 0,008	1,0

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Fluoreto	mg/L	0,1	< 0,1	150

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Orgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
1,1-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	3,0
1,2-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	1,0
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	7,5
2,4,5-T	mg/L	0,001	< 0,001	0,2
2,4,5-TP	mg/L	0,001	< 0,001	1,0
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	0,001	< 0,001	400
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	0,0005	< 0,0005	20,0
2,4-D	mg/L	0,0005	< 0,0005	3,0
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	0,001	< 0,001	0,13
Aldrin + Dieldrin	mg/L	3E-5	< 3E-5	0,003
Benzeno	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Benzo(a)pireno	mg/L	5E-5	< 5E-5	0,07
Clordano (isômeros)	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,02
Cloreto de Vinila	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Clorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	100
Clorofórmio	mg/L	0,001	< 0,001	6,0
DDT (isômeros)	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,2
Endrin	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,06
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Hexacloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	3,0
3+4-Metilfenol (m+p-Cresol)	mg/L	0,002	< 0,002	200
Metoxicloro	mg/L	0,0005	< 0,0005	2,0
Nitrobenzeno	mg/L	0,0002	< 0,0002	2,0

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Orgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
2-Metilfenol (o-Cresol)	mg/L	0,001	< 0,001	200
Pentaclorofenol	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,9
Piridina	mg/L	5	< 5	5,0
Tetracloro de Carbono	mg/L	0,001	< 0,001	0,2
Tetracloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	4,0
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,5
Tricloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	7,0
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	2E-5	< 2E-5	0,003
Lindano (g-BHC)	mg/L	5E-5	< 5E-5	0,2
Metiletilcetona	mg/L	5	< 5	200

NBR 10005:2004 - Lixiviado

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Tempo de Lixiviação	h	---	18	16 - 20
Solução de Extração	---	---	2	---
pH Final do Lixiviado	---	---	5,1	---

⇒NBR 10006 - Solubilizado

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Cloreto	mg/L	0,5	12,3	250
Fluoreto	mg/L	0,05	< 0,05	1,5
Nitrato (como N)	mg/L	0,1	0,2	10,0
Sulfato	mg/L	0,5	7,9	250

NBR 10006:2004 - Solubilizado - Parâmetros Inorgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Alumínio	mg/L	0,01	0,710	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	0,01	0,061	0,7
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,05	< 0,05	0,07
Cobre	mg/L	0,005	< 0,005	2,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Ferro	mg/L	0,01	0,236	0,3
Índice de Fenóis	mg/L	0,005	0,075	0,01
Manganês	mg/L	0,01	0,907	0,1
Mercúrio	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,001
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Selênio	mg/L	0,008	< 0,008	0,01
Sódio	mg/L	0,5	9,2	200
Surfactantes (como LAS)	mg/L	0,1	< 0,1	0,5
Zinco	mg/L	0,01	0,077	5,0

NBR 10006:2004 - Solubilizado - Parâmetros Orgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
2,4,5-T	mg/L	0,001	< 0,001	0,002
2,4,5-TP	mg/L	0,001	< 0,001	0,03
2,4-D	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,03
Aldrin + Dieldrin	mg/L	3E-5	< 3E-5	0,00003
Clordano (isômeros)	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,0002
DDT (isômeros)	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,002
Endrin	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,0006
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,001
Metoxicloro	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,02
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,005
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	2E-5	< 2E-5	0,00003
Lindano (g-BHC)	mg/L	5E-5	< 5E-5	0,002

NBR 10006:2004 - Solubilizado

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
------------	---------	----	-----------------------	--------------------

**NBR 10006:2004 - Solubilizado**

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
pH Final do Solubilizado	---	0-14	7,6	