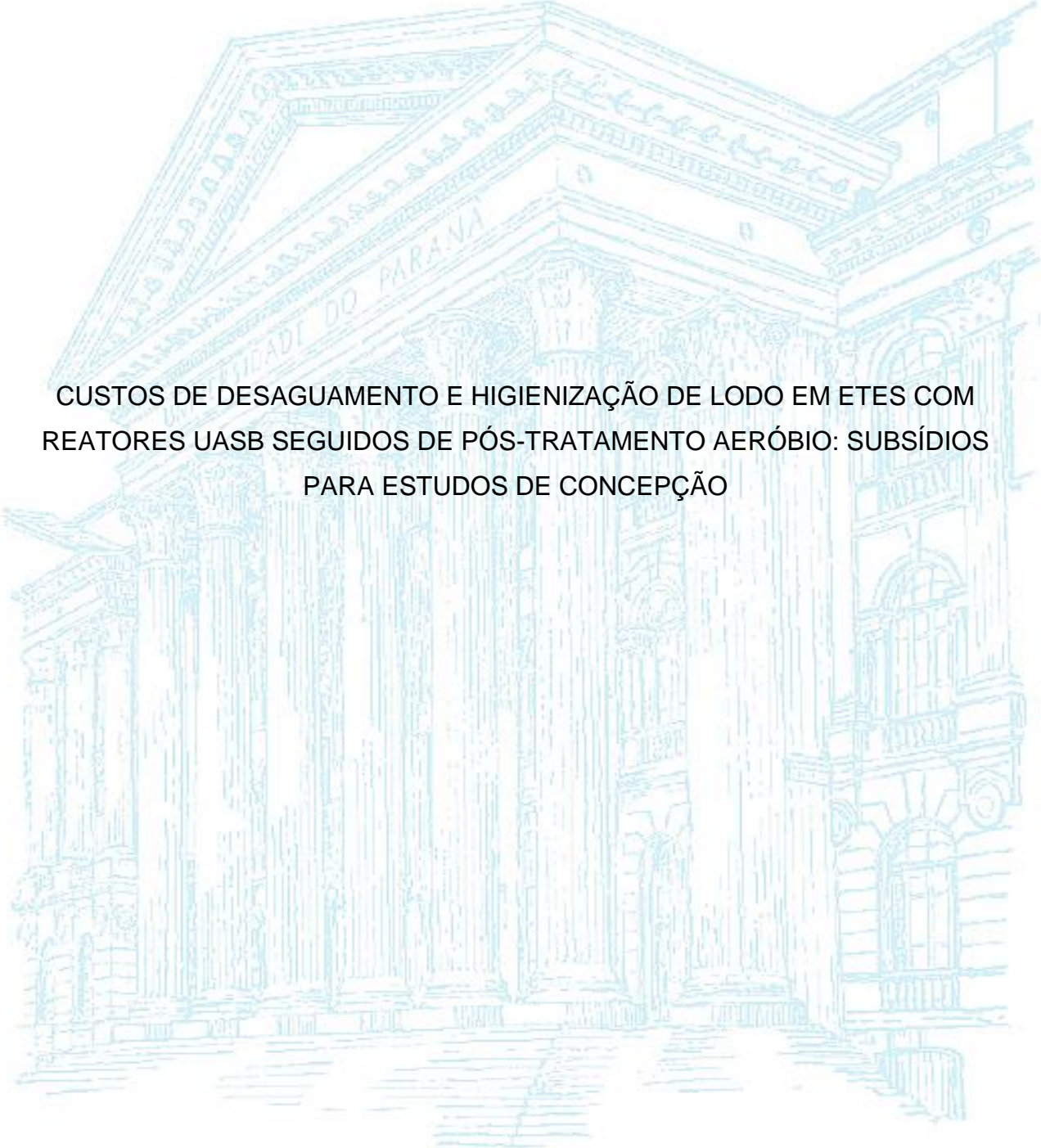


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO LINDSTRON WITTICA CERQUEIRA



CUSTOS DE DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DE LODO EM ETES COM
REATORES UASB SEGUIDOS DE PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO: SUBSÍDIOS
PARA ESTUDOS DE CONCEPÇÃO

CURITIBA

2019

PEDRO LINDSTRON WITTICA CERQUEIRA

CUSTOS DE DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DE LODO EM ETES COM
REATORES UASB SEGUIDOS DE PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO: SUBSÍDIOS
PARA ESTUDOS DE CONCEPÇÃO

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Mansur Aisse

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C416c

Cerqueira, Pedro Lindstron Wittica

Custos de desaguamento e higienização de lodo em ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio: subsídios para estudos de concepção / Pedro Lindstron Wittica Cerqueira. – Curitiba, 2019.

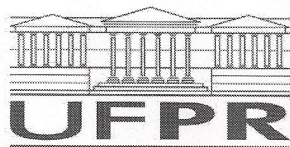
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2019.

Orientador: Miguel Mansur Aisse.

1. Lodo de esgoto. 2. Esgotos. 3. Águas residuais – eliminação - custos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Aisse, Miguel Mansur. III. Título.

CDD: 628.364

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



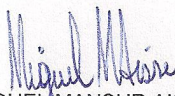
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL - 40001016021P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **PEDRO LINDSTRON WITTICA CERQUEIRA** intitulada: **CUSTOS DE DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DE LODO EM ETES COM REATORES UASB SEGUIDOS DE PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO: SUBSÍDIOS PARA ESTUDOS DE CONCEPÇÃO.**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 24 de Maio de 2019.


MIGUEL MANSUR AISSE

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)



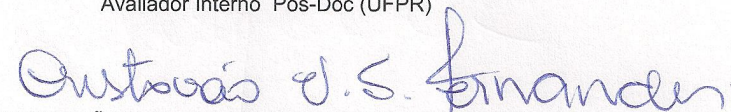
PEDRO ALEM SOBRINHO

Avaliador Externo (USP)



KARINA GUEDES CUBAS DO AMARAL

Avaliador Interno Pós-Doc (UFPR)


CRISTOVÃO VICENTE SCAPULATEEMPO FERNANDES

Avaliador Interno (UFPR)

Ao Professor Dr. Miguel Mansur Aisse,
pelo exemplo de humildade e dedicação à ciência,
dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela oportunidade de viver e aprender a cada dia que passa, e ter forças para enfrentar todos os desafios que surgem.

Aos meus pais, Sérgio e Claudia, e minha irmã Marina, pelo carinho e incentivo que me dão, sempre almejando o meu bem.

Ao Professor Dr. Miguel Mansur Aisse, que me oportunizou trabalhar em uma de suas linhas de pesquisa, sendo receptivo desde o primeiro contato, e me acompanhou neste percurso como orientador e amigo.

Agradeço à Professora Dr^a. Selma A. Cubas, que me deu o primeiro incentivo a iniciar o mestrado e também me estimulou a crescer profissionalmente.

Ao Prof. Dr. Harry A. Bollmann, pelas inspirações a ampliar o conhecimento.

A todos os professores do PPGERHA, que me transmitiram ricos conhecimentos com muita competência e seriedade, bem como à instituição que me possibilitou com eles aprender, Universidade Federal do Paraná.

Aos colegas e amigos do mestrado, Rodrigo Godoy, Júlio Rietow, Will Correa, Túlio, Taiane e todos os demais que compartilharam esta experiência.

Agradeço à minha noiva, Camila, que esteve comigo por todo este tempo como um braço direito, um ombro amigo e uma companhia que não abro mão.

Ao meu primo, Filipe Lima Dornelas, pelos sábios e preciosos conselhos.

Ao meu amigo Adhemar Romero, a quem devo atribuir parte de minhas inspirações, principalmente à força de vontade!

Aos profissionais e amigos da SANEPAR, César A. Marin, Simone Bittencourt, Inácio Andrade, David Garcia, José Geraldo e todos os demais que foram extremamente solícitos no fornecimento de informações e troca de experiências.

Aos profissionais das empresas Albrecht, Perialisi, Fast Indústria, Andritz e Wetlands Construídos, que me atenderam com muita atenção e respeito. Em especial, ao Luiz Ferreira da Albrecht e ao André B. Barreto da Wetlands Construídos.

Aos novos colegas de trabalho e amigos da SANEAGO, Fausto Batista, Fábio Julian, Marco Jardim, Rodrigo, Felipe Carvalho, Leandro Roncato, Alah, Abigail e todos os demais, que me acolheram e ajudaram a enriquecer este trabalho.

Por fim, agradeço aos meus amigos e familiares, pelas palavras de incentivo e compreensão de minha ausência, em diversas ocasiões, sempre desejando-me o melhor.

RESUMO

O lodo de esgoto, proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), requer tratamento e disposição final adequados, o que demanda elevados custos de implantação e operação de unidades destinadas ao processamento deste subproduto. Os reatores UASB possibilitam, além da redução da carga orgânica dos esgotos, a digestão e o adensamento do lodo produzido, de forma que este pode ser encaminhado diretamente às etapas de desaguamento e higienização. Para a fase líquida, há uma tendência de serem implementados sistemas aeróbios, como pós-tratamento dos reatores UASB, devido à limitada capacidade destes na remoção de poluentes. Com isto, a produção de lodo deverá aumentar e, conseqüentemente, os custos associados. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os custos de implantação (CAPEX) e operação (OPEX) de sistemas de desaguamento e higienização de lodo proveniente de ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio, visando subsidiar Estudos de Concepção. As alternativas tecnológicas avaliadas foram: Leitões de Secagem, Centrífugas, Wetlands Construídos para Lodo (WCL), Estabilização Alcalina Prolongada (EAP) e Secagem Térmica. Como métodos empregados, inicialmente, realizaram-se pesquisas bibliográficas e entrevistas com profissionais da área de saneamento, para se investigarem questões relacionadas ao dimensionamento de estruturas de tratamento de lodo não consolidadas ou pouco abordadas na literatura. Em seguida, foram dimensionados os sistemas, para então serem estimados os custos de implantação e operação, bem como elaboradas ferramentas de auxílio em Estudos de Concepção. Avaliaram-se os custos para ETEs com vazões de 5 a 750 L/s. Como resultados, obtiveram-se refinamento dos critérios e parâmetros adotados, tais como coeficientes de produção de sólidos dos sistemas de tratamento de esgoto considerados; fluxogramas alternativos de descarte do lodo aeróbio de excesso em ETEs com reatores UASB e Pós-tratamento aeróbio; dimensionamento de Tanques de Equalização, equipamentos mecânicos de desaguamento de lodo, Leitões de Secagem e pátios de higienização de lodo por EAP. Para estes últimos, propôs-se uma metodologia análoga à dos leitões de secagem, com taxa de aplicação de sólidos de até 350 kgST/m² e tempo de ciclo de 1 ano. Quanto à avaliação dos custos, verificaram-se as faixas de vazão em que cada tecnologia estudada é mais econômica, sem se considerar os custos de aquisição de área e destinação final do lodo, devido à grande variabilidade destes itens. Os leitões de secagem mostraram-se mais econômicos que as centrífugas para toda a faixa de vazão em que foram considerados (5 a 160 L/s), mas, quando considerado apenas o CAPEX, superaram o custo das centrífugas em ETEs acima de 80 L/s. Uma alternativa mista de leitões de secagem em paralelo às centrífugas foi avaliada, porém, apresentou-se mais onerosa que as demais. Os WCL apresentaram-se com CAPEX superior ao das centrífugas para ETEs acima de 120 L/s, mas foram a alternativa mais econômica de desaguamento de lodo quando considerados CAPEX e OPEX. A consideração da EAP após o desaguamento aumentou de 80 para 130 L/s a vazão em que o CAPEX dos leitões é superior ao das centrífugas. A EAP apresentou-se mais econômica do que a secagem térmica para toda a faixa de vazões, mas, quando considerado apenas o CAPEX, tornou-se mais onerosa para ETEs a partir de 500 L/s. Por fim, desenvolveram-se 4 Ferramentas de Auxílio em Estudos de Concepção: F1) Funções custo das alternativas de desaguamento e higienização de lodo; F2) Custos de implantação e operação de alternativas de desaguamento de lodo; F3) Custos de implantação e operação de alternativas de higienização de lodo; F4) Custos totais, requisitos de área e destinação

de lodo para diferentes alternativas de tratamento de lodo. Juntas, as ferramentas podem auxiliar em estudos para diversas realidades de empresas de saneamento.

Palavras-chave: Avaliação de alternativas. Custos de Implantação. Custos de Operação. Estabilização Alcalina Prolongada. Lodo Misto Anaeróbio Aeróbio. Secagem Térmica. Tomada de decisão. Wetlands Construídos para Lodo.

ABSTRACT

Sludge, from Sewage Treatment Plants (STPs), requires adequate treatment and final disposal, which demands high capital and operational expenditures in units destined to processing this endproduct. In addition to reducing the sewage organic matter, UASB reactors allow the sludge digestion and thickening, so that it can be sent directly to the dewatering and disinfection processes. For the liquid phase, there is a tendency of aerobic systems be used as post-treatment of the UASB reactors, due to its limited capacity of pollutants removal. With this, sludge production is expected to increase, and consequently, the associated costs. The objective of this study was to evaluate the capital costs (CAPEX) and the operation costs (OPEX) of sludge dewatering and disinfection, from STPs with UASB reactors followed by aerobic post-treatment, aiming to subsidize Conception Studies. The technological alternatives evaluated were: Drying Beds, Centrifuges, Sludge Drying Reed Beds (SDRBs), Alkaline Stabilization and Thermal Drying. As methods used, initially, bibliographical researches and interviews with utilities professionals were carried out to investigate some undefined, or not easily found in the literature, questions related to design parameters of sludge treatment facilities. Next, the systems were dimensioned thus enabling the CAPEX and OPEX valuation, as well as the formulation of assistant tools for Conception Studies. The costs of sludge processing were evaluated for STPs ranging from 5 to 750 L/s. As results, polishment of the adopted criteria and parameters was obtained, such as the solids production coefficient; alternative flow diagrams of excess aerobic sludge in STPs with UASB reactors followed by aerobic post-treatment; Equalizing Tanks, Sludge Dewatering and Alkaline Stabilization design parameters. A methodology was proposed for alkaline stabilization area estimate, with a solids application rate up to 350 kgTS/m² and 1 year of cycle time. In relation to the costs assessments, sewage flow rates in which each technology is more economical were verified, without considering the costs of land acquisition and final disposal of the sludge, due to the great variability of these items. The drying beds were more economical than the centrifuges for the entire flow range in which they were considered (5 to 160 L/s), but when considered only the CAPEX, they exceeded the costs of the centrifuges in STPs above 80 L/s. A mixed alternative of drying beds in parallel to the centrifuges was evaluated, however, it was more expensive than the others. The SDRBs presented a superior CAPEX than the centrifuges for STPs above 120 L/s, but they were the most cost effective alternative of sludge dewatering when considered CAPEX and OPEX. The post-dewatering alkaline stabilization increased the STPs flow rate at which the CAPEX of the centrifuges is lower than the drying beds, from 80 to 130 L/s. Alkaline stabilization was more cost effective than heat drying for the entire flow range evaluated, although, when considered only CAPEX, it became more expensive for STPs above 500 L/s. Finally, 4 assistant tools for Conception Studies were developed: F1) Cost functions of sludge dewatering and disinfection alternatives; F2) CAPEX and OPEX of sludge dewatering alternatives; F3) CAPEX and OPEX of sludge disinfection alternatives; F4) Total costs, area requirements and allocation of sludge for different sludge treatment alternatives. Together, these tools may be helpful in studies for different realities.

Key-words: Alkaline Stabilization. Alternatives Evaluation. Capital costs. Decision making. Blended anaerobic aerobic sludge. Heat drying. Operational costs. Sludge Drying Reed Beds.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 – ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA..... | 24 |
| FIGURA 2 – CONFIGURAÇÃO DOS REATORES UASB..... | 26 |
| FIGURA 3 – ROTAS DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS | 28 |
| FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DE SISTEMAS UASB + PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO | 30 |
| FIGURA 5 – METABOLISMO BACTERIANO NO TRATAMENTO DE ESGOTOS | 34 |
| FIGURA 6 – FORMAS DE ASSOCIAÇÃO ÁGUA-SÓLIDO NO LODO DE ESGOTO | 39 |
| FIGURA 7 – CORTE ESQUEMÁTICO DE LEITO DE SECAGEM | 41 |
| FIGURA 8 – EXEMPLO DE LEITOS DE SECAGEM COBERTOS | 43 |
| FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO DA CENTRÍFUGA DECANter | 44 |
| FIGURA 10 – PRÉDIO DAS CENTRÍFUGAS – ETE STA QUITÉRIA (SANEPAR)..... | 45 |
| FIGURA 11 – PRÉDIO DAS CENTRÍFUGAS – ETE HÉLIO SEIXO DE BRITO (SANEAGO) | 46 |
| FIGURA 12 – DESENHO ESQUEMÁTICO E SISTEMA PILOTO DOS WETLANDS CONSTRUÍDOS PARA LODO..... | 47 |
| FIGURA 13 – WCL IMPLANTADA EM ETE PARA 1.750 HABITANTES | 49 |
| FIGURA 14 – PÁTIO DE CURA DA UGL ETE RONDA, PONTA GROSSA-PR (SANEPAR) | 52 |
| FIGURA 15 – PÁTIO DE CURA DA UGL VASSOURAL, GUARAPUAVA-PR (SANEPAR) . | 53 |
| FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DA HIGIENIZAÇÃO COM CAL DE LODO DESAGUADO EM LEITOS DE SECAGEM | 54 |
| FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DA HIGIENIZAÇÃO COM CAL DE LODO CENTRIFUGADO | 54 |
| FIGURA 18 – SECADOR TÉRMICO BRUTHUS | 57 |
| FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA PILOTO DE SECAGEM DE LODO MOVIDO A BIOGÁS | 58 |
| FIGURA 20 – SECADOR TÉRMICO BRUTHUS F | 59 |
| FIGURA 21 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA STHIL | 60 |
| FIGURA 22 – ETAPAS DA GESTÃO DO USO AGRÍCOLA DE LODO DE ESGOTO NO ESTADO DO PARANÁ | 62 |
| FIGURA 23 – FUNÇÕES CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE DESAGUAMENTO DE LODO | 69 |
| FIGURA 24 – FUNÇÕES CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE CALEAÇÃO..... | 70 |
| FIGURA 25 – FUNÇÕES CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE DESAGUAMENTO DE LODO DE UASB E DE UASB + LA..... | 70 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 26 – FUNÇÕES CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE CALEAÇÃO DE LODO DE UASB, MANUAL E MECANIZADA..... | 71 |
| FIGURA 27 – PROCESSOS CONSIDERADOS E POSSÍVEIS ROTAS DE TRATAMENTO DE LODO | 78 |
| FIGURA 28 – MATERIAIS E MÉTODOS – OBJETIVO ESPECÍFICO A..... | 81 |
| FIGURA 29 – MODELO DO EDIFÍCIO DE DESIDRATAÇÃO DE LODO..... | 95 |
| FIGURA 30 – PLANTA DA WCL ADOTADA..... | 98 |
| FIGURA 31 – CORTE ESQUEMÁTICO DA WCL ADOTADA..... | 98 |
| FIGURA 32 – FLUXOGRAMA 1: DESCARTE DE LODO EM TANQUE AUXILIAR | 116 |
| FIGURA 33 – FLUXOGRAMA 2: USO DE DECANTADOR INTERMEDIÁRIO AUXILIAR . | 116 |
| FIGURA 34 – FLUXOGRAMA 3: UTILIZAÇÃO DE DECANTADOR SECUNDÁRIO DE FLUXO HORIZONTAL E FUNDO DE PIRÂMIDE INVERTIDA, PARA EVITAR A FUGA DE SÓLIDOS DO SISTEMA DE TRATAMENTO..... | 118 |
| FIGURA 35 – FLUXOGRAMA 4: MISTURA DE LODOS ANAERÓBIO E AERÓBIO DE EXCESSO EM TANQUE DE HOMOGENEIZAÇÃO, PARA DESAGUAMENTO..... | 119 |
| FIGURA 36 – FLUXOGRAMA 5: PROPOSTA DE FLUXOGRAMA PARA FLEXIBILIZAÇÃO OPERACIONAL QUANTO AO PROCESSAMENTO DO LODO DE EXCESSO | 121 |
| FIGURA 37 – FOTO DO PÁTIO DE CURA DE LODO DA ETE TIBAGI..... | 130 |
| FIGURA 38 – CORTE ESQUEMÁTICO DE UM MONTE DE LODO EM PÁTIO DE HIGIENIZAÇÃO POR EAP | 130 |
| FIGURA 39 – RELAÇÃO ENTRE OS COMPONENTES DO OPEX DAS CENTRÍFUGAS | 146 |
| FIGURA 40 – RELAÇÃO ENTRE OS COMPONENTES DO OPEX DA EAP..... | 150 |
| FIGURA 41 – RELAÇÃO ENTRE OS COMPONENTES DO OPEX DA SECAGEM TÉRMICA | 152 |
| FIGURA 42 – CAPEX: LEITOS DE SECAGEM E CENTRÍFUGAS..... | 153 |
| FIGURA 43 – CAPEX + OPEX: LEITOS DE SECAGEM E CENTRÍFUGAS..... | 154 |
| FIGURA 44 – CAPEX: LEITOS DE SECAGEM, CENTRÍFUGAS E WCL..... | 155 |
| FIGURA 45 – CAPEX + OPEX: LEITOS DE SECAGEM, CENTRÍFUGAS E WCL..... | 155 |
| FIGURA 46 – CAPEX: DESAGUAMENTO + EAP | 156 |
| FIGURA 47 – CAPEX + OPEX: DESAGUAMENTO + EAP | 157 |
| FIGURA 48 – CAPEX: EAP E SECAGEM TÉRMICA | 158 |
| FIGURA 49 – CAPEX + OPEX: EAP E SECAGEM TÉRMICA..... | 158 |
| FIGURA 50 – CAPEX + OPEX: EAP E SECAGEM TÉRMICA SEM COMPLEMENTAÇÃO ENERGÉTICA | 159 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| TABELA 1 - OPERAÇÕES, PROCESSOS E SISTEMAS DE TRATAMENTO..... | 22 |
| TABELA 2 – PODER CALORÍFICO INFERIOR DE GASES UTILIZADOS COMO COMBUSTÍVEL | 27 |
| TABELA 3 – EFICIÊNCIA DE SISTEMAS UASB + PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO..... | 29 |
| TABELA 4 - COMPOSIÇÃO TÍPICA DE DIFERENTES TIPOS DE LODO | 32 |
| TABELA 5 - TAXAS DE PRODUÇÃO DE LODO NOS SISTEMAS DE TRATAMENTO | 34 |
| TABELA 6 - TEOR DE SÓLIDOS SECOS, UMIDADE E CONSISTÊNCIA DO LODO..... | 35 |
| TABELA 7 - FAIXAS TÍPICAS DE DOSAGEM DE POLÍMERO E CONCENTRAÇÃO DE LODO DESAGUADO EM CENTRÍFUGA..... | 38 |
| TABELA 8 - PROCESSOS DE HIGIENIZAÇÃO DE LODO RECOMENDADOS PELA EPA 50 | |
| TABELA 9 - FORNECEDORES E CARACTERÍSTICAS DE SECADORES TÉRMICOS NO MERCADO BRASILEIRO | 55 |
| TABELA 10 - HIGIENIZAÇÃO DE LODO ANAERÓBIO POR SECAGEM TÉRMICA..... | 58 |
| TABELA 11 - CUSTO DOS SECADORES TÉRMICOS E SISTEMA DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS PARA ETE COM UASB + LA..... | 72 |
| TABELA 12 - CUSTOS UNITÁRIOS DE COMPONENTES DO CUSTO OPERACIONAL DE TRATAMENTO DE LODO | 74 |
| TABELA 13 - MATERIAIS E MÉTODOS POR OBJETIVO ESPECÍFICO | 76 |
| TABELA 14 – PROCESSOS CONSIDERADOS POR FAIXA DE VAZÃO | 77 |
| TABELA 15 - UGLS UTILIZADAS PARA O ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO DE PÁTIOS DE CURA PARA EAP | 83 |
| TABELA 16 – VAZÕES ADOTADAS, POPULAÇÃO EQUIVALENTE E REPRESENTATIVIDADE | 84 |
| TABELA 17 - PARÂMETROS ADOTADOS PARA A ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE LODO | 86 |
| TABELA 18 – ESTIMATIVA DO PCI DO BIOGÁS COM 75 % DE CH ₄ | 92 |
| TABELA 19 – RESUMO DOS PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO E VALORES DE REFERÊNCIA UTILIZADOS..... | 93 |
| TABELA 20 – DADOS DOS PROJETOS DE EDL UTILIZADOS PARA ORÇAMENTAÇÃO | 96 |
| TABELA 21 – DADOS DOS PROJETOS EXISTENTES PARA CALEAÇÃO DE LODO | 99 |
| TABELA 22 – CUSTO DOS SERVIÇOS DE LIMPEZA DOS LEITOS DE SECAGEM | 102 |
| TABELA 23 – COMPOSIÇÃO DO CUSTO COM PESSOAL PARA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS | 104 |
| TABELA 24 – COMPOSIÇÃO DO CUSTO COM PESSOAL PARA OPERAÇÃO DE WCL | 108 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 25 – ESTIMATIVA DE COEFICIENTES DE PRODUÇÃO DE LODO DE UASB + PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO | 114 |
| TABELA 26 - SISTEMA DE DESAGUAMENTO DE LODO EM ETES DO PARANÁ | 122 |
| TABELA 27 - Td EM TANQUES DE EQUALIZAÇÃO | 125 |
| TABELA 28 - TEORES DE SÓLIDOS NO LODO ANTES E DEPOIS DA EAP EM UGLS DA SANEPAR | 128 |
| TABELA 29 - PRODUÇÃO DE LODO CORRESPONDENTE ÀS VAZÕES DE ESGOTO . | 133 |
| TABELA 30 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DOS LEITOS DE SECAGEM | 133 |
| TABELA 31 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DOS LEITOS DE SECAGEM COM CENTRÍFUGAS EM PARALELO (OPÇÃO MISTA) | 134 |
| TABELA 32 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DAS CENTRÍFUGAS..... | 134 |
| TABELA 33 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DAS CENTRÍFUGAS PARALELAS AOS LEITOS DE SECAGEM (OPÇÃO MISTA) | 134 |
| TABELA 34 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DAS WCL | 134 |
| TABELA 35 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DA EAP: PÁTIOS DE CURA PARA LODO DE LEITOS DE SECAGEM | 135 |
| TABELA 36 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DA EAP: SILO DE CAL E PÁTIOS DE CURA PARA OPÇÃO MISTA DE DESAGUAMENTO..... | 135 |
| TABELA 37 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DA EAP: SILO DE CAL E PÁTIOS DE CURA PARA LODO DESAGUADO EM CENTRÍFUGAS..... | 135 |
| TABELA 38 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DOS SECADORES TÉRMICOS: CAPACIDADE DO SECADOR..... | 136 |
| TABELA 39 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DOS SECADORES TÉRMICOS (GASÔMETRO E BALANÇO DE ENERGIA) | 136 |
| TABELA 40 – CAPEX DE LEITOS DE SECAGEM | 137 |
| TABELA 41 – CAPEX DE LEITOS DE SECAGEM (OPÇÃO MISTA) | 137 |
| TABELA 42 – CAPEX DE CENTRÍFUGAS..... | 138 |
| TABELA 43 – CAPEX DE CENTRÍFUGAS PARALELAS AOS LEITOS (OPÇÃO MISTA). | 138 |
| TABELA 44 – CAPEX DE WETLANDS PARA LODO | 139 |
| TABELA 45 – CAPEX EAP: LODO DE LEITOS DE SECAGEM | 140 |
| TABELA 46 – CAPEX EAP: LODO DE LEITOS DE SECAGEM PARALELOS ÀS CENTRÍFUGAS (OPÇÃO MISTA) | 140 |
| TABELA 47 – CAPEX EAP: LODO DESAGUADO EM CENTRÍFUGAS | 140 |
| TABELA 48 – CAPEX SECAGEM TÉRMICA..... | 141 |
| TABELA 49 – DADOS E OPEX DOS LEITOS DE SECAGEM..... | 142 |
| TABELA 50 – DADOS E OPEX DOS LEITOS DE SECAGEM PARALELOS ÀS CENTRÍFUGAS | 143 |

| | |
|--|-----|
| TABELA 51 – CUSTO COM PESSOAL NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS | 143 |
| TABELA 52 – CUSTO COM PESSOAL NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS PARALELAS AOS LEITOS DE SECAGEM (OPÇÃO MISTA) | 143 |
| TABELA 53 – CUSTO COM MANUTENÇÃO NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS | 144 |
| TABELA 54 – CUSTO COM MANUTENÇÃO NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS PARALELAS AOS LEITOS DE SECAGEM (OPÇÃO MISTA) | 144 |
| TABELA 55 – CUSTO COM ENERGIA ELÉTRICA NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS | 145 |
| TABELA 56 – CUSTO COM ENERGIA ELÉTRICA NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS PARALELAS AOS LEITOS DE SECAGEM | 145 |
| TABELA 57 – CUSTO COM PRODUTOS QUÍMICOS NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS | 145 |
| TABELA 58 – CUSTO COM PRODUTOS QUÍMICOS NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS PARALELAS AOS LEITOS DE SECAGEM | 146 |
| TABELA 59 – CUSTO COM PESSOAL NA OPERAÇÃO DE WCL | 147 |
| TABELA 60 – CUSTO COM MANUTENÇÃO NA OPERAÇÃO DE WCL..... | 147 |
| TABELA 61 – CUSTO COM MANUTENÇÃO DA WCL: REMOÇÃO DO LODO | 147 |
| TABELA 62 – OPEX DA EAP PARA LODO DE LEITOS DE SECAGEM..... | 148 |
| TABELA 63 – OPEX DA EAP PARA LODO DE CENTRÍFUGAS..... | 149 |
| TABELA 64 – OPEX DA EAP PARA LODO DE LEITOS DE SECAGEM PARALELOS ÀS CENTRÍFUGAS (OPÇÃO MISTA) | 150 |
| TABELA 65 – RESULTADOS DO OPEX DE SECADORES TÉRMICOS | 151 |
| TABELA 66 – FERRAMENTA F1: FUNÇÕES CUSTO DAS ALTERNATIVAS DE DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DE LODO | 161 |
| TABELA 67 – FERRAMENTA F2: CAPEX E OPEX DE ALTERNATIVAS DE DESAGUAMENTO DE LODO | 162 |
| TABELA 68 – FERRAMENTA F3: CAPEX E OPEX DE ALTERNATIVAS DE HIGIENIZAÇÃO DE LODO | 163 |
| TABELA 69 – FERRAMENTA F4: CUSTOS TOTAIS, REQUISITO DE ÁREA E DESTINAÇÃO DE LODO PARA AS ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO DE LODO..... | 164 |

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ACV – Análise de Ciclo de Vida
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPEX – Capital Expenditures
CEDAE – Companhia Estadual de Água e Esgoto
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CUB – Custo Unitário Básico
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO – Demanda Química de Oxigênio
EAP – Estabilização Alcalina Prolongada
EDL – Edifício de Desidratação de Lodo
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
FBP – Filtro Biológico Percolador
GLP – Gás Liquefeito de Petróleo
INCC – Índice Nacional de Custos da Construção
LA – Lodos Ativados
NBR – Norma Brasileira
OPEX – Operational Expenditures
PCI – Poder Calorífico Inferior
PE – População Equivalente
PVC – Policloreto de Vinila
PSRP – *Processes to Significantly Reduce Pathogens*
PFRP – *Processes to Further Reduce Pathogens*
SANEAGO – Companhia de Saneamento de Goiás
SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná
SELIC – Sistema Especial de Liquidação e Custódia
SEMA – Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná
SDF – Sólidos Dissolvidos Fixos
SDRB – *Sludge Drying Reed Beds*
SDV – Sólidos Dissolvidos Voláteis
SDT – Sólidos Dissolvidos Totais
SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

SSF – Sólidos Suspensos Fixos
SST – Sólidos Suspensos Totais
SSV – Sólidos Suspensos Voláteis
ST – Sólidos Totais
STHIL – Secagem Térmica para Higienização de Lodo
TDH – Tempo de Detenção Hidráulica
TIR – Taxa Interna de Retorno
UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*
UGL – Unidade de Gerenciamento de Lodo
VPL – Valor Presente Líquido
WCL – *Wetlands* Construídos para Lodo
 γ – Coeficiente de produção de sólidos
 ρ – Massa específica

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 | OBJETIVOS | 20 |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL | 20 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 20 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 21 |
| 3.1 | ESGOTAMENTO SANITÁRIO | 21 |
| 3.1.1 | Tratamento de Esgoto Sanitário..... | 22 |
| 3.1.2 | Tratamento Anaeróbio..... | 23 |
| 3.1.3 | Reatores UASB com Pós-Tratamento Aeróbio..... | 29 |
| 3.2 | LODO DE ESGOTO SANITÁRIO..... | 31 |
| 3.2.1 | Descrição geral | 31 |
| 3.2.2 | Composição do lodo de esgoto..... | 32 |
| 3.2.3 | Geração de Lodo | 33 |
| 3.3 | PROCESSAMENTO DE LODO | 35 |
| 3.3.1 | Adensamento..... | 36 |
| 3.3.2 | Estabilização | 36 |
| 3.3.3 | Condicionamento | 38 |
| 3.3.4 | Desaguamento..... | 39 |
| 3.3.5 | Higienização | 49 |
| 3.3.6 | Disposição final e aproveitamento do lodo | 61 |
| 3.4 | GERENCIAMENTO DE LODO DE REATORES UASB COM PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO: PROBLEMAS RECENTES | 64 |
| 3.5 | ESTUDOS DE CONCEPÇÃO E ORÇAMENTAÇÃO NO SANEAMENTO..... | 66 |
| 3.6 | CUSTOS DE SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO E TRATAMENTO DE LODO – UMA ANÁLISE DA LITERATURA TÉCNICA..... | 67 |
| 3.6.1 | Custos de Implantação de Sistemas de Tratamento de Lodo..... | 69 |
| 3.6.2 | Custos de Operação de Sistemas de Tratamento de Lodo | 73 |
| 3.6.3 | Considerações finais..... | 75 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 76 |
| 4.1 | DELINEAMENTO METODOLÓGICO 1 - OBJETIVO ESPECÍFICO A | 79 |
| 4.1.1 | Descarte de Lodo Aeróbio de Excesso aos Reatores UASB e seu Impacto no Dimensionamento das Estruturas de Tratamento de Lodo..... | 81 |
| 4.1.2 | Faixas de Vazão Viáveis de Tratamento de Lodo por Tecnologia | 82 |
| 4.1.3 | Regime de Operação de Equipamentos de Tratamento de Lodo | 82 |
| 4.1.4 | Dimensionamento de Tanques de Equalização | 82 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.1.5 | Parâmetros de Dimensionamento de Leitões de Secagem | 83 |
| 4.1.6 | Dimensionamento de Pátios de Cura para a EAP | 83 |
| 4.2 | DELINEAMENTO METODOLÓGICO 2 - OBJETIVO ESPECÍFICO B | 84 |
| 4.2.1 | Vazões Adotadas, a População Equivalente e sua Representatividade | 84 |
| 4.2.2 | Dimensionamento das Estruturas de Tratamento de Lodo | 85 |
| 4.2.3 | Resumo dos Parâmetros de Dimensionamento | 92 |
| 4.2.4 | Orçamentação das Estruturas de Tratamento de Lodo | 94 |
| 4.3 | DELINEAMENTO METODOLÓGICO 3 – OBJETIVO ESPECÍFICO C | 113 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 114 |
| 5.1 | INVESTIGAÇÃO DE QUESTÕES NÃO CONSOLIDADAS, VARIÁVEIS OU POUCO ABORDADAS NA LITERATURA..... | 114 |
| 5.1.1 | O Descarte de Lodo Aeróbio de Excesso aos Reatores UASB e seu Impacto no Dimensionamento das Estruturas de Tratamento de Lodo..... | 114 |
| 5.1.2 | Faixas de Vazão Viáveis de Tratamento de Lodo por Tecnologia | 122 |
| 5.1.3 | Regime de Operação de Equipamentos de Tratamento de Lodo | 124 |
| 5.1.4 | Dimensionamento de Tanques de Equalização | 125 |
| 5.1.5 | Parâmetros de Dimensionamento de Leitões de Secagem | 126 |
| 5.1.6 | Dimensionamento de Pátios de Cura para a EAP | 128 |
| 5.2 | AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE TRATAMENTO DE LODO..... | 133 |
| 5.2.1 | Resultados dos Dimensionamentos | 133 |
| 5.2.2 | Custos das Tecnologias de Tratamento de Lodo | 137 |
| 5.3 | FERRAMENTAS DE AUXÍLIO EM ESTUDOS DE CONCEPÇÃO | 160 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 165 |
| 7 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 170 |
| 7.1 | CONCLUSÕES | 170 |
| 7.2 | RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS | 172 |
| | REFERÊNCIAS | 173 |
| | APÊNDICES | 182 |
| | APÊNDICE 1 - ENTREVISTAS COM PROFISSIONAIS DO SANEAMENTO..... | 183 |
| | APÊNDICE 2 - ÍNDICE NACIONAL DE CUSTOS DA CONSTRUÇÃO | 184 |
| | APÊNDICE 3 - PLANTA DO EDIFÍCIO DE DESIDRATAÇÃO DE LODO | 185 |
| | APÊNDICE 4 - TARIFAS DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA | 186 |
| | APÊNDICE 5 - ORÇAMENTO PRELIMINAR DE WETLANDS PARA LODO | 188 |
| | APÊNDICE 6 - PLANILHA DE CÁLCULO DAS QUANTIDADES DE LODO | 189 |

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), 45 % do esgoto gerado pela população brasileira é disposto na natureza sem receber nenhum tipo de tratamento. Da parcela restante, 12 % é tratado por soluções individuais (fossas sépticas) e 43 % do esgoto é efetivamente coletado e tratado. O governo brasileiro pretende elevar os índices de coleta e tratamento de esgoto para 93 % de atendimento, na área urbana, até o ano de 2033 (BRASIL, 2014).

Neste contexto, os lodos de esgoto sanitário, cuja produção é inevitável em função do tratamento dos esgotos, e deverá aumentar, no mínimo, proporcionalmente ao crescimento populacional, requer processos de tratamento e disposição final adequados para que sejam dirimidos seus impactos na saúde pública e no meio ambiente (BRASIL, 2006).

Entretanto, o processamento e a disposição final do lodo requerem uma série de equipamentos com alto custo de investimento e operação (JORDÃO, 2015). von Sperling e Andreoli (2014) comentaram que, apesar do lodo representar de 1 a 2 % do volume de esgoto tratado, seu gerenciamento é complexo e pode demandar de 20 a 60 % dos gastos operacionais das Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs). Jordão (2008) destacou a importância da escolha do processo de tratamento de esgoto buscando-se a redução da geração de lodo.

Neste sentido, os processos anaeróbios de tratamento possuem, comparativamente aos processos aeróbios, baixo consumo energético e reduzida produção de lodo, razão pela qual vêm sendo amplamente empregados no Brasil e em diversos países de clima tropical (especialmente na América Latina e na Índia), notadamente os reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) (CHERNICHARO et al., 2015). No estado do Paraná, 96 % das ETEs possuem reatores anaeróbios de manta de lodo, entre UASBs e RALFs (Reatores Anaeróbios de Lodo Fluidizado). Em números, são 195 de 203 ETEs com este tipo de tratamento (ROSS, 2015).

Os reatores UASB possibilitam, ainda que com algumas ressalvas em termos operacionais, além da redução da carga orgânica dos esgotos, o adensamento e a digestão de lodo de excesso proveniente de pós-tratamento aeróbio, refletindo em economia (ALÉM SOBRINHO; JORDÃO, 2001; FLORIPES et al., 2018). O pós-tratamento aeróbio de reatores UASB é uma tendência no Brasil, haja vista que, usualmente, os padrões de lançamento de esgoto em corpos receptores não são

atendidos pelos reatores UASB e estes representam a segunda tecnologia mais utilizada no Brasil (ANA, 2017).

O lodo em excesso removido dos reatores UASB pode ser destinado diretamente às etapas de desaguamento e higienização. Dentre as tecnologias utilizadas nesses processos têm se destacado os Leitões de Secagem, as Centrífugas e, para a higienização, a Estabilização Alcalina Prolongada (EAP) (BITTENCOURT, 2014). Mais recentemente, a Secagem Térmica também tem sido atrativa para as concessionárias de saneamento, apresentando vantagens como a redução do volume de lodo e a possibilidade de aproveitamento energético do biogás gerado nos reatores UASB (BIELSCHOWSKY, 2014; POSSETTI et al., 2015).

Outra alternativa que vem ganhando espaço no Brasil, principalmente para o desaguamento de lodo de Tanques Sépticos, são os Wetlands Construídos para Lodo (WCL), por apresentarem vantagens como baixo custo de implantação e simplicidade operacional (MANJATE, 2016).

Para a definição da melhor alternativa de tratamento de lodo devem ser considerados os aspectos técnicos, sociais, ambientais e econômicos (AMARAL, 2018). Quanto ao aspecto econômico, encontram-se, na literatura, estudos com diferentes abordagens. Estudos de caso, funções custo, métodos para tomada de decisão e análise de ciclo de vida (ACV) são alguns exemplos.

Apesar de todos esses serem de grande relevância, nem sempre é possível utilizá-los de forma direta em Estudos de Concepção, requerendo adaptações e/ou considerações para que sejam utilizados. As funções custo, particularmente, possuem maior aplicabilidade neste sentido, já que têm esta finalidade (PACHECO, 2011). Os Estudos de Concepção constituem uma etapa prévia aos Projetos de Engenharia, na qual são avaliadas alternativas para se definir a solução mais adequada em termos técnicos, econômicos, sociais e ambientais (SANEPAR, 2017).

Neste sentido, as análises de ciclo de vida assemelham-se aos Estudos de Concepção, assim como os métodos para tomada de decisão, pois permitem avaliações econômicas, sociais e ambientais das soluções de saneamento (AMARAL, 2018). As funções custo podem ser utilizadas como ferramentas auxiliares no desenvolvimento deste tipo de estudo (PACHECO, 2011). Entretanto, quando se trata de lodo de esgoto, poucos são os trabalhos encontrados na literatura que consideram os custos. Amaral (2018) relacionou o estado da arte das Análises de Ciclo de Vida

de tratamento de lodo, em que apenas 4 de 10 estudos consideraram os aspectos econômicos.

Além disso, segundo Jordão & Pessoa (2017), “Nem sempre as empresas de saneamento ou as empresas de consultoria dispõem de indicadores confiáveis para estimativa e projeção de custos”, o que enfatiza a necessidade e importância de serem desenvolvidos mais estudos nesta direção.

No âmbito do PPGERHA¹ e do Departamento de Hidráulica e Saneamento – DHS, da Universidade Federal do Paraná, Baréa (2013) e Pacheco (2011) avaliaram os custos de implantação de alternativas de tratamento de lodo, ambos por meio da elaboração de funções custo. Amaral (2018) também avaliou custos em seu estudo, aplicando ACV para a comparação de alternativas de processamento de lodo e aproveitamento de biogás de reatores UASB, sendo um dos poucos estudos encontrados na literatura em que se consideram os custos de implantação (CAPEX) e de operação (OPEX) de alternativas de tratamento de lodo de esgoto sanitário.

Além desta lacuna existente na literatura, o tratamento de lodo contém outras questões ainda não consolidadas, pouco abordadas ou variáveis conforme a região, o que dificulta a adoção de parâmetros em Estudos de Concepção. O descarte de lodo aeróbio de excesso em reatores UASB e o dimensionamento de Tanques de Equalização de lodo e de pátios de cura para higienização por EAP são alguns exemplos.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os custos de implantação (CAPEX) e operação (OPEX) das alternativas mencionadas de tratamento de lodo, considerando-se ETEs com reatores UASB + Pós-tratamento aeróbio, buscando-se fornecer subsídios técnico-científicos para o desenvolvimento de Estudos de Concepção ou similares. Além disso, buscou-se a elucidação de algumas questões não consolidadas, pouco abordadas ou variáveis na literatura, contribuindo assim para a fundamentação de soluções e parâmetros de dimensionamento de estruturas de tratamento de lodo.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os custos de desaguamento e higienização de lodo em ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio, fornecendo subsídios para Estudos de Concepção.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Investigar questões relacionadas ao dimensionamento de estruturas de tratamento de lodo não consolidadas, variáveis ou pouco abordadas na literatura;
- b) Avaliar os custos de implantação e operação de diferentes processos de desaguamento e higienização de lodo de esgoto;
- c) Elaborar ferramentas de auxílio para a avaliação de alternativas de desaguamento e higienização de lodo de esgoto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESGOTAMENTO SANITÁRIO

O afastamento do esgoto sanitário foi relatado pela primeira vez em 6 AC, em Roma, onde ajudou no controle da malária que se espalhava na região. Em outras partes do mundo, como na Inglaterra, o esgoto era acumulado em privadas, o que tornava o ambiente insalubre. Aos poucos passou-se a dispor os excretas nas ruas e em canais de drenagem pluvial, para que fossem levadas pelas chuvas. A primeira descarga hídrica foi inventada em 1596, mas apenas após as epidemias ocorridas no século XIX é que a coleta e o afastamento dos esgotos sanitários começaram a receber a devida importância (ALÉM SOBRINHO & TSUTIYA, 2000).

Nos idos de 1840 se iniciou o desenvolvimento de sistemas de esgotamento planejados, particularmente na Inglaterra e na Alemanha, seguindo-se os princípios utilizados em Roma, com sistemas unificados (canalização dos esgotos juntamente com as águas pluviais). A partir de então começou-se a implantação desses sistemas em outros polos urbanos como Boston, Paris, Viena, Buenos Aires e Rio de Janeiro. Por questões econômicas, surgiram os sistemas parcialmente unificados (parte da água da chuva é destinada à rede coletora de esgoto) e separador absoluto, em que o esgoto possui tubulação independente da pluvial. Em 1879, nos Estados Unidos, o engenheiro George Waring projetou o primeiro sistema separador absoluto, para a cidade de Memphis, que serviu de exemplo para os outros países (ALÉM SOBRINHO & TSUTIYA, 2000).

Atualmente, os serviços de esgotamento sanitário ainda são bastante precários em várias regiões do mundo. Estima-se que 60 % da população mundial possui coleta de esgoto, mas apenas uma parcela deste valor recebe tratamento. Os índices de tratamento, assim como de coleta, variam conforme o nível de desenvolvimento de cada país. Aqueles são estimados, considerando-se a população urbana, em 70 % nos países desenvolvidos, 38 % nos países de renda média-alta, 28 % nos países de renda média-baixa e apenas 8 % em países de baixa renda (UNESCO, 2017). No Brasil, o índice de coleta de esgoto é de 61 %, sendo 43 % tratado e os outros 18 % despejados sem tratamento em corpos receptores. A parcela que não é coletada é dividida em 12 % com soluções individuais e 27 % que não possui nenhuma medida de saneamento (ANA, 2017).

3.1.1 Tratamento de Esgoto Sanitário

Segundo von Sperling (1996), o tratamento dos esgotos domésticos pode ser classificado quanto ao nível, a depender do poluente que se pretende remover, conforme é apresentado a seguir:

- Preliminar: sólidos em suspensão grosseiros (areia e resíduos);
- Primário: sólidos sedimentáveis e DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) em suspensão;
- Secundário: DBO em suspensão (remanescente) e DBO solúvel;
- Terciário: nutrientes, patógenos, compostos não biodegradáveis, metais pesados, sólidos fixos dissolvidos e sólidos em suspensão remanescentes.

Para o tratamento de esgoto são utilizados mecanismos físicos, químicos e biológicos, que vêm a remover os poluentes com diferentes eficiências, a depender do tipo de tratamento empregado. Esses mecanismos são os princípios das Operações e Processos Unitários de Tratamento, que, combinadas, compõem os Sistemas de Tratamento. Na Tabela 1, apresentam-se as operações, processos e sistemas comumente utilizados no tratamento de esgotos (von SPERLING, 1996).

TABELA 1 - OPERAÇÕES, PROCESSOS E SISTEMAS DE TRATAMENTO

| Poluente | Operação, Processo ou Sistema de Tratamento de Esgoto Doméstico |
|--------------------------------|--|
| Sólidos em Suspensão | Gradeamento |
| | Caixa de areia |
| | Sedimentação |
| | Disposição no solo |
| Matéria Orgânica Biodegradável | Lagoas de Estabilização e variações |
| | Lodos Ativados e variações |
| | Filtro Biológico e variações |
| | Tratamento Anaeróbio em Filtros e Reatores de Manta de Lodo |
| | Disposição no solo |
| Organismos Patogênicos | Lagoas de maturação |
| | Disposição no solo |
| | Desinfecção com produtos químicos |
| | Desinfecção com radiação ultravioleta |
| Nutrientes | Remoção biológica |
| | Processos físico-químicos |
| | Disposição no solo |

FONTE: Adaptado de von Sperling (1996).

Como pode-se observar, há uma grande variedade de operações, processos e sistemas de tratamento de esgoto, que aumenta ainda mais na medida que podem ser combinadas as operações e processos para a composição de outros sistemas de tratamento.

3.1.2 Tratamento Anaeróbio

Os sistemas anaeróbios de tratamento de esgoto são bastante difundidos no mundo, especialmente nas regiões de clima tropical como Brasil, Colômbia, México e Índia (CHERNICHARO et al., 2015). Segundo os autores, em relação aos sistemas aeróbios, os anaeróbios possuem algumas vantagens, podendo-se destacar:

- Baixo consumo energético;
- Reduzida produção de lodo;
- Produção de metano;
- Boa aplicabilidade em pequena escala.

Entretanto, os sistemas anaeróbios possuem, como principal desvantagem, uma reduzida capacidade de degradação da matéria orgânica, da ordem de 70 % para DBO, o que torna comum a necessidade de um pós-tratamento aeróbio para atendimento de condicionantes ambientais (FORESTI et al., 1999).

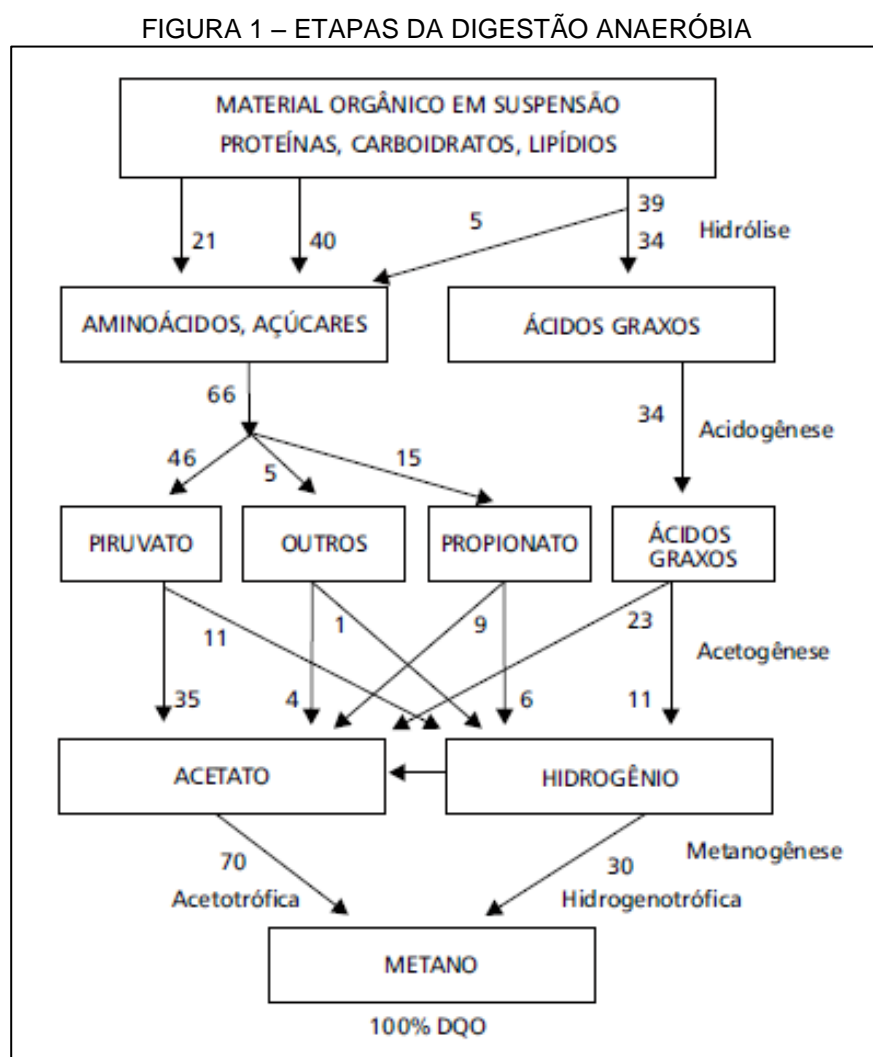
A digestão anaeróbia consiste na conversão da matéria orgânica complexa, por meio de grupos microbianos, em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas (McCARTY, 1974). O processo pode ser dividido, simplificadaamente, em 4 etapas sequenciais:

- Hidrólise: quebra de moléculas complexas como carboidratos, proteínas e lipídios, pela ação de enzimas excretadas por bactérias fermentativas hidrolíticas.
- Acidogênese: transformação dos compostos hidrolisados em substâncias orgânicas simples, como ácidos orgânicos (acético, propiônico e butírico), álcoois, cetonas e compostos minerais como CO₂, H₂, NH₃, H₂S, entre outros.
- Acetogênese: conversão dos produtos da acidogênese em acetato, hidrogênio e CO₂ a partir dos produtos gerados na acidogênese.

- Metanogênese: produção de metano e gás carbônico por organismos denominados arqueas metanogênicas, as quais utilizam-se de acetato (arqueas acetoclásticas) ou de H₂ e CO₂ (arqueas hidrogenotróficas) para seus metabolismos.

Há ainda a sulfetogênese, que ocorre paralelamente às duas últimas etapas, e consiste na redução biológica de compostos sulfurados, como sulfato e sulfito, à sulfeto (gás sulfídrico). Parte das bactérias sulforedutoras utiliza acetato e hidrogênio como substratos, o que as torna competidoras com as arqueas metanogênicas (CHERNICHARO, 2016).

A seguir, na Figura 1, apresenta-se um fluxograma simplificado das etapas mencionadas, excetuando-se a sulfetogênese. Os índices na figura indicam os percentuais da parcela de DQO (Demanda Química de Oxigênio) que foi convertida em metano.



FONTE: Foresti et al. (1999).

A depender da composição do esgoto, e de outros fatores como as condições físico-químicas do meio, a digestão anaeróbia produz diferentes teores de metano e gás carbônico, além de outros gases, que juntos compõem o biogás. Em geral, na digestão anaeróbia de esgoto sanitário, o biogás é constituído de 60 a 85 % de metano, 5 a 15 % de gás carbono e 10 a 25 % de nitrogênio, além de traços de Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) e de oxigênio (LOBATO, 2011).

Cabe mencionar, por fim, que há diversos sistemas de tratamento anaeróbios de esgoto sanitário, sendo os mais comumente encontrados as Lagoas Anaeróbias, os Tanques Sépticos, os Filtros Biológicos Anaeróbios e os Reatores UASB (KATO et al., 1999; CHERNICHARO, 2016).

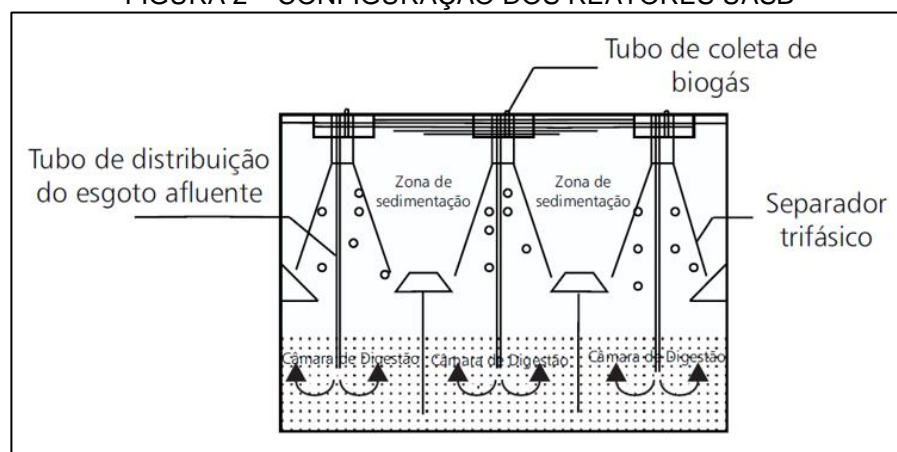
3.1.2.1 Reatores UASB

Os Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* começaram a ser utilizados na década de 80, inicialmente na Holanda (LETTINGA et al., 1983). A partir de então passaram a constar cada vez mais nos fluxogramas das Estações de Tratamento de Esgoto. Atualmente, eles representam a terceira mais utilizada tecnologia de tratamento de esgoto na América Latina, em número de estações, e a quarta maior em atendimento de população (CHERNICHARO et al., 2015).

Pode-se dividir os reatores UASB em dois compartimentos principais: um de digestão (inferior) e outro de decantação (superior). Esta separação é feita pelo sistema de separação trifásico, que consiste em dispositivos inclinados que bloqueiam a passagem de gases, e do próprio lodo, para o compartimento de decantação. No compartimento de digestão acumula-se a manta de lodo, responsável pela decomposição da matéria orgânica afluenta (KATO et al., 1999). Esta manta de lodo possui concentrações variadas, usualmente de 4 a 5 % nas camadas inferiores, chegando a atingir valores inferiores a 1 % nas camadas mais altas (cerca de 2 m do fundo), a depender do regime de descarte do lodo (FLORIPES et al., 2018).

Segundo van Haandel et al. (1999), deve-se manter nos reatores UASB uma massa de lodo suficiente para a degradação da DQO, geralmente em torno de 50 % do volume de digestão. A seguir, na Figura 2, apresenta-se um desenho esquemático dos reatores UASB.

FIGURA 2 – CONFIGURAÇÃO DOS REATORES UASB



FONTE: Adaptado de Kato et al. (1999).

Para evitar que o fluxo líquido leve consigo parte do lodo do reator, e também proporcionar o contato suficiente entre o substrato e a biomassa, um dos principais parâmetros de dimensionamento dos reatores é o tempo de detenção hidráulica. Em geral, para temperaturas médias do esgoto de 20° C, adotam-se tempos de detenção da ordem de 8 a 10 h (CHERNICHARO, 2016). Na NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011) recomenda-se tempos entre 6 e 10 hr, a depender da temperatura média do esgoto, considerada no mês mais frio. A norma dá também outras orientações de projeto, como a profundidade útil, entre 4 e 6 m, e a profundidade mínima do compartimento de digestão, de 2,5 m.

A eficiência dos reatores na remoção de matéria orgânica é bastante variável. Chernicharo et al. (2015) apresentaram valores oscilando na faixa de 40 a 80 % para DQO e 40 a 85 % para DBO. Saliba e von Sperling (2017) relataram eficiências médias de 58, 54 e 64 %, respectivamente, para DBO, DQO e SST, referentes a um monitoramento de 4 anos na ETE Betim (Minas Gerais). Os reatores UASB não proporcionam remoções significativas de nutrientes e organismos patogênicos (CHERNICHARO et al. 2015; SALIBA; von SPERLING, 2017).

Quanto à produção de biogás nos reatores, Lobato (2011, p.111) apresentou as relações unitárias de 60, 86 e 102 NL_{biogás}/m³_{esgoto}, respectivamente para os cenários crítico, típico e ótimo, a depender de fatores como o nível de diluição do esgoto afluente à ETE, a concentração de sulfato neste, a eficiência na remoção de DQO e as perdas de metano do reator (liberação para a atmosfera, metano dissolvido no efluente ou outra forma de perda). A autora apresenta também relações unitárias em função de outros parâmetros, como DQO removida e população atendida.

3.1.2.2 Aproveitamento Energético do Biogás

A depender do percentual de metano que possui, o biogás apresenta diferentes valores de Poder Calorífico Inferior - PCI, da ordem de 5.130 kcal/m³ quando com 60 % de CH₄, e 6.720 kcal/m³ quando com teores próximos de 80 % de CH₄ (LOBATO, 2011; ROSA et al., 2016).

Lobato (2011) encontrou valores médios de teores de CH₄ no biogás de 65 e 73 %, respectivamente, para estudos em escala piloto e de demonstração. Já Possetti et al. (2015), obteve teores de CH₄ de 78 % no biogás avaliado de uma ETE em escala real. Na Tabela 2, a seguir, são apresentados o PCI do biogás e de outros gases utilizados como combustível.

TABELA 2 – PODER CALORÍFICO INFERIOR DE GASES UTILIZADOS COMO COMBUSTÍVEL

| Gás | Poder Calorífico Inferior | | |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|
| | MJ/kg ³ | MJ/Nm ³ | kWh/Nm ³ |
| Metano | 50,0 | 35,9 | 10,0 |
| Gás Natural | 45,1 | 31,8 | 8,8 |
| Biogás (60 % de CH ₄) | 30,0 | 21,5 | 6,0 |
| Butano | 45,7 | 118,5 | 32,9 |
| Propano | 46,4 | 90,9 | 25,2 |

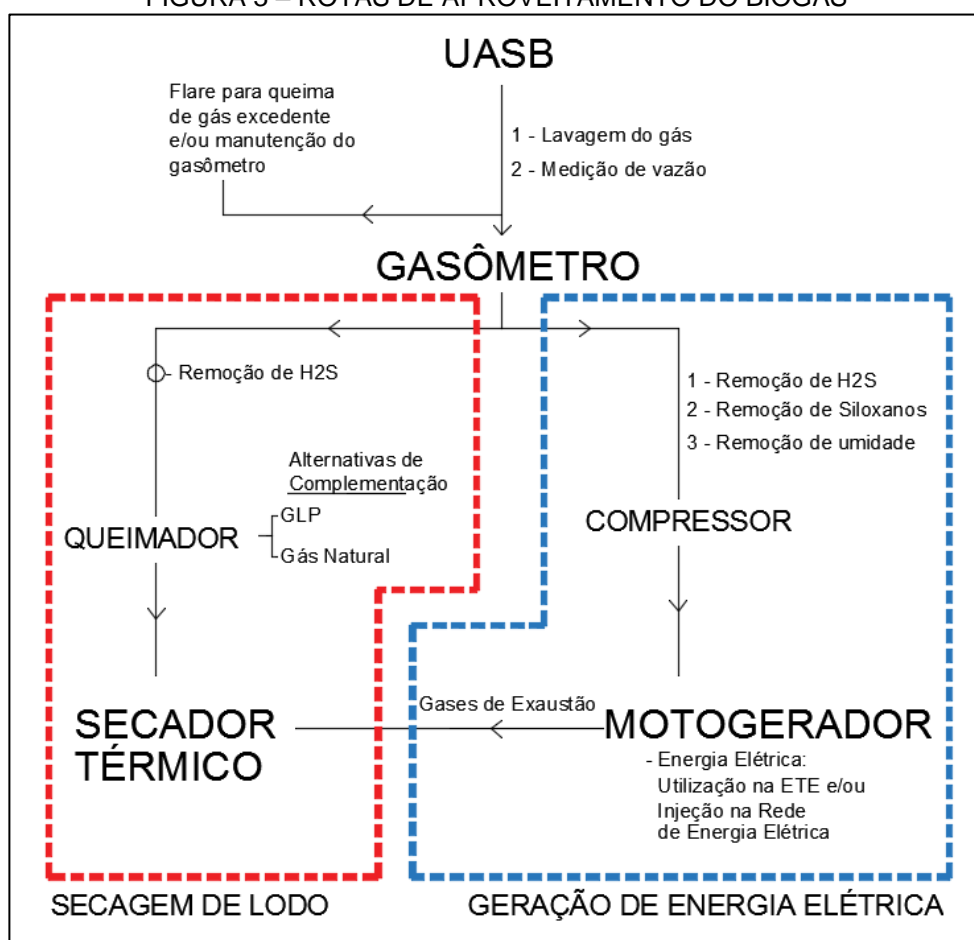
FONTE: Adaptado de NOYOLA (2006) apud LOBATO (2011).

Como pode-se observar, o biogás possui um poder calorífico considerável, o que, aliado ao benefício ambiental de aproveitá-lo, já que o metano é um dos principais gases causadores do efeito estufa, torna-o uma fonte energética bastante atrativa para aproveitamento nas ETEs.

Valente (2015) e Rosa et al. (2016) avaliaram alternativas de uso do biogás para a secagem de lodo e para a geração de energia elétrica. Quando da geração de energia elétrica, tem-se a desvantagem de o rendimento de conversão do biogás em energia ser relativamente baixo, da ordem de 30 %, enquanto que na queima direta deste para uso na secagem de lodo pode-se aproveitar cerca de 80 % da energia disponível (ROSA et al., 2016). Todavia, os gases residuais dos motogeradores de energia podem ser aproveitados para a secagem de lodo, configurando uma alternativa com ambas as formas de aproveitamento.

Na Figura 3, a seguir, apresentam-se as rotas de aproveitamento do biogás mencionadas, bem como algumas etapas intermediárias para tanto, conforme descrito por Valente (2015).

FIGURA 3 – ROTAS DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS



FONTE: Adaptado de Valente (2015).

Como pode-se observar, o aproveitamento do biogás demanda o pré-tratamento deste, principalmente para a geração de energia elétrica. Boa parte das tubulações utilizadas nos processos, bem como alguns equipamentos, são compostas em aço inoxidável, o que pode elevar o custo de implantação dos sistemas. O gásômetro pode ser fornecido em membrana de poliéster revestida com PVC, sendo usualmente dimensionado para volumes de 30 a 50 % da produção diária de biogás (VALENTE, 2015).

Conforme os dados apresentados por Valente (2015), o custo do gásômetro pode variar entre 30 e 45 % do custo do secador térmico. Os equipamentos periféricos para o pré-tratamento do biogás também possuem custos expressivos, mesmo quando não considerada a geração de energia elétrica.

3.1.3 Reatores UASB com Pós-Tratamento Aeróbio

Principalmente devido às restrições ambientais, há uma tendência da aplicação de pós-tratamentos aeróbios aos reatores UASB, podendo-se assim atingir efluentes finais com valores de DBO da ordem de 30 mg/L e, quando necessário, a remoção de nutrientes (ALÉM SOBRINHO; JORDÃO, 2001). Aisse e Além Sobrinho (2002) estudaram diferentes tecnologias de pós-tratamento aeróbio de efluentes de reatores UASB, encontrando eficiências de remoção de matéria orgânica e sólidos bastante promissoras em relação ao UASB isoladamente, conforme resume-se na Tabela 3, a seguir.

TABELA 3 – EFICIÊNCIA DE SISTEMAS UASB + PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO

| Processo de Tratamento | Eficiência de Remoção (%) | | |
|--|---------------------------|-----|-----|
| | DBO | DQO | SST |
| UASB + Lodos Ativados (LA) | 94 | 88 | 89 |
| UASB + Filtro Biológico Percolador (FBP) | 87 | 79 | 85 |
| UASB + Filtro Biológico Aerado Submerso (FBAS) | 88 | 82 | 83 |
| UASB + Flotador por Ar Dissolvido* (FAD) | 91 | 87 | 83 |

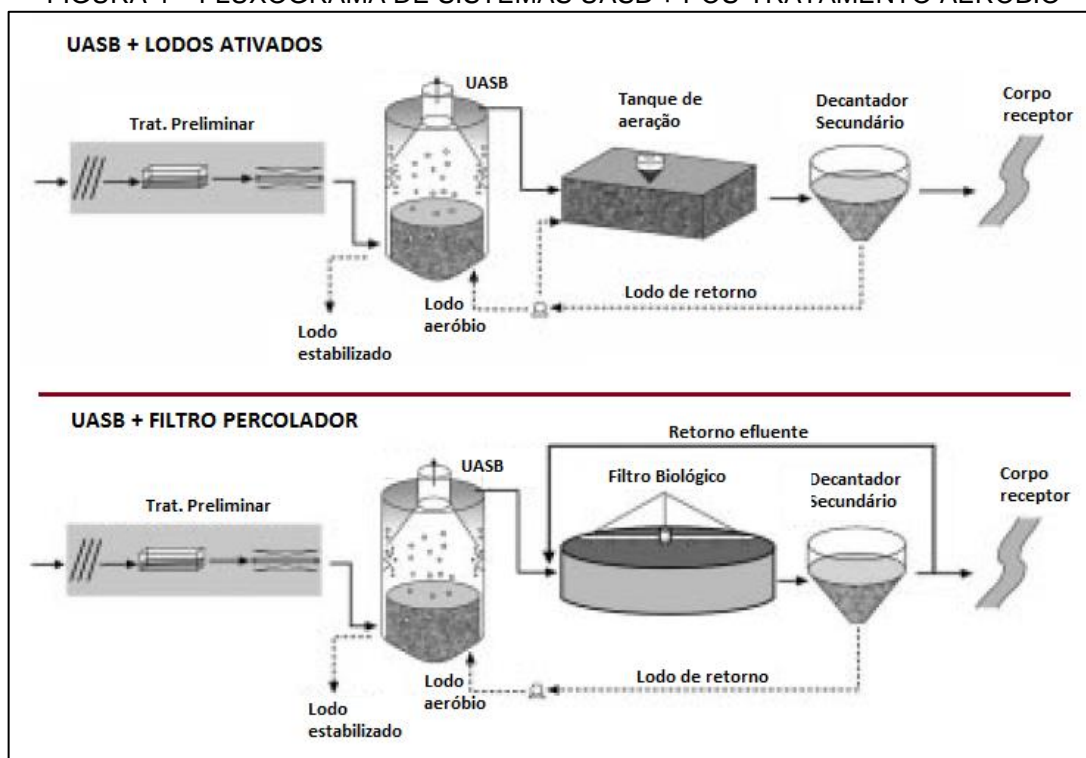
FONTE: Aisse e Além Sobrinho (2002).

NOTA: *Apesar do FAD não ser um processo biológico aeróbio, mas físico-químico, está apresentado nesta tabela para fins de comparação.

Como os reatores UASB possuem eficiência de remoção de sólidos e de DBO superiores aos decantadores primários, a combinação dos processos anaeróbio seguido de aeróbio permite a redução do porte das unidades aeróbias, gerando grandes reduções de custos na implantação e operação dos sistemas (ALÉM SOBRINHO; JORDÃO, 2001; CHERNICHARO et al., 2015). Além disso, os reatores UASB podem ser utilizados como digestores e adensadores do lodo aeróbio de excesso das unidades de pós-tratamento, suprimindo, assim, unidades adicionais de tratamento de lodo (ALÉM SOBRINHO; JORDÃO, 2001; PONTES; CHERNICHARO, 2009). Esta questão, em particular, merece atenção especial, uma vez que problemas operacionais, como a redução da qualidade do efluente do reator UASB, têm sido associados à esta prática (SILVA FILHO; van HAANDEL, 2014; FLORIPES et al., 2018). Maiores detalhes sobre esta temática estão apresentados no Item 3.4.

Na Figura 4, a seguir, apresentam-se os fluxogramas clássicos dos sistemas de tratamento compostos por UASB + pós-tratamento aeróbio, com o retorno do lodo aeróbio de excesso aos reatores UASB. No caso, apresentam-se apenas os processos de Lodos Ativados e Filtro Biológico Percolador como pós-tratamento.

FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DE SISTEMAS UASB + PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO



FONTE: Adaptado de Além Sobrinho e Jordão (2001).

Segundo Chernicharo et al. (2018), os Lodos Ativados e os Filtros Biológicos Percoladores são as tecnologias aeróbias mais empregadas como pós tratamento de reatores UASB, no sul e sudeste brasileiro. Destaque especial é dado aos FBP, com cerca de 80 unidades instaladas após reatores UASB, especialmente nos estados de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul.

É perceptível a tendência do crescimento do número de ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio quando se observam os dados constantes no Atlas do Esgoto (ANA, 2017). No documento, menciona-se que, no Brasil, os reatores UASB são a segunda tecnologia mais utilizada (logo atrás das Lagoas Anaeróbias + Lagoas Facultativas), mas com 328 unidades ainda sem pós-tratamento. Relata-se, também, que há 121 ETEs com reatores UASB seguidos de Filtro Biológico Aeróbio e Decantador Secundário e 92 seguidos de Lodos Ativados. O texto evidencia não só a necessidade de ampliação da cobertura da coleta e tratamento de esgotos, mas também da melhoria da qualidade dos atuais sistemas de tratamento, ou seja, de implantação de pós tratamento aeróbio nas ETEs que possuem apenas reatores UASB.

3.2 LODO DE ESGOTO SANITÁRIO

3.2.1 Descrição geral

O lodo é um subproduto gerado no tratamento de esgotos, distinto do fluxo líquido, designado como fase sólida, mesmo que constituído, em boa parte das etapas de tratamento, de 95 % de água e 5 % de sólidos (von SPERLING; GONÇALVES, 2014). Segundo os autores, o lodo pode ser classificado em função da etapa de tratamento de esgoto de que é proveniente, conforme exposto a seguir.

- Lodo primário: Lodo retido nos decantadores primários ou em tanques sépticos. Possui odor bastante desagradável, exceto quando já estabilizado, e seca com dificuldade (TCHOBANOGLIOUS et al., 2014).
- Lodo Secundário: Consiste na biomassa de microorganismos gerada a partir do consumo da matéria orgânica do esgoto. A depender do processo de tratamento do esgoto, o lodo secundário pode ser aeróbio, estabilizado ou não, ou anaeróbio estabilizado (von SPERLING; GONÇALVES, 2014).
- Lodo Misto: Composto pela mistura dos lodos primário e secundário. von Sperling e Gonçalves et al. (2014) explicam que a relação entre lodo primário e secundário no lodo misto interfere na capacidade de desaguamento deste, sendo que o lodo secundário é mais dificilmente desaguado.
- Lodo Químico: Produzido em processos físico-químicos de tratamento, usualmente pela precipitação química com sais metálicos ou com cal. Possui uma taxa de decomposição inferior à do lodo primário e odor geralmente pouco ofensivo, sendo mais incômodo quando da estabilização com cal (von SPERLING; GONÇALVES, 2014). Segundo os autores, este lodo é usualmente removido de unidades como decantadores primários com precipitação química e lodos ativados com precipitação química de fósforo.

Cabe mencionar que o lodo de esgoto, quando utilizado beneficemente, como na disposição agrícola, ao invés de meramente disposto em aterro sanitário ou ter outro fim improdutivo, é comumente chamado de “biossólido” (USEPA, 1994; VON SPERLING; GONÇALVES, 2014).

3.2.2 Composição do lodo de esgoto

Além de água, o lodo possui em sua composição Sólidos em Suspensão Totais (SST) e Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), sendo os sólidos em suspensão a maioria, chegando a serem “confundidos” com os Sólidos Totais (ST). Os sólidos do lodo são também classificados em orgânicos (voláteis) e inorgânicos (fixos). Desta forma, é possível se distinguir, basicamente, quatro tipos de sólidos no lodo: Sólidos Suspensos Voláteis (SSV), Sólidos Suspensos Fixos (SSF), Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) e Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF), que, somados, compõem os Sólidos Totais (von SPERLING; GONÇALVES, 2014).

A composição do lodo varia em função das características do esgoto afluente à ETE, do sistema de tratamento deste e dos processos a que o lodo é submetido (IMHOFF, 1986; TCHOBANOGLIOUS et al., 2014). Em geral, o lodo possui macro e micronutrientes essenciais para o crescimento de plantas, o que o torna uma rica matéria prima para uso agrícola. Entretanto, possui também metais pesados, poluentes orgânicos e microorganismos patogênicos, necessitando-se, portanto, de muita cautela em sua utilização. A presença de metais pesados está usualmente associada a lançamento de esgoto industrial na rede coletora de esgotos (BITTENCOURT, 2014). A seguir, na Tabela 4, são apresentadas faixas típicas das quantidades de alguns componentes do lodo, para diferentes tipos deste.

TABELA 4 - COMPOSIÇÃO TÍPICA DE DIFERENTES TIPOS DE LODO

| Componente | Unidade | Tipo de Lodo | | |
|------------------|--|------------------|-----------------------------|----------|
| | | Primário | Secundário não estabilizado | Digerido |
| Matéria Orgânica | (% ST) | 60 - 85 (75) | 60 - 85 (70) | 45 - 60 |
| Óleos e Graxas | (% ST) | 5 - 8 (6) | 5 - 12 (8) | 3 - 20 |
| Proteínas | (% ST) | 20 - 30 (25) | 30 - 40 (36) | 15 - 20 |
| Nitrogênio | (N, % ST) | 1,5 - 4 (2,5) | 2,4 - 5 (3,8) | 1,5 - 6 |
| Fósforo | (P ₂ O ₅ , % ST) | 0,8 - 2,8 (1,6) | 2,8 - 11 (5,5) | 2,5 |
| Potássio | (K ₂ O, % ST) | 0 - 1 (0,4) | 0,5 - 0,7 (0,6) | 0 - 2 |
| Celulose | (% ST) | 8 - 15 (10) | 5 - 15 | 5 - 15 |
| pH | - | 5 - 8 (6) | 6,5 - 8 (7,1) | |
| Alcalinidade | (mg/L de CaCO ₃) | 500 - 1500 (600) | 580 - 1100 (790) | |

FONTE: Adaptado de Tchobanoglous et al. (2014).

Quanto aos microorganismos patogênicos, cinco grupos podem estar presentes no lodo: helmintos, protozoários, fungos, vírus e bactérias (SILVA et al., 2014). A presença desses organismos está ligada às condições de saúde da

população atendida pelo sistema de esgotamento sanitário. Uma vez presentes no esgoto doméstico, são aderidos aos sólidos sedimentáveis e tornam-se mais concentrados no lodo. Essas concentrações variam de acordo com a região, época do ano, amostragem realizada e também em relação ao processo e à etapa de tratamento de esgoto da qual o lodo é proveniente. A título de exemplo, os ovos de helmintos podem ser encontrados em quantidades acima de 10^3 unidades por quilograma de massa seca, em lodo primário (SILVA et al., 2014).

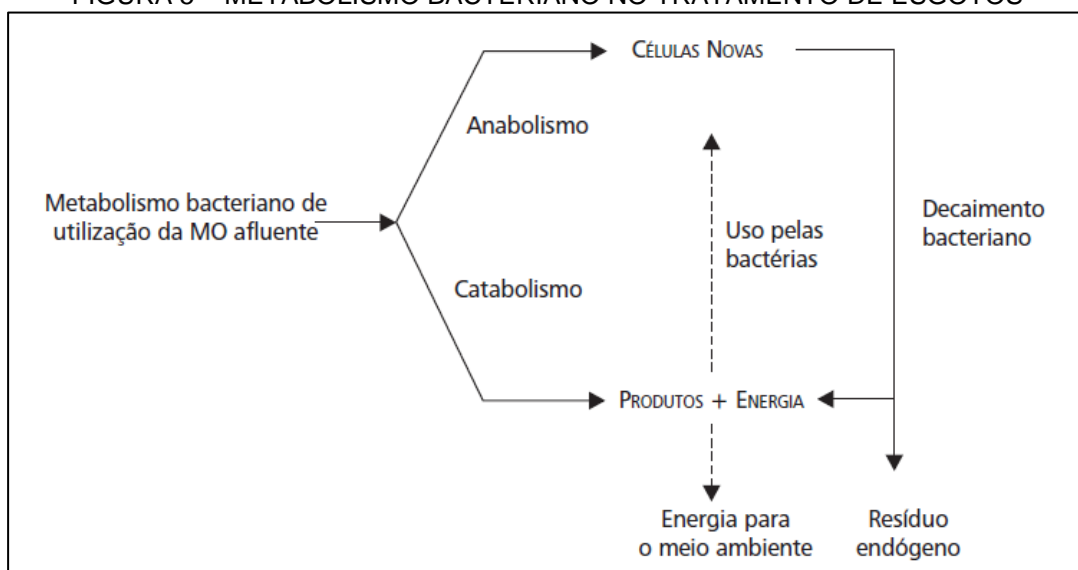
3.2.3 Geração de Lodo

O processo de geração de lodo biológico é fundamentado em dois processos: anabolismo e catabolismo. O anabolismo consiste na produção de novas células bacterianas pela transformação do material orgânico disponível em massa celular; já o catabolismo é o processo em que parte do material orgânico disponível é transformada em compostos inorgânicos, liberando-se, com isto, a energia necessária para que o anabolismo possa ocorrer (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

O catabolismo pode ser distinguido em dois processos: oxidativo e fermentativo. No oxidativo, o material orgânico é oxidado por compostos extracelulares, como O_2 , NO_3^- e SO_4^{2-} , liberando-se CO_2 e água como subprodutos. No fermentativo, especificando-se para a digestão anaeróbia, a matéria orgânica inicial é transformada em CO_2 e CH_4 . Como parte da energia inicialmente disponível ainda permanece na forma de CH_4 , a energia liberada neste processo é inferior à liberada no catabolismo oxidativo, o que explica a menor taxa de crescimento bacteriano (anabolismo) nos processos anaeróbios em relação aos aeróbios (van HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

Há ainda que se considerar o decaimento bacteriano, ocorrido quando as próprias células das bactérias são utilizadas como alimento pelas mesmas, o que se denomina respiração endógena. Portanto, a rigor, deve-se considerar apenas a fração biodegradável presente no lodo sujeita à respiração endógena (von SPERLING, 2016). Na Figura 5 é apresentado um esquema do metabolismo bacteriano.

FIGURA 5 – METABOLISMO BACTERIANO NO TRATAMENTO DE ESGOTOS



FONTE: Van Haandel e Cavalcanti (2001).

Em termos práticos, von Sperling e Gonçalves (2014) apresentam relações de produção de sólidos em suspensão em função da quantidade de matéria orgânica afluyente aos sistemas de tratamento, expressa como $DQO_{aplicada}$. A seguir, na Tabela 5, observam-se essas relações, resumidamente para as tecnologias abordadas no presente trabalho, inclusive para o caso do descarte do lodo aeróbio de excesso para digestão e adensamento nos reatores UASB.

TABELA 5 - TAXAS DE PRODUÇÃO DE LODO NOS SISTEMAS DE TRATAMENTO

| Sistema de Tratamento de Esgoto | Produção de lodo | | |
|---|-----------------------|-----------------------------|-----------|
| | (kgSST/kgDQOaplicada) | Concentração de Sólidos (%) | (L/hab.d) |
| Lodos ativados convencional | | | |
| Lodo primário | 0,35 - 0,45 | 2 - 6 | 0,6 - 2,2 |
| Lodo secundário | 0,25 - 0,35 | 0,6 - 1 | 2,5 - 6,0 |
| Total | 0,60 - 0,80 | 1 - 2 | 3,1 - 8,2 |
| Filtro Biológico de alta carga | | | |
| Lodo primário | 0,35 - 0,45 | 2 - 6 | 0,6 - 2,2 |
| Lodo secundário | 0,20 - 0,30 | 1 - 2,5 | 0,8 - 3,0 |
| Total | 0,55 - 0,75 | 1,5 - 4 | 1,4 - 5,2 |
| Reator UASB | 0,12 - 0,18 | 3 - 6 | 0,2 - 0,6 |
| UASB + Lodos Ativados convencional | | | |
| Lodo anaeróbio | 0,12 - 0,18 | 3 - 4 | 0,3 - 0,6 |
| Lodo aeróbio (descartado no UASB) | 0,08 - 0,14 | 3 - 4 | 0,2 - 0,5 |
| Total | 0,20 - 0,32 | 3 - 4 | 0,5 - 1,1 |

FONTE: Adaptado de Von Sperling e Gonçalves (2014).

3.3 PROCESSAMENTO DE LODO

Segundo Cassini et al. (2003), o lodo pode possuir características indesejáveis como instabilidade biológica, possibilidade de transmissão de doenças e grandes volumes a serem dispostos; para eximir tais características os autores relacionam as seguintes etapas:

- a) Adensamento ou espessamento: remoção da umidade;
- b) Estabilização: remoção da matéria orgânica;
- c) Condicionamento: preparação para a desidratação;
- d) Desidratação ou desaguamento: remoção de umidade;
- e) Higienização: remoção de organismos patogênicos;
- f) Disposição final: destinação final dos subprodutos.

Imhoff (1986), ao referir-se às etapas de processamento do lodo, afirmou: “A arte do planejador consiste em combinar as diferentes soluções de tal maneira que resulte uma sequência de processos de baixo custo e alta confiabilidade”. von Sperling e Gonçalves (2014) destacaram a importância de se conhecer a relação entre o teor de sólidos, a umidade e a consistência do lodo, pois são fatores que alteram significativamente seu volume, interferindo no dimensionamento das unidades operacionais, custos de transporte e disposição final, além de influírem em outras questões, como o manejo e o poder calorífico do lodo. Na Tabela 6, a seguir, apresenta-se tal relação.

TABELA 6 - TEOR DE SÓLIDOS SECOS, UMIDADE E CONSISTÊNCIA DO LODO

| Teor de sólidos secos (%) | Umidade (%) | Consistência |
|---------------------------|-------------|------------------------------|
| 0 a 25 | 75 a 100 | fluido |
| 25 a 35 | 65 a 75 | torta semi-sólida |
| 35 a 60 | 40 a 65 | sólido duro |
| 60 a 85 | 15 a 40 | lodo em grânulos |
| 85 a 100 | 0 a 15 | lodo desintegrado em pó fino |

FONTE: van Haandel e Lettinga (1994) apud von Sperling e Gonçalves (2014).

O fluxograma de processamento do lodo, bem como os equipamentos a serem utilizados em cada etapa, dependerá de sua composição, dos processos de tratamento de esgoto originários do lodo e da disposição final desejada para este. Além disso, alguns processos realizam mais de uma das etapas mencionadas, por exemplo, a secagem térmica, que propicia, além da desidratação do lodo, sua

estabilização e higienização (GONÇALVES et al., 2014). Portanto, nos projetos devem ser avaliadas as diversas opções de equipamentos e fluxogramas, inclusive considerando-se os processos de tratamento do esgoto, afim de se obter a solução mais adequada (FORBES, 2012).

3.3.1 Adensamento

O adensamento do lodo consiste no aumento da concentração de sólidos deste por meio da remoção parcial da quantidade de água, visando à redução de seu volume para facilitar o manuseio, processamento e disposição final (JORDÃO & PESSÔA, 2017). O teor de sólidos no lodo adensado atinge entre 1 e 8 %, dependendo de sua origem (GONÇALVES et al., 2014).

Segundo Gonçalves et al. (2014), os principais processos utilizados para o adensamento do lodo são a sedimentação por gravidade, a flotação por ar dissolvido e a centrifugação, mas as prensas desaguadoras também são mencionadas com frequência pelos autores. Na escolha entre um ou outro processo deve-se levar em conta que suas eficiências variam conforme o tipo de lodo a ser adensado.

Conforme mencionado anteriormente, os reatores UASB, além de reduzirem a carga orgânica dos esgotos, promovem o adensamento do lodo, por gravidade, atingindo valores entre 2 e 5 % de ST. Com isto, é dispensável uma unidade de adensamento do lodo excedente de reatores UASB, podendo este ser destinado diretamente para a etapa de desaguamento (CHERNICHARO, 2016).

Na NBR 12.209/11 definem-se taxas máximas de aplicação de sólidos e hidráulica para o dimensionamento de adensadores por gravidade, além de outros critérios de projeto como diâmetro e profundidade mínimos de 3 m e um Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) máximo de 24 h (ABNT, 2011).

3.3.2 Estabilização

A estabilização consiste na degradação de parte da matéria orgânica “fresca” do lodo, reduzindo, por consequência, as condições de sobrevivência de patógenos e a geração de odores oriundos da decomposição biológica desse (FERNANDES; SOUZA, 2001; CASSINI et al., 2003).

A estabilização pode ocorrer por via biológica, química ou térmica, sendo a digestão anaeróbia o processo mais utilizado no Brasil e no mundo (LUDUVICE, 2014;

TCHOBANOGLIOUS et al., 2014). Entretanto, esse processo não atinge níveis suficientes de remoção de patógenos para que o lodo possa ser reciclado sem restrições, necessitando-se, para tanto, processos complementares de higienização.

A digestão aeróbia de lodo ocorre quando os microrganismos aeróbicos consomem o próprio protoplasma microbiano, devido ao déficit de substrato disponível, gerando, como principais subprodutos: gás carbônico, água e amônia (FERNANDES; SOUZA, 2001; LUDUVICE, 2014). Em relação à anaeróbia, a digestão aeróbia possui vantagens como: produção de um biossólido fértil e inodoro, semelhante ao húmus; reduzida concentração de DBO no clarificado; ausência de risco de explosão; entre outras. Como desvantagens, podem ser citados o alto consumo energético para aeração, a não produção de metano para recuperação energética e a baixa capacidade de desaguamento mecânico do lodo digerido. A estabilização aeróbia também não torna o lodo higienizado para aplicação agrícola (TCHOBANOGLIOUS et al., 2014).

A estabilização química ocorre pela inibição da atividade biológica ou oxidação da matéria orgânica devido à adição de produtos químicos. Em pequenas escalas podem ser utilizados o cloro, ozônio, peróxido de hidrogênio e permanganato de potássio. Entretanto, o principal método empregado é a estabilização alcalina, geralmente adicionando-se cal ao lodo (FERNANDES; SOUZA, 2001). Por alcançar uma remoção significativa de patógenos, este processo será abordado no item 3.3.5 – Higienização.

Já a estabilização térmica é obtida pela ação do calor sobre os sólidos voláteis em recipientes hermeticamente fechados. Este processo, assim como a estabilização alcalina, promove uma redução significativa de patógenos, além de reduzir substancialmente o teor de umidade de lodos previamente desaguados (PINTO, 2014). Sendo assim, também será abordado no item 3.3.5 – Higienização.

A relação entre os sólidos voláteis e os sólidos totais (SV/ST) indica o grau de estabilização de um lodo quanto à sua biodegradabilidade. Na Resolução Conama 357/06, para fins de uso agrícola, o lodo é considerado estável quando possui esta relação inferior a 0,70 (BRASIL, 2006). O lodo anaeróbio excedente dos reatores UASB possui uma relação de SV/ST na faixa de 0,55 a 0,60 (von SPERLING; GONÇALVES, 2014).

3.3.3 Condicionamento

O condicionamento do lodo consiste em alterar suas características físico-químicas para que este possa ser mais facilmente adensado e/ou desaguado (MIKI et al., 2006). Segundo os autores, no condicionamento busca-se, primariamente, aumentar o tamanho das partículas sólidas, por coagulação e floculação, sendo que seu desempenho é afetado pelo tamanho das partículas, além de outros fatores físicos, químicos e biológicos.

O condicionamento é realizado, principalmente, pela adição de produtos químicos ao lodo. Outros métodos, como o tratamento térmico, o pré-aquecimento e o congelamento-descongelamento, podem apresentar vantagens interessantes (como a estabilização e higienização do lodo). Entretanto, estes têm sido pouco ou apenas experimentalmente aplicados (TCHOBANOGLIOUS et al., 2014).

Os produtos químicos utilizados podem ser orgânicos ou inorgânicos. Os orgânicos (também chamados de polieletrólitos ou polímeros) são mais comumente empregados em lodo de esgoto, pois apresentam vantagens como reduzido ou nulo acréscimo de massa de sólidos ao lodo, preservação da aptidão do lodo desidratado à incineração, maior simplicidade operacional e reduzidos custos (MIKI et al., 2006; GONÇALVES et al., 2014).

Os produtos condicionantes podem ser encontrados na forma sólida (pó) ou líquida (emulsão). A definição de qual é mais adequada depende de uma análise econômica, na qual deve-se considerar o teor de sólidos ativos no polímero em emulsão (geralmente na faixa de 25 a 50 %), comparativamente ao polímero em pó (100 % ativo), e seus respectivos custos e consumos (MIKI, 2017). A seguir, na Tabela 7, apresentam-se faixas típicas de consumo de polímero, por tipo de lodo, para desaguamento em centrífuga, bem como o teor de sólidos tipicamente obtido após o desaguamento (GONÇALVES et al., 2014).

TABELA 7 - FAIXAS TÍPICAS DE DOSAGEM DE POLÍMERO E CONCENTRAÇÃO DE LODO DESAGUADO EM CENTRÍFUGA

| Tipo de lodo | Dosagem de polímero (g/kgST) | Teor de Sólidos do Lodo Desaguado (%) |
|---------------------|-------------------------------------|--|
| Bruto primário | 2 a 3 | 28 a 34 |
| Anaeróbio | 2 a 3 | 35 a 40 |
| Aeróbio | 6 a 10 | 18 a 22 |
| Misto | 4 a 6 | 26 a 30 |

FONTE: Adaptado de Gonçalves et al. (2014).

3.3.4 Desaguamento

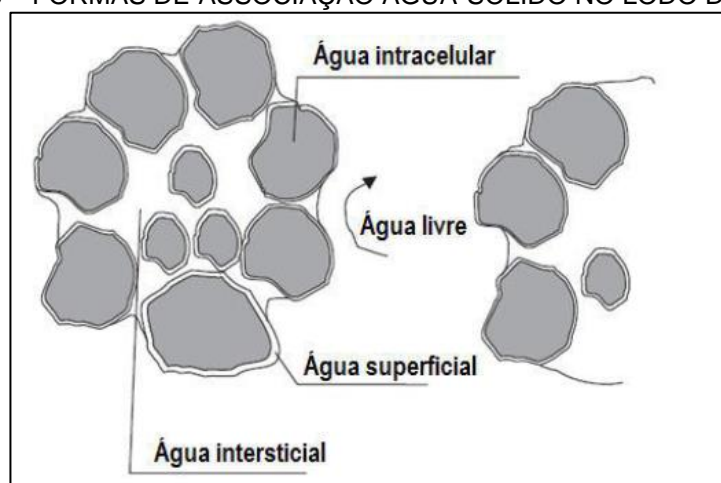
O desaguamento ou desidratação do lodo tem a finalidade de reduzir o volume deste por meio da elevação de sua concentração de sólidos, resultante da perda de água do lodo (MIKI et al., 2006; GONÇALVES et al., 2014). Segundo os autores, as principais razões para o desaguamento do lodo são:

- Redução do custo de transporte para a disposição final;
- Melhoria das condições de manejo do lodo;
- Aumento do poder calorífico do lodo;
- Redução do volume para disposição em aterro ou aplicação na agricultura;
- Diminuição da produção de lixiviado quando da disposição em aterros sanitários.

Van Haandel e Lettinga (1994) apresentam o impacto expressivo da redução volumétrica do lodo conforme reduz-se sua umidade, exemplificando que uma redução de 15 % na umidade pode provocar um decréscimo de 75 % no volume. Conforme o teor de umidade do lodo, a água pode estar associada a este de diferentes formas: livre, intersticial, superficial e intracelular, sendo que as três últimas necessitam de forças mecânicas ou alteração de estado físico para serem separadas dos sólidos (TCHOBANOGLIOUS et al., 2014).

Na Figura 6, a seguir, são apresentadas as diferentes formas que a água pode estar presente no lodo.

FIGURA 6 – FORMAS DE ASSOCIAÇÃO ÁGUA-SÓLIDO NO LODO DE ESGOTO



Fonte: Chen et al. (2006) apud Lobato (2011).

Segundo Gonçalves et al. (2014) os processos de desaguamento do lodo podem ser naturais ou mecanizados, sendo os principais:

- a) Leitões de secagem;
- b) Lagoas de lodo;
- c) Centrífugas;
- d) Filtros a vácuo;
- e) Prensas desaguadoras;
- f) Filtros prensas.

Os autores explicam que a eficiência dos processos está relacionada à facilidade de remoção da água dos sólidos, e depende, dentre outros fatores, do tipo de sólidos e da forma com que a água está ligada a esses. von Sperling e Gonçalves (2014, p.38) apresentaram faixas de teores de sólidos esperadas para diferentes processos de desaguamento para lodos provenientes de diversos tipos e etapas de tratamento de esgoto; os valores oscilam de 20 a 45 % de ST, o que caracteriza o lodo como torta semissólida, conforme apresentado na Tabela 6.

Valores inferiores de umidade já caracterizam o lodo como sólido duro, grânulos ou até pó, e são obtidos por outros processos, como a secagem térmica e a incineração. Tais processos, além de promoverem redução significativa do teor de umidade do lodo, também o tornam higienizado. Todavia, para essas operações o lodo deve ser previamente desaguado à teores de sólidos da ordem de 15 a 30 % ou superiores (MIKI et al., 2006; TCHOBANOGLOUS et al., 2014).

Gonçalves et al. (2001) apresentaram os “tubos de membrana geotêxtil” (também conhecidos como BAGs) como uma alternativa de desaguamento bastante robusta, apropriada para receber lodo de fossas sépticas e lagoas de estabilização. Segundo Jordão e Pessôa (2017), os BAGs, após utilizados, podem ser destinados à uma área de descarte ou permanecerem no próprio local. O líquido drenado deve retornar à entrada da ETE.

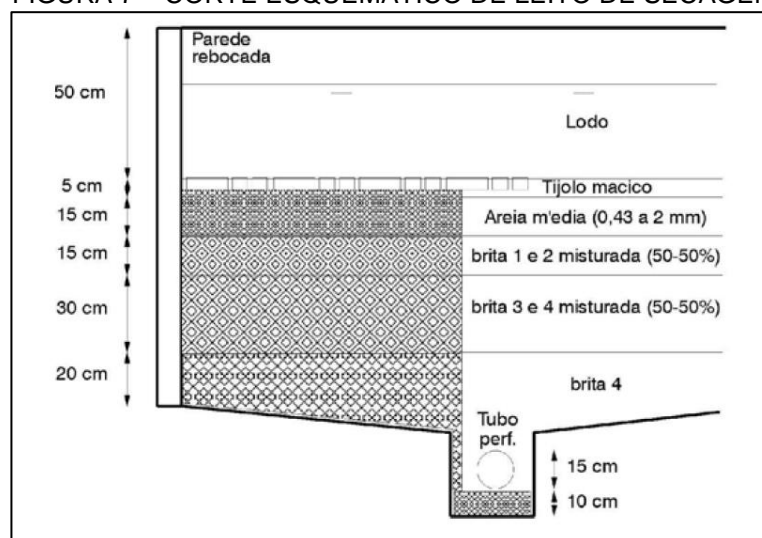
Na NBR 12.209 define-se que o líquido drenado nos processos de secagem deve ser recirculado à entrada do sistema de tratamento, e, na maioria dos casos, considerado no dimensionamento deste (BRASIL, 2011). Tchobanoglous et al. (2014) mencionam que tal efluente pode ser tratado separadamente afim de evitar uma sobrecarga de nutrientes na ETE, em especial quando o lodo for proveniente de digestão anaeróbia.

3.3.4.1 Leitões de Secagem

Os leitões de secagem foram as primeiras unidades a serem utilizadas para secagem de lodo. Tratam-se de tanques retangulares de concreto ou alvenaria destinados à secagem natural de lodo já estabilizado. São estruturas simples que possuem reduzido custo de implantação e operação se comparadas aos processos de secagem mecanizada (van HAANDEL & LETTINGA, 1994; AISSE et al., 1999).

A estrutura de secagem dos leitões compõe-se, basicamente, de uma soleira drenante (camadas de areia e brita, com espessura total em torno de 0,50 m), uma camada suporte (tijolos recozidos ou material semelhante assentados sobre a soleira drenante) e um sistema de drenagem (tubulação perfurada ou com juntas abertas alocada sob a soleira drenante) (AISSE et al., 1999; PEDROZA et al., 2006; ABNT, 2011), conforme apresenta-se na Figura 7, a seguir.

FIGURA 7 – CORTE ESQUEMÁTICO DE LEITO DE SECAGEM



FONTE: Pedroza et al. (2006).

van Haandel e Lettinga (1994) apresentaram o conceito de produtividade dos leitões, definida como a razão entre a taxa aplicada de sólidos por metro quadrado (kgST/m^2) e o tempo de ciclo (em dias) necessário para obter determinada umidade residual no lodo. Dividindo-se a produção diária esperada de lodo pela produtividade é possível estimar a área necessária de leitões. Entretanto, o dimensionamento por este método requer o conhecimento prévio da produtividade dos leitões a serem implantados, ou seja, a taxa de aplicação de sólidos e o tempo de ciclo necessário para obter determinado teor final de sólidos.

Outra forma de se dimensionarem os leitos de secagem é dividindo-se a massa total de lodo produzida, em um ciclo de operação, pela taxa de aplicação de sólidos adotada (GONÇALVES et al., 2014). Na prática, isto representa a massa diária de lodo multiplicada pelo inverso da produtividade. Ou seja, nas duas situações é necessário um conhecimento prévio de valores de taxa de aplicação de sólidos e tempo de ciclo.

A taxa de aplicação de sólidos é função da concentração do lodo e da altura da coluna de água no leito, e é preconizada pela NBR 12.209/11 no valor máximo de 15 kgST/m² (ABNT, 2011). Já o tempo de ciclo, compõe-se por quatro períodos:

- T1: Período de preparação do leito e descarga do lodo;
- T2: Período de percolação;
- T3: Período de evaporação;
- T4: Período de coleta do lodo seco e limpeza do leito.

Os períodos T1 e T4 são menos significativos e dependem basicamente das condições operacionais dos leitos. Já os períodos T2 e T3 variam em função de diversos aspectos. São esses: taxa de aplicação de sólidos, características do lodo, fatores meteorológicos, características da camada drenante do leito (alguns autores consideram que a granulometria não deve afetar a percolação), umidade final desejada para o lodo e aspectos construtivos (existência ou não de cobertura e/ou aquecimento artificial do leito) (AISSE et al., 1999; PEDROZA et al., 2006).

Gonçalves et al. (2014) apresentaram um exemplo em que consideraram 20 dias de tempo de ciclo, sendo 15 dias para T2 e T3 e 5 dias para T1 e T4. Cerqueira e Aisse (2017) levantaram uma série de resultados da literatura, de tempos de ciclo e taxas de aplicação de sólidos, verificando as relações que levaram às maiores produtividades para teores de sólidos finais variando entre 20 e 30 %. A taxa de aplicação de 23,7 kgST/m², com o tempo de ciclo de 14 dias (desconsiderando-se os períodos T1 e T4), levou o lodo à concentração final de 27 % nos trabalhos de Aisse e Andreoli (1998), em leitos cobertos. Por outro lado, sob a influência de chuvas, levaram-se 29 dias para se obter o mesmo teor de sólidos (28 %), com a mesma taxa de aplicação.

Cabe observar que, apesar da taxa de 15 kgST/m² ser a máxima estabelecida por norma, alguns estudos, relacionados por Cerqueira e Aisse (2017), apresentaram bons resultados (maior produtividade) com taxas bastante superiores (atingindo até

73 kgST/m², em regiões de clima quente), para a obtenção de lodos com teores de sólidos da ordem de 20 a 30 %. Uma possível explicação é que, até que atinja em torno de 20 % de sólidos, o lodo é desaguado, rapidamente, por percolação da água. A partir de então, passa a predominar o processo de evaporação, que é mais lento (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994; AISSE et al., 1999; SOARES, 2001). Ou seja, mesmo com taxas de aplicação altas, é possível atingir, em tempos relativamente curtos, teores de sólidos finais na faixa de 20 a 30 %, desde que não haja influência significativa de chuvas.

A principal limitação dos leitos é a demanda por grandes áreas, de tal forma que, em geral, tais unidades são viáveis apenas para atendimento de pequenas e médias comunidades (GONÇALVES et al., 2014). Baréa (2013) concluiu em seu estudo que, considerando-se apenas os custos de implantação, a secagem natural em leitos pode ser mais econômica que a mecanizada para ETEs com vazão de até 100 L/s. Visando um maior alcance dos leitos de secagem, Cerqueira e Aisse (2017) sugerem que, para cada novo projeto, considere-se a disposição final do lodo e o teor de sólidos mínimo que a viabilize, para então se definirem os parâmetros que reflitam a maior produtividade possível, considerando-se os dados dos estudos existentes e a semelhança das condições experimentais destes com a realidade local.

Cabe mencionar, por fim, que estudos têm sido realizados com diferentes camadas drenantes, como geotêxtil em substituição à areia, que podem ser alternativas promissoras de otimização dos leitos (MORTARA, 2011).

Na Figura 8 é apresentado um exemplo de leitos de secagem cobertos.

FIGURA 8 – EXEMPLO DE LEITOS DE SECAGEM COBERTOS



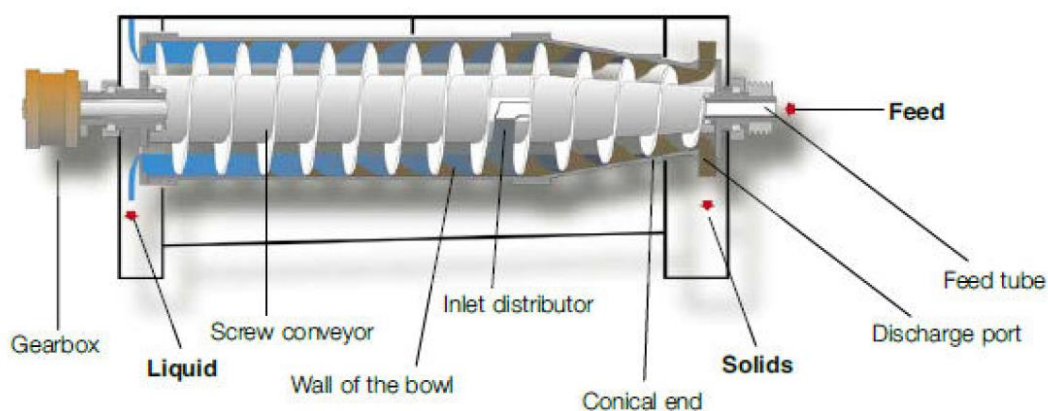
FONTE: O autor (2019).

3.3.4.2 Centrífugas Decanter

As Centrífugas Decanter, com este nome associado à alimentação contínua de material, são utilizadas para desaguamento de lodo a mais de 30 anos, tendo sido bastante difundidas nos Estados Unidos e no Brasil (MIKI et al., 2006). Atualmente, no Brasil, há uma tendência da utilização de centrífugas quando se trata de desaguamento mecânico de lodo de esgoto. Os equipamentos vêm sendo modernizados, com melhorias na eficiência de desaguamento, materiais e, notavelmente quanto à captura de sólidos, que pode atingir 99 %, desde que utilizada uma dosagem adequada de polímeros (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

O princípio básico de funcionamento das centrífugas é a diferença da aceleração de materiais de densidades diferentes, que, ao serem expostos à força centrífuga, que atinge de 500 a 3.000 vezes a força da gravidade, separam-se. Esta força é atingida pela rotação de um tambor cilíndrico, dentro do qual o lodo é descarregado. A captura da fração sólida é realizada por uma rosca sem fim, interna ao tambor, que carrega os sólidos para o sentido inverso do fluxo líquido. Na descarga dos sólidos o tambor possui forma cônica, forçando o adensamento dos sólidos (MIKI et al., 2006). A seguir, na Figura 9, pode-se observar um corte esquemático do equipamento descrito.

FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO DA CENTRÍFUGA DECANTER



FONTE: Alfa Laval (2018).

O modo de funcionamento das centrífugas pode variar conforme o fabricante. Jordão e Pessôa (2017) comentam que essas podem operar com fluxo contracorrente ou co-corrente, a depender da direção dos fluxos do lodo centrifugado e do líquido excedente, denominado de “centrado”.

Quanto ao teor de sólidos obtidos, Bittencourt (2014, p. 125) apresentou valores médios entre, aproximadamente, 16 e 21% para lodo centrifugado proveniente de três diferentes processos de tratamento: Lodos Ativados de Aeração Prolongada, UASB + Flotação por Ar Dissolvido e UASB + Lagoa. Apesar de não relatada a dosagem de polímero nessas ETEs, nota-se que os valores de teor de sólidos são um pouco abaixo das faixas típicas apresentadas por Gonçalves et al. (2014), apresentadas na Tabela 7.

Cabe observar que é recomendado, pelas empresas fornecedoras de centrífugas, que a concentração do lodo afluente à estas seja a mais homogênea possível, o que geralmente demanda a utilização de tanques de equalização/mistura de lodo (GRUPO PIERALISI, 2018; SANEPAR, 2018).

Ademais, tendo em vista que o lodo centrifugado deverá ser removido da área da ETE, podendo ser diretamente levado à um destino final ou passar por um processo de higienização logo em seguida, a estrutura em que as centrífugas são alocadas geralmente possui mais de um pavimento, de forma que o lodo pode ser descartado por gravidade para uma caçamba ou uma canaleta de transporte. O porte dessas estruturas dependerá do número e do tamanho das centrífugas, bem como dos itens periféricos como painéis elétricos, sistemas de alimentação do lodo, sistemas de condicionamento, entre outros, como pode-se observar nas Figuras 10 e 11, a seguir.

FIGURA 10 – PRÉDIO DAS CENTRÍFUGAS – ETE STA QUITÉRIA (SANEPAR)



FONTE: Bittencourt (2014).

FIGURA 11 – PRÉDIO DAS CENTRÍFUGAS – ETE HÉLIO SEIXO DE BRITO (SANEAGO)



FONTE: Adaptado de SANEAGO (2018).

Segundo a Norma Técnica 287/11 da Sabesp (SABESP, 2011), no dimensionamento das centrífugas deve ser considerada a carga de sólidos (kgST/h) afluyente ao equipamento, respeitando-se a capacidade de processamento deste. Assim, com a carga mínima de sólidos pode-se estipular a vazão máxima de lodo afluyente; já com a carga máxima, estipula-se o torque máximo a ser suportado pela centrífuga. Entretanto, é comum que as centrífugas sejam referidas em termos de vazão volumétrica de lodo (GRUPO PIERALISI, 2018).

3.3.4.3 Wetlands Construídos para Lodo

Os Wetlands Construídos para Lodo (WCL), também conhecidos como *reed beds* ou *Sludge Drying Reed Beds* (SDRB), são utilizados desde a década de 80 para o desaguamento e a estabilização de lodo de esgoto, em alguns países da Europa como Dinamarca, Polônia, Bélgica, França, e também na Ásia. Na Dinamarca e na França, essa tecnologia já é consolidada para o tratamento de lodo, com mais de 140 e 500 unidades em operação, respectivamente, em cada país (UGGETTI et al., 2010; MELLO, 2014 apud MANJATE, 2016).

Em geral, os WCL são utilizados para tratamento de lodo de tanques sépticos, em sistemas descentralizados, porém, há também diversas experiências com o recebimento de lodo secundário de lodos ativados (KOLECKA et al., 2018). Por requererem áreas relativamente grandes, os WCL são mais utilizados em sistemas de

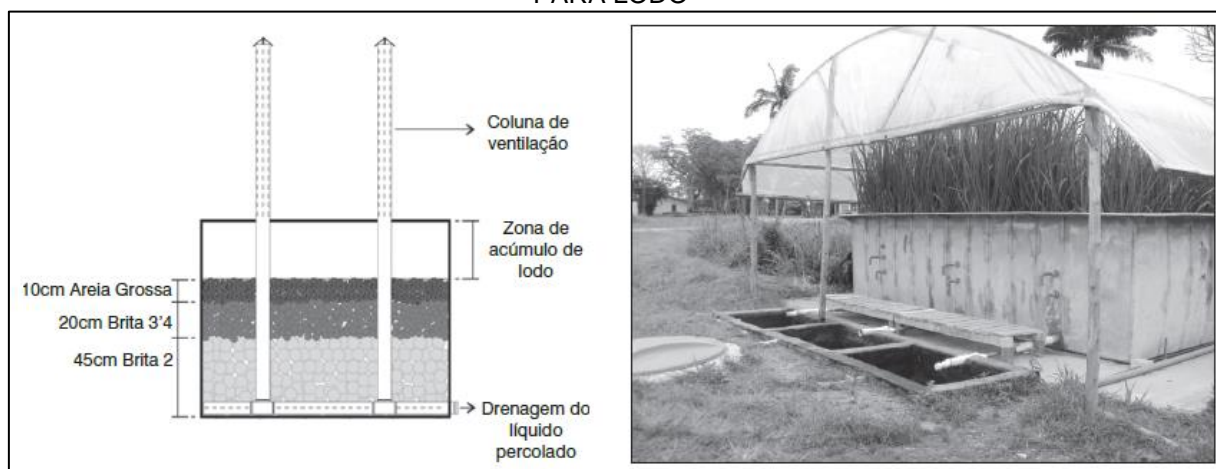
pequeno e médio porte, entretanto, na Dinamarca existem sistemas atendendo até 125 mil habitantes (UGGETI et al., 2010).

Os WCL são muito semelhantes ao Sistema Francês de Wetlands para tratamento de esgoto, com fluxo vertical e um leito filtrante granular, usualmente cascalho e areia grossa, dispostos gradualmente. Porém, em se tratando de lodo, os Wetlands contam com uma borda livre maior, geralmente acima de 1 m, possibilitando o acúmulo do lodo por períodos prolongados, que podem ultrapassar 10 anos (UGGETI et al., 2010; MELLO et al., 2005 apud MANJATE, 2016).

Cabe a analogia também com os leitos de secagem, com algumas diferenças essenciais (além da maior altura de borda livre), como a não remoção do lodo após cada ciclo de desaguamento e a presença de plantas nos WCL. Diferentemente das plantas emergentes de forma involuntária nos leitos de secagem, nos WCL são plantadas macrófitas, com a finalidade de auxiliarem no desaguamento, tanto por transpiração quanto pela fissuração das camadas de lodo devido ao crescimento de suas raízes, que tornam o meio mais poroso. Além disso, pelas raízes formam-se canais de transporte de oxigênio para as camadas inferiores de lodo, favorecendo a mineralização dessas (UGGETI et al., 2010). Acrescenta-se ainda que, nos WCL, devem-se prever tubulações para ventilação do meio filtrante (SUNTTI et al., 2011).

Na Figura 12, apresenta-se um esquema dos Wetlands Construídos para Lodo e um sistema piloto estudado por Suntti et al. (2011), em Florianópolis – SC.

FIGURA 12 – DESENHO ESQUEMÁTICO E SISTEMA PILOTO DOS WETLANDS CONSTRUÍDOS PARA LODO



FONTE: Suntti et al. (2011).

Assim como nos leitos de secagem, o principal parâmetro de dimensionamento dos WCL é a taxa de aplicação de sólidos, a qual deve ser

associada a fatores como as características do lodo, a estratégia operacional, o clima, dentre outros (VINCENT et al., 2011; MANJATE, 2016). Manjate (2016) relaciona uma série de trabalhos que relatam taxas de aplicação de sólidos variando de 30 a 360 kgST/m².ano⁻¹. O autor menciona que, para lodo de lodos ativados, em regiões de clima tropical, é possível indicar taxas de 100 a 200 kgST/m².ano⁻¹, mas, em regiões de clima temperado, as taxas devem ser da ordem de 30 a 50 kgST/m².ano⁻¹. Suntti et al. (2011) aplicou taxas de 125 e 250 kgST/m².ano⁻¹, com lodo de Tanque Séptico, na região sul do Brasil.

O líquido drenado dos WCL assemelha-se a um esgoto bruto, as vezes com elevadas concentrações de sólidos e matéria orgânica, devendo ser tratado antes de lançado em corpos receptores. Observa-se, entretanto, que, conforme observado por Suntti et al. (2011) e Manjate (2016), as WCL atingem elevadas eficiências de remoção de sólidos, QDO e nutrientes, o que minimiza o impacto da recirculação deste à entrada dos sistemas de tratamento.

Por fim, os WCL apresentam uma série de vantagens, tais como simplicidade operacional e baixo custo de implantação e operação. Como principal desvantagem pode-se citar a necessidade de áreas relativamente grandes. Problemas operacionais como a colmatação do leito filtrante, ocasionando mal cheiro e atração de moscas, podem ocorrer, apesar de serem relatados na literatura como associados a equívocos de projetos e/ou de operação (DOMINIÁK et al., 2011; KOLECKA et al. 2018).

Em suma, os Wetlands para lodo apresentam-se como soluções bastante interessantes para países como o Brasil, em desenvolvimento, de clima tropical e com muitos sistemas descentralizados. Porém, conforme mencionam Suntti et al. (2011), essa tecnologia ainda é muito pouco estudada e aplicada no território nacional.

Na Figura 13, a seguir, apresenta-se uma WCL implantada em escala real, dentro de uma ETE, para uma população de 1.750 habitantes, em Itabirito - MG.

FIGURA 13 – WCL IMPLANTADA EM ETE PARA 1.750 HABITANTES



FONTE: Wetlands Construídos (2018).

Por fim, cabe comentar que não se encontram com facilidade, na literatura, trabalhos que verificam a qualidade sanitária do lodo removido dos WCL, algo compreensível, uma vez que o lodo é removido apenas após períodos de 10 a 15 anos.

3.3.5 Higienização

A higienização consiste na redução da concentração dos organismos patogênicos a níveis que o lodo não cause riscos de contaminação à população ou danos ao meio ambiente, podendo ser realizada por meio de mecanismos físicos, químicos e/ou biológicos. Fatores como temperatura, pH, teor de umidade, radiação solar, oxigênio, entre outros, associados ao tempo de exposição e às características do lodo, definem os níveis de redução dos diferentes grupos de patógenos (PINTO, 2014; POMPEO, 2015).

As tecnologias utilizadas variam conforme o nível de higienização que se pretende atingir. A agência americana de proteção ao meio ambiente, EPA (*Environmental Protection Agency*), define, em função da qualidade sanitária atingida no lodo (Classe A ou Classe B), duas categorias de tratamento: PSRP (*Processes to Significantly Reduce Pathogens*) e PFRP (*Processes to Further Reduce Pathogens*), conforme apresenta-se na Tabela 8 (USEPA, 2003).

TABELA 8 - PROCESSOS DE HIGIENIZAÇÃO DE LODO RECOMENDADOS PELA EPA

| Obtenção de lodo Classe A | Obtenção de lodo Classe B |
|---|---|
| Processes to Further Reduce Pathogens (Processos de redução adicional de patógenos) | Processes to Significantly Reduce Pathogens (Processos de redução significativa de patógenos) |
| Compostagem | Compostagem |
| Secagem térmica | Digestão aeróbia |
| Tratamento térmico | Digestão anaeróbia |
| Digestão aeróbica termofílica | Secagem |
| Radiação Beta e Gama | Estabilização com cal |
| Pasteurização | Processos equivalentes |
| Processos equivalentes | - |

Fonte: Adaptado de USEPA (2003).

No Brasil, a Resolução CONAMA 375/06, que também distingue o lodo em classes A e B conforme os padrões sanitários, dá a mesma orientação quanto aos processos de higienização. Entretanto, define que, após 5 anos de sua publicação, apenas o lodo Classe A pode ter aplicação agrícola, o que aparentemente restringe as tecnologias a serem aplicadas. No entanto, a Resolução permite que outros processos de higienização sejam realizados, desde que comprovada a segurança sanitária do lodo higienizado (BRASIL, 2006). No Paraná, por exemplo, a Estabilização Alcalina Prolongada (EAP) tem sido utilizada com êxito para se obterem lodos que atendam aos critérios da classificação Classe A, viabilizando a disposição agrícola do lodo (BITTENCOURT, 2014).

Andreoli et al. (2001) apresentaram como as alternativas mais econômicas de higienização: caleação, compostagem e tratamento térmico com energia alternativa. Os autores explanam que a caleação e a compostagem, apesar de econômicas, ocasionam o aumento da quantidade final do produto higienizado. Quanto ao tratamento térmico com energia alternativa, os autores apresentam algumas experiências realizadas pela SANEPAR, buscando-se higienizar o lodo em leitos de secagem, tais como: uso de estufa aquecida com queima de biogás; uso de filme plástico sobre a camada do lodo; uso de estufa plástica para aquecimento, e; revolvimento do lodo, com e sem estufa. Apesar de não possibilitarem o alcance de lodo Classe A, essas alternativas mostraram-se vantajosas no sentido de reduzir a quantidade de cal necessária para tanto.

Cabe reforçar que há diversas formas de tornar o lodo higienizado, sendo algumas já consolidadas e outras ainda em estudo. Pompeo (2015) avaliou a eficiência da higienização de lodos pelo processo de estocagem prolongada, que

consiste na simples disposição do lodo em pátios e espera por um período tal que as condições ambientais inativem os organismos patogênicos. Avaliou-se a estocagem de lodo séptico e de reatores UASB, em pátios cobertos e descobertos, com e sem revolvimento do lodo, sob diferentes condições climáticas no Paraná.

Quanto ao lodo de reatores UASB, as condições mais desfavoráveis foram os pátios descobertos, em região mais fria e de maior precipitação pluviométrica (no caso, Fazenda Rio Grande comparativamente à Apucarana), independentemente de haver o revolvimento ou não (este fator não apresentou influência significativa na redução dos patógenos). Para estas condições, foram necessárias 47 e 61 semanas, respectivamente, para que os valores de coliformes e *Salmonella* atendessem aos limites da Classe A da Resolução CONAMA 375/06. A autora avaliou também o decaimento de ovos viáveis de helmintos, que atingiu os padrões de Classe A em 2 anos de estocagem, porém, apenas nos pátios cobertos, devendo-se destacar também que a concentração inicial de ovos foi relativamente baixa (sempre abaixo de 10 ovos viáveis por grama de ST). Além de ser um reflexo das condições de saúde da população, baixos valores de ovos de helmintos puderam ser atribuídos à uma “pré-higienização” nos leitos de secagem, com eficiências de até 99 % em 30 dias.

Por fim, em relação à compostagem, que já é uma solução consolidada, destaca-se a possibilidade do processamento integrado do lodo com resíduos sólidos urbanos e agroindustriais, produzindo-se um insumo de alta qualidade agronômica, além de ser benéfica no sentido ambiental (FERNANDES; SILVA, 1999).

3.3.5.1 Estabilização Alcalina Prolongada - EAP

Segundo Pinto (2014), a elevação do pH do lodo, a determinados níveis, altera a natureza coloidal do protoplasma celular dos microrganismos patogênicos de forma letal. O processo torna-se ainda mais efetivo quando se eleva a temperatura, o que ocorre quando se utiliza a cal para promover a higienização.

A caleação do lodo possui vantagens como baixo custo e relativa facilidade operacional, se comparada à compostagem (ANDREOLI et al., 2001). Segundo os referidos autores, três fatores intervêm na higienização do lodo por caleação: a alteração inicial da temperatura, a mudança do pH e a ação da amônia que é liberada devido ao nitrogênio presente no lodo, especialmente em lodos anaeróbios. Neste aspecto, ressalta-se a importância da avaliação dos riscos toxicológicos associados à inalação de amônia pelos operadores da ETE (AMARAL, 2018).

Segundo Pegorini et al. (2003), pesquisas demonstraram que os padrões de higienização do lodo para aplicação agrícola, exigidos por uma Instrução Normativa do Instituto Ambiental do Paraná – IAP, mais restritiva que a atual CONAMA 375/06 para lodo Classe A, eram alcançados pela aplicação de 50 % de cal em relação à massa seca de lodo, elevando-se o pH do lodo a 12 ou superior e assim o mantendo por 30 dias ou mais, preferencialmente em pátio coberto.

Este método, após comprovada eficiência, passou a constar na Resolução SEMA 21/09 (PARANÁ, 2009) e a ser empregado pela Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR, que vem aplicando lodo calcado na agricultura desde 2002. Passou a ser chamado de Estabilização Alcalina Prolongada (EAP), e, no Paraná, têm sido aplicadas quantidades de 30 a 50 % de cal em relação à massa seca de lodo (BITTENCOURT, 2014).

O tempo de estocagem mínimo é de 60 dias, sendo 30 para a higienização em si e mais 30 até que sejam finalizados os ensaios de sanidade do lodo. Todavia, outras etapas são necessárias, como a Autorização Ambiental e, paralelamente a este processo, o desenvolvimento de um projeto agrônomo da disposição agrícola do lodo (BITTENCOURT et al. 2017a). Todas essas questões, além de outras como a disponibilidade de áreas, aumentam a complexidade logística do processo, fazendo com que o lodo permaneça por períodos prolongados nos pátios (BITTENCOURT, 2014; BITTENCOURT et al. 2017a).

Nas Figuras 14 e 15, apresentam-se imagens de pátios de estocagem utilizados pela SANEPAR.

FIGURA 14 – PÁTIO DE CURA DA UGL ETE RONDA, PONTA GROSSA-PR (SANEPAR)



FONTE: SANEPAR (2018).

FIGURA 15 – PÁTIO DE CURA DA UGL VASSOURAL, GUARAPUAVA-PR (SANEPAR)



FONTE: Bittencourt (2014).

Cabe observar que o lodo submetido à EAP, previamente desaguado a níveis da ordem de 15 a 30 % de ST, após o período de estocagem, atinge teores de sólidos na faixa de 50 a 60 % (BITTENCOURT, 2014).

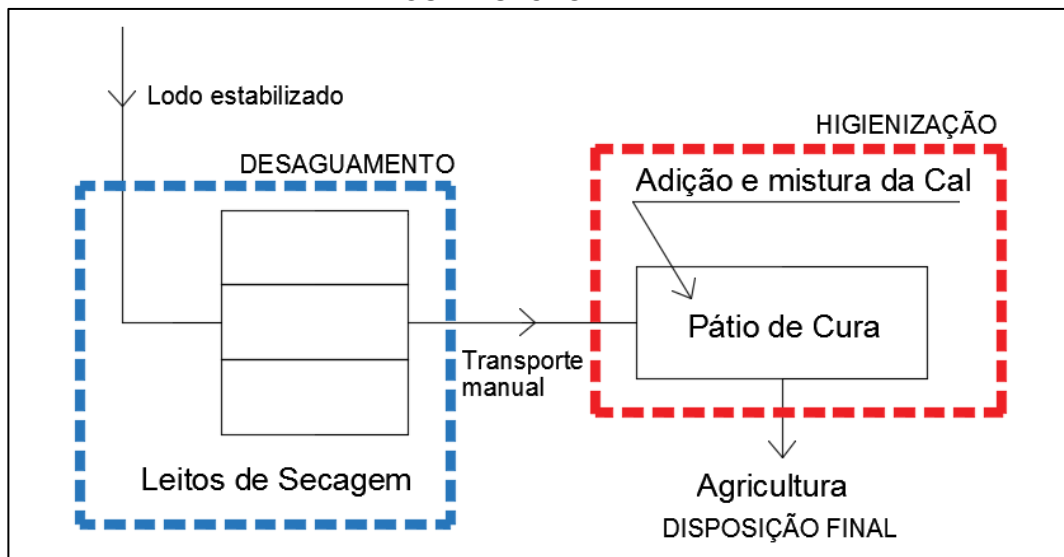
Como desvantagem do processo de caleação, Andreoli et al. (2001) e Tchobanoglous et al. (2014) citam o aumento da massa de sólidos devido à incorporação do material ao lodo.

Quanto às estruturas necessárias para promover a caleação, dependerão da vazão de lodo a ser higienizado e da forma de desaguamento deste. Para sistemas de grande porte, em que o lodo é desaguado mecanicamente, utilizam-se silos de estocagem, dosador de cal, roscas de transporte de cal e de lodo, misturador de cal e lodo, entre outros equipamentos auxiliares. Já em sistemas menores, em que o lodo é desaguado em Leitos de Secagem, a betoneira com carregador automático é uma alternativa de equipamento para promover a mistura cal/lodo, podendo ser adaptada para promover o destorroamento do lodo e otimizar o contato deste com a cal (BARÉA, 2013). Em ambas as situações, no caso da aplicação agrícola, faz-se necessário o pátio de estocagem de lodo caleado. Destaca-se, entretanto, que na literatura não se encontram parâmetros de dimensionamento desses pátios.

O lodo excedente de reatores UASB possui, em geral, teores de sólidos na faixa de 3 a 6 % (von SPERLING; ANDREOLI, 2014). No Paraná, este lodo é desidratado a teores de 15 a 35 % (mecanicamente ou naturalmente), para então ser higienizado por EAP (BITTENCOURT, 2014).

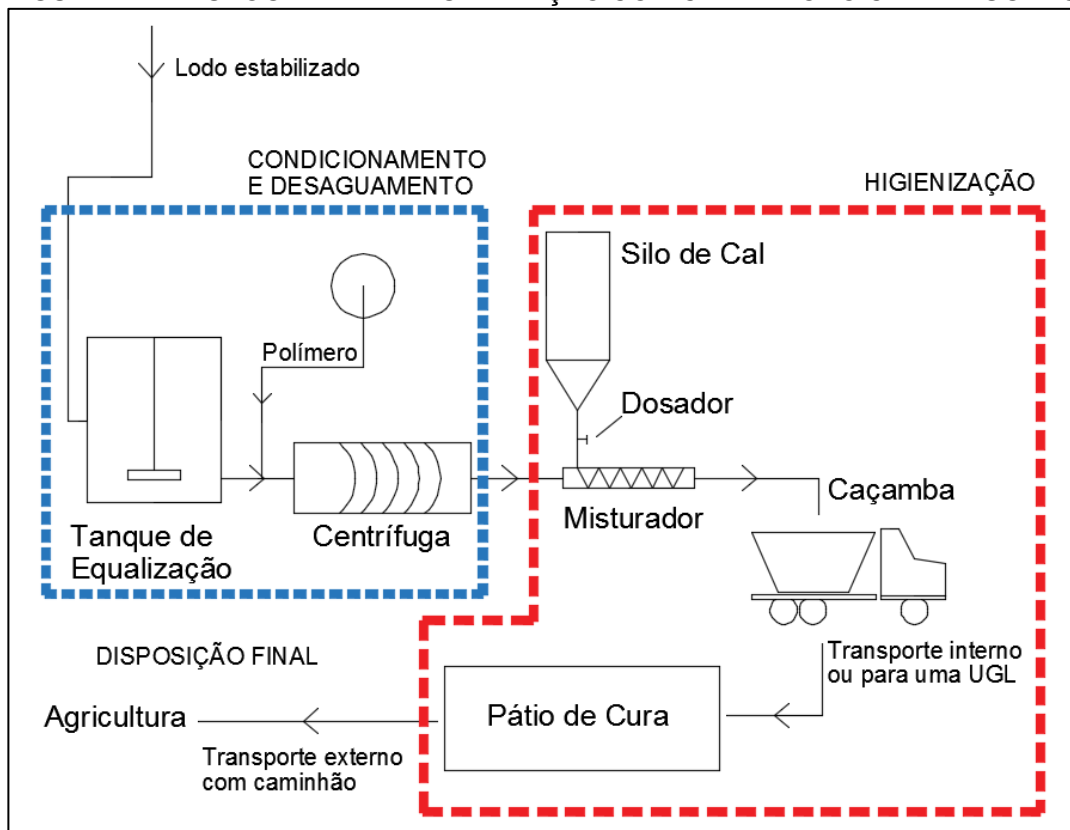
Nas Figuras 16 e 17, apresentam-se os fluxogramas, usualmente encontrados na literatura, de higienização por meio da Estabilização Alcalina Prolongada, a depender da forma de desagamento do lodo.

FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DA HIGIENIZAÇÃO COM CAL DE LODO DESAGUADO EM LEITOS DE SECAGEM



FONTE: Adaptado de: Baréa (2013), Bittencourt (2014) e Gonçalves et al. (2014).

FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DA HIGIENIZAÇÃO COM CAL DE LODO CENTRIFUGADO



FONTE: Adaptado de: Baréa (2013), Bittencourt (2014), Gonçalves et al. (2014) e Tchobanoglous et al. (2014).

3.3.5.2 Secagem Térmica

Segundo Gonçalves et al. (2014), o processo de secagem térmica consiste no aquecimento do lodo em ambiente hermeticamente fechado, com a evaporação da umidade desse e recirculação do vapor, condensado, à entrada da ETE. O lodo de entrada deve ser previamente desaguado a teores de sólidos da ordem de 20 %, pelo menos, e atinge valores da ordem de 90 % de ST após a secagem (ROSA et al., 2016). Conforme apresentado na Tabela 8, a secagem térmica é considerada um processo de redução adicional de patógenos, permitindo a obtenção de lodo higienizado a nível de Classe A.

Os secadores térmicos são classificados quanto à forma de transferência de calor ao lodo, que pode ser por condução, convecção, irradiação ou a combinação de dois ou mais desses métodos. Classificam-se em: diretos (secagem por convecção, quando um gás quente entra em contato direto com o lodo úmido); indiretos (secagem por condução, quando um fluido aquecido transfere calor à superfície em que o lodo se encontra), diretos-indiretos (combinação dos processos mencionados) e infravermelhos (secagem por irradiação) (TCHOBANOGLOUS et al., 2014).

No mercado brasileiro são encontrados secadores do tipo direto, indireto e, em menor frequência, direto-indireto. Dentre os vários modelos disponíveis, os secadores do tipo tambor rotativo são os mais comumente encontrados, geralmente com sistema de secagem indireta, utilizando-se óleo ou gás quente para aquecer a superfície de contato do secador (PRATA, 2016). Prata (2016) relacionou alguns fornecedores e as características dos respectivos secadores térmicos, conforme é apresentado na Tabela 9.

TABELA 9 - FORNECEDORES E CARACTERÍSTICAS DE SECADORES TÉRMICOS NO MERCADO BRASILEIRO

| Fornecedor | Modelo | Tipo de secagem |
|-----------------|--------------------|--------------------|
| Pieralisi | Tambor Rotativo | Indireta |
| Albrecht | Tambor Rotativo | Direta |
| Haarslev | Esteira | Direta ou Indireta |
| Watropur | Gerador de ar seco | Direta |
| Watropur | Esteira | Direta |
| M. W. Watermark | Esteira | Direta |
| Gratt | Tambor Rotativo | Indireta |
| Gratt | Tambor Rotativo | Indireta |
| Andritz | Tambor Rotativo | Indireta |
| SMS | Tambor Rotativo | Indireta |

FONTE: Adaptado de Prata (2016).

Como pode-se observar, os secadores térmicos ainda não possuem um modelo padrão, que possibilitasse, por exemplo, o atendimento à uma Norma Técnica para seu fornecimento para empresas de saneamento, como é feito para as centrífugas na SABESP (SABESP, 2011). Desta forma, cada fabricante possui um secador com características únicas, variando-se não apenas o modelo e a forma de secagem, mas também os materiais empregados, tamanho, alternativas construtivas e possibilidades operacionais (PRATA, 2016). Com base nisto, Prata (2016) sugere as seguintes etapas para a seleção adequada de um secador térmico:

- a) Definição da vazão de lodo e regime de funcionamento do secador;
- b) Pré-seleção dos secadores recomendados pela literatura e disponíveis no mercado;
- c) Compatibilização das características dos equipamentos pré-selecionados com as características da ETE, tais como: nível de automação, disponibilidade de funcionários, fontes de energia disponíveis, teores de sólidos, área disponível, entre outras;
- d) Análise econômica dos secadores tecnicamente viáveis.

Os secadores podem ser aquecidos a partir de diferentes fontes de energia térmica, como gás natural, gás GLP, carvão, óleo e, em especial, quando utilizados para secagem de lodo em ETEs com tratamento anaeróbio, o biogás. O próprio lodo, após seco, pode ser utilizado como combustível, devido ao alto poder calorífico que possui (POSSETTI et al., 2015, ROSA et al., 2016, ALBRECHT, 2018). Isso mostra a grande variedade de alternativas técnicas e operacionais. A seguir, apresentam-se alguns modelos de secadores observados em contato com empresas e na literatura.

a) Secadores Térmicos Albrecht - Bruthus

O Bruthus é um secador térmico de tambor rotativo, em que o fluxo de ar quente entra em contato direto com o lodo, em co-corrente, trocando calor com este e elevando seu teor de sólidos. Uma vez que o lodo possui alto poder calorífico, o fluxo em co-corrente é uma medida de inibição do risco de ignição, já que a massa de ar mais quente entra em contato com o lodo mais úmido. A capacidade do sistema em lodo úmido varia de 300 a 4.500 kg/h (ALBRECHT, 2018).

O Bruthus é alimentado por um transportador helicoidal que introduz o lodo no tambor rotativo. Este é confeccionado em aço e possui isolamento térmico com lã

de rocha. Em seu interior, possui haletas e moinhos que direcionam o lodo e quebram os torrões formados. Todo o sistema de alimentação do lodo e rotação do tambor é automatizado e pode ser controlado por inversores de frequência (ALBRECHT, 2018).

A saída de lodo seco se dá pela diferença de pressão, maior no interior do tambor, para um compartimento denominado multiciclone, onde os sólidos são separados dos gases quentes por ação da gravidade. O lodo seco é descarregado pela parte inferior do multiciclone e pode ser conduzido por rosca transportadora até uma caçamba, ou, se for o caso, conduzido à um equipamento de queima de lodo seco para utilização deste como fonte adicional de energia térmica, reduzindo o lodo a cinzas. Os gases expelidos do multiciclone devem passar por um sistema lavador de gases (hidrociclone) para serem liberados à atmosfera, com a ajuda de um exaustor centrífugo (ALBRECHT, 2018). Na Figura 18 apresenta-se o secador térmico Bruthus instalado.

FIGURA 18 – SECADOR TÉRMICO BRUTHUS



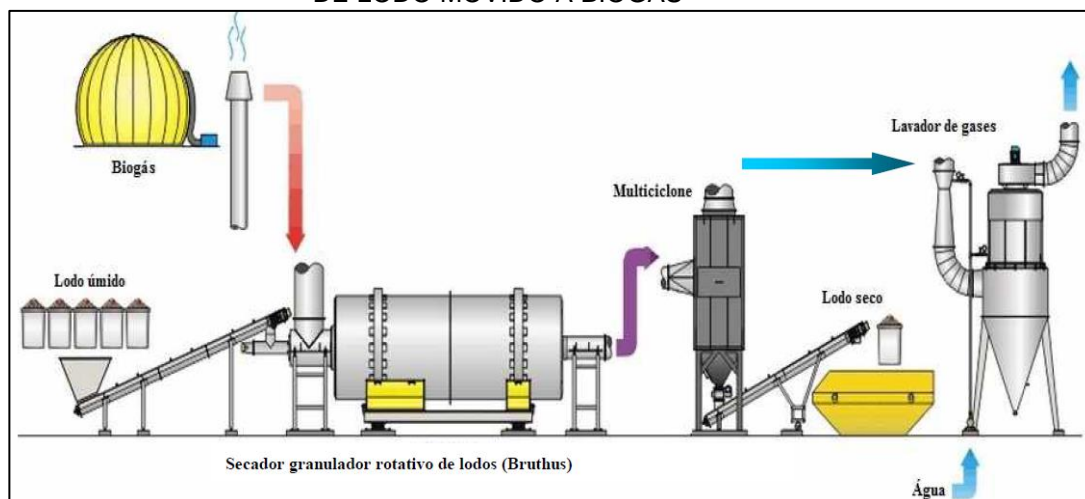
FONTE: Albrecht (2018).

Cabe destacar também que, a depender da fonte de energia térmica utilizada, variam os equipamentos periféricos necessários. Enquanto que o gás natural e o GLP são soluções comerciais, relativamente compactas, outras opções como o biogás e o próprio lodo necessitam de instalações adicionais que, apesar de serem fontes de energia prontamente disponíveis nas ETEs anaeróbias, requerem maiores investimentos de implantação, conforme mencionado no Item 3.1.2.2.

Possetti et al. (2015) avaliaram um sistema piloto do Bruthus para a secagem de lodo anaeróbio, em uma ETE no Paraná, utilizando o biogás como fonte de energia térmica. O lodo, inicialmente com cerca de 23 % de sólidos, passou a 83 % de ST,

tendo-se verificada a necessidade de cerca de 1.300 ± 300 kcal para a remoção de 1 kg de água do lodo. Na Figura 19 apresenta-se o fluxograma considerado neste estudo.

FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA PILOTO DE SECAGEM DE LODO MOVIDO A BIOGÁS



FONTE: Possetti et al. (2015)

Quanto à higienização, Possetti et al. (2015) observaram a redução dos organismos patogênicos a níveis inferiores aos limites impostos na Resolução CONAMA 375/06 (BRASIL, 2006), para lodo classe A, conforme apresenta-se na Tabela 10.

TABELA 10 - HIGIENIZAÇÃO DE LODO ANAERÓBIO POR SECAGEM TÉRMICA

| Indicador Biológico | Unidade | Quantidade | | VMP ^(c) CONAMA 375/06 |
|----------------------------|-----------------------------|-------------------|---------|----------------------------------|
| | | Antes | Depois | |
| Ovos viáveis de helmintos | Ovo/g de ST | 5 | 0,1 | < 0,25 |
| <i>Salmonellas</i> | UFC ^(a) /g de ST | $9,9 \times 10^3$ | Ausente | Ausente |
| Vírus Entéricos | UFF ^(b) /g de ST | > 10 | Ausente | < 0,25 |
| Coliformes Termotolerantes | UFC/g de ST | $2,3 \times 10$ | 70 | < 10^3 |

FONTE: Adaptado de POSSETTI et al. (2015).

NOTAS: (a) Unidade Formadora de Colônia; (b) Unidade Formadora de Foco; (c) Valor Máximo Permitido para lodo classe A.

b) Secadores Térmicos Albrecht – Bruthus F

O Bruthus F foi desenvolvido para quantidades menores de massa: 100 a 300 kg/h. Apesar de ser tecnicamente adequado para secagem de lodo de esgoto, sua aplicação tem sido em outras áreas como na secagem de farinha de penas ou vísceras, subprodutos de graxarias e resíduos de frigoríficos (ALBRECHT, 2018).

Diferentemente do Bruthus, o Bruthus F é do tipo indireto, utilizando vapor de água para o aquecimento das paredes metálicas do secador, bem como do helicóide interno que movimenta o lodo. A água evaporada do lodo é conduzida a um lavador de gases por conter alto teor de particulados; já o vapor de aquecimento do sistema é condensado no processo e retorna à uma caldeira, formando um circuito fechado (ALBRECHT, 2018).

A entrada do sistema é semelhante ao Bruthus, necessitando de um sistema de deslocamento positivo para a introdução do lodo no equipamento. Já quanto à saída do lodo, não se faz necessário o multiciclone, uma vez que os gases de secagem não se misturam com o lodo. A fase sólida é removida diretamente pela parte inferior do secador (ALBRECHT, 2018).

Quanto ao aproveitamento de fontes alternativas de energia, o biogás, por exemplo, seria utilizado para aquecimento da caldeira de geração de vapor, necessitando de acessórios semelhantes aos mencionados no item 3.1.2.2 (tanque de drenagem, compressor, gasômetro, etc.) para manter a queima contínua do gás (ALBRECHT, 2018). Na Figura 20 apresentam-se os equipamentos do Bruthus F.

FIGURA 20 – SECADOR TÉRMICO BRUTHUS F



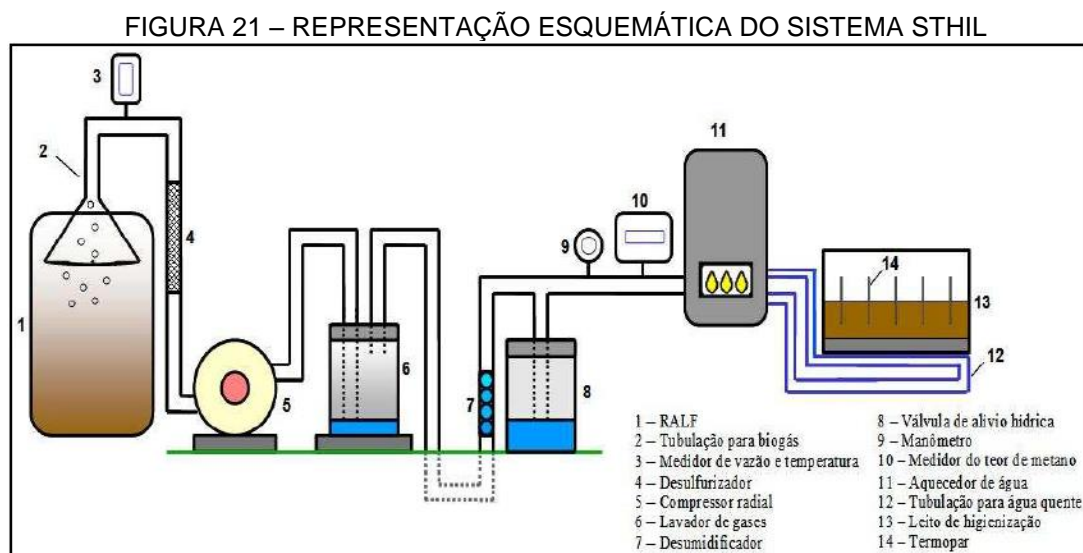
FONTE: Albrecht (2018).

c) Sistema STHIL

Ferreira et al. (2003) iniciaram estudos de higienização de lodo pelo aquecimento deste nos próprios leitos de secagem, utilizando-se, para tanto, tubulações de cobre com circulação de óleo aquecido, em sistema fechado, dispostas no fundo dos leitos. Para o aquecimento do óleo utilizou-se o biogás disponível na ETE. Os leitos de secagem foram cobertos com estufas plásticas para evitar a interferência da chuva no processo.

Possetti et al. (2012), seguindo esta linha de pesquisa, desenvolveram um leito com piso aquecido para secagem e higienização de lodo de ETEs de pequeno e médio porte, denominado STHIL (Secagem Térmica para Higienização do Lodo). O lodo, já desaguado à teores de sólidos de 15 %, foi disposto em bateladas no leito de higienização. Água aquecida foi circulada em tubulações internas ao piso de concreto do leito, com 10 cm de espessura. A água foi aquecida a partir da queima de biogás proveniente de reatores UASB.

Ambas as experiências demonstraram ser eficientes quanto à higienização do lodo a nível de uso irrestrito na agricultura. A seguir, na Figura 21, apresenta-se um esquema do sistema STHIL apresentado por Possetti et al. (2012).



FONTE: Possetti et al. (2012).

Posteriormente, Wagner et al. (2015) realizam estudos semelhantes aos de Possetti et al. (2012), desta vez utilizando-se energia solar para o aquecimento da água. Os autores recomendaram que o lodo seja previamente desaguado a teores de sólidos de 20 %, afim de reduzir a área necessária dos leitos de higienização.

3.3.6 Disposição final e aproveitamento do lodo

Sendo o lodo de esgoto um resíduo proveniente dos serviços de saneamento, conforme a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, deve ser gerenciado com a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010). Neste sentido, Sampaio (2013) considera que a produção de lodo não deve ser vista como uma simples consequência do processo de tratamento de esgotos, mas sim como uma ineficiência de processos que devem ser otimizados quanto à produção e à qualidade do lodo. O autor propõe que seja sempre avaliada a possibilidade de redução da produção e obtenção de um lodo com qualidade desejável, para então serem estudadas alternativas de disposição final.

Outra questão é que o lodo deve ser considerado como fonte de matéria prima, e não mais como um resíduo a ser descartado. Países mais desenvolvidos vêm cada vez mais aplicando o lodo na agricultura e/ou utilizando-o como combustível, já que esse possui elevado poder calorífico e pode ser termicamente processado para a cogeração de energia elétrica ou utilização direta dos gases quentes (ROSA et al., 2016).

As principais formas de destinação final do lodo, em geral, são: descarte em aterro sanitários, aplicação no solo para usos benéficos (incluindo-se neste item a utilização agrícola do lodo) e incineração (embora esta última não seja considerada uma forma de destinação final, por alguns autores, já que o processo produz cinzas) (BEECHER, 2008).

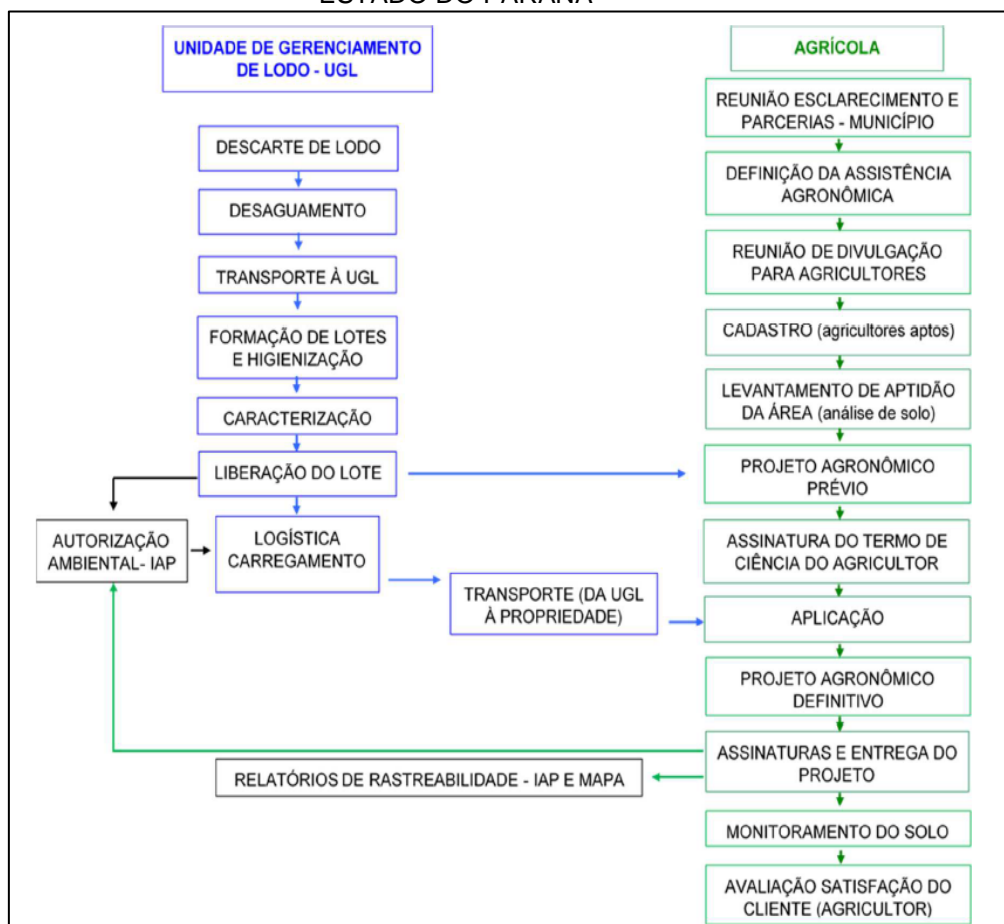
A disposição do lodo na agricultura se destaca por proporcionar uma série de benefícios sociais, ambientais e econômicos, tais como (SAMPAIO, 2013; BITTENCOURT, 2014):

- A redução da disposição do lodo em aterros sanitários, minimizando, assim, a emissão de gases do efeito estufa;
- A reciclagem de nutrientes, destacando-se o Nitrogênio e o Fósforo;
- A fertilização do solo e conseqüente redução do consumo de fertilizantes industrializados;
- O condicionamento do solo quando utilizado lodo higienizado com cal, reduzindo as despesas do agricultor neste processo;
- O aumento da produtividade agrícola, ao encontro da crescente demanda.

Conforme mencionado anteriormente, para a aplicação agrícola do lodo deve-se respeitar a Resolução CONAMA 375/06. Entretanto, algumas das exigências desta têm se tornado empecilhos para esta prática no Brasil, fazendo com que, na maioria do território nacional, o lodo continue a ser disposto em aterros sanitários (SAMPAIO, 2013; BITTENCOURT, 2014). Dentre as várias dificuldades encontradas para o atendimento à Resolução, pode-se citar a frequência de monitoramento exigida em função da produção de lodo, que nem sempre é compatível às realidades das concessionárias de saneamento, por exemplo, pela falta de laboratórios qualificados para a caracterização dos lotes de lodo formados (BITTENCOURT et al., 2017b). Além disso, podem ocorrer desencontros entre a liberação do lote e a época de semeadura das culturas agrícolas, forçando o acúmulo de lodo nos pátios das ETEs.

Bittencourt (2014) destaca a grande complexidade no gerenciamento da aplicação agrícola do lodo, no estado do Paraná, envolvendo um projeto agrônomo que deve ser desenvolvido em paralelo ao processamento do lodo, conforme é apresentado na Figura 22, a seguir.

FIGURA 22 – ETAPAS DA GESTÃO DO USO AGRÍCOLA DE LODO DE ESGOTO NO ESTADO DO PARANÁ



FONTE: Bittencourt (2014).

Por outro lado, a Companhia de Saneamento do Estado de Goiás – SANEAGO destina o lodo produzido em sua maior ETE para a recuperação de áreas degradadas, após desaguá-lo em centrífugas e higienizá-lo parcialmente com cal, possivelmente obtendo um lodo equivalente à Classe B. A empresa têm observado bons resultados de recuperação da fertilidade do solo em áreas anteriormente desertas (SANEAGO, 2018).

O aproveitamento energético do lodo apresenta-se também como uma solução interessante, pois além de ser uma fonte energética renovável, o lodo é reduzido a cinzas, com massa e volume relativamente desprezível. A combustão/incineração é a forma mais difundida de aproveitamento energético do lodo, havendo também outros processos como a pirólise e a gaseificação (ROSA et al., 2015). As cinzas geradas nesses processos possuem potencial de aproveitamento agrícola, principalmente pela concentração elevada de fósforo, entretanto, deve-se atentar à possível presença de metais pesados (VOGEL et al., 2016 apud AMARAL, 2018). Outras aplicações para as cinzas de lodo de esgoto são o condicionamento de solos e o uso na indústria de cimento, amplamente realizado no Japão (BEECHER, 2008).

O processo de combustão para aproveitamento energético do lodo demanda um controle rigoroso das emissões atmosféricas, bem como elevados custos de implantação e operação, fatores que têm inibido o crescimento dessas tecnologias em alguns países, como no Brasil (BEECHER, 2008; ROSA et al., 2015).

Por fim, cabe acrescentar que pesquisas recentes têm estudado a recuperação dos nutrientes Nitrogênio e Fósforo do lodo a partir da precipitação desses na forma de estruvita, o que ganha uma importância cada vez maior, principalmente quanto ao fósforo que é um recurso natural limitado e vem sendo consumido pela indústria de fertilizantes (CARMONA, 2017).

De maneira geral, nota-se que o lodo pode ser aproveitado de diversas formas ao invés de ser simplesmente disposto em aterros sanitários. A disposição do lodo nestes torna-se problemática devido, além dos possíveis impactos ambientais (como o aumento de emissões atmosféricas e contaminação de aquíferos), a demanda grandes áreas e competição com os resíduos sólidos urbanos (LUDUVICE; FERNANDES, 2014). Portanto, conforme mencionado por Sampaio (2013), o lodo deve ser visto como matéria prima, e não mais como resíduo.

3.4 GERENCIAMENTO DE LODO DE REATORES UASB COM PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO: PROBLEMAS RECENTES

Conforme mencionado no item 3.1.3, em ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio existe a possibilidade de descarte do lodo aeróbio de excesso nos reatores UASB, para adensamento e digestão, permitindo, assim, que o lodo misto excedente seja encaminhado diretamente à etapa de desaguamento. Entretanto, problemas operacionais têm sido associados à esta prática, reflexos da perda excessiva de sólidos junto ao efluente dos reatores UASB, como a colmatação de leitos filtrantes (no caso de UASB + FBP) e sobrecargas de sólidos nos decantadores secundários, levando ao acúmulo excessivo de lodo nestes (FLORIPES et al., 2018; LOBATO et al., 2018; ALMEIDA et al., 2018).

A literatura é contraditória em alguns pontos sobre as causas da perda de sólidos dos reatores UASB. Silva Filho e van Haandel (2014) verificaram que parte do lodo aeróbio descartado nos reatores UASB, de baixa biodegradabilidade e sedimentabilidade, tinham facilidade em serem expulsos do UASB, passando a permanecer em “ciclo” no sistema de tratamento, até que fossem carreados junto ao efluente final, deteriorando a qualidade deste. Por outro lado, Almeida et al. (2018) mencionaram estudos que verificaram boas condições de sedimentabilidade do lodo aeróbio de excesso, e atribuem a perda de sólidos à falta de protocolos adequados de descarte do lodo do UASB, bem como à falta de capacidade das unidades de desaguamento, que impedem a realização de descartes do UASB na frequência adequada.

Em relação aos protocolos de descarte de lodo, Almeida et al. (2018) e Lobato et al. (2018) recomendam a retirada de, no mínimo, 50 % do lodo de excesso da parte superior do compartimento de digestão dos reatores UASB, em que o lodo é menos concentrado e tende a escapar mais facilmente do reator. Face ao volume relativamente grande deste lodo (por ser menos concentrado), os autores recomendam a utilização de um tanque auxiliar de adensamento e homogeneização previamente à etapa de desaguamento.

Floripes et al. (2018), avaliando diferentes estratégias de descarte de lodo em reatores seguidos de FBP, com retorno do lodo aeróbio ao UASB, também sugeriram o descarte de parte do lodo da camada superior do compartimento de digestão, para inibir a perda de sólidos com o efluente. Além disso, os autores recomendaram que a

frequência de descarte do lodo seja tal que mantenha a concentração de lodo, nas camadas mais altas, inferior a 0,5 % de ST (FLORIPES et. al., 2018)

Silva Filho e van Haandel (2014), por sua vez, ao verificarem a perda de sólidos no efluente de reatores UASB (sólidos provenientes da descarga de lodo aeróbio no UASB), propõem uma unidade de decantação previamente ao pós-tratamento aeróbio, visando remover as partículas que ficariam em ciclo no sistema, conforme mencionado anteriormente. Este lodo removido poderia ser destinado diretamente à etapa de desaguamento. Silva (2018), verificando uma perda da qualidade do efluente de reatores UASB quando da alimentação destes com lodo aeróbio de excesso (de lodos ativados), também comenta sobre a possibilidade de utilizar uma unidade de decantação (o autor sugere um sistema de alta taxa) intermediária. Entretanto, o autor observou possíveis efeitos negativos, como o aumento do teor de sólidos de baixa biodegradabilidade no tanque de aeração, reduzindo a capacidade de transferência de oxigênio no sistema e aumentado, por consequência, o consumo energético.

Além daquelas mencionadas, diversas outras causas da perda de sólidos dos reatores UASB são encontradas na literatura mais recente (ALMEIDA et al., 2018; LOBATO et al., 2018; SILVA, 2018), tais como:

- Definições inadequadas em projeto, como o coeficiente de produção de sólidos sem considerar-se a parcela do lodo aeróbio excedente;
- Aumento da produção de lodo devido ao recebimento de lodo de fossas sépticas na ETE, recebimento de lixiviado de aterro sanitário e ao lançamento de efluentes industriais na rede coletora de esgotos;
- Subdimensionamento das unidades de desaguamento;
- Dificuldades logísticas na destinação final do lodo, fazendo com que unidades de desaguamento fiquem sobrecarregadas e impeçam o descarte de lodo de excesso do UASB;
- Descarga do lodo aeróbio de excesso aos reatores UASB em momentos de vazões altas afluentes à ETE (principalmente em épocas de chuva).

Como pode-se perceber, o problema da perda de sólidos no efluente de reatores UASB, quando da descarga de lodo aeróbio neste, envolve uma série de fatores, tornando o gerenciamento do lodo uma atividade essencial, porém, de grande complexidade, para se manter a qualidade do efluente final.

3.5 ESTUDOS DE CONCEPÇÃO E ORÇAMENTAÇÃO NO SANEAMENTO

Os Estudos de Concepção constituem uma etapa prévia aos Projetos de Engenharia de Sistemas de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário. Nesses, são realizadas comparações de alternativas, devendo-se considerar os aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais de cada uma, para se definir a solução ideal ou a alternativa ótima (SANEPAR, 2017).

Quanto aos aspectos econômicos, tendo em vista que, muitas vezes, é inviável a realização de orçamentos detalhados, a SANEPAR sugere, em seu Manual de Projetos (MPS), que sejam realizados orçamentos preliminares para fins de comparação das alternativas (SANEPAR, 2017).

Segundo a Caixa Econômica Federal (CEF, 2014), um orçamento preliminar possui menor grau de incerteza do que uma estimativa de custo, e “Pressupõe o levantamento de quantidades dos serviços mais expressivos e requer pesquisa de preços dos principais insumos”. O órgão define estimativa de custo como uma avaliação expedita, com base em custos históricos e comparação de projetos similares, utilizada nas etapas iniciais do empreendimento para análises de viabilidade.

Para a orçamentação de obras e serviços de engenharia contratados e executados com recursos da União, excetuando-se as de infraestrutura de transportes, o SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, deve ser utilizado como balizador dos custos (BRASIL, 2013). O SINAPI consiste em um banco de dados, atualizado mensalmente, de preços de insumos e composições de serviços de engenharia, separadamente para cada Unidade da Federação (CEF, 2014).

Além desta ferramenta para a elaboração de orçamentos, algumas companhias de saneamento possuem bancos de dados próprios, construídos a partir de suas experiências, de preços de insumos e serviços. Esses dados são disponibilizados publicamente, na forma de tabelas, para uso pelas empresas projetistas, fornecedores, empreiteiros e demais interessados. A vantagem desses bancos de dados em relação ao SINAPI é que são específicos para obras de saneamento, compatíveis com os preços reais pagos pelas concessionárias, além de possuírem composições exclusivas do setor, como o custo de assentamento de tijolos em leitos de secagem, por exemplo (SANEPAR, 2018; SANEAGO, 2017).

Voltando aos Estudos de Concepção, para a comparação econômica de alternativas devem ser considerados não apenas os custos de implantação, mas também os de operação, para se verificar aquela de menor custo total. Os custos de operação devem ser representados pelo Valor Presente Líquido (VPL) correspondente ao período de projeto considerado, que geralmente é em torno de 20 anos (von SPERLING, 1996; JORDÃO & PESSÔA, 2017).

3.6 CUSTOS DE SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO E TRATAMENTO DE LODO – UMA ANÁLISE DA LITERATURA TÉCNICA

Na literatura encontram-se diferentes abordagens sobre os custos relacionados à coleta e tratamento de esgoto sanitário, tais como estudos de caso, funções custo, custos unitários, modelos de tomada de decisão e análises de ciclo de vida (ACV).

Canziani et al. (1999) verificaram a viabilidade de utilização agrícola do lodo de esgoto gerado na ETE Belém, em Curitiba-PR. Já Bielschowsky (2014), avaliou alternativas de gerenciamento de lodo para as cinco principais ETEs da bacia da Baía de Guanabara. Ambos são exemplos de estudos de caso.

Quanto às funções custo, Lucca et al. (2011) e Pacheco (2011) elaboram curvas que possibilitam a estimativa, gráfica ou por meio de fórmulas, dos custos de implantação de redes coletoras e sistemas de tratamento de esgoto. Pacheco (2011) e Baréa (2013) obtêm funções para a estimativa de custos de implantação de centrífugas e leitos de secagem para desaguamento de lodo, bem como de sistemas de higienização por Estabilização Alcalina Prolongada.

Os custos unitários, por sua vez, podem ser interpretados como funções custos, pois permitem a estimativa de custos em função de uma determinada variável (vazão, carga orgânica removida, população atendida, entre outras). Encontram-se, na literatura, algumas relações de custos unitários para diferentes processos de tratamento de esgoto, geralmente expressos em R\$/habitante (von SPERLING, 1996; ALÉM SOBRINHO & JORDÃO, 2001; AISSE et al., 2002).

Reami e Coraucci Filho (2015) apresentaram os custos unitários de implantação de sistemas de tratamento de esgoto em função da vazão (R\$/m³.d⁻¹). Os autores comentam que o custo por habitante pode vir a mascarar os resultados quando há grande variabilidade na contribuição per capita de esgoto, já que o porte de ETE depende da vazão de dimensionamento. Outra consideração interessante dos

autores é que os custos unitários podem gerar grandes discrepâncias quando aplicados em diferentes realidades. Segundo esses, o padrão de acabamento das obras, o tipo de impermeabilização e outras questões podem afetar significativamente os custos de implantação de determinadas unidades de tratamento de esgoto.

Métodos para tomada de decisão também são encontrados na literatura quando se pesquisa sobre os aspectos econômicos associados ao esgotamento sanitário. Reami (2011) aplicou métodos de tomada de decisão para a definição da alternativa mais adequada de tratamento de esgoto para o município de Restinga-SP. O autor utilizou, como dados de entrada, os custos unitários de implantação e operação, além de uma série de critérios qualitativos, para se definir a melhor alternativa. Oliveira (2004) elaborou um modelo do tipo “árvore” para tomada de decisão, em que o custo das alternativas de tratamento foi estimado a partir dos custos unitários da literatura e de entrevistas com especialistas.

Por fim, as Análises de Ciclo de Vida não deixam de ser métodos para tomada de decisão, pois permitem a avaliação da sustentabilidade global de alternativas. Em geral, quando realizadas com este objetivo, nas ACV consideram-se os aspectos sociais, econômicos e ambientais, condizendo com os pilares da sustentabilidade. Desta forma, os custos estão inseridos em um contexto mais amplo, porém, são imprescindíveis para as análises (AMARAL, 2018).

Como pode-se perceber, as diversas abordagens sobre os custos nos Sistemas de Esgotamento Sanitário são complementares, mas com focos diferentes. As funções custo e os custos unitários têm como enfoque possibilitar a estimativa de custos, enquanto que os métodos para tomada de decisão geralmente utilizam tais resultados para avaliações mais amplas, nas quais consideram-se também fatores sociais e ambientais.

É notável, entretanto, que estudos cujo objetivo é a construção de funções custo ou a obtenção de custos unitários, que, de certa forma, constituem uma base de dados para métodos de tomada de decisão (e para estudos de concepção), são escassos na literatura quando se trata de lodo de esgoto sanitário.

A seguir, apresentam-se resultados de alguns estudos que visaram à construção de funções custo para o tratamento de lodo, ou que apresentam dados voltados a este tipo de abordagem.

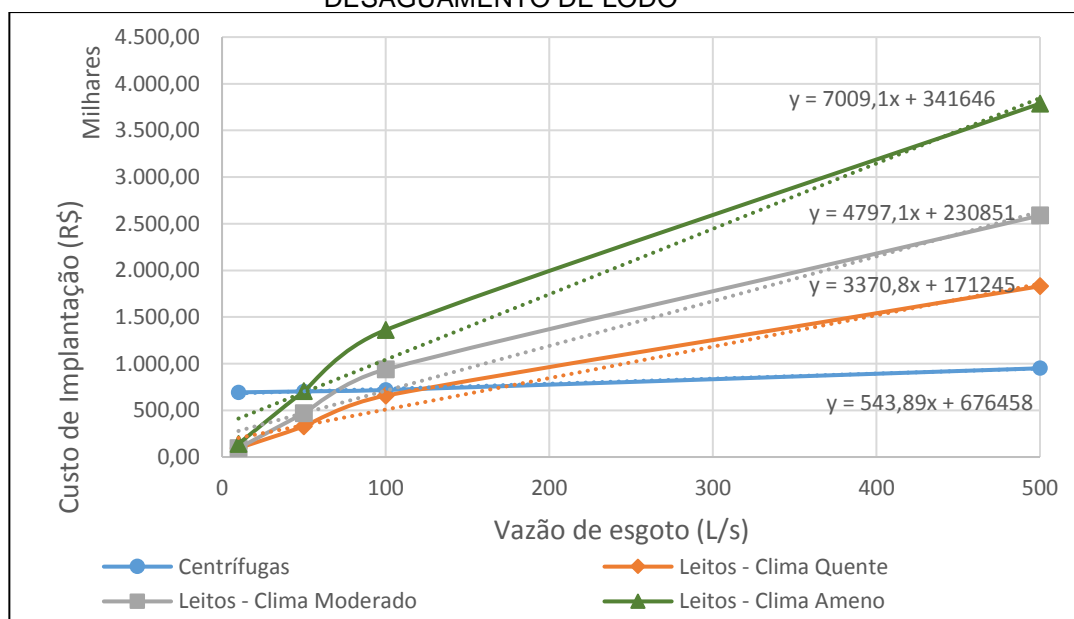
3.6.1 Custos de Implantação de Sistemas de Tratamento de Lodo

Baréa (2013) obteve curvas de custos de implantação de leitos de secagem, centrífugas e sistemas de higienização por caleação, considerando ETEs com reatores UASB (sem pós-tratamento). Para os leitos de secagem a autora realizou orçamentos a partir de modelos/projetos da SANEPAR, de dimensões 5 x 10 m e 6 x 20 m (largura x comprimento), a depender da vazão da ETE. Variou-se também o tempo de ciclo nos dimensionamentos, em função do clima considerado.

Quanto às centrífugas, a autora considerou os custos de Tanques de Equalização (inclusive misturador) e das centrífugas (com uma unidade reserva) já com o sistema de condicionamento, além da estrutura civil necessária. O custo das centrífugas foi obtido por cotações com empresas.

Na Figura 23, a seguir, estão apresentadas as funções custo obtidas pela autora para o desaguamento de lodo de esgoto.

FIGURA 23 – FUNÇÕES CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE DESAGUAMENTO DE LODO



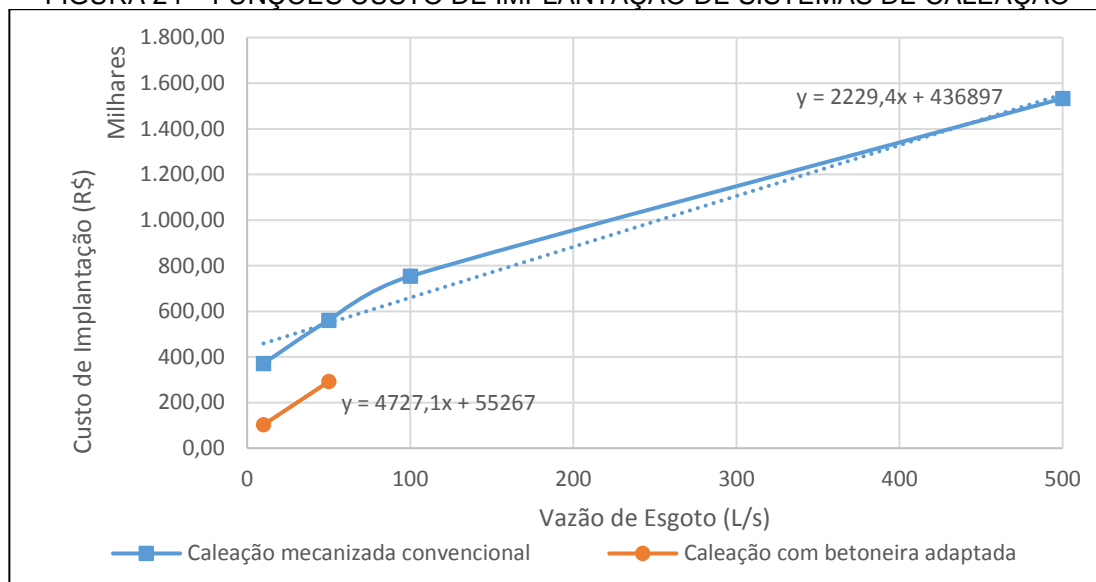
FONTE: Adaptado de Baréa (2013).
NOTA: Data-base dos valores: 2013.

Como pode-se observar, para as condições estudadas por Baréa (2013), em regiões de clima quente os leitos de secagem possuem menor custo de implantação para ETEs de até 100 L/s, aproximadamente.

Em relação aos sistemas de higienização, a autora dimensionou pátios de cura para a higienização por Estabilização Alcalina Prolongada (EAP), e orçou, além das obras civis, os equipamentos necessários para armazenamento, transporte e mistura

da cal à massa de lodo. Além disso, considerou uma alternativa de mistura cal-lodo para as vazões de 10 e 50 L/s, com uma betoneira adaptada, orçada em cerca de R\$ 20 mil. A seguir, na Figura 24, apresentam-se os resultados por ela obtidos.

FIGURA 24 – FUNÇÕES CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE CALEAÇÃO

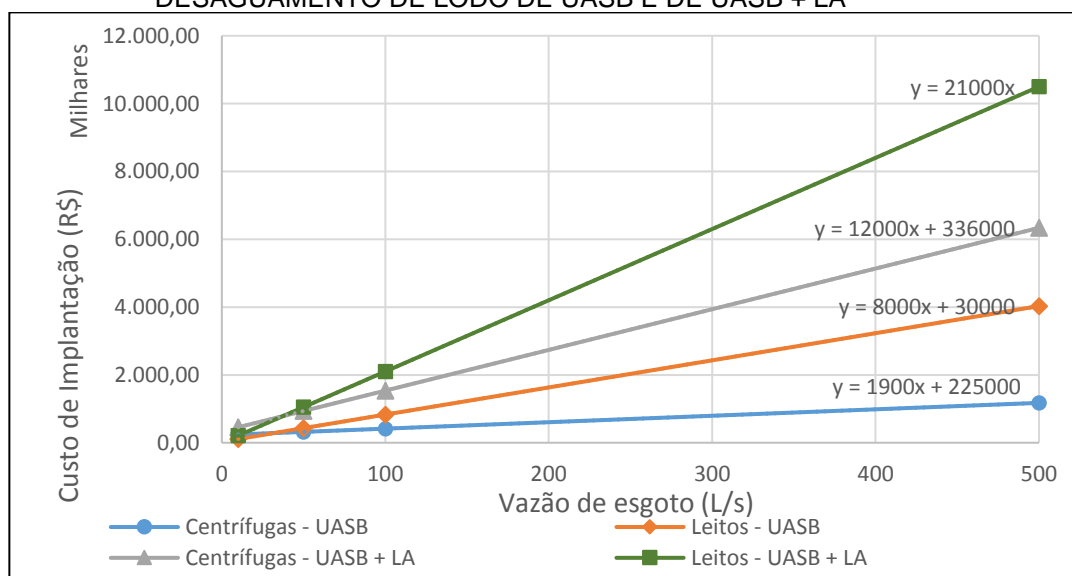


FONTE: Adaptado de Baréa (2013).

NOTA: Data-base dos valores: 2013.

Pacheco (2011) também elaborou curvas de custo de implantação de sistemas de desaguamento e higienização de lodo, considerando tanto o tratamento do esgoto apenas em reatores UASB como em UASB seguido de Lodos Ativados. Na Figura 25, a seguir, estão apresentadas as funções custo obtidas pelo autor.

FIGURA 25 – FUNÇÕES CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE DESAGUAMENTO DE LODO DE UASB E DE UASB + LA



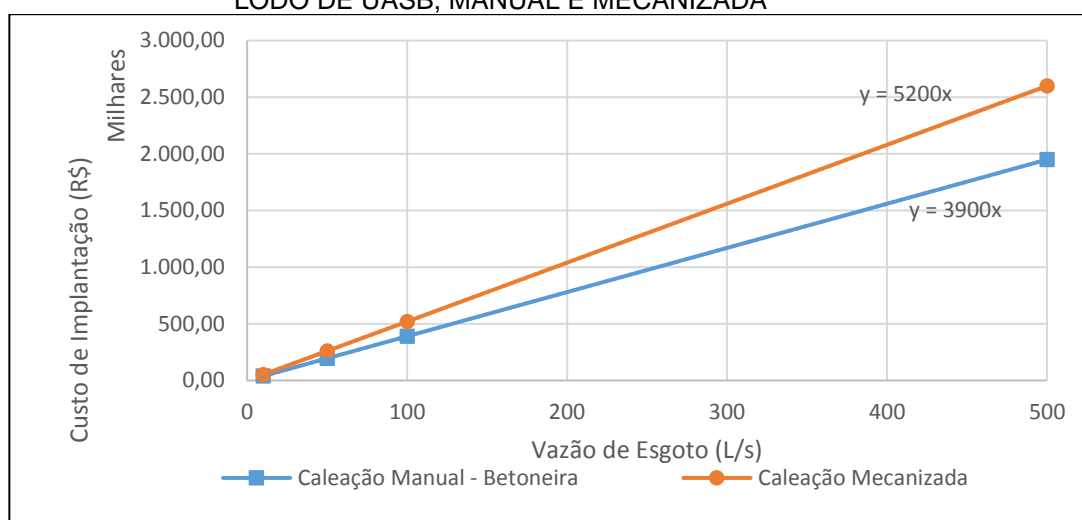
FONTE: Adaptado de Pacheco (2011).

NOTA: Data-base dos valores: maio de 2011.

Observa-se que a variação de custo por tipo de ETE se dá devido à maior produção de lodo quando realizado o pós-tratamento aeróbio. Não se verificaram os mesmos limites de viabilidade das tecnologias encontrados por Baréa (2013), sendo inferior a 50 L/s a vazão máxima em que os leitos ainda são mais econômicos.

Em relação ao custo da caleação, Pacheco (2011) apresentou os resultados referentes à ETE apenas com reator UASB. Entretanto, realizou orçamentos tanto para a opção de caleação com betoneira (manual), para o caso de higienização de lodo proveniente de Leitos de Secagem, como à opção mecanizada, para lodo proveniente de centrífugas, conforme é apresentado na Figura 26, a seguir.

FIGURA 26 – FUNÇÕES CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE CALEAÇÃO DE LODO DE UASB, MANUAL E MECANIZADA



FONTE: Adaptado de Pacheco (2011).

NOTA: Data-base dos valores: maio de 2011.

Cabe observar que, apesar de terem sido estimados os custos de implantação do sistema manual de caleação para ETEs de até 500 L/s, com custo inferior ao sistema mecanizado, a operação de tamanha quantidade de lodo poderia inviabilizar esta opção.

Valente (2015) estudou alternativas de secagem de lodo proveniente de ETEs com reatores UASB seguido de Lodos Ativados. O autor avaliou 5 arranjos, variando quanto ao aproveitamento do biogás para a secagem e para a produção de energia elétrica, e esta sendo injetada na rede pública de energia ou aproveitada na própria ETE, alternando-se ainda quanto à produção de energia em horas de ponta ou não.

O autor apresentou os custos de implantação e operação dos diferentes arranjos para ETEs com população de projeto de 50 mil, 100 mil, 200 mil e 450 mil habitantes. O arranjo em que se obteve a menor escala de viabilidade foi o Arranjo 3,

no qual considerou-se a produção de energia elétrica a partir do biogás e o aproveitamento dos gases de exaustão do moto-gerador para secagem térmica do lodo. A população mínima para viabilizar este sistema foi estimada em, aproximadamente, 140 mil habitantes, considerando-se uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 8 % a.a.

Outro arranjo avaliado por Valente (2015) foi o aproveitamento do biogás exclusivamente para a secagem térmica do lodo, sem considerar a produção de energia. Com este arranjo obteve-se a segunda menor escala de viabilidade, em torno de 150 mil habitantes, para a mesma TIR mencionada.

Como no presente estudo não foi considerada a produção de energia elétrica a partir do biogás, o que seria um aprofundamento deste, estão apresentados, na Tabela 11, apenas os valores utilizados pelo autor referentes aos secadores térmicos e aos equipamentos necessários para o aproveitamento do biogás. Não estão contidos nos valores os custos de obras civis e de equipamentos para a geração de energia elétrica a partir do biogás.

TABELA 11 - CUSTO DOS SECADORES TÉRMICOS E SISTEMA DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS PARA ETE COM UASB + LA

| Equipamento/Referência | População atendida (hab) | | | |
|--|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 50.000 | 100.000 | 200.000 | 450.000 |
| Secador Térmico | 753.000,00 | 980.000,00 | 1.212.000,00 | 1.857.000,00 |
| Gasômetro | 265.000,00 | 385.000,00 | 525.000,00 | 585.000,00 |
| Subsistema Biogás | 155.200,00 | 182.800,00 | 203.500,00 | 230.000,00 |
| Total | 1.173.200,00 | 1.547.800,00 | 1.940.500,00 | 2.672.000,00 |
| Observações: | | | | |
| Capacidade do Secador, em lodo úmido (kg/h) | 250 | 500 | 1.000 | 2.250 |
| Vazão de biogás estimada (m ³ /d) | 700 | 1.400 | 2.800 | 6.300 |
| Volume do Gasômetro (m ³) | 340 | 540 | 970 | 2.100 |

FONTE: Adaptado de Valente (2015).

NOTA: Data-base dos valores: novembro de 2014.

Os valores apresentados por Valente (2015) foram obtidos por cotação com a empresa Albrecht, que, segundo o mesmo, é uma das poucas empresas que têm atuado no fornecimento de secadores térmicos no mercado de saneamento.

3.6.2 Custos de Operação de Sistemas de Tratamento de Lodo

Os custos operacionais relacionados ao tratamento de esgoto, e, conseqüentemente, ao lodo de esgoto, são (CANZIANI et al., 1999, JORDÃO & PESSÔA, 2017):

- Mão de obra interna;
- Serviços de terceiros;
- Produtos Químicos;
- Energia Elétrica;
- Manutenção;
- Transporte e Disposição final do lodo.

Não se encontram, na literatura, estudos que apresentam, com clareza, funções custos e/ou custos unitários da operação de sistemas de tratamento de lodo. Encontram-se, todavia, valores que são utilizados para a composição desses custos, tais como o custo de energia elétrica, pessoal, produtos químicos, manutenção, transporte e destinação final do lodo. Com esses tipos de dados é possível compor os custos operacionais para cada situação estudada (BIELSCHOWSKY, 2014; VALENTE, 2015; AMARAL, 2018).

Destaca-se que muitos dos custos operacionais são de obtenção bastante complexa, em especial quando pretende-se representar mais de uma região do país, utilizando-se valores médios. O custo de energia elétrica, por exemplo, varia não apenas conforme a região, mas também em função do tipo de contrato entre as concessionárias de serviços de saneamento e de distribuição de energia elétrica. As unidades operacionais das empresas de saneamento devem ser classificadas nas modalidades tarifárias que melhor se enquadram, a depender de fatores como a tensão de fornecimento, os horários de funcionamento dos equipamentos mais potentes, entre outros.

Valente (2015), apresenta uma relação de 14 ETEs da SANEPAR, com populações atendidas variando entre 37.800 e 604.800 habitantes, sendo 13 delas incluídas no grupo A (Tensão de fornecimento acima de 2,3 kV), subgrupo A4 (2,3 a 25 kV), com 9 na modalidade Horó-sazonal Verde (tarifa sem alteração no horário de ponta, além de outras especificidades). Apenas uma foi enquadrada no grupo B (tensão de fornecimento abaixo de 2,3 kV), subgrupo B3 (demais classes),

convencional (tarifa fixa do consumo de energia). Esta classificação segue um padrão nacional estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2010) e define as tarifas a serem pagas pela energia elétrica, as quais podem ser encontradas nos sites das concessionárias de energia elétrica ou da ANEEL.

Na Tabela 12, a seguir, estão relacionados os dados utilizados, na forma de custos unitários, por alguns autores que consideraram os custos operacionais do tratamento de lodo.

TABELA 12 - CUSTOS UNITÁRIOS DE COMPONENTES DO CUSTO OPERACIONAL DE TRATAMENTO DE LODO

| Item | Unidade | Valor | Fonte citada | Base utilizada pelo autor | Ano-base |
|---|---------------------------|--------------------------|--------------------|---------------------------|----------|
| Produtos químicos | | | | | |
| Polímero | | 12,65 | Amaral (2018) | SANEPAR | 2017 |
| Cal | R\$/kg | 0,29 | Amaral (2018) | SANEPAR | 2017 |
| Cal | | 0,42 | Bielshowski (2014) | CEDAE ^g | 2014 |
| Energia elétrica | | | | | |
| | | 0,24 ^a | Bielshowski (2014) | CEDAE | 2013 |
| Consumo de energia elétrica | R\$/kWh | 0,29 ^b | Valente (2015) | - | 2015 |
| | | 0,46 e 0,66 ^c | Amaral (2018) | - | 2017 |
| Pessoal | | | | | |
| Operador de ETE | R\$/mês | 4.858,61 | Amaral (2018) | SANEPAR | 2017 |
| | | 3.500,00 | Valente (2015) | - | - |
| Manutenção | | | | | |
| Manutenção de equipamentos mecanizados | % do custo do equipamento | 1,5 | Bielshowski (2014) | Fabricantes | - |
| | | 2 | Valente (2015) | Literatura | - |
| Transporte e destinação do lodo | | | | | |
| Transporte | R\$/ton | 120 | Valente (2015) | Literatura | - |
| Transporte | R\$/t.km | 0,44 | Bielshowski (2014) | EMOP ^h | - |
| Dsposição em aterro sanitário | R\$/t | 90 a 160 ^d | Bielshowski (2014) | CEDAE | - |
| Disposição na agricultura | R\$/t lodo hig. | 42 ^e | Amaral (2018) | SANEPAR | 2017 |
| Outros associados à higienização e disposição agrícola do lodo | | | | | |
| Locação de pá carregadeira | R\$/t lodo hig. | 7,46 | | Cotação | |
| Apoio agrônômico | R\$/t lodo hig. | 4,02 | Amaral (2018) | SANEPAR | 2017 |
| Análises laboratoriais | R\$/ano | 16.887,66 ^f | | SANEPAR | |

FONTE: Adaptado de Amaral (2018), Bielshowski (2014) e Valente (2015).

NOTAS: a) Valor médio de 5 ETEs operadas pela CEDAE; b) Valor médio para determinados arranjos considerados pelo autor, em que não havia distinção da tarifa no horário de ponta; c) Valores fora do horário de ponta e no horário de ponta, respectivamente, com 29 % de ICMS; d) Valores variáveis a depender do teor de sólidos do lodo; e) Considerado o transporte e o espalhamento do lodo no campo agrícola utilizando-se equipamento específico (lancer); f) Considerada a formação de 1 lote por bimestre; g) Companhia Estadual de Águas e Esgotos (Rio de Janeiro); h) Empresa de Obras Públicas do Estado do Rio de Janeiro.

3.6.3 Considerações finais

Pretendeu-se, nesta revisão, classificar, quanto à abordagem, os estudos relacionados aos custos de sistemas de tratamento de esgoto e de lodo de esgoto, afim de melhor se identificarem as lacunas existentes na literatura. De fato, verificou-se que há um déficit de trabalhos que objetivam a elaboração de funções custo e custos unitários de tratamento de lodo, não havendo sido encontrados trabalhos que abordam, desta forma, os custos de operação dos sistemas de tratamento de lodo. Como consequência, em cada novo estudo que se pretende considerar os custos associados ao tratamento de lodo, necessita-se uma busca de dados, que muitas vezes é complexa. Neste sentido, no âmbito de Estudos de Concepção, as referidas abordagens podem ter grande utilidade, assim como têm os custos unitários de sistemas de tratamento de esgoto apresentados na literatura clássica (von SPERLING, 1996; ALÉM SOBRINHO E JORDÃO, 2001).

Ressalta-se, novamente, que as diferentes abordagens mencionadas são complementares e geralmente aparecem em conjunto. Reami (2011), por exemplo, utiliza custos unitários como dados de entrada em métodos de tomada de decisão, que por sua vez foram aplicados em um estudo de caso. Por outro lado, alguns estudos mantêm-se em apenas uma dessas abordagens, obtendo custos unitários ou funções custo, por exemplo (AISSE et al., 2002; PACHECO, 2011). Além disso, há ainda outras abordagens que não as enfatizadas nesta revisão. O trabalho de Valente (2015), por exemplo, consistiu em uma análise de viabilidade, sem o intuito de se obterem funções custo ou custos unitários, mas que permitiu a verificação da escala mínima de viabilidade de sistemas de secagem térmica de lodo e aproveitamento de biogás. Possivelmente, este trabalho tem uma abordagem mais próxima das últimas mencionadas, em que os resultados são uma rica fonte de informações para a elaboração de Estudos de Concepção.

Destaca-se, por fim, que estudos têm sido realizados no âmbito do PPGERHA² e do Departamento de Hidráulica e Saneamento – DHS, da Universidade Federal do Paraná, seguindo a linha de pesquisa que busca o fornecimento de subsídios para Estudos de Concepção, tais como os trabalhos de Pacheco (2011) e Baréa (2013).

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Tabela 13 apresentam-se, resumidamente, os materiais e métodos utilizados para o cumprimento de cada objetivo específico deste trabalho.

TABELA 13 - MATERIAIS E MÉTODOS POR OBJETIVO ESPECÍFICO

| Objetivo Específico | | Materiais | Métodos |
|---------------------|--|--|---|
| A | Investigar questões relacionadas ao dimensionamento de estruturas de tratamento de lodo não consolidadas, variáveis ou pouco abordadas na literatura | Meios de comunicação diversos (e-mail, telefone, contato pessoal, etc.) | Entrevistas com profissionais de experiência na área de operação de ETEs; Consulta a fornecedores de equipamentos de tratamento de lodo. |
| | | Artigos científicos, trabalhos acadêmicos, livros, revistas técnicas e Normas Brasileiras | Pesquisa Bibliográfica e análise de conteúdo |
| B | Avaliar os custos de implantação e operação de processos de desaguamento e higienização de lodo de esgoto | Resultados do Objetivo Específico A; Bibliografia técnica; Bibliografia Documental (Projetos e orçamentos fornecidos por empresas de saneamento); Planilha eletrônica. | Dimensionamento e posterior orçamentação das estruturas de tratamento de lodo. |
| C | Elaborar ferramentas de auxílio para a avaliação de alternativas de desaguamento e higienização de lodo de esgoto | Resultados dos Objetivos Específicos A e B; Planilha eletrônica. | Compilar os resultados dos objetivos específicos A e B de modo a sumarizar as informações relevantes para Estudos de Concepção, e apresentá-las de forma clara e autoexplicativa. |

FONTE: O autor (2019).

Como pode-se notar, os objetivos específicos são complementares, assim como os métodos utilizados para alcançá-los. Os resultados obtidos em resposta ao Objetivo Específico A foram utilizados no método aplicado para atingir o Objetivo Específico B, e os resultados de ambos compuseram os dados de entrada para a formulação de ferramentas de auxílio para Estudos de Concepção.

Foram avaliados diversos cenários, adotando-se diferentes portes de ETE (variando de 5 a 750 L/s) e tecnologias de desaguamento e higienização de lodo.

Os processos e tecnologias de tratamento de lodo contemplados foram:

- Leitões de Secagem;
- Centrífugas;
- *Wetlands* Construídos para Lodo;
- Estabilização Alcalina Prolongada;
- Secagem Térmica.

Considerou-se, também, a possibilidade da combinação de Leitões de Secagem e Centrífugas, em paralelo. Na Tabela 14, apresentam-se os processos avaliados, a depender da faixa de vazão da ETE, que podem compor inúmeros fluxogramas/cenários, conforme é apresentado na sequência (Figura 27).

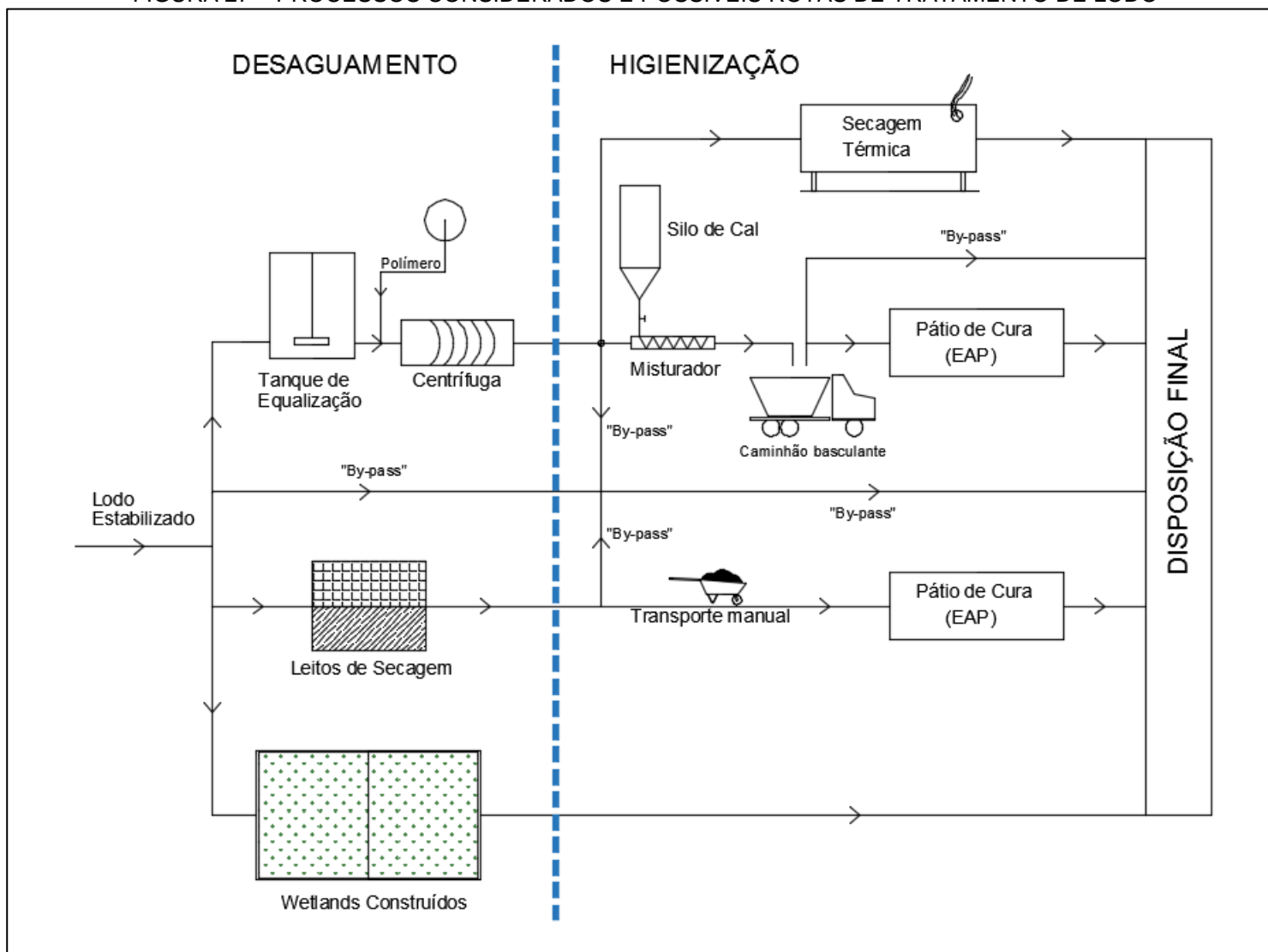
TABELA 14 – PROCESSOS CONSIDERADOS POR FAIXA DE VAZÃO

| Vazão da ETE (L/s) | Processos Considerados | |
|--------------------|------------------------|-------------------------------|
| | Desaguamento | Higienização |
| 5 a 40 | (a) | (b) |
| | LSE | (b) EAP |
| | Wetlands | (b) |
| 80 a 160 | LSE | (b) EAP |
| | LSE + Centrífuga | (b) EAP |
| | Centrífuga | (b) EAP Secagem Térmica |
| | Wetlands | (b) |
| | LSE + Centrífuga | (b) EAP Secagem Térmica |
| 240 a 320 | Centrífuga | (b) EAP Secagem Térmica |
| | Wetlands | (b) |
| | Centrífuga | (b) EAP Secagem Térmica |
| | Wetlands | (b) |
| 400 a 750 | Centrífuga | (b) EAP Secagem Térmica |

FONTE: O autor (2019).

NOTAS: (a) Constitui uma alternativa em que o lodo é transportado de uma ETE para ser desaguado em outra; (b) Opção de não realizar a higienização previamente à disposição final; LSE = Leitões de Secagem; EAP = Estabilização Alcalina Prolongada.

FIGURA 27 – PROCESSOS CONSIDERADOS E POSSÍVEIS ROTAS DE TRATAMENTO DE LODO



FONTE: O autor (2019).

As pré-definições de tecnologia por faixa de vazão são parte dos resultados do Objetivo Específico A (Item 5.1.2), que serviram de base para a adoção de hipóteses mais realistas. Considerou-se, também, a possibilidade de destinação do lodo gerado em uma ETE para o desaguamento em uma outra, representando uma solução teoricamente sem custos em relação às demais.

Deve-se esclarecer, também, que o estudo foi feito para valores pré-definidos de vazão, adotando-se uma concentração constante de DQO e, conseqüentemente, que a carga orgânica afluyente à ETE aumenta linearmente com a vazão. Além disso, para que possam ser avaliados os custos de tratamento de lodo em ETEs com vazões diferentes das apresentadas na Tabela 14, foram elaboradas funções custo.

Destaca-se que não foram estudados fluxogramas pré-definidos de tratamento de lodo, mas sim cada tecnologia isoladamente, permitindo a composição de qualquer fluxograma, desde que respeitadas as faixas de vazão estabelecidas para cada tecnologia, bem como as restrições de processo apresentadas na Tabela 14.

Além disso, não foram considerados os custos de disposição final do lodo, uma vez que a grande variabilidade e complexidade desses dificulta uma estimativa mais generalista e ao mesmo tempo confiável. Neste sentido, ressalta-se que o intuito do presente trabalho não é dar a solução definitiva aos tomadores de decisão, mas sim permitir que, conhecendo-se o custo de transporte e destinação final do lodo (para cada realidade), possa ser feita uma análise preliminar, orientativa, de alternativas de desaguamento e higienização de lodo já estabilizado.

4.1 DELINEAMENTO METODOLÓGICO 1 - OBJETIVO ESPECÍFICO A

Conforme apresentado na Revisão de Literatura, há uma série de questões referentes ao processamento de lodo que são pouco abordadas, variáveis ou ainda não se encontram consolidadas na literatura, principalmente por serem diretamente relacionadas aos aspectos operacionais das Estações de Tratamento de Esgoto, mas que são importantes para a avaliação dos custos de desaguamento e higienização de lodo, tais como:

- a) O descarte de lodo aeróbio de excesso aos reatores UASB e seu impacto no dimensionamento de estruturas de tratamento de lodo;
- b) As faixas de vazão que viabilizam a implantação de sistemas de tratamento de lodo;

- c) O regime de operação de equipamentos de tratamento de lodo.
- d) O dimensionamento de Tanques de Equalização previamente ao desaguamento mecanizado;
- e) Parâmetros de dimensionamento de Leitões de Secagem.
- f) O dimensionamento de pátios de cura para a Estabilização Alcalina Prongada - EAP.

Sendo assim, buscando-se melhor fundamentar o presente estudo, foram pré-definidas algumas hipóteses e critérios a respeito dessas questões, não apenas com base na bibliografia, mas também em experiências de profissionais da área. Para tanto, os materiais e métodos utilizados foram:

- Pesquisa bibliográfica em artigos científicos, trabalhos acadêmicos, livros, revistas técnicas e NBRs, de informações que permitam, direta ou indiretamente, pela análise de seus conteúdos, a definição de hipóteses e critérios que representem, de uma forma ampla, as condições consideradas neste trabalho (UASB seguido de Pós-tratamento aeróbio).
- Entrevistas não-estruturadas (quando não há um roteiro pré-definido) e semi-estruturadas (com um roteiro pré-definido, mas com flexibilidade para discussões), por meio de contato pessoal, e-mail e/ou telefone, com profissionais com experiência e/ou conhecimento na área de operação de ETEs, e com representantes de empresas fornecedoras de equipamentos mecânicos de tratamento de lodo.

Observa-se que esses métodos foram realizados com objetivo exploratório, pelos quais buscou-se obter maior conhecimento sobre questões que não estavam claramente definidas na literatura. Foram métodos de pesquisa qualitativa, em que não foi dado prioridade à quantidade de informações, mas sim à compatibilidade dessas com os assuntos pesquisados.

Sendo assim, dado o caráter exploratório dos métodos empregados, foram também suscitadas possibilidades de otimização, no âmbito econômico, das variáveis relacionadas ao processamento do lodo, tais como os parâmetros de dimensionamento, rotinas operacionais e até mesmo alternativas construtivas. Portanto, nos resultados referentes ao Objetivo Específico A podem ser apresentadas questões adicionais àquelas colocadas na descrição deste tópico.

Na Figura 28, a seguir, ilustram-se os materiais e métodos aplicados para o cumprimento deste Objetivo Específico. No Apêndice 1 apresentam-se as perguntas que nortearam as entrevistas realizadas.

FIGURA 28 – MATERIAIS E MÉTODOS – OBJETIVO ESPECÍFICO A



FONTE: O autor (2019).

A seguir são apresentados os métodos utilizados, e mais alguns detalhes, para explorar cada questão mencionada anteriormente.

4.1.1 Descarte de Lodo Aeróbio de Excesso aos Reatores UASB e seu Impacto no Dimensionamento das Estruturas de Tratamento de Lodo

Foram entrevistados profissionais da SANEPAR e realizada pesquisa bibliográfica nas referências citadas nos Itens 3.1.3 e 3.4, buscando-se o esclarecimento de questões que pudessem impactar nos resultados e na abrangência do presente estudo, tais como:

- A variação da produção de sólidos em função da realização da descarga de lodo aeróbio de excesso aos reatores UASB e da tecnologia de pós-tratamento aeróbio adotada;

- A diferença, em termos técnico-econômicos, da realização ou não do descarte de lodo aeróbio de excesso nos reatores UASB, para adensamento e digestão.

4.1.2 Faixas de Vazão Viáveis de Tratamento de Lodo por Tecnologia

O Objetivo Geral desta dissertação vai ao encontro desta temática, buscando-se definir quais as vazões máximas e mínimas de ETEs que viabilizam as estruturas de tratamento de lodo. Entretanto, para se ter um delineamento inicial, foram buscadas as informações já existentes neste âmbito, nas seguintes fontes:

- Baréa (2013);
- Bittencourt (2014);
- Valente (2015);
- Entrevista com profissionais da SANEPAR;
- Entrevista com fornecedores de equipamentos;
- Entrevista com profissionais da Wetlands Construídos.

4.1.3 Regime de Operação de Equipamentos de Tratamento de Lodo

Buscando-se subsídios para se definir o regime de operação dos equipamentos de desaguamento e secagem de lodo, essencial para os dimensionamentos desses, realizaram-se:

- Entrevista com profissionais da SANEPAR;
- Entrevista com profissionais da SANEAGO;
- Entrevista com fornecedores de equipamentos.

4.1.4 Dimensionamento de Tanques de Equalização

Dada a dificuldade de se encontrarem, na literatura, orientações e parâmetros de dimensionamento de tanques de equalização de lodo, previamente ao desaguamento mecanizado, foram consultadas as empresas SANEPAR e SANEAGO, além do trabalho de Baréa (2013), para serem tomadas decisões e realizadas análises críticas sobre essas unidades.

4.1.5 Parâmetros de Dimensionamento de Leitões de Secagem

Foram avaliados os dados apresentados por Cerqueira e Aisse (2017), bem como informações obtidas em entrevistas com profissionais da SANEPAR e da SANEAGO, para a definição dos parâmetros de dimensionamento dos leitões de secagem. Neste contexto, buscaram-se informações para a suscitação de possíveis otimizações, visando à redução da área necessária por meio do aumento da taxa de aplicação de sólidos e/ou da redução do tempo de ciclo de desaguamento.

4.1.6 Dimensionamento de Pátios de Cura para a EAP

Um destaque especial foi dado ao dimensionamento dos pátios de cura para a higienização do lodo por EAP, tendo em vista a falta de informações na literatura e o potencial desta tecnologia de ser empregada mais intensamente no Brasil, conforme apresentado na Revisão Bibliográfica (Item 3.3.6).

Além de uma análise dos resultados de Bittencourt (2014), foram realizadas entrevistas com profissionais da SANEPAR para se obterem informações a respeito do processo de EAP, bem como da capacidade dos pátios de cura em função de suas dimensões. Buscaram-se informações no intuito da definição de uma taxa de aplicação de sólidos por m² de pátio, por intervalo de tempo, analogamente ao método de dimensionamento de leitões de secagem.

Com este objetivo, em discussão com profissionais da SANEPAR, foram pré-selecionadas três UGLs (Unidades de Gerenciamento de Lodo) que possuem pátios de cura e que recebem lodo diversas ETEs, além da própria ETE em que se encontram. Na Tabela 15 apresentam-se as UGLs cujos dados foram utilizados.

TABELA 15 - UGLS UTILIZADAS PARA O ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO DE PÁTIOS DE CURA PARA EAP

| UGL | ETEs Contribuintes (Vazão em L/s) |
|---------------------|--|
| ETE Tibagi (17) | ETE Arapoti (15), ETE Bandeirantes (3,5), ETE Cândido de Abreu (19), ETE Embaú (5), ETE Limeira (20), ETE Marinha (15), ETE Ortigueira (7), ETE Piraí (8), ETE Reserva (19), ETE São Silvestre (10), ETE Sengés (20), ETE Uvaranal (8) e ETE Ventania (14) |
| ETE Ronda (615) | ETE Verde (280), ETE Olarias (70), ETE Cristo Rei (5), ETE Gertrudes (30), ETE Congonhas (30), ETE Cará-Cará (30), ETE Tibagi* (30), ETE Bárbara (10). |
| ETE CIC Xisto (612) | ETE Cachoeira (100), ete São Jorge (134), ETE Cambuí (85), Outras (esporadicamente). |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: *Nome coincidente com a UGL ETE Tibagi, não sendo a mesma unidade.

4.2 DELINEAMENTO METODOLÓGICO 2 - OBJETIVO ESPECÍFICO B

Para se avaliarem os custos de implantação e operação dos processos de tratamento de lodo o método aplicado consistiu nas seguintes etapas:

- a) Estabelecimento de premissas (muitas delas com base nos resultados do Objetivo Específico A);
- b) Dimensionamento das estruturas de tratamento de lodo;
- c) Orçamentação da implantação;
- d) Orçamentação da operação.

4.2.1 Vazões Adotadas, a População Equivalente e sua Representatividade

As vazões de estudo foram escolhidas considerando-se a representatividade dessas para a realidade brasileira, observando-se o número de municípios que podem vir a representar. Adotou-se, para a estimativa da População Equivalente (PE), o valor de 130 L/hab.d de esgoto, sendo este um valor bastante próximo do coeficiente de retorno 0,80 aplicado ao consumo de água *per capita* médio do Brasil, de 160,8 L/hab.d (SNIS, 2016).

Apresentam-se, na Tabela 16, as vazões consideradas, com suas respectivas Populações Equivalentes e o número e percentual de municípios que possuem populações urbanas dentro dos intervalos considerados.

TABELA 16 – VAZÕES ADOTADAS, POPULAÇÃO EQUIVALENTE E REPRESENTATIVIDADE

| Ponto | Vazão (L/s) | PE (hab) | Nº Municípios no intervalo* | Representatividade (%) |
|-------|-------------|----------|-----------------------------|------------------------|
| 1 | 5 | 3.325 | 1.668 | 30,0 |
| 2 | 10 | 6.650 | 1.222 | 22,0 |
| 3 | 20 | 13.300 | 1.063 | 19,1 |
| 4 | 40 | 26.600 | 776 | 13,9 |
| 5 | 80 | 53.170 | 385 | 6,9 |
| 6 | 160 | 106.330 | 224 | 4,0 |
| 7 | 240 | 159.500 | 71 | 1,3 |
| 8 | 320 | 212.670 | 42 | 0,8 |
| 9 | 400 | 265.850 | 27 | 0,5 |
| 10 | 500 | 332.300 | 22 | 0,4 |
| 11 | 750 | 498.460 | 29 | 0,5 |

FONTE: O autor (2019)

NOTAS: *Dados do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010); Chernicharo et al. (2018) classificaram ETEs, quanto ao porte, em pequenas: atendimento de até 10 mil hab; médias: atendimento entre 10 e 100 mil hab e; grande: atendimento acima de 100 mil habitantes.

Nota-se que praticamente 50 % dos municípios possuem população inferior a 6.650 habitantes, ou seja, terão ou tiveram suas ETEs projetadas para vazões da ordem de 5 a 10 L/s, ou um pouco superior a 10 L/s, a depender de suas projeções populacionais. Por esse motivo optou-se por adotar pontos mais próximos na faixa de baixas vazões, afim de se obter maior precisão das funções custo, dada a representatividade desses valores.

Por outro lado, para projetos e estudos de ETEs com vazões mais altas, as curvas de custo tornam-se menos aplicáveis uma vez que se tratam de grandes investimentos, que devem ser planejados mais detalhadamente, razão pela qual aumentou-se o intervalo entre os pontos da curva e limitou-se o valor máximo de 750 L/s, correspondente a cerca de 500 mil habitantes.

Cabe colocar, entretanto, que apesar do número de municípios pequenos superar 50 % do total, a população somada desses não tem a mesma representatividade, já que a maior parte da população se encontra nos grandes centros urbanos.

Para que fosse possível abranger todos esses cenários foram feitas algumas simplificações (que serão descritas na sequência) nos dimensionamentos das unidades, especialmente quanto às centrífugas e aos secadores térmicos, de forma que um cenário pudesse também representar, satisfatoriamente, outros de vazão inferior. A seguir, apresentam-se os métodos aplicados para os dimensionamentos.

4.2.2 Dimensionamento das Estruturas de Tratamento de Lodo

Para o dimensionamento das estruturas de tratamento de lodo foi realizada, inicialmente, a estimativa da quantidade de lodo gerado para cada vazão de ETE (considerando-se uma DQO constante), utilizando-se as fórmulas apresentada a seguir, consolidadas na literatura (von SPERLING; GONÇALVES, 2014):

1º - Carga de DQO afluente à ETE:

$$C_{DQO} = Q_{esg} \cdot S_{DQO} \quad (1)$$

Em que:

C_{DQO} = Carga de DQO (kgDQO/d);

Q_{esg} = Vazão média de esgoto afluente à ETE (m³/d);

S_{DQO} = Concentração média de DQO no esgoto bruto (kg/m³).

2º - Produção de lodo no UASB + Pós-tratamento aeróbio:

$$P_{LODO} = C_{DQO} \cdot Y \quad (2)$$

Em que:

P_{LODO} = Produção diária de lodo em massa seca (kgSST/d);

Y = Coeficiente de produção de lodo (kgSST/kgDQO_{aplicada}).

3º - Vazão volumétrica de lodo produzido:

$$Q_{LODO} = \frac{P_{LODO}}{C_{LODO} \cdot \rho} \quad (3)$$

Em que:

Q_{LODO} = Vazão diária de lodo produzido (m³/d);

C_{LODO} = Concentração do lodo (kgSST/kg_{lodo});

ρ = Massa específica do lodo (kg_{lodo}/m³).

4º - Massa úmida de lodo produzido:

$$M_{LODO} = Q_{LODO} \cdot \rho \quad (4)$$

Em que:

M_{LODO} = Massa úmida diária de lodo (kg/d);

A seguir, na Tabela 17, apresentam-se os parâmetros adotados para os cálculos da produção de lodo em massa seca e úmida.

TABELA 17 - PARÂMETROS ADOTADOS PARA A ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE LODO

| Parâmetro | Valor | Referência |
|--|-------|---------------------------------|
| DQO no esgoto bruto (mg/L) ^a | 600 | von Sperling (1996) |
| Coeficiente Y (kgSS/kgDQO _{aplicada}) | 0,30 | (b) |
| Concentração do lodo excedente (%) | 3,00 | (b) |
| Densidade do lodo excedente (kg/m ³) | 1.010 | von Sperling e Gonçalves (2014) |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: a) Considerou-se a DQO constante, independentemente da vazão de esgoto; b)

Valores adotados a partir dos resultados do Objetivo Específico A.

Calculada a quantidade de lodo gerado, em massa seca, massa úmida e volume, foram dimensionadas as estruturas de tratamento de lodo, observando-se que, para a higienização, bem como para a estimativa da quantidade de lodo final a

ser transportado, considerou-se a redução da massa úmida e do volume do lodo devido às etapas prévias, aplicando-se as seguintes fórmulas:

$$M_{LODO,f} = M_{LODO,i} \cdot \frac{C_i}{C_f} \quad (5)$$

Em que:

$M_{LODO,f}$ = Massa final de lodo (kg);

$M_{LODO,i}$ = Massa inicial de lodo (kg);

C_i = Concentração inicial do lodo (kgST/kg_{LODO});

C_f = Concentração final do lodo (kgST/kg_{LODO}).

e,

$$V_{LODO,f} = V_{LODO,i} \cdot \frac{C_i \cdot \rho_i}{C_f \cdot \rho_f} \quad (6)$$

Onde:

$V_{LODO,f}$ = Volume final de lodo (m³);

$V_{LODO,i}$ = Volume inicial de lodo (m³);

ρ_i = Massa específica inicial do lodo (kg_{lodo}/m³);

ρ_f = Massa específica final do lodo (kg_{lodo}/m³).

Reforça-se que foram considerados os resultados das análises relativas ao Objetivo Específico A, ou seja, parâmetros e critérios (taxas de aplicação, regimes de funcionamento, etc.) estabelecidos a partir de pesquisa bibliográfica, entrevistas com profissionais da área e até mesmo projetos obtidos com empresas de saneamento.

A seguir apresentam-se os métodos utilizados para o dimensionamento de cada estrutura de tratamento de lodo.

4.2.2.1 Leitões de Secagem

Para o dimensionamento foi utilizada a seguinte fórmula:

$$A_{\text{útil}} = \frac{T_c \cdot P_{LODO}}{T_x} \quad (7)$$

Onde:

$A_{\text{útil}}$ = Área útil mínima de Leito de Secagem (m²);

T_c = Tempo de Ciclo (d), adotado de 18 dias.

Tx = Taxa de aplicação de sólidos (kgST/m²), adotada de 15 kgST/m².

O tempo de ciclo de 18 dias encontra-se entre os valores verificados por Aisse e Andreoli (1998), de 14 dias para a obtenção de um lodo com 27 % de sólidos (com taxa de aplicação de 23,7 kgST/m², sem influência de chuva), e o exemplo apresentado por Gonçalves (2014), de 20 dias, sendo 15 de secagem e 5 para descarga e limpeza dos leitos. Já a taxa de aplicação foi adotada não apenas com base na NBR 12.209/11 (ABNT, 2011), mas também da concentração do lodo excedente do sistema de tratamento de esgoto considerado, de 3 % de ST, que dificulta o alcance de taxas mais elevadas. Uma discussão mais detalhada sobre a definição destes parâmetros é apresentada no item 5.1.5.

Calculada a área mínima necessária, o número de leitos de secagem foi obtido dividindo-se esta pela área de um leito. O resultado da divisão foi sempre arredondado para o próximo número par, para que os leitos possam ser implantados de maneira “espelhada” e permitam um rodízio simples de utilização.

Para os cenários em que se considerou o uso de leitos de secagem e centrífugas em paralelo, adotou-se um percentual de 33,3 % da produção de lodo disposto nos leitos de secagem.

4.2.2.2 Centrífugas

O dimensionamento das centrífugas foi orientado, principalmente, por dois projetos de Edifícios de Desidratação de Lodo (EDL) fornecidos pela empresa SANEAGO, sendo um para centrífugas de 10 m³/h e outro para 36 m³/h.

Sendo assim, conhecendo-se as vazões diárias de lodo para cada vazão de ETE, foram verificados os regimes de funcionamento que seriam necessários para o desaguamento nestas centrífugas, respeitando-se alguns critérios básicos como, por exemplo, o regime de funcionamento inferior a 20 h/d (nos resultados referentes ao Objetivo Específico A fazem-se algumas reflexões a respeito do regime de funcionamento dos equipamentos de tratamento de lodo).

Desta forma, devido à disponibilidade de dados reais e à inexistência de valores generalizados de regime de funcionamento das centrífugas em função do porte da ETE, optou-se por adequar as vazões diárias de lodo aos projetos existentes, porém, considerando-se 30 m³/h para a centrífuga de maior porte.

Nesses projetos mencionados foram previstos Tanques de Equalização previamente às centrífugas, respectivamente, de 82 m³ e 235 m³ para as centrífugas com vazão de 10 e 36 m³/h. Os tanques foram dimensionados para Tempos de Detenção Hidráulica de 20 horas. Com base nisto e em outras considerações que estão apresentadas nos resultados do Objetivo Específico A (Item 5.1.4), foram definidos tempos de detenção hidráulica entre 12 e 24 horas, a depender do porte da ETE e do regime de funcionamento esperado para a centrífuga, evitando-se que a soma do TDH e do regime de funcionamento das centrífugas fosse inferior a 24 h/d, o que representaria, teoricamente, déficits de volume de armazenamento de lodo.

4.2.2.3 Wetlands Construídos para Lodo – WCL

Os Wetlands Construídos para lodo foram dimensionados de maneira análoga aos Leitões de Secagem, utilizando-se a seguinte fórmula:

$$AW_{\text{útil}} = \frac{P_{\text{LODO}} \cdot 365}{Txw} \quad (8)$$

Onde:

$AW_{\text{útil}}$ = Área útil mínima de Wetlands (m²);

Txw = Taxa de aplicação de sólidos (kgST/m².ano).

Foi adotada a taxa de aplicação de sólidos de 120 kgST/m².ano, valor este conservador em relação aos estudos de Sunti et al. (2011), que trabalhou com lodo de tanque séptico; Porém, o valor é superior aos valores internacionais, conforme mencionado no item 3.3.4.3, referentes à lodo excedente de lodos ativados, em clima temperado. Nesses casos, a taxa usual é de 30 a 50 kgST/m².ano⁻¹ (MANJATE, 2016).

Calculada a área útil mínima, foram pré-definidas as dimensões (comprimento e largura), com a quantidade mínima de 2 Wetlands, de modo a sempre permitir o rodízio de funcionamento.

4.2.2.4 Caleação - Estabilização Alcalina Prolongada

Para a EAP foram dimensionadas duas estruturas principais: o sistema de aplicação de cal ao lodo, composto por silo, rosca transportadora e misturador; e os pátios de cura. O sistema de aplicação foi considerado apenas para os casos de

desaguamento por centrífugas, enquanto que os pátios foram dimensionados para todas as situações.

Utilizando-se os mesmos projetos que àqueles mencionados para as centrífugas, os quais contemplam a estrutura de caleação de lodo, foi realizado um procedimento análogo de dimensionamento, ou seja, verificou-se a compatibilidade dos projetos existentes com os valores do presente estudo. Nos projetos de referência, os silos possuem, respectivamente, 14 m³ e 55 m³, tendo sido dimensionados para um mês de armazenamento.

Sendo assim, foi calculado o volume de cal necessário e verificado o tempo de armazenamento nesses silos, admitindo-se um tempo mínimo de 15 dias para a reposição de cal (visando favorecer a logística). Nos casos em que, mesmo com o silo de 55 m³, o tempo de reposição foi inferior a 15 dias, optou-se por dobrar o volume, para 110 m³, aumentando-se o tempo de reposição da cal e dobrando-se o custo de aquisição do equipamento.

A quantidade diária de cal foi calculada considerando-se a taxa de 40 % de cal em relação aos sólidos totais do lodo, conforme é realizado em algumas ETEs da SANEPAR. O volume de cal foi estimado considerando-se a massa específica de 650 kg/m³ (MARTINS; HARMEL, 2012).

Os pátios de cura de lodo caleado foram dimensionados considerando-se a taxa de 350 kgST/m².ciclo, sendo cada ciclo de 12 meses. Esses parâmetros foram adotados com base nos resultados do Objetivo Específico A (Item 5.1.6). A fórmula utilizada para cálculo da área de pátio apresenta-se a seguir.

$$AP_{\text{útil}} = \frac{P_{\text{Lodo}} \cdot 365}{T_s} \quad (9)$$

Onde:

$AP_{\text{útil}}$ = Área útil mínima de Pátio de Cura (m²);

P_{lodo} = Produção diária de lodo em massa seca (kgST/d);

T_s = Taxa de aplicação de sólidos (kgST/m².ciclo).

4.2.2.5 Secagem Térmica

Dois critérios básicos foram observados para o dimensionamento dos secadores térmicos:

- Massa de lodo úmido aplicada (kg/h);
- Massa de água evaporada (kg/h).

A massa de lodo úmido aplicada foi calculada por:

$$M_{LODO,i} = \frac{P_{LODO}}{C_i} \quad (10)$$

Onde:

$M_{LODO,i}$ = Massa de lodo inicial (kg/h).

P_{LODO} = Carga de lodo (kgST/h);

C_i = Concentração inicial do lodo (kgST/kg_{LODO}).

Observa-se que a massa de lodo úmido aplicada corresponde à massa diária de lodo proveniente da etapa de desaguamento, dividida pelo regime de operação dos secadores. Este, por sua vez, foi definido como sendo o mesmo que o das centrífugas, sugerindo-se a operação desses equipamentos em série e simultânea.

A massa de água evaporada foi calculada pelas seguintes fórmulas:

$$M_{H_2O,EV} = M_{LODO,i} - M_{LODO,f} \quad (11)$$

Onde:

$M_{H_2O,EV}$ = Massa de água evaporada (kg/h);

$M_{LODO,i}$ = Massa de lodo inicial (úmido) (kg/h).

$M_{LODO,f}$ = Massa de lodo final (seco) (kg/h).

$$M_{LODO,f} = M_{LODO,i} \cdot \frac{C_i}{C_f} \quad (12)$$

Onde:

C_f = Concentração final do lodo (kgST/kg_{LODO}).

Com base no exposto na revisão de literatura (item 3.3.5.2), foram considerados os teores de sólidos de 20 % e 80 %, respectivamente, para o lodo úmido e seco. A massa de água evaporada foi calculada para se estimar a quantidade de energia térmica necessária para a secagem do lodo. Em contato com a Empresa Albrecht, foi informado que o secador rotativo Bruthus, considerado neste estudo, consome cerca de 1.000 kcal para cada kg de água evaporado.

Buscando-se verificar a autonomia do sistema de secagem com o aproveitamento do biogás dos reatores UASB, foi estimada a energia disponível de biogás, considerando-se 85 NL/m³esgoto – valor típico, segundo Lobato (2011) – e o Poder Calorífico Inferior (PCI) de 6.300 kcal/m³. Este valor foi adotado, considerando-se o teor de 75 % de CH₄ no biogás, pela interpolação linear dos valores apresentados por Lobato (2011) e Rosa et al. (2016) (mencionados no item 3.1.2.2), conforme ilustra-se na Tabela 18.

TABELA 18 – ESTIMATIVA DO PCI DO BIOGÁS COM 75 % DE CH₄

| % CH ₄ no Biogás | PCI (kcal/Nm ³) | Fonte |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 60 | 5.130 | Lobato (2011) |
| 75 | 6.323 | - |
| 80 | 6.720 | Rosa et al. (2016) |

FONTE: O Autor (2019).

Ainda visando o aproveitamento do biogás, calcularam-se gasômetros com volume de 35 % do volume diário produzido, conforme adotado por Valente (2015).

Considerou-se também o uso de gás GLP quando não atingida a autonomia do sistema com o biogás. Nestes casos, o consumo de GLP foi calculado dividindo-se o déficit energético verificado pelo PCI de 11.100 kcal/kg, informado por empresas fornecedoras do gás.

Por fim, a área necessária para alocação do Secador Térmico foi considerada como sendo acoplada ao Edifício de Desidratação de Lodo (EDL), possibilitando a operação em série com as centrífugas. Devido ao gasômetro e equipamentos periféricos, considerou-se um acréscimo de 50 % em relação à área do EDL.

4.2.3 Resumo dos Parâmetros de Dimensionamento

Na Tabela 19 apresenta-se um resumo dos parâmetros de dimensionamento adotados no presente estudo, bem como alguns valores utilizados como referência. Destaca-se que alguns desses parâmetros e valores foram definidos a partir dos resultados obtidos no Objetivo Específico A, razão pela qual não estão necessariamente explícitos nos tópicos anteriores, mas estão apresentados na sequência.

TABELA 19 – RESUMO DOS PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO E VALORES DE REFERÊNCIA UTILIZADOS

| Parâmetro | Valor | Unidade ou Referência | Referência Bibliográfica ou Fonte | Observação |
|---|---------|--|-----------------------------------|--|
| DQO no esgoto bruto | 600 | mg/L | von Sperling (1996) | - |
| Coefficiente de produção de sólidos | 0,30 | kgST/kgDQO _{aplicada} | Objetivo Específico A | UASB + Pós-tratamento aeróbio (Lodos ativados ou FBP). |
| Leitos de Secagem | | | | |
| Taxa de Aplicação de Sólidos | 15 | kgST/m ² | NBR 12.209/11 | - |
| Tempo de ciclo | 18 | dias | Objetivo Específico A | Considerado leitos cobertos e teor de sólidos final de 25 %. |
| Centrífugas | | | | |
| Capacidade para ETE de 80 L/s | 5* | m ³ /h | - | Valores adotados a partir de projetos fornecidos pela SANEAGO (2018) e observação dos resultados do Objetivo Específico A. |
| Capacidade para ETEs de 80 a 240 L/s | 10 | m ³ /h | - | |
| Capacidade para ETEs de 320 a 750 L/s | 30 | m ³ /h | - | |
| Regime de operação | 4 a 13 | h/d | - | |
| Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) no Tanque de Equalização | 14 a 20 | horas | - | TDH adotado inversamente proporcional à produção de sólidos e superior ao regime de operação das centrífugas. |
| Wetlands Construídos para Lodo | | | | |
| Taxa de Aplicação de Sólidos | 120 | kgST/m ² .ano | Sunti et al. (2011) | Valor inferior à taxa de 125 kgST/m ² .ano aplicado por Sunti et al. (2011) para lodo de Tanque Séptico. |
| Estabilização Alcalina Prolongada | | | | |
| Taxa de aplicação de cal | 40 | % de Massa Seca de lodo | SANEPAR (2018) | - |
| Taxa de Aplicação de Sólidos - Pátios de Cura | 350 | kgST/m ² .ano | - | Valores adotados a partir dos resultados do Objetivo Específico A. |
| Tempo de reposição da cal | 15 a 60 | dias | - | Parâmetro adotado para o pré-dimensionamento dos silos de armazenamento de cal. |
| Secagem Térmica | | | | |
| Capacidade para ETEs de 80 a 240 L/s | 2.000 | kg/h | - | Valores resultantes da consideração do mesmo regime de operação que as centrífugas (ver item 5.1.3). |
| Capacidade para ETEs de 320 a 750 L/s | 4.500 | kg/h | - | |
| Concentração inicial do lodo | 20 | % ST | - | Adotado. |
| Concentração final do lodo | 80 | % ST | - | Adotado. |
| Coefficiente de produção de biogás | 85 | NL/m ³ esgoto | Lobato (2011) | Valor considerado típico. |
| Teor de metano no biogás | 75 | % | Lobato (2011) e Rosa et al. | Valores médios obtidos a partir de dados apresentados por Lobato (2011) e Rosa et al. (2016). |
| Poder calorífico do biogás | 6.300 | kcal/m ³ | (2016) | |
| Capacidade do gasômetro | 35 | % do volume diário de biogás produzido | Valente (2015) | - |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: *Adotada uma centrífuga de 5 m³/h para a ETE com vazão de 80 L/s e leitos de secagem recebendo 1/3 do lodo produzido.

4.2.4 Orçamentação das Estruturas de Tratamento de Lodo

Tendo em vista que no presente trabalho objetivou-se dar subsídios para Estudos de Concepção, os orçamentos realizados foram do tipo Estimativa de Custos, ou seja, conforme a definição apresentada na Revisão Bibliográfica, trata-se de uma “Avaliação expedita com base em custos históricos e comparação de projetos similares, utilizada nas etapas iniciais do empreendimento para análises de viabilidade”. Em alguns casos, foram feitos Orçamentos Preliminares, com o levantamento de quantitativos dos principais itens, para refinamento dos resultados.

O custo final de cada alternativa de tratamento de lodo foi estimado somando-se o custo de implantação (CAPEX) ao de operação (OPEX), sendo que, para o OPEX, considerou-se o Valor Presente Líquido (VPL) referente a 15 anos de operação.

4.2.4.1 Custos de Implantação - CAPEX

a) Leitões de Secagem

Para a obtenção dos custos de implantação dos leitões foi obtido, junto à SANEAGO, o orçamento de 20 unidades de leitões de secagem com dimensões 10 x 10 m (largura x comprimento). Neste orçamento, já estavam inclusos todos os impostos e o BDI (Bonificações e Despesas Indiretas). Após verificação da compatibilidade dos itens do orçamento com as estruturas consideradas neste trabalho (leitões em concreto com camadas sucessivas de material granular), foi dividido o valor total da obra pela área útil de leitões de secagem, obtendo-se um valor em R\$/m². A data base do orçamento utilizado é fevereiro de 2017, portanto, o valor foi atualizado para janeiro de 2019, utilizando-se o valor médio do INCC (Índice Nacional de Custos da Construção) neste período (ver Apêndice 2).

Para fins de comparação, foram verificados os resultados de Baréa (2013) e de Pacheco (2011), dividindo-se os custos totais pelas áreas apresentadas pelos autores, obtendo-se os valores unitários (R\$/m²), que também foram atualizados pelo INCC.

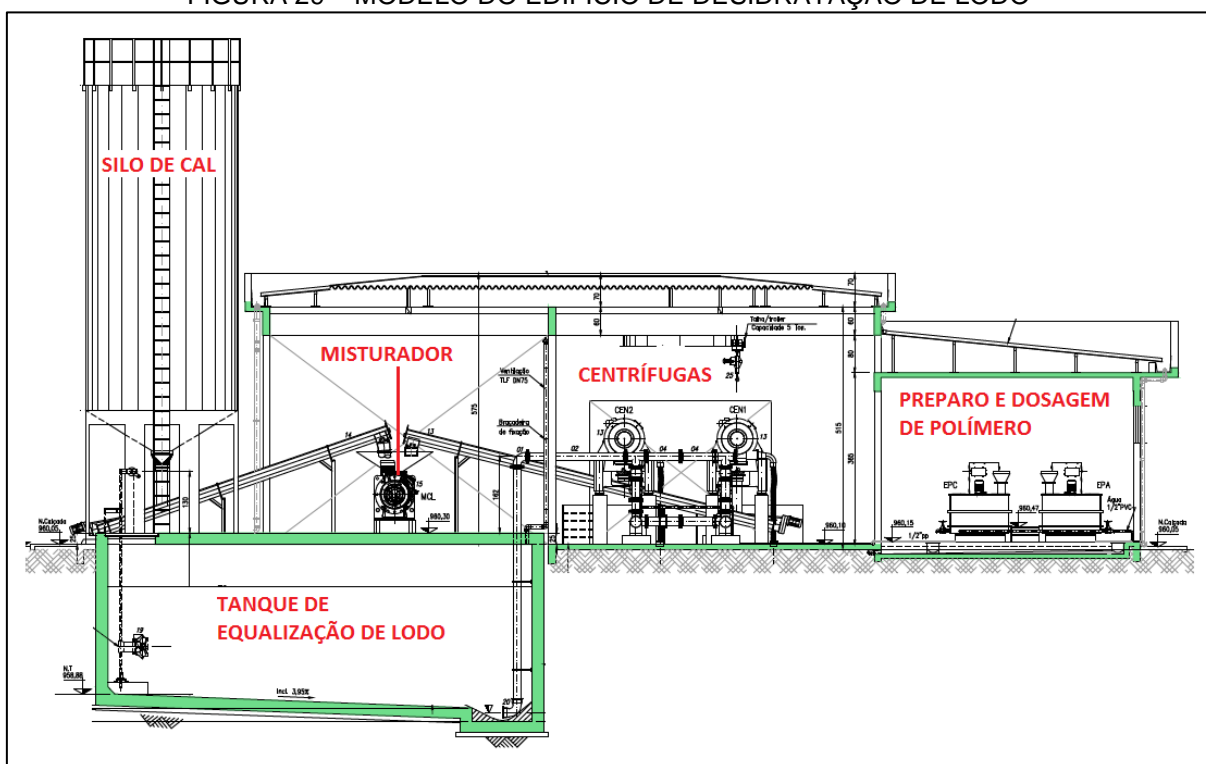
Considerando-se ambos os resultados, foi definido um valor unitário de referência de custo dos leitões de secagem, para posteriormente ser multiplicado às áreas calculadas nos dimensionamentos.

b) Centrífugas

O custo de implantação das centrífugas foi estimado a partir de dois projetos fornecidos pela empresa SANEAGO. Conforme mencionado na descrição dos dimensionamentos, tratam-se de dois Edifícios de Desidratação de Lodo, um para uma centrífuga de 10 m³/h e outro para 36 m³/h, e com tanques de equalização de lodo de, respectivamente, de 82 m³ e 235 m³.

Apesar das grandes diferenças de vazão das centrífugas e dos volumes dos tanques, as edificações possuem porte e concepção bastante semelhantes. Diferentemente dos modelos mencionados na revisão bibliográfica, esses EDL possuem apenas um pavimento. A remoção do lodo centrifugado se dá por roscas transportadoras, que elevam a torta de lodo para a altura necessária para a mistura com a cal. Na Figura 29 apresenta-se um corte esquemático desses projetos, e no Apêndice 3, mais detalhes sobre suas plantas.

FIGURA 29 – MODELO DO EDIFÍCIO DE DESIDRATAÇÃO DE LODO



FONTE: Adaptado de SANEAGO (2018).

Como pode-se observar, a estrutura contempla áreas cobertas para as centrífugas, equipamentos de condicionamento e caleção, um silo de cal externo e um tanque de equalização, em concreto armado, enterrado. A partir dos orçamentos desses projetos, também fornecidos pela SANEAGO, e com base nos

dimensionamentos realizados, foram estabelecidos os custos de cada componente do EDL para as diversas vazões de ETE consideradas neste estudo. Na Tabela 20, apresentam-se as características principais, bem como os custos, dos dois projetos utilizados.

TABELA 20 – DADOS DOS PROJETOS DE EDL UTILIZADOS PARA ORÇAMENTAÇÃO

| DADOS | ETE 01 | ETE 02 |
|--|---------------------|---------------------|
| Vazão de projeto da ETE (L/s) | 155 | 759 |
| Capacidade da centrífuga (m ³ /h) | 10 | 36 |
| Volume do Tanque de Equalização (m ³) | 81 | 235 |
| Volume do Silo de Cal (m ³) | 14 | 55 |
| Área do EDL em planta (m ²) | 420 | 475 |
| ORÇAMENTO | | |
| Data-base | 01/02/2017 | 01/08/2014 |
| Construção civil - EDL | 256.170,48 | 285.989,09 |
| Construção civil - TQ. Equalização | 129.875,04 | 201.884,37 |
| Material hidráulico | 35.177,32 | 37.803,14 |
| Equipamentos (centrífugas, bombas de alimentação, etc.)* | 2.471.123,15 | 2.210.363,61 |
| Material elétrico | 42.293,67 | 80.655,25 |
| Total | 2.934.639,66 | 2.816.695,46 |

FONTE: Adaptado de SANEAGO (2018).

NOTA: *O custo dos Equipamentos da ETE 01 apresentou-se mais elevado que da ETE 02 por conta da data-base dos orçamentos e por variações dos preços (cotações) originais utilizados.

Os orçamentos foram fornecidos pela empresa já organizados em termos de Construção Civil, Materiais Hidráulicos, Equipamentos e Materiais Elétricos. Foram revisados os itens de ambos os orçamentos e realizadas algumas adaptações para tornar os projetos mais similares em termos de detalhes construtivos. Itens como pintura, revestimento e estrutura do telhado, por exemplo, foram padronizados para os dois projetos, porém, manteve-se toda a concepção original (áreas, volumes, disposição das unidades, materiais hidráulicos, etc.).

Conforme mencionado na descrição dos dimensionamentos, calculadas as vazões de lodo para cada porte de ETE, foram adotadas centrífugas com vazões semelhantes às desses projetos (no caso, 5, 10 e 30 m³/h), variando-se os regimes de funcionamento para que os projetos pudessem ser utilizados à contento. Entretanto, quanto aos Tanques de Equalização, foram dimensionados em função de diferentes TDHs para cada vazão de ETE. Sendo assim, o custo dessas unidades foi determinado com base em um valor unitário médio, em R\$/m³, obtido a partir dos projetos existentes.

O custo de equipamentos foi composto pelo valor de duas centrífugas (uma de reserva) e os demais periféricos como sistema de polímero, bombas de alimentação de lodo, rosca transportadora de lodo centrifugado, misturador do tanque de equalização e monovia para içamento das centrífugas. Os Materiais Hidráulicos correspondem às tubulações, conexões, válvulas, etc., enquanto que os Materiais Elétricos são referentes à fiação, inversor de frequência, sistema de proteção contra descargas atmosféricas, painel de comando, etc.

Para todos os itens, os valores apresentados na Tabela 20 foram corrigidos para janeiro de 2019, com base no INCC médio do período entre a data-base e essa data.

Foi também realizada uma pesquisa de custo, especificamente para as centrífugas, por meio da solicitação de cotações para empresas fornecedoras do equipamento, para capacidades variando de 5 a 40 m³/h, considerando-se o lodo inicialmente com 3 % de ST. Os resultados obtidos foram utilizados para o balizamento do custo deste item na composição do orçamento. Juntamente aos custos, foram solicitadas as potências dos equipamentos, para o posterior cálculo do consumo de energia elétrica.

c) Wetlands Construídos para Lodo

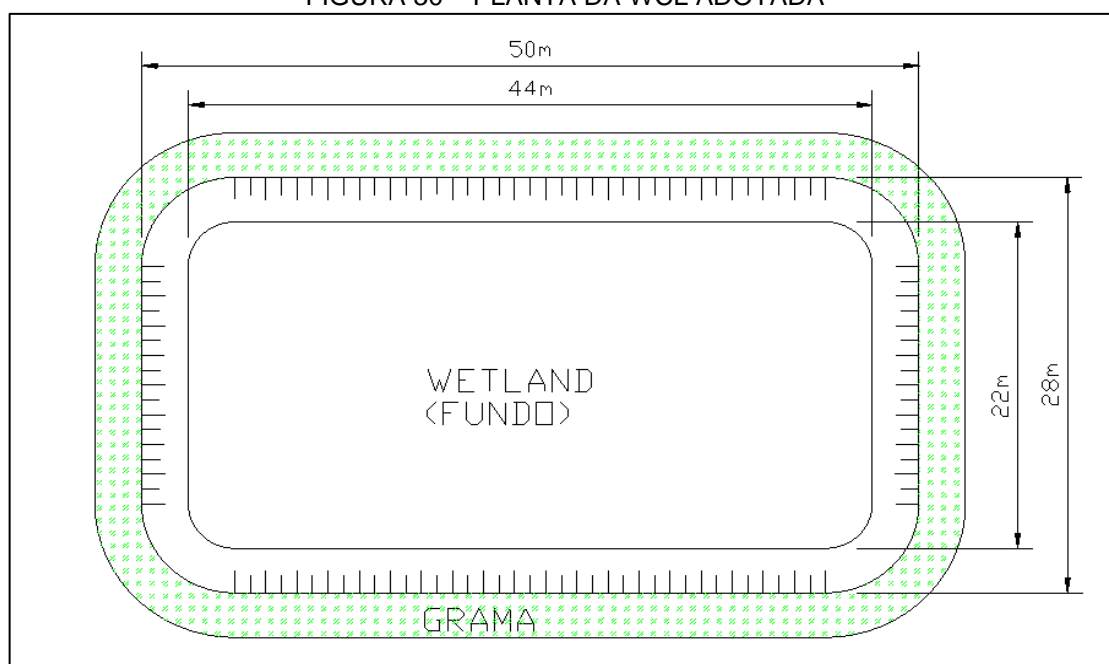
Foram realizados dois procedimentos para a estimativa do custo de implantação dos WCL. O primeiro foi a consulta a uma das empresas que trabalha diretamente com projetos de WCL. A esta foi solicitado o custo em R\$/m² de Wetland Construído para Lodo.

O segundo foi, a partir de contato com técnicos da empresa mencionada e das informações apresentadas na revisão bibliográfica (item 3.3.4.3), a elaboração de um orçamento preliminar para uma WCL de 22 x 44 x 2 m (largura x comprimento x profundidade), afim de se estimar o custo em R\$/m² para esta dimensão de Wetland. Para tanto, foram elaborados croquis auxiliares e levantamento dos quantitativos principais, como movimentação de terra, impermeabilização e materiais do leito filtrante. O custo total foi calculado utilizando-se os preços e composições unitárias constantes nas tabelas da SANEPAR e da SANEAGO (SANEPAR, 2018; SANEAGO, 2017). Assim, foi calculado um novo custo unitário, em R\$/m², para fins de comparação com os valores informados pela empresa de referência.

Com isto, adotaram-se valores unitários para os diferentes portes de Wetland, reduzindo-se gradativamente este por questões de ganhos de escala, mas mantendo-se o preço unitário dentro de uma faixa realista. Os valores unitários foram multiplicados às áreas úteis calculadas para as Wetlands, para se estimar o custo total de implantação dessas.

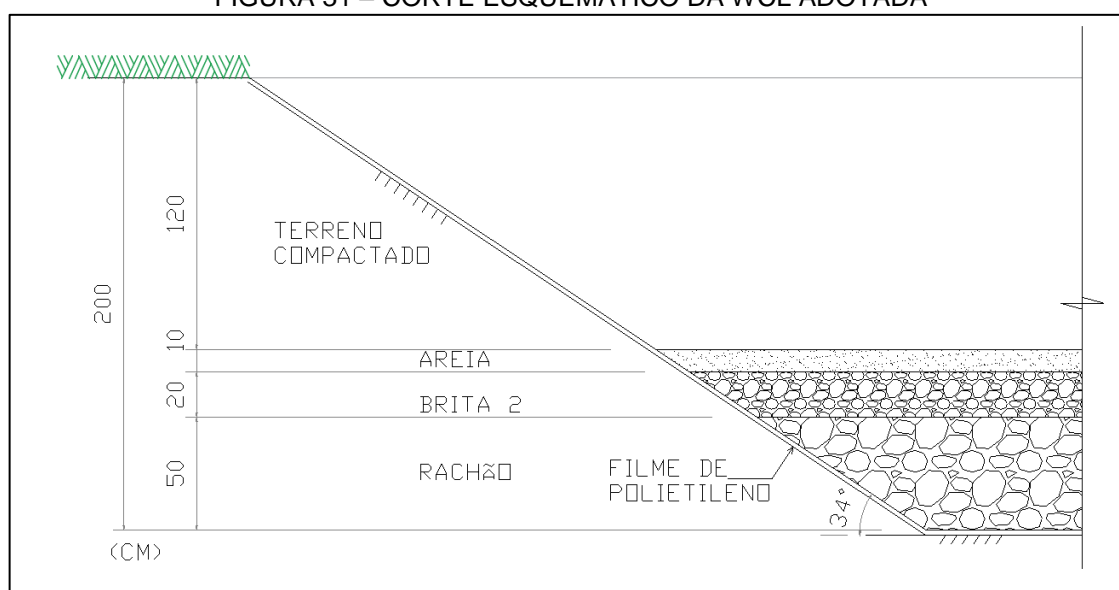
Nas Figuras 30 e 31 apresentam-se os desenhos auxiliares elaborados.

FIGURA 30 – PLANTA DA WCL ADOTADA



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 31 – CORTE ESQUEMÁTICO DA WCL ADOTADA



FONTE: O autor (2019).

Observa-se que não foi estudada a fundo a questão da impermeabilização da WCL, porém, sabe-se que o custo de impermeabilização geralmente é bastante relevante nos orçamentos. Por simplificação, neste trabalho adotou-se a utilização de filme de polietileno sobre um terreno compactado.

d) Estabilização Alcalina Prolongada

O custo de implantação do processo de EAP foi dividido em duas parcelas:

- Aplicação de cal;
- Pátio de Cura.

A aplicação de cal, no caso de lodo desaguado em centrífuga, teve seu custo estimado a partir dos projetos fornecidos pela SANEAGO. Para tanto, utilizaram-se os custos dos equipamentos de caleação, conforme apresenta-se na Tabela 21.

TABELA 21 – DADOS DOS PROJETOS EXISTENTES PARA CALEAÇÃO DE LODO

| DADOS | ETE 01 | ETE 02 |
|---|-------------------|-------------------|
| Vazão de projeto da ETE (L/s) | 155 | 759 |
| Volume do Silo de cal (m ³) | 14 | 55 |
| Capacidade da Rosca de Cal (kg/h) | 54 | 193 |
| Capacidade da Rosca de Lodo + Cal (kg/h) | 1.100 | 4.000 |
| ORÇAMENTO – EQUIPAMENTOS DE CALEAÇÃO | | |
| Data-base | 01/02/2017 | 01/08/2014 |
| Silo de cal | 239.507,95 | 294.877,70 |
| Alimentador volumétrico | - | 54.588,76 |
| Rosca transport. Cal | - | 57.185,00 |
| Misturador CAL/LODO | 156.968,11 | 177.273,50 |
| Rosca transport. lodo + Cal | 75.244,65 | 78.474,25 |
| Caçamba | - | 6.794,00 |
| Total | 471.720,71 | 669.193,21 |

FONTE: Adaptado de SANEAGO (2018).

Como pode-se observar, nos dados da ETE 01 não foram fornecidos os custos de três itens: alimentador volumétrico, rosca transportadora de cal e da caçamba. Exceto a caçamba, os outros 2 itens foram estimados pela proporção média entre os valores dos equipamentos das duas ETES, calculada em 88,5 %. A caçamba foi adotada com o mesmo valor.

Esses valores, após atualizados pelo INCC, foram adotados para as diversas situações deste estudo (a depender da quantidade de lodo), com adaptações, quando necessário, como no caso da duplicação do volume do silo de cal.

Nos casos de lodo desaguado em leitos de secagem, não foi considerado o custo de implantação do sistema de aplicação da cal, já que esta seria feita manualmente, no próprio Pátio de Cura. Considerou-se, para estes casos, apenas o custo do pátio de cura (em relação ao CAPEX).

O custo do Pátio de Cura, independentemente da origem do lodo (centrífugas ou leitos de secagem), foi estimado a partir do Custo Unitário Básico – CUB para Galpão Industrial (GI), divulgado mensalmente pelo SINDUSCON (Sindicato da Indústria da Construção) de cada estado brasileiro. Utilizou-se, como referência, a média aritmética dos valores dos estados do Paraná e de Goiás, já que grande parte das considerações deste estudo foram feitas com base nos dados da SANEPAR e da SANEAGO.

O CUB para Galpão Industrial é calculado considerando-se uma área de 1.000 m² composta por um galpão com área administrativa, 2 banheiros, um vestiário e um depósito (SINDUSCON-MG, 2007). Sendo assim, considerando-se que os pátios de cura devem, preferencialmente, possuir um depósito para a cal (internamente revestido em cerâmica), e podem conter banheiro já que são áreas relativamente grandes, entendeu-se que este parâmetro pode representar adequadamente os pátios de cura. Utilizaram-se os valores sem desoneração, que são geralmente utilizados nos orçamentos de uma das empresas de saneamento consultadas. Esta questão é bastante particular de cada empresa, devendo-se verificar, para cada caso, a vantajosidade ou não do uso de custos com desoneração da folha de pagamento.

e) Secagem Térmica

O custo de secagem térmica foi composto por duas parcelas: equipamentos (secadores com equipamentos periféricos, gasômetros e sistemas de filtragem de biogás) e obras civis. Sendo os secadores térmicos os equipamentos mais relevantes entre esses custos, seus valores foram obtidos por consulta a empresas fornecedoras. Já os gasômetros e os sistemas de filtragem de biogás foram adotados a partir dos dados apresentados por Valente (2015) (ver Tabela 11). Os valores expostos pelo autor foram atualizados para janeiro de 2019 com base no INCC.

Quanto às estruturas civis, foram estimadas como 3 % do custo dos equipamentos. Para tal definição, considerou-se que, como os secadores seriam subsequentes às centrífugas, substituindo o sistema de caleação, a área prevista para o silo de cal e para o misturador poderia ser utilizada pelo o secador. Logicamente, necessitariam-se algumas adaptações, bem como de estruturas adicionais para assentamento do gasômetro e do sistema de filtragem do biogás, refletindo em acréscimos de custo, os quais foram estimados com base no percentual mencionado.

4.2.4.2 Custos de Operação - OPEX

O OPEX foi calculado considerando-se o custo de:

- a) Pessoal;
- b) Manutenção;
- c) Energia Elétrica;
- d) Produtos Químicos.

Foram estimados, para cada tecnologia em estudo, os custos anuais desses itens. Os valores foram projetados para um período de 15 anos e trazidos à Valor Presente Líquido (VPL), utilizando-se a seguinte fórmula:

$$VPL = \sum_{n=1}^{15} \frac{C_n}{(1+i)^n} \quad (13)$$

Em que:

VPL = Valor Presente Líquido (R\$);

C_n = Custo no ano “n” (R\$);

i = Taxa de juros (%);

n = ano.

Por simplificação, foi considerada a taxa de juros de 6,50 % ao ano, que corresponde à taxa básica de juros do mercado, SELIC. Em tese, isto significa que o empreendedor/empresa poderia aplicar o capital no Tesouro Nacional para obter o montante desejado após o período considerado. O valor adotado pode ser considerado conservador, uma vez que a expectativa do mercado é que a taxa passe para 8 % nos próximos anos (BCB, 2018). Ou seja, com a taxa considerada menor, o montante inicial necessário é estimado para cima.

A seguir, apresentam-se os materiais e métodos utilizados para a estimativa dos custos de operação de cada tecnologia abordada neste estudo.

a) Leitos de Secagem

Para os leitos de secagem, consideraram-se duas parcelas de custos operacionais: pessoal e manutenção. Esses custos foram estimados com base em valores fornecidos pela SANEPAR, que, em alguns casos, terceiriza os serviços de limpeza e manutenção dos leitos de secagem. Os custos unitários dos serviços informados pela empresa estão apresentados na Tabela 22, a seguir.

TABELA 22 – CUSTO DOS SERVIÇOS DE LIMPEZA DOS LEITOS DE SECAGEM

| Item | Serviços | Unidade | Custo Unitário (R\$) |
|----------------|---|----------------|----------------------|
| 1 (Pessoal) | Retirada manual de lodo do leito de secagem | t | 20,00 |
| 2 (Manutenção) | Retirada e recolocação de areia e frisagem dos espaçamentos (fornecimento de areia incluso) | m ² | 2,00 |

FONTE: Adaptado de SANEPAR (2018).

O quantitativo desses serviços foi realizado considerando-se o lodo úmido remanescente nos leitos ao final do tempo de ciclo, tendo-se adotado o teor de sólidos de 25 %. A frequência de limpeza, necessária para se determinar o número de limpezas por ano, foi considerada igual a frequência de descarga de lodo nos leitos, a qual foi estipulada considerando-se aspectos técnicos e operacionais, a saber:

- Altura da camada de lodo no descarte: 0,50 m;
- Volume de descarte do UASB igual ao enchimento de metade dos leitos de secagem disponíveis, não ultrapassando 25 % do volume de digestão do UASB;
- Volume de digestão do UASB igual a 75 % do volume total deste, com o reator dimensionado para um TDH total de 8 horas (valor típico, conforme mencionado no item 3.1.2).

Assim, primeiramente, estimou-se a frequência de limpeza dos leitos de secagem, da seguinte maneira:

$$V_{desc} = V_{Leito} \cdot n \quad (14)$$

Em que:

V_{desc} = Volume de descarte do UASB (m^3);

V_{Leito} = Volume Útil de uma unidade de Leito de Secagem (m^3);

n = Número de Leitões utilizados por descarga.

e,

$$F = \frac{V_{desc}}{Q_{LODO}} \quad (15)$$

Onde:

F = Frequência de descarte de lodo dos reatores UASB (d);

V_{desc} = Volume de lodo descartado (m^3);

Q_{LODO} = Vazão diária de lodo produzido (m^3/d).

Em seguida, calcularam-se a massa anual de lodo removido (quantificação do item 1) e a área de retirada e recolocação de areia e frisagem dos espaçamentos (quantificação do item 2). A primeira, multiplicando-se o volume de lodo descartado (V_{desc}) por sua massa específica, considerando-se o lodo desaguado a 25 % de sólidos e com massa específica de $1.030 \text{ kg}/m^3$ (MORETTO et al. 2011). A segunda, multiplicando-se o número de leitões utilizados por descarga, pela área dos mesmos. A quantificação anual destes itens se deu pela multiplicação desses resultados ao número de limpezas realizadas por ano, estimada por 365 dias divididos pela frequência de descarte.

b) Centrífugas

Para as centrífugas foram consideradas as 4 parcelas mencionadas que compõem o OPEX, conforme é detalhado na sequência.

- Pessoal

Para o cálculo do custo com Pessoal foram adotados, a partir de contato com profissionais da SANEAGO, dois cargos responsáveis por essa operação: Agente de Operação e Técnico Industrial.

Da mesma forma, adotaram-se os tempos que cada profissional dispõe para a operação das centrífugas, ou qualquer outra atividade diretamente relacionada (preparo de polímeros, realização de análises, lavagem das centrífugas após o uso, entre outras). O tempo foi adotado como sendo 1 hora a mais do que o regime de

funcionamento previsto para as centrífugas (por conta da lavagem destas). Com isto, foi elaborada uma composição simplificada do custo com Pessoal, conforme apresenta-se na Tabela 23.

TABELA 23 – COMPOSIÇÃO DO CUSTO COM PESSOAL PARA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS

| Item | Vazão de Esgoto (L/s) |
|---|--|
| | 80, 160, 320... 750 |
| 1. Agente de Operação - Custo horário (R\$) | X_1 (fixo) |
| Horas dedicadas (h/d) | $Y = \text{regime de operação} + 1$ |
| 2. Técnico industrial - Custo horário (R\$) | X_2 (fixo) |
| Horas dedicadas (h/d) | $Y/5$ |
| Custo total (R\$/ano) | $(X_1 \cdot Y + X_2 \cdot Y/5)$ 365 dias |

FONTE: O Autor (2019).

NOTAS: Custos horários: Agente de Operação: R\$ 51,80; Técnico Industrial: R\$ 69,44.

Como pode-se observar, para o Técnico Industrial considerou-se 1/5 do tempo dispendido pelo Agente de Operação, uma vez que esse ocupa uma posição de supervisor. Logicamente, o tempo que esses profissionais utilizam para a operação das centrífugas é variável, principalmente em função do nível de automação da ETE. Entretanto, neste estudo considerou-se a experiência da SANEAGO, em que um Agente de Operação é dedicado exclusivamente às centrífugas.

O custo horário de cada um dos cargos foi adotado com base nos salários pagos pela empresa SANEAGO, para profissionais na metade de suas carreiras, ou seja, com correção de salário equivalente à metade do plano de carreira oferecido pela empresa. Consideraram-se, ainda, todos os encargos pagos pela empresa (INSS, FGTS, férias, 13º salário, vale alimentação, entre outros), que somados equivalem a 113,75 % do valor base (salário bruto). Não foi considerado adicional noturno uma vez que todas as centrífugas foram dimensionadas para trabalhar em regime inferior a 15 h/d (por exemplo, das 06:00 hr às 21:00 hr).

- Manutenção

Em relação ao custo de manutenção, também em contato com a SANEAGO, foi relatado pela empresa que existem contratos com os fornecedores das centrífugas para que esses mantenham-nas em funcionamento adequado. Os contratos englobam manutenção preventiva e corretiva e os valores pagos dependem das quantidades e tipos de manutenção que são feitas, havendo um valor base anual, mas que pode ser ultrapassado (por exemplo, no caso de troca de peças de alto custo).

Foram utilizados, como referência, os contratos existentes para as centrífugas da ETE Hélio Seixo de Brito (ETE Goiânia). A ETE possui vazão média em torno de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ e seu sistema de tratamento é composto por tratamento preliminar e sedimentação primária quimicamente assistida, de forma que o lodo gerado é um lodo químico primário. Está atualmente em obras a etapa secundária do tratamento, que será por lodos ativados convencional. Essas informações são importantes uma vez que a qualidade do lodo interfere no custo de manutenção das centrífugas. Existem três centrífugas implantadas, sendo duas em operação e uma em reserva, alternadamente.

Por ser primário, o lodo na ETE Goiânia possui elevada carga de areia e materiais fibrosos, o que torna o contrato de manutenção das centrífugas bastante oneroso. O regime de funcionamento e o uso do tanque pulmão previamente às centrífugas também refletem nesse custo, mas estas questões estão comentadas à parte, nos resultados do Objetivo Específico A (itens 5.1.3 e 5.1.4).

Resumidamente, as centrífugas na ETE Goiânia operam em regime de 16 a 22 h/d, a depender do dia, e possuem capacidades de 30 a 40 m^3/h para um lodo com 3 % de ST. O valor contratado para manutenção dessas foi adaptado ao presente estudo, da seguinte maneira: dividiu-se o custo médio dos contratos pela vazão diária média das centrífugas, obtendo-se assim um valor unitário em $\text{R}\$/\text{m}^3.\text{d}/\text{ano}$, que, multiplicado às vazões diárias previstas em cada cenário, resultou em custos proporcionais de manutenção.

- Energia Elétrica

Para o cálculo da energia elétrica, foram obtidos, junto a fornecedores, os valores de potência instalada e consumida esperada de centrífugas com capacidades para 5, 10 e 30 m^3/h , para um lodo afluente com 3 % de ST. Simplificadamente, é aconselhável que a potência instalada em motores de uso geral, como é o caso das centrífugas, seja em torno de 30 % superior à potência efetivamente consumida, devido à inércia das massas (MAMEDE FILHO, 2007). Para fins de comparação, além da solicitação dos dados de potência aos fornecedores, foram solicitados à SANEAGO dados da potência consumida de uma das centrífuga em operação na ETE Hélio Seixo de Brito, com vazão nominal próxima de 30 m^3/h .

Além da potência das centrífugas, sabe-se que há uma série de outros equipamentos instalados para o processo como um todo, tais como as bombas de

alimentação de lodo, as roscas transportadoras, as bombas dosadoras de polímero, os misturadores de polímero e até mesmo o misturador do tanque de homogeneização. Desconsiderando-se o misturador do tanque de homogeneização (ver item 5.1.4), foi adotado o percentual de 20 % da potência das centrífugas para a potência total desses equipamentos.

Definidos os valores de potência, o custo anual com energia elétrica foi calculado somando-se duas parcelas: consumo e demanda. As fórmulas utilizadas para o cálculo dessas parcelas apresentam-se a seguir.

$$P_{consumo} = S_{Total} \cdot n \cdot T_{consumo} \cdot 365 \quad (16)$$

Onde:

$P_{consumo}$ = Parcela do consumo de energia elétrica (R\$/ano);

S_{total} = Potência total consumida dos equipamentos (kW);

n = Regime de funcionamento (h/d);

$T_{consumo}$ = Tarifa do consumo de energia elétrica (R\$/kWh).

e,

$$P_{demanda} = D_{medida} \cdot T_{demanda} \cdot 12 \quad (17)$$

Onde:

$P_{demanda}$ = Parcela da demanda de energia elétrica (R\$/ano);

D_{medida} = Demanda medida (kW);

$T_{demanda}$ = Tarifa da demanda de energia elétrica (R\$/kWh).

A Demanda medida de energia elétrica em uma unidade consumidora corresponde à “maior demanda de potência ativa, verificada por medição, integralizada em intervalos de 15 (quinze) minutos durante o período de faturamento” (ANEEL, 2010). Ou seja, corresponde ao máximo valor obtido entre as médias das potências solicitadas em intervalos de 15 minutos, ao longo de um mês.

Em tese, a Parcela da demanda deve ser calculada considerando-se a demanda contratada, que é definida como (ANEEL, 2010):

Demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela distribuidora, no ponto de energia, conforme valor e período de vigência fixados em contrato, e que deve ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW).

Entretanto, para se definir a demanda contratada de uma ETE deve-se ter um conhecimento mais detalhado das instalações previstas e a simultaneidade de uso dos equipamentos. Portanto, para o presente estudo considerou-se apenas a demanda que seria medida pela utilização das centrífugas e seus equipamentos periféricos, representando, assim, a “parcela” da demanda que seria contratada para o atendimento especificamente destes equipamentos.

A Tarifa do consumo de energia elétrica foi adotada considerando-se a modalidade tarifária Horo-sazonal Verde, Subgrupo A4 (2,3 a 25 kV). Uma vez que, conforme os dimensionamentos realizados, não haveria necessidade de operação das centrífugas em horários de ponta, a Tarifa Verde tende a ser mais vantajosa que a azul. Quanto ao Subgrupo A4, por conta da carga instalada nas ETEs é comum que a tensão de fornecimento seja na faixa de 2,3 a 25 kV, conforme observado por Valente (2015). Para a definição de um valor de tarifa foi verificada a média nacional em 2018 das tarifas de consumo para Serviços Públicos (água, esgoto e saneamento), Subgrupo A4, disponível no site da ANEEL (ver Apêndice 4).

Para a Tarifa da demanda não foi encontrado um valor médio nacional, portanto, adotou-se o valor de R\$ 25,00 /kW tomando-se como referência valores pagos pela SANEAGO no ano de 2018. Deve-se destacar, entretanto, que para ambas as tarifas, foi aplicado o desconto 15 % previsto em legislação (ANEEL, 2010).

- Produtos Químicos

Quanto aos produtos químicos, utilizaram-se os preços recentemente pagos pela SANEAGO, de R\$ 13,00 por kg de polímero catiônico em pó, bastante próximo ao valor utilizado por Amaral (2018), em estudo com dados da SANEPAR. A quantidade de polímero foi calculada considerando-se 5 kg de polímero por tonelada de massa seca de lodo, conforme apresentado na revisão bibliográfica (item 3.3.3), para lodo misto.

c) Wetlands Construídos para Lodo

O custo de operação das WCL foi estimado considerando-se apenas Pessoal e Manutenção, não havendo aplicação de produtos químicos e desprezando-se qualquer consumo de energia elétrica associado ao processo.

Uma manutenção periódica refere-se ao corte das plantas que crescem sobre o leito de lodo. Em contato com uma empresa especializada nesta tecnologia, foi informado que o corte é necessário, em geral, semestralmente. Para o levantamento deste custo foi multiplicada a área útil de WCL pelo custo de “roçada densa”, de R\$ 2,16 /m² (SANEPAR, 2018).

Outro item considerado para a manutenção foi a remoção do lodo quando do preenchimento do volume útil das WCLs, teoricamente, após 10 anos de utilização. A altura útil considerada foi de 1,10 m de lodo e o volume de remoção foi calculado multiplicando-se este valor pela área da WCL. Considerou-se 10 % escavado manualmente e 90 % mecanicamente, para o levantamento dos custos de remoção, utilizando-se os valores unitários apresentados a seguir (SANEPAR, 2018):

- Escavação manual, não em valas, em qualquer tipo de solo exceto rocha, 0 m < h < 1 m: 34,12 R\$/m³;
- Escavação mecânica, não em valas, em qualquer tipo de solo exceto rocha, 0 m < h < 2 m: 7,07 R\$/m³;

Como a operação de escavação seria realizada apenas no décimo ano após a implantação das Wetlands, o custo total dessa foi trazido a valor presente para ser somado aos demais custos de operação das WCL.

Quanto ao custo de Pessoal, segundo a empresa mencionada, atividades como abertura de registros de descarga e realização de análises podem ser associadas à operação das WCL, bem como o corte da grama nos arredores dessas. Com base nisso, foram adotados tempos variando de 6 a 15 horas por mês (0,20 a 0,50 h/d), aumentando-se linearmente conforme a vazão da ETE. Na Tabela 24 apresentam-se os valores adotados de tempo e a forma de cálculo do custo com pessoal.

TABELA 24 – COMPOSIÇÃO DO CUSTO COM PESSOAL PARA OPERAÇÃO DE WCL

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|--|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 | 240 |
| Agente de Operação - Custo horário (R\$) | X | X | X | X | X | X | X |
| Horas dedicadas (h/d) | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 |
| Custo anual (R\$) | X . Horas dedicadas . 365 dias | | | | | | |

FONTE: O Autor (2019).

NOTA: Custo horário de Agente de Operação: R\$ 51,80 (SANEAGO, 2018).

d) Estabilização Alcalina Prolongada

Os procedimentos operacionais relacionados à EAP são pouco comentados na literatura. Portanto, grande parte das considerações dos custos desses foram feitas a partir das entrevistas realizadas (Objetivo Específico A). A definição da mão de obra, por exemplo, é uma questão subjetiva, pois há uma série de fatores intervenientes, tais como a produtividade dos operadores para a realização de tarefas, as atividades envolvidas e a realidade de cada ETE. Além disso, tendo-se verificado que na EAP existem alguns procedimentos únicos em relação aos demais processos estudados, criou-se, neste tópico, um centro de custos denominado “Outros”, composto por:

- Apoio agrônômico;
- Análises laboratoriais;
- Mistura e empilhamento do lodo em pátios, com retro-escavadeira;
- Carregamento de caminhão basculante, com pá carregadeira;

Os valores de apoio agrônômico e análises laboratoriais foram adotados a partir dos dados apresentados por Amaral (2018). A autora apresentou, para estes itens, os seguintes valores: R\$ 4,02 /t lodo higienizado, para o apoio agrônômico, e R\$ 16.887,66 /ano para as análises laboratoriais, considerando-se análises bimestrais. Para o primeiro item foi adotado o valor de R\$ 5,00 /t lodo higienizado; quanto ao segundo item, adotou-se o valor de R\$ 17.500 /ano, porém, proporcionalmente ao número de lotes de lodo higienizado que seriam formados em cada cenário de vazão, conforme exigido pela Resolução CONAMA 375/06 (BRASIL, 2006). Sendo assim, o valor de R\$ 17.500 foi dividido por 6 bimestres, obtendo-se o valor para a realização das análises de um lote, e multiplicado pelo número de lotes calculado. Cabe observar que este valor total adotado corresponde a uma correção próxima da inflação acumulada entre janeiro de 2018 e janeiro de 2019.

Quanto aos outros dois itens, referem-se à movimentação do lodo no pátio de cura. Verificou-se, nas entrevistas, que tem sido comum o uso de retroescavadeira para a mistura da cal ao lodo e o empilhamento deste nos pátios. O carregamento de caminhão basculante foi considerado para que, na montagem da planilha final de custos, o custo de transporte do lodo para a destinação final passe a ser o único não considerado, conforme explicado no início do item 4.2.

Estes custos foram levantados por meio da adaptação de composições unitárias da planilha de preços da SANEAGO (SANEAGO, 2017), no que tange à movimentação de solos: Escavação e carga com escavadeira hidráulica e Carga mecanizada (com pá carregadeira) em caminhão basculante – material de 1ª categoria. A planilha apresenta, respectivamente, os custos unitários de 1,84 e 1,93 R\$/m³; anulando-se os custos relativos ao caminhão basculante, dentro das composições, esses custos foram reduzidos a 1,44 e 1,50 R\$/m³. Estes custos foram multiplicados pelo volume estimado de lodo higienizado (considerado a 35 % de ST), buscando-se, com isto, representar a parcela de movimentação de lodo nos pátios de cura, desde o recebimento deste até a carga do material em caminhões para destinação final.

Além desses itens, foram também considerados os convencionais: pessoal, manutenção, energia elétrica e produtos químicos, porém, com variações a depender da forma de desaguamento do lodo, conforme descreve-se a seguir.

- Lodo de Leitos de Secagem

O lodo que chega aos pátios de cura, proveniente de leitos de secagem, ainda não tem a cal incorporada em sua massa, como é o caso de lodo centrifugado, que é misturado mecanicamente à cal. Portanto, também com base nas entrevistas realizadas, considerou-se a aplicação manual da cal sobre o lodo, para a posterior mistura com o uso de escavadeira hidráulica.

Para o cômputo desse custo consideraram-se duas parcelas: i) transporte do lodo removido dos leitos de secagem aos pátios de cura, considerando-se o uso de jérica com 90 litros e uma distância média de 100 m; e, ii) transporte dos sacos de cal do local de armazenamento para o local em pátio onde os lotes de lodo são formados, considerando-se sacos de 20 kg e uma distância média de 30 m. Essas condições foram adotadas com base na disponibilidade de composições do SINAPI compatíveis com as realidades observadas ao longo deste trabalho. Para o levantamento dos custos dos itens (i) e (ii), utilizaram-se duas composições do SINAPI, respectivamente:

- TRANSPORTE HORIZONTAL, MASSA/GRANEL, JERICA 90 L, 100 M: R\$ 57,15 /m³, conforme SINAPI GO, 11/2018, sem desoneração;
- TRANSPORTE HORIZONTAL, SACOS 20 KG, MANUAL, 30 M: R\$ 50,72 /ton, conforme SINAPI GO, 11/2018, sem desoneração.

Não foram consideradas as parcelas de manutenção e energia elétrica na composição do custo de caleação de lodo de leitos de secagem, por não haverem equipamentos mecânicos associados diretamente ao processo, exceto a parte de mistura com a retro-escavadeira.

O custo de produtos químicos, no caso, a cal, foi calculado considerando-se a taxa de dosagem de 40 % em relação à massa seca de lodo, valor este utilizado em muitos casos pela SANEPAR (SANEPAR, 2018), e o custo unitário de 0,47 R\$/kg cal, atualmente pago pela empresa SANEAGO (SANEAGO, 2018). Observa-se que este valor se aproxima ao valor utilizado por Bielshowski (2014), mas supera em quantia razoável o valor adotado por Amaral (2018), mostrando que o preço da cal pode ter uma oscilação relevante.

- Lodo de Centrífugas

Em relação ao custo com pessoal, a aplicação de cal ao lodo centrifugado tende a ser mais econômica por ser um processo mecanizado. Considerou-se que o tempo dispendido por um Agente de Operação seria de 10 % do regime de operação das centrífugas, uma vez que os processos são simultâneos e o operador das centrífugas pode monitorar o sistema de caleação, por supervisão (SANEAGO, 2018). Não foi descontado, entretanto, este tempo do custo de operação das centrífugas. Adotou-se também que 1/5 do tempo de Agente de Operação seria dispendido por um Técnico Industrial, supervisor do processo.

Os equipamentos componentes do sistema de caleação são relativamente simples e robustos, de forma que o custo de manutenção se torna reduzido em relação às centrífugas. Conforme a experiência relatada pela SANEAGO, o equipamento de maior custo de manutenção é o misturador de cal/lodo, que, no caso, é importado. Adotou-se, por conveniência, uma taxa anual de manutenção de 1,5 % do custo de implantação dos equipamentos de caleação de lodo (silo, sistema de alimentação, rosca transportadora e misturador).

O custo de energia elétrica foi desprezado por se tratar de equipamentos de porte muito pequeno em relação às centrífugas. Por fim, o custo com produtos químicos foi calculado da mesma forma que descrito no caso anterior: 40 % de cal em relação à massa seca de lodo e 0,47 R\$/kg cal, porém, esse foi levemente reduzido pois considerou-se 95 % de captura de sólidos nas centrífugas.

- Lodo de Leitos de Secagem + Centrífugas

Conforme mencionado anteriormente, para as vazões de 80 a 320 L/s considerou-se a opção de se trabalhar com leitos e centrífugas em paralelo, desidratando, respectivamente, 1/3 e 2/3 da quantidade total de lodo produzido. O cálculo do custo de operação da EAP para esta situação não foi diferente dos casos anteriores, destacando-se apenas que a frequência de formação dos lotes, que define a quantidade de análises laboratoriais, foi estipulada com base na produção total de lodo. Os demais custos foram obtidos pelas somas das duas parcelas, calculadas separadamente.

e) Secagem Térmica

O levantamento do OPEX da secagem térmica foi feito de maneira semelhante ao das centrífugas. Para Pessoal, consideraram-se um operador de sistemas por todo o regime de operação do secador (que foi adotado como sendo igual ao das centrífugas) e um técnico industrial, com dedicação de 1/5 do tempo do operador de sistemas. Da mesma forma, consideraram-se os salários pagos pela empresa SANEAGO, com todos os encargos pagos pela empresa.

O custo de manutenção foi adotado em 4 % do custo dos equipamentos, um pouco acima dos valores recomendados pelos fabricantes e verificados na literatura, entre 1,5 e 2,5 %, devido à realidade observada para as centrífugas.

Quanto à energia elétrica, foi calculada da mesma forma que explanado para as centrífugas: considerou-se, como potência consumida, 70 % da potência total instalada, informada pelos fabricantes.

Conforme mencionado no dimensionamento (item 4.2.2.5), quando não atingida a autonomia da secagem com o uso exclusivo do biogás da própria ETE, considerou-se a complementação com o gás GLP. A partir do consumo mensal de GLP estimado nos dimensionamentos, obtiveram-se os custos unitários deste insumo para o levantamento dos custos totais. Estes custos foram identificados como “Complemento Energético”.

Não foi considerado o uso de produtos químicos na secagem térmica.

4.3 DELINEAMENTO METODOLÓGICO 3 – OBJETIVO ESPECÍFICO C

A partir dos resultados dos Objetivos Específicos A e B, foram compiladas as informações tornando-as acessíveis e de simples interpretação para uso de engenheiros e tomadores de decisão, sendo essas:

- Área necessária para implantação das unidades;
- Massa e concentração do lodo a ser transportado, bem como a frequência de transporte;
- Custo de implantação;
- Custo de operação (equivalente a um período de 15 anos);
- Custo total (CAPEX + OPEX).

Todas essas informações foram organizadas em quatro tabelas, denominadas como Ferramentas de Auxílio em Estudo de Concepção e enumeradas de F1 a F4, conforme apresenta-se a seguir:

- a) F1: FUNÇÕES CUSTO DAS ALTERNATIVAS DE DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DE LODO
- b) F2: CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE DESAGUAMENTO DE LODO
- c) F3: CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE HIGIENIZAÇÃO DE LODO
- d) F4: CUSTOS TOTAIS, REQUISITOS DE ÁREA E DESTINAÇÃO DE LODO PARA DIFERENTES ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO DE LODO

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 INVESTIGAÇÃO DE QUESTÕES NÃO CONSOLIDADAS, VARIÁVEIS OU POUCO ABORDADAS NA LITERATURA

5.1.1 O Descarte de Lodo Aeróbio de Excesso aos Reatores UASB e seu Impacto no Dimensionamento das Estruturas de Tratamento de Lodo

5.1.1.1 Quanto à Produção de Lodo

A primeira questão levantada neste tópico foi em relação à produção de sólidos no sistema de tratamento. Conforme apresentado na revisão bibliográfica (Item 3.4), a consideração de valores equivocados de coeficientes de produção de lodo pode acarretar problemas como, por exemplo, o subdimensionamento das unidades de desaguamento de lodo. Portanto, foi realizada, inicialmente, uma análise de valores disponíveis na literatura, de coeficientes de produção de sólidos, como se apresenta a seguir.

Utilizando-se os dados apresentados por von Sperling e Gonçalves (2014) (ver Tabela 5), foram calculados os coeficientes de produção de sólidos para os sistemas compostos por UASB + LA e UASB + FBP, adotando-se uma eficiência típica de remoção de DQO no reator UASB, de 60 %. Desta forma, o coeficiente de produção de lodo secundário, nas etapas aeróbias, foi multiplicado pelo fator 0,40, já que apenas 40 % da DQO seria aplicada à essas. Na Tabela 25 apresentam-se os resultados obtidos.

TABELA 25 – ESTIMATIVA DE COEFICIENTES DE PRODUÇÃO DE LODO DE UASB + PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO

| Unidade de tratamento | Produção de lodo (kgSS/kgDQOaplicada) | |
|-----------------------------|---------------------------------------|-------------|
| | Mínimo | Máximo |
| UASB | 0,12 | 0,18 |
| Lodos Ativados | 0,10 | 0,14 |
| Total (UASB + LA) | 0,22 | 0,32 |
| UASB | 0,12 | 0,18 |
| Filtro Biológico Percolador | 0,08 | 0,12 |
| Total (UASB + FBP) | 0,20 | 0,30 |

FONTE: O Autor (2019).

Cabe observar que nessas estimativas não foi considerado o descarte de lodo aeróbio ao UASB, para adensamento e digestão. Para este caso, von Sperling e

Gonçalves (2014) apresentaram a faixa de 0,20 a 0,32 kgSS/kgDQOaplicada. Ou seja, teoricamente, não há uma redução do coeficiente de produção de sólidos se realizado o descarte, o que faz sentido uma vez que esta operação visa o adensamento e a digestão de sólidos voláteis, e não a remoção de sólidos. Os referidos autores não apresentaram coeficientes de produção de sólidos para o caso de UASB + FPB com descarga de lodo aeróbio de excesso ao UASB.

A análise realizada permite também verificar que a produção teórica de lodo é muito semelhante para o FPB e os Lodos Ativados, o que já era possível perceber pelos dados da Tabela 5, mas que se potencializa com o uso dos reatores UASB.

Cabe mencionar, também, outros valores de coeficientes encontrados na literatura. Bastos et al. (2006), ao estudarem UASB seguido de Biofiltro Aerado Submerso, obtiveram valores da ordem de 0,70 kgST/kgDQOaplicada (com uma eficiência de 85 % de remoção da DQO). Por outro lado, Pontes e Chernicharo (2009) encontraram, para UASB + FPB, valores entre 0,11 e 0,16 kgST/kgDQOaplicada, respectivamente, sem e com a descarga do lodo aeróbio de excesso para adensamento e digestão no UASB, em um sistema em escala piloto. Em escala de demonstração, os valores obtidos foram, respectivamente, 0,21 e 0,23 kgST/kgDQOaplicada, equiparando-se ao valor mínimo apresentado na Tabela 25. Os autores comentam ser esperado que a produção de sólidos aumentasse quando da realização do descarte de lodo aeróbio de excesso no UASB, provavelmente devido ao acréscimo de DQO afluente ao UASB quando realizado tal procedimento. É notável, entretanto, o elevado valor apresentado por Bastos et al. (2006), distanciando-se dos demais valores observados na literatura.

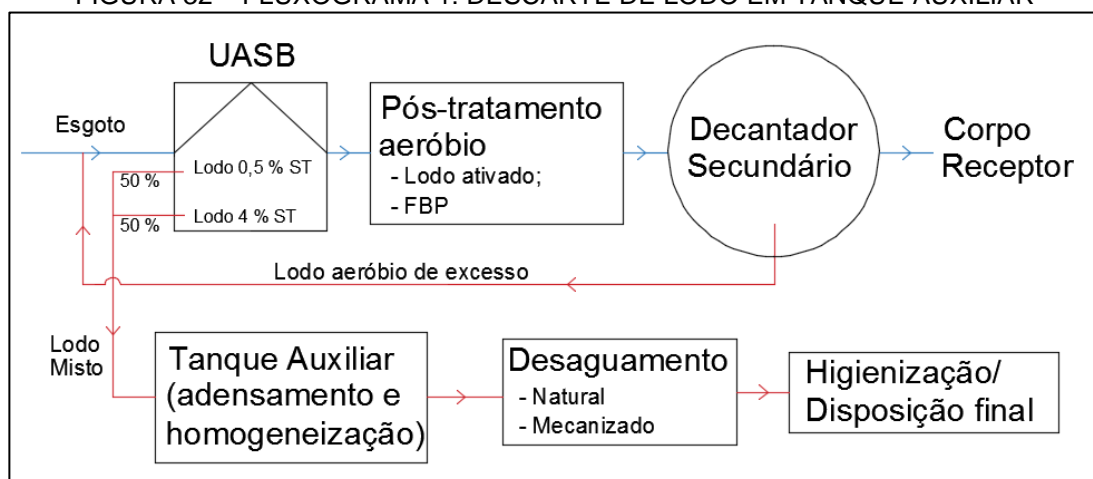
Paralelamente aos valores da literatura, em contato com técnicos da SANEPAR foi relatado que, com base em monitoramentos realizados em diversas ETEs que possuem reatores UASB, o coeficiente de produção de lodo tem se mantido, na maioria dos casos, abaixo de 0,15 kgSST/kgDQOaplicada.

Todos esses relatos permitem concluir que o coeficiente de produção de sólidos não é um valor de fácil definição, porém, é um dado essencial para o dimensionamento adequado das estruturas de tratamento da fase sólida. Lobato et al. (2018) mencionaram um caso em que a produção de sólidos aumentou 20 % em relação ao valor de projeto, devido ao recebimento de lodo de tanque séptico e outras fontes de carga orgânica, o que gerou a perda excessiva de sólidos dos reatores UASB, e certamente uma sobrecarga ao sistema de desaguamento de lodo.

5.1.1.2 Quanto ao Fluxograma

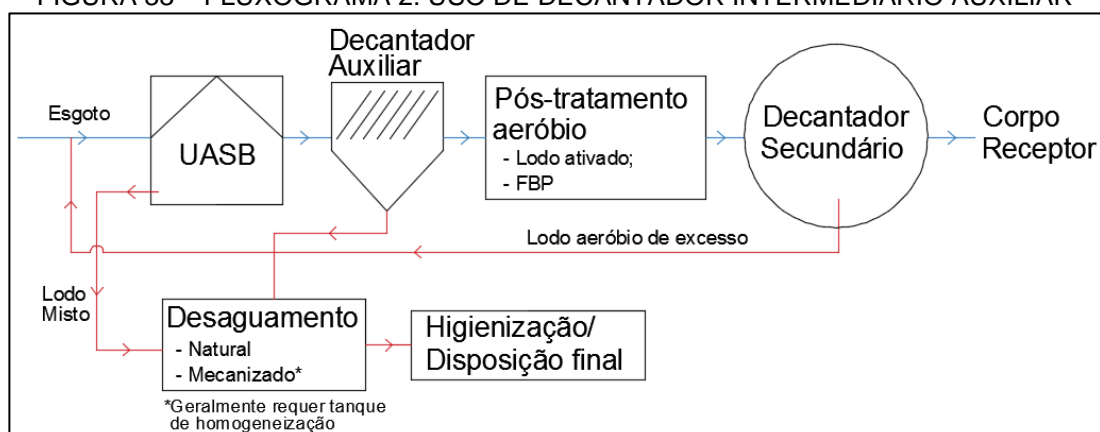
O segundo tópico abordado nesta temática foi a diferença, em termos técnico-econômicos, da realização ou não do descarte de lodo aeróbio de excesso nos reatores UASB, para adensamento e digestão. Inicialmente, para esta análise, foram desenhados alguns fluxogramas com base em recomendações encontradas na literatura (ver Item 3.4), que propõe adequações de projeto para se evitar o problema de fuga de sólidos dos reatores UASB quando da alimentação destes com lodo aeróbio de excesso. Duas abordagens foram encontradas, conforme apresenta-se nas Figuras 32 e 33, a seguir.

FIGURA 32 – FLUXOGRAMA 1: DESCARTE DE LODO EM TANQUE AUXILIAR



FONTE: Adaptado de Almeida et al. (2018) e Lobato et al. (2018).

FIGURA 33 – FLUXOGRAMA 2: USO DE DECANTADOR INTERMEDIÁRIO AUXILIAR



FONTE: Adaptado de Silva Filho e van Haandel (2013) e Silva (2018).

Como pode-se observar, nas duas concepções sugeridas pela literatura há a inclusão de uma unidade adicional para que os sólidos mais leves não se acumulem no sistema de tratamento. Cabe mencionar que, para o Fluxograma 1, o tanque

auxiliar para adensamento e homogeneização já seria necessário, de qualquer forma, no caso de desaguamento por centrífugas.

Ainda no Fluxograma 1, representou-se a remoção de sólidos do UASB a duas alturas diferentes. As concentrações de 4 e 0,5 % são exemplificações, mas a prática de remoção de, pelo menos, 50 % da massa de lodo da altura superior, conforme recomendado por Lobato et al. (2018), já permite inferir a necessidade de um tanque de adensamento, devido ao maior volume de lodo que seria removido (presume-se, pela literatura consultada, que se trata de 50 % de massa seca).

Quanto ao segundo fluxograma, foi elaborado a partir de uma compilação das informações apresentadas por Silva Filho e van Haandel (2013) e Silva (2018). Enquanto os primeiros mencionaram a necessidade do decantador auxiliar intermediário (entre o UASB e a unidade de pós-tratamento aeróbio), Silva (2018) sugeriu a utilização de sistemas de alta taxa, buscando redução de área. Cabe salientar que nesta análise não foi considerado o dimensionamento dessas unidades adicionais ao sistema convencional, apenas a concepção em si.

Buscando-se averiguar as soluções que têm sido adotadas na prática para o problema em questão, foram entrevistados alguns profissionais responsáveis por ETEs que possuem reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio, no caso, com filtros percoladores (FBP). Os profissionais entrevistados informaram que não têm realizado a descarga de lodo aeróbio de excesso nos reatores UASB, devido às dificuldades que enfrentaram quando da realização desta prática.

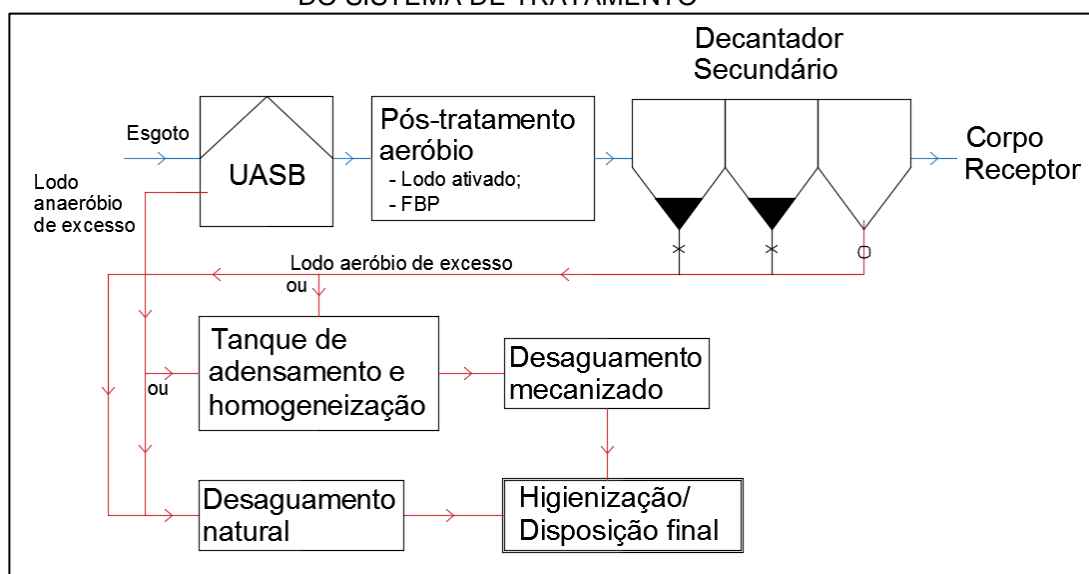
Em algumas das ETEs operadas pelas SANEPAR, os FBPs trabalham com baixa taxa, o que permite inferir que não há necessidade da digestão do lodo aeróbio de excesso nos reatores UASB, por exemplo. Porém, foi relatado que, mesmo com filtros de alta taxa, o lodo aeróbio é desaguado sem passar por uma etapa adicional de digestão. Ou seja, o encaminhamento do lodo aeróbio de excesso aos reatores UASB, para adensamento e digestão, tem sido evitado ao máximo.

Uma questão interessante levantada nas entrevistas é que, principalmente nas ETEs que operam com vazões inferiores à nominal, a operação tem permitido um acúmulo de lodo de excesso no decantador secundário, utilizando-o como adensador, removendo o lodo com teores de sólidos da ordem de 2 a 6 %. Entretanto, destacou-se que esta prática não é ideal, pois requer uma atenção maior da operação para evitar que sólidos escapem com o efluente, devido à produção de gases no decantador.

Nota-se, portanto, que esta prática é uma forma de contornar a não existência de uma unidade adicional de adensamento do lodo aeróbio de excesso (bem como a não utilização do UASB para isto), porém, de maior risco e atenção operacional. Além disso, a digestão do lodo aeróbio, nesses casos, não tem sido realizada em etapa separada, mas, segundo os entrevistados, isto não têm gerado problemas no desaguamento do lodo. Possivelmente, o lodo “adensado” no decantador secundário já se encontrava satisfatoriamente estabilizado para ser desaguado.

Outro procedimento operacional mencionado foi a utilização de decantadores secundários com fluxo horizontal. No caso relatado, trata-se de um decantador com 5 pirâmides invertidas no fundo, mas com passagem livre na parte superior, funcionando com fluxo horizontal. O lodo é removido apenas dos 2 últimos compartimentos, evitando-se assim a saída de sólidos com o efluente. Mesmo sem a descarga de lodo aeróbio de excesso no UASB, esta prática tem permitido a obtenção de um lodo relativamente bem adensado e com boas características de desidratação, além de um efluente final praticamente isento de sólidos em suspensão, segundo os profissionais entrevistados. Na Figura 34 apresenta-se o fluxograma esquemático desta alternativa, mostrando-se ainda duas possibilidades de desaguamento (mecanizado ou natural).

FIGURA 34 – FLUXOGRAMA 3: UTILIZAÇÃO DE DECANTADOR SECUNDÁRIO DE FLUXO HORIZONTAL E FUNDO DE PIRÂMIDE INVERTIDA, PARA EVITAR A FUGA DE SÓLIDOS DO SISTEMA DE TRATAMENTO

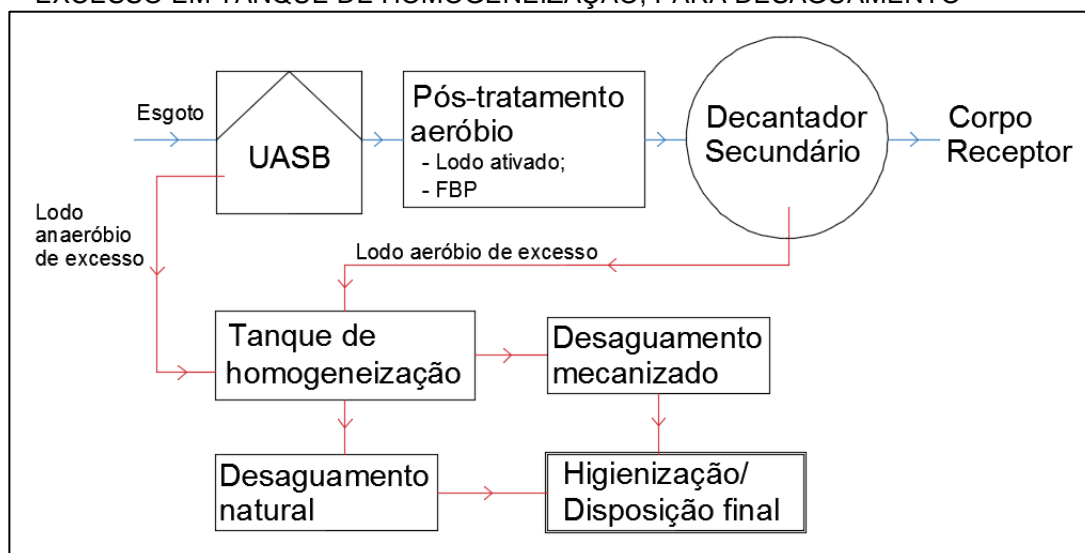


Fonte: O autor (2019).

Um terceiro procedimento relatado nas entrevistas foi a mistura do lodo anaeróbio e aeróbio de excesso, em um tanque de homogeneização, previamente ao desaguamento mecanizado. No caso em questão, o lodo aeróbio era proveniente do

decantador secundário de um FBP, com operação em baixa taxa. Na Figura 35 apresenta-se este fluxograma.

FIGURA 35 – FLUXOGRAMA 4: MISTURA DE LODOS ANAERÓBIO E AERÓBIO DE EXCESSO EM TANQUE DE HOMOGENEIZAÇÃO, PARA DESAGUAMENTO



Fonte: O autor (2019).

Nota: Na ETE consultada o desaguamento é mecanizado, porém, incluiu-se neste fluxograma a opção natural, para discussão.

Apesar de o lodo aeróbico ser proveniente de filtros de baixa taxa, o que permite a obtenção de um lodo mais estabilizado, cabe refletir se esta operação não seria também adequada nos casos de filtro de alta taxa e lodos ativados convencionais. A mistura de um lodo anaeróbico de excesso, bem estabilizado, com um lodo aeróbico de excesso, pouco estabilizado, talvez possa resultar em um lodo misto suficientemente digerido para o desaguamento ocorrer adequadamente. Para uma análise mais consistente, seria interessante o monitoramento da relação SVT/ST dos lodos anaeróbico, aeróbico e misto, afim de identificarem-se possíveis adaptações para sistemas de alta taxa.

5.1.1.3 Conclusões e Proposições

É evidente que o coeficiente de produção de sólidos e o fluxograma adotados interferem diretamente no dimensionamento das estruturas de tratamento de lodo, levando à variação do custo estimado de implantação e operação dessas unidades e, conseqüentemente, à definição das alternativas em Estudos de Concepção.

Entretanto, conforme apresentado nos tópicos anteriores, ambas estas questões são bastante complexas e têm sido abordadas recentemente pela literatura,

sendo também sensato observar o que tem sido realizado na prática quanto à configuração de UASB + Pós-tratamento aeróbio, frente às dificuldades operacionais.

Quanto ao coeficiente de produção de sólidos, conforme ressaltado por Lobato et al. (2018), é fundamental que se considere a parcela de produção do lodo aeróbio para o dimensionamento das estruturas de desaguamento, bem como um planejamento a respeito da descarga de outras fontes de matéria orgânica na ETE, que podem aumentar a produção de lodo. Por outro lado, segundo relatos de profissionais da Sanepar, a produção de lodo no UASB tem sido inferior ao índice de 0,15 kgST/kgDQOaplicada, usualmente adotado. Os resultados de Pontes e Chernicharo (2013) também apontam uma produção de sólidos no UASB abaixo de 0,15 kgST/kgDQOaplicada, uma vez que os coeficientes totais (lodo anaeróbio + aeróbio) foram 0,16 e 0,23 kgST/kgDQOaplicada, respectivamente, em escala piloto e de demonstração.

Recomenda-se, portanto, mais investigações sobre os coeficientes de produção de lodo, especialmente nos reatores UASB, buscando-se refinar os valores apresentados na literatura, já que existem variações significativas e que impactam diretamente no porte das estruturas de tratamento de lodo.

Ademais, conforme a análise realizada utilizando-se valores teóricos, verificou-se que a diferença do coeficiente de produção de sólidos entre os FBP e os LA, que já seria relativamente pequena, torna-se minorada quando essas tecnologias são após reatores UASB. Verificou-se, também, que a descarga de lodo aeróbio de excesso nos reatores UASB pode não ter efeito relevante no coeficiente de produção de sólidos do sistema, com base nos valores apresentados por von Sperling e Gonçalves (2014). Porém, Pontes e Chernicharo (2013) relataram o aumento desses coeficientes quando há a descarga, o que já seria esperado, segundo os autores.

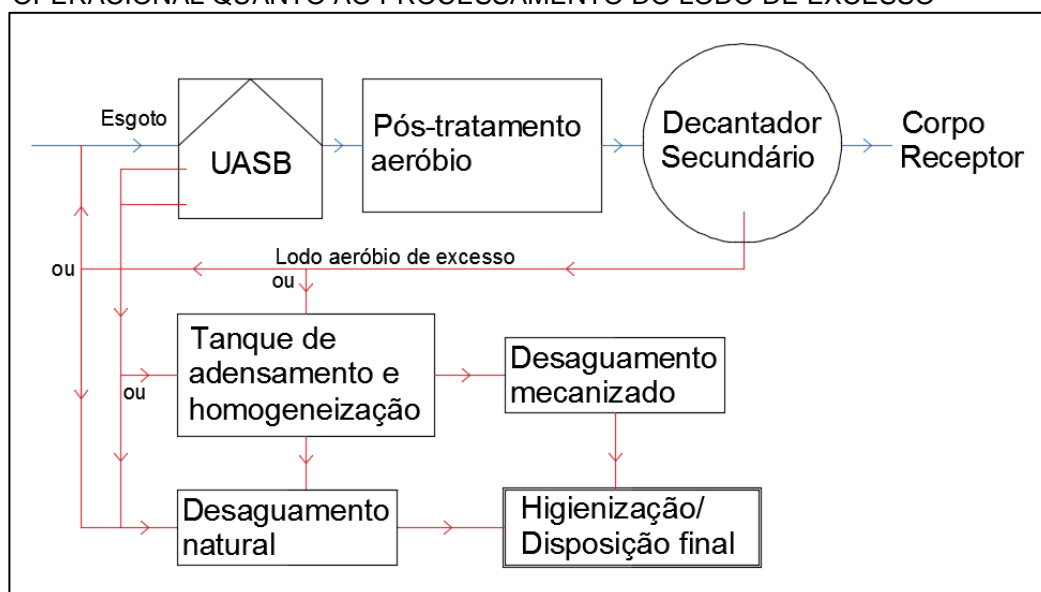
Cabe avaliar, conjuntamente à essa questão, o fluxograma da fase sólida. A alternativa exposta por Almeida et al. (2018) e Lobato et al. (2018) apresenta uma solução ao problema da fuga de sólidos em suspensão dos reatores UASB, entretanto, requer uma unidade adicional de adensamento e homogeneização de lodo. Se por um lado os tanques de homogeneização já seriam necessários no caso de desaguamento mecanizado, por outro, a presença do tanque de equalização pode permitir a mistura de lodo anaeróbio e aeróbio de excesso, obtendo-se um lodo misto com relação SV/ST desejável, sem haver alimentação do UASB com lodo aeróbio de excesso, como foi mencionado em entrevistas. Apesar do relato desta alternativa ter

sido aplicada em uma ETE com FBP de baixa taxa, não deixa de ser um tema potencial de estudo também para sistemas de alta taxa, uma vez que simplifica o fluxograma da fase sólida.

A alternativa citada em que o decantador secundário é utilizado como adensador de lodo aeróbio, apesar de ser discrepante em relação ao que se encontra na literatura, segundo gestores de ETEs têm funcionado bem quando a vazão é inferior à nominal da ETE. Nota-se que não é uma solução definitiva, mas pode ser uma questão de Estudo de Concepção quando a disponibilidade de recursos, ou de espaço, é pequena. O mesmo pode-se concluir para o caso dos decantadores de fluxo horizontal, mas enfatizando-se a satisfação dos profissionais da SANEPAR quanto à qualidade do efluente final quando realizado o procedimento descrito no item anterior. Cabe observar que nestas duas últimas configurações o lodo aeróbio excedente não era retornado aos reatores UASB, mas foram alternativas que permitiram a simplificação do fluxograma, enviando lodo aeróbio de excesso diretamente para a etapa de desaguamento, mesmo em alguns casos de FBP de alta taxa.

Com isto, tendo em vista que as realidades operacionais são diversas, ajustadas conforme a experiência de cada empresa, propõe-se que, para os novos projetos de implantação de ETEs com UASB + Pós-tratamento aeróbio, sempre que possível, sejam previstas tubulações que permitam a flexibilidade operacional, com base nas recomendações da literatura e também de experiências práticas que têm obtido bons resultados. Na Figura 36 apresenta-se esta proposta.

FIGURA 36 – FLUXOGRAMA 5: PROPOSTA DE FLUXOGRAMA PARA FLEXIBILIZAÇÃO OPERACIONAL QUANTO AO PROCESSAMENTO DO LODO DE EXCESSO



Fonte: O autor (2019).

Destacam-se, em relação às práticas tradicionais, duas possibilidades: a de mistura dos lodos anaeróbio e aeróbio de excesso, para substituir a digestão do lodo aeróbio; e a utilização de um tanque de adensamento/homogeneização previamente ao desaguamento natural, o que seria necessário no caso da alimentação do UASB com lodo aeróbio de excesso, com a remoção do lodo menos denso das camadas superiores do UASB.

5.1.2 Faixas de Vazão Viáveis de Tratamento de Lodo por Tecnologia

Baréa (2013) verificou que, considerando-se apenas os custos de implantação, as centrífugas passam a ser mais vantajosas que os leitos de secagem em ETEs (com UASB) com vazões a partir de 100 L/s. Bittencourt (2014, p. 92) apresenta uma relação das ETEs da região metropolitana de Curitiba, na qual observa-se que, dentre as 8 estações existentes, 5 possuem centrífugas e 3 possuem leitos de secagem para desaguamento do lodo. Conicidentemente ou não, a partir da vazão de 99 L/s as ETEs apresentaram sistema mecanizado de desaguamento, conforme apresenta-se na Tabela 26.

TABELA 26 - SISTEMA DE DESAGUAMENTO DE LODO EM ETES DO PARANÁ

| Nome | Vazão Média (L/s) | Sistema de tratamento de esgoto | Sistema de desaguamento de lodo |
|------------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| ETE Belém | 1.243 | Lodos Ativados de Aeração Prolongada | Centrífuga |
| ETE Atuba Sul | 1.250 | UASB + Flotação por Ar Dissolvido | Centrífuga |
| ETE Santa Quitéria | 438 | UASB + Flotação por Ar Dissolvido | Centrífuga |
| ETE CIC Xisto | 361 | UASB + Lagoa | Centrífuga |
| ETE Fazenda Rio Grande | 99 | UASB + Lagoa | Centrífuga |
| ETE Cachoeira | 61 | UASB | Leitos de secagem |
| ETE Cambuí | 47 | RALF + Flotação por Ar Dissolvido | Leitos de secagem |
| ETE Colombo Sede | 7 | RALF + Filtro Anaeróbio | Leitos de secagem |

FONTE: Adaptado de Bittencourt (2014).

A autora comenta que as ETEs que possuem sistemas mecanizados de desaguamento, no Paraná, são consideradas como Unidades de Gerenciamento de Lodo - UGLs, para as quais é levado o lodo de estações menores para desaguamento e/ou higienização. Porém, há também algumas ETEs menores em que se realiza a higienização (por caleação) de lodo desaguado em leitos de secagem. Cabe observar,

ainda, que o sistema de tratamento de esgoto deve influenciar na decisão do método de desaguamento, uma vez que determina a quantidade de lodo a ser processada.

Além disso, segundo a SANEPAR, em algumas ETEs de pequeno porte (da ordem de 10 L/s), o custo de transporte do lodo para desaguamento em UGLs mostrou-se mais vantajoso até mesmo do que a implantação e operação de Leitos de Secagem, sendo uma alternativa interessante para se avaliar em Estudos de Concepção.

Outra questão levantada, em entrevista com a SANEPAR, foi a possibilidade de se trabalhar com leitos de secagem e centrífugas em paralelo, no intuito da redução do porte das estruturas. Comentou-se que isto já é realidade em algumas ETEs da SANEPAR, porém, utilizando-se os leitos como unidades reserva, e não como sistemas em paralelo. Sendo assim, no presente trabalho optou-se por considerar a opção de leitos e centrífugas em paralelo para ETEs com vazões de 80 a 320 L/s, abrangendo a faixa que seria de transição entre essas tecnologias.

Ainda quanto às alternativas de desaguamento de lodo, cabe comentar sobre os Wetlands Construídos para Lodo. Conforme citado na Revisão Bibliográfica (item 3.3.4.3), existem sistemas, na Dinamarca, que atendem até 125 mil habitantes. Segundo a empresa Wetlands Construídos, existem WCLs operantes para o atendimento de até 2 milhões de habitantes, também no exterior. Por ser ainda incipiente no Brasil, no presente trabalho esta tecnologia foi considerada para ETEs de até 240 L/s (cerca de 160 mil habitantes), o que já é um porte considerável.

Em relação à Secagem Térmica, Valente (2015) estuda alternativas desta tecnologia, para ETEs com UASB + LA, partindo de ETEs para População Equivalente de 50 mil habitantes. O autor justifica este critério mencionando que não é comum ser empregado este tipo de tratamento em ETEs menores, e que, segundo o Orçamento da União de 2015, o Ministério das Cidades é responsável por apoiar e financiar melhorias de esgotamento sanitário em municípios com população superior a 50 mil habitantes.

Em contato com a empresa Albrecht, a mesma apresentou duas tecnologias aplicáveis para a secagem térmica de lodo de esgoto: o Bruthus e o Bruthus F. O Bruthus é o mesmo considerado por Valente (2015), já o Bruthus F é indicado para quantidades pequenas de lodo. Entretanto, não há ainda aplicação do Bruthus F em ETEs, tornando mais incerta a viabilidade operacional e econômica deste. Portanto,

no presente trabalho consideraram-se os secadores térmicos para ETEs com vazões a partir de 80 L/s (cerca de 50 mil habitantes).

5.1.3 Regime de Operação de Equipamentos de Tratamento de Lodo

Verificou-se, nas entrevistas realizadas, que não há um padrão em relação ao regime de funcionamento dos equipamentos de tratamento de lodo. Na prática, esses funcionam conforme a demanda de lodo a ser processado, variando de poucas horas a 24 horas por dia.

Em contato com a SANEPAR, relatou-se que a operação de centrífugas chega a 24 h/d quando a quantidade de lodo é excessiva, porém, foi mencionado que, para fins de dimensionamento, não se deve considerar mais do que 20 h/d, já que os equipamentos necessitam de manutenção. Na SANEAGO, as centrífugas da ETE cujos profissionais foram entrevistados operam em regime de 16 a 20 horas por dia.

Algumas questões de impacto nos custos, relacionadas ao regime de operação dos equipamentos, foram destacadas durante as entrevistas: a) a operação em horários de ponta, que eleva os custos com energia elétrica; b) o funcionamento em período noturno, que eleva os custos com mão de obra em cerca de 30 %.

Sendo assim, no presente estudo adotaram-se regimes inferiores que 13 h/d, possibilitando a parada nos períodos em que o custo operacional é elevado (por exemplo, considerando-se o funcionamento das 06:00 hr às 19:00 hr).

Logicamente, o porte dos equipamentos passa a ser maior quando o regime de operação é menor, porém, a definição do ponto ideal de Regime de Operação X Porte do Equipamento ainda não é conhecida e/ou generalizada, mesmo porque dependente das características de cada empresa de saneamento. No presente trabalho buscou-se obter uma diretriz neste sentido.

Já quanto à Secagem Térmica, segundo um dos fabricantes, o funcionamento em regime de 24 h/d apresenta a vantagem de não necessitar o reaquecimento do secador a cada parada, o qual implicaria no consumo energético sem alimentação de lodo ao secador. Entretanto, analogamente ao caso das centrífugas, esta situação demandaria maiores gastos operacionais, não sendo, portanto, claramente definida como mais vantajosa. Ademais, para a operação em 24 h/d também pode haver um consumo energético sem alimentação de lodo, caso a quantidade de lodo produzido seja reduzida e deseje-se manter o secador aquecido.

Sendo assim, para este estudo considerou-se o regime de funcionamento dos secadores térmicos como o mesmo das centrífugas. Apesar de não terem sido verificados casos de ambos os equipamentos em uma mesma ETE, considerou-se que esses podem ter funcionamento em série, com o lodo desaguado sendo destinado diretamente aos secadores.

5.1.4 Dimensionamento de Tanques de Equalização

A homogeneização da massa de lodo a ser desaguado é uma prática recomendada pelos fornecedores de centrífugas e, segundo a SANEPAR, tem trazido bons resultados ao desaguamento, otimizando o consumo de polímero e facilitando o controle operacional.

Quanto ao dimensionamento desses tanques, Baréa (2013) define o tempo de detenção (T_d) dos tanques de equalização em função do porte da ETE, para ETEs com tratamento apenas anaeróbio (UASB), conforme apresenta-se na Tabela 27.

TABELA 27 - T_d EM TANQUES DE EQUALIZAÇÃO

| Vazão da ETE (L/s) | 10 | 50 | 100 | 500 |
|-----------------------|----|----|-----|-----|
| Tempo de Detenção (h) | 24 | 12 | 12 | 8 |

FONTE: Adaptado de Baréa (2013).

Como pode-se observar, o T_d torna-se reduzido conforme aumenta-se o porte da ETE, o que, conforme relatos de profissionais da SANEPAR, é necessário para a viabilização dos tanques. Na prática, além da função de homogeneização do lodo, os tanques também funcionam como “pulmão”, flexibilizando a operação das centrífugas quanto ao regime de funcionamento.

Neste sentido, cabe observar que o tanque deve ter capacidade para o armazenamento de, pelo menos, o tempo em que as centrífugas não estiverem em operação. Por exemplo, se uma centrífuga funcionar em apenas 8 h/d, o tanque deve ter capacidade para armazenar o lodo produzido nas outras 16 horas do dia (partindo-se da premissa de que o lodo é produzido a uma mesma taxa ao longo do dia).

Por outro lado, se o tanque for demasiadamente grande, este pode requerer grandes quantidades de energia para manter o lodo com concentração homogênea em seu interior. Além disso, tempos de detenção excessivos podem ocasionar mau cheiro, sendo salutar a adoção de tempos inferiores a 24 horas, tomando-se como base o tempo máximo para o dimensionamento de adensadores de lodo por gravidade

(segundo a NBR 12.209/11). Para o presente estudo, adotaram-se tempos de detenção variando entre 20 e 14 h/d, variando inversamente com o porte da ETE.

Em relação à energia necessária para manter o lodo homogeneizado, pouco se encontra na literatura. Observaram-se, nas entrevistas realizadas, diferentes métodos de mistura, como agitadores submersíveis, sistemas de pás rotativas e até aeração submersa. Cada método possui peculiaridades associadas que devem ser observadas, tais como o formato do tanque e as características do lodo, porém, este detalhamento foge ao escopo do presente trabalho. Por simplificação, e pela falta de informações disponíveis na literatura, não foi considerado o consumo energético da mistura do lodo nos tanques de equalização.

5.1.5 Parâmetros de Dimensionamento de Leitões de Secagem

Conforme apresentado por Cerqueira e Aisse (2017), diversos estudos demonstraram bons resultados de desaguamento aplicando-se taxa de sólidos superiores à de 15 kgST/m², recomendada por norma (ABNT, 2011). Nas regiões mais úmidas, tempos de ciclo inferiores a 15 dias, com taxas de sólidos acima de 20 kgST/m² resultaram em teores de sólidos da ordem de 20 a 30 %. Já nas regiões de clima seco, com tempos de ciclo variando de 12 a 21 dias e taxas de aplicação de 15 a 40 kgST/m², van Haandel e Lettinga (1994), por exemplo, obtiveram teores de sólidos de 30 %.

Analisando-se primeiramente a questão da taxa de sólidos, cabe observar que, apesar de terem sido realizados experimentos com taxas elevadas (em relação à norma), na prática pode não ser possível a aplicação destas taxas devido à concentração do lodo excedente e ao limite de altura livre dos leitões de secagem, que geralmente é de 0,50 m.

Para este estudo, por exemplo, em que se considerou a concentração do lodo excedente de 3 % (30 kgST/m³), o enchimento dos leitões de secagem levaria justamente à taxa de aplicação de 15 kgST/m² (30 kgST/m³ x 0,50 m). No caso deste estudo, para que fossem aplicadas taxas superiores, seriam necessárias medidas alternativas, tais como:

- a) Alteração do projeto dos leitões, aumentando-se a borda livre;
- b) Remoção de um lodo mais concentrado do UASB;

- c) Aplicação de descargas em batelada, conforme apresentado por Miranda et al. (2017);
- d) Alteração do material drenante.

Sendo assim, uma vez que a adoção de uma ou mais dessas medidas levaria a grandes alterações metodológicas, no presente estudo optou-se por manter a taxa convencional de 15 kgST/m².

Quanto ao tempo de ciclo, observou-se, também nos dados de Cerqueira e Aisse (2017), que as menores produtividades dos leitos ocorreram nos casos de maior precipitação, devido ao maior tempo de ciclo. Apesar do apresentado por Soares (2001), de que as chuvas pouco afetam o desaguamento do lodo quando este já perdeu água por percolação, notou-se que, no geral, elas têm um efeito bastante adverso. Sendo assim, para que se adote o menor tempo de ciclo possível, é interessante que se considere o uso de cobertura nos leitos, mesmo em regiões de clima predominantemente seco.

Em contato com profissionais da SANEAGO, informou-se que os leitos geralmente possuem cobertura plástica, pois, apesar do clima ser predominantemente seco, tinha-se grande dificuldade de desaguamento quando da ocorrência de chuvas. Informou-se, também, que há projetos de coberturas móveis para alguns leitos de menor porte, em que um toldo corre sobre trilhos, permitindo assim o aproveitamento máximo da radiação solar e a proteção das chuvas, alternadamente.

Segundo profissionais da SANEPAR e da SANEAGO, tempos de ciclo entre 20 e 30 dias são comumente utilizados em projetos de leitos de secagem. Cabe observar que, em alguns casos, na SANEPAR, a limpeza dos leitos é feita por empresa terceirizada, o que reduziu significativamente o tempo de realização deste serviço, e conseqüentemente o tempo de ciclo, o que mostra a importância da consideração de aspectos operacionais para aumentar a viabilidade dos leitos de secagem.

Com base nessas considerações, e também nos dados relacionados por Cerqueira e Aisse (2017), considerou-se, no presente estudo, o tempo de ciclo de 18 dias, visando obterem-se teores de sólidos da ordem de 20 a 30 %, o que já é suficiente para as etapas subsequentes, como caleação e/ou disposição final. Considerou-se, para maior garantia de se atingirem essas condições de maneira perene, o uso de cobertura nos leitos.

5.1.6 Dimensionamento de Pátios de Cura para a EAP

Com base nas informações obtidas nas entrevistas com profissionais da SANEPAR, somadas à literatura (BITTENCOURT, 2014), determinou-se, para o dimensionamento dos pátios de cura, uma taxa de aplicação de sólidos por m² de pátio. Esta foi estipulada a partir de formulações teóricas alimentadas por dados provenientes da prática, e também balisada pelos valores reais observados nas UGLs mencionadas no Item 4.1.6. Destaca-se, entretanto, que foram consideradas as seguintes premissas:

- O lodo nos pátios de cura atinge cerca de 50 % de ST ao final do período de estocagem;
- Os montes de lodo atingem cerca de 3,50 m de altura, o que pode exigir maquinário, e são escorados em paredes laterais dos pátios para otimização do volume estocado por área;
- Os pátios são cobertos e com piso impermeabilizado.

Bittencourt (2014) apresentou teores de sólidos antes e depois da Estabilização Alcalina Prolongada em algumas UGLs da SANEPAR. A autora comenta também que, com o aumento do teor de sólidos, a massa específica do lodo decai rapidamente, tendo-se verificado uma média de 700 kg/m³ no lodo destinado à agricultura. Moretto et al. (2011) encontraram o valor de 998 kg/m³ para lodo com 35 % de ST, indicando que já é um início de queda da massa específica com a perda de umidade. Na Tabela 28 apresentam-se os dados expostos por Bittencourt (2014).

TABELA 28 - TEORES DE SÓLIDOS NO LODO ANTES E DEPOIS DA EAP EM UGLS DA SANEPAR

| ETE/UGL | Método de desaguamento | ST (%) - inicial | ST (%) - final |
|------------------------|------------------------|------------------|----------------|
| ETE Belém | Centrífuga | 15,9 | 34,4 |
| ETE Atuba Sul | Centrífuga | 20,0 | 49,1 |
| ETE Santa Quitéria | Centrífuga | 17,1 | 57,9 |
| ETE CIC Xisto | Centrífuga | 19,1 | 52,9 |
| ETE Fazenda Rio Grande | Centrífuga | 20,7 | 57,8 |
| ETE Colombo Sede | Leito de secagem | 35,3 | 57,8 |
| ETE Cambuí | Leito de secagem | 22,5 | 39,2 |
| ETE Cachoeira | Leito de secagem | 29,3 | 54,2 |

FONTE: Adaptado de Bittencourt (2014).

Como pode-se observar, o lodo inicialmente com cerca de 20 % de ST passa para valores acima de 50 % de ST durante a estocagem em pátio. Isto pode ser explicado por dois fatores principais: o tempo de estocagem, que pode chegar a até 12 meses em alguns casos, e a adição da cal, que eleva a temperatura do lodo, ambos favorecendo à evaporação da água (BITTENCOURT, 2014).

Os teores de sólidos inicial e final do lodo são fundamentais para o dimensionamento dos pátios, já que, conforme aumenta-se o teor de sólidos, torna-se possível a formação de montes mais altos, o que reduz a área necessária. Neste contexto, o uso de paredes laterais para escoramento dos montes favorece à elevação destes, assim como a utilização de máquinas como pá-carregadeira e retroescavadeira, que têm sido utilizadas, inclusive, para a mistura da cal ao lodo, segundo relatos de profissionais da SANEPAR.

A partir das entrevistas realizadas e fotos recebidas, pôde-se verificar alguns valores que melhor embasaram essas questões. Na ETE Ronda, por exemplo, com lodo proveniente de leitos de secagem, inicialmente com cerca de 35 % de ST, são feitos montes que, conforme tornam-se mais secos, atingem até 4 m de altura (em forma piramidal), com o auxílio de retroescavadeira. Na ETE CIC Xisto, por outro lado, boa parte do lodo que chega aos pátios é proveniente de centrífugas, com teor de sólidos em torno de 20 %. Mesmo com o uso de equipamentos, os montes de lodo são formados com altura média de 1,30 m de altura, porém, quando escorados em paredes, atingem até 2 m. Cabe observar que, com o passar do tempo de estocagem, com a perda de umidade, esses montes poderiam ser mais elevados a fim de liberar espaço no pátio, se necessário.

Por fim, a ETE Tibagi apresentou uma realidade intermediária das mencionadas, em que o lodo, inicialmente com cerca de 30 % de ST (advindo de leitos de secagem), é misturado à cal em betoneira e o empilhamento é feito com auxílio de retroescavadeira. Os montes atingem cerca de 3 m de altura, mesmo sem estarem escorados lateralmente.

Cabe comentar que, segundo os profissionais entrevistados, a aplicação da cal é feita em percentuais de 30 a 50 % da massa seca de lodo, variando conforme a eficiência do processo de mistura cal/lodo, para se atingir um lodo de Classe A segundo a Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006).

Na Figura 37 podem-se observar os montes de lodo em pátio da ETE Tibagi.

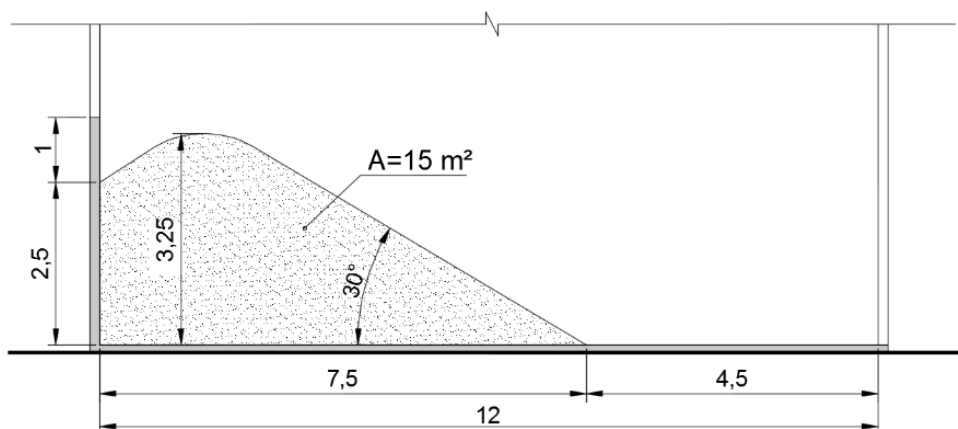
FIGURA 37 – FOTO DO PÁTIO DE CURA DE LODO DA ETE TIBAGI



FONTE: Sanepar (2018).

Com base nessas considerações, foi estabelecida uma metodologia para a definição da taxa de aplicação de sólidos por m^2 de pátio. O método consistiu na elaboração de um corte esquemático, a partir do qual pôde-se estimar o volume de lodo disposto por metro linear de pátio, multiplicando-se a área da seção transversal do monte de lodo por 1 m. Na Figura 38 apresenta-se o corte esquemático.

FIGURA 38 – CORTE ESQUEMÁTICO DE UM MONTE DE LODO EM PÁTIO DE HIGIENIZAÇÃO POR EAP



FONTE: O autor (2019).

Como pode-se observar, determinou-se um monte de lodo com área da seção transversal de 15 m^2 . Desta forma, para 1 m de comprimento do pátio, o volume de lodo é de 15 m^3 , a área sob o monte de lodo é de $7,50 \text{ m}^2$ e a área total de pátio é de 12 m^2 . O espaço livre de $4,50 \text{ m}$ deixado ao lado do monte é para circulação de

pessoas e equipamentos. Desta forma, na configuração apresentada é possível dispor 15 m³ de lodo em 12 m² de pátio, obtendo-se uma relação de 1,25 m³/m².

Sendo assim, considerando-se um lodo com teor final de sólidos de 50 % e massa específica de 850 kg/m³ (média entre os valores observado por Bittencourt (2014) e Moretto et al. (2011)), pôde-se estimar a taxa de aplicação de sólidos (Ts) por m² de pátio, conforme apresenta-se a seguir:

$$T_s = 1,25 \frac{m^3_{Lodo}}{m^2_{Pátio}} \cdot 0,50 \frac{kgST}{kg_{Lodo}} \cdot 850 \frac{kg_{Lodo}}{m^3_{Lodo}} = 531 \frac{kgST}{m^2_{Pátio}} \quad (X)$$

Considerando-se, por segurança, que a aplicação de cal seja de 50 % em relação aos sólidos do lodo, calculou-se que, dos 531 kgST, 354 kgST são referentes ao lodo e 177 kgST provenientes da adição de cal. Desta forma, visando-se estabelecer um parâmetro mais prático de dimensionamento, optou-se por considerar a taxa de aplicação de sólidos de 350 kgST/m², que deve ser utilizada sem se considerar os sólidos advindos da caleação.

Complementarmente à taxa de sólidos por m², deve-se estabelecer um período de estocagem, equivalente ao tempo de ciclo quando se dimensionam os leitos de secagem. Conforme exposto na revisão de literaruta (item 3.3.5.1), os lotes de lodo levam, no mínimo, 60 dias para serem higienizados, sendo 30 dias de cura após a adição da cal e mais 30 dias para a finalização das análises de ovos viáveis de helmintos. Feito isto, deve-se proceder com a Autorização Ambiental pelo órgão ambiental competente, o que pode levar mais 1 mês para ser efetivado. A partir de então, havendo sido emitida a Autorização Ambiental, o lote pode ser destinado à agricultura, porém, desde que seja época de plantio; caso contrário, o lodo deverá ficar armazenado até que seja levado aos campos.

Como pode-se perceber, a partir do momento que se faz a caleação de um lote é possível que este fique armazenado em pátio por períodos superiores a 3 meses. Entretanto, deve-se computar ainda o período que precede à caleação, ou seja, da própria formação do lote de lodo. Na Tabela 1 da Resolução CONAMA 375/06 determina-se a frequência de amostragem de lodo em função da quantidade anual destinada à agricultura. Assim, o tempo de formação de cada lote pode ser definido em função da frequência de amostragem. Na SANEPAR, por exemplo, a maioria das UGLs destina quantidades dentro da faixa de 240 a 1.500 kgST/ano para a agricultura, o que requer amostragens trimestrais, levando à formação de quatro lotes por ano,

cada um equivalente a 3 meses de acúmulo de lodo. Para estes casos (que, por ser uma faixa bastante larga de abrangência, também representa a maioria dos casos no presente trabalho), o tempo mínimo de ciclo da EAP nos pátios seria de 6 meses.

A consideração de 6 meses de produção de sólidos para o dimensionamento dos pátios de cura, para os casos de amostragem trimestral, seria adequada se houvesse um controle rigoroso da logística de destinação agrícola do lodo, o que, na prática, é pouco factível pois há variáveis interferentes como clima, época de plantio, disponibilidade de área, entre outras. Observa-se que o lodo produzido em 6 meses seria dividido em 2 lotes, defasados de três meses para que um terceiro lote pudesse ser alocado no espaço do primeiro, quando este fosse destinado ao campo, e assim sucessivamente.

Finalmente, com base na experiência da SANEPAR, uma entre as empresas que mais destina lodo de esgoto à agricultura no Brasil (SAMPAIO, 2013), os pátios têm sido gerenciados com cálculos anuais de movimentação de lodo, indicando que é prudente considerar a produção de 12 meses de lodo para o dimensionamento desses. Pelo raciocínio apresentado, um período de 9 meses também poderia atender algumas situações, porém, correndo-se maiores riscos de falta de espaço para a formação dos lotes.

Sendo assim, com as análises realizadas, definiu-se a taxa de 350 kgST/m².ano para o dimensionamento de pátios de cura para higienização por EAP, lembrando-se que foram adotadas algumas premissas que devem ser observadas antes de qualquer dimensionamento.

Para uma análise de sensibilidade, foram também calculadas as taxas anuais de sólidos aplicadas nas UGLs da SANEPAR cujos gestores foram entrevistados. Os resultados obtidos foram:

- ETE Tibagi: 367 kgST/m².ano;
- ETE Ronda: 250 kgST/m².ano;
- ETE CIC Xisto: 174 kgST/m².ano.

Como pode-se observar, nas ETEs Ronda e CIC Xisto as taxas são inferiores ao valor estipulado de 350 kgST/m².ano, o que pode estar associado a diversos fatores, conforme já comentado neste item. Já o valor obtido para a ETE Tibagi aproximou-se bastante daquele valor.

5.2 AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE TRATAMENTO DE LODO

5.2.1 Resultados dos Dimensionamentos

Aplicando-se as fórmulas e parâmetros apresentados na metodologia, os valores obtidos da produção estimada de lodo, para cada vazão de esgoto, são apresentados na Tabela 29.

TABELA 29 - PRODUÇÃO DE LODO CORRESPONDENTE ÀS VAZÕES DE ESGOTO

| Vazão de Esgoto (L/s) | Produção de Lodo | | |
|-----------------------|------------------|-------------------|---------|
| | kgSST/d | m ³ /d | kg/d |
| 5 | 78 | 2,6 | 2.592 |
| 10 | 156 | 5,1 | 5.184 |
| 20 | 311 | 10,3 | 10.368 |
| 40 | 622 | 20,5 | 20.736 |
| 80 | 1.244 | 41,1 | 41.472 |
| 160 | 2.488 | 82,1 | 82.944 |
| 240 | 3.732 | 123,2 | 124.416 |
| 320 | 4.977 | 164,2 | 165.888 |
| 400 | 6.221 | 205,3 | 207.360 |
| 500 | 7.776 | 256,6 | 259.200 |
| 750 | 11.664 | 385,0 | 388.800 |

FONTE: O autor (2019).

NOTAS: Concentração do lodo = 3 %; Massa específica do lodo = 1.010 kg/m³.

Com esses dados foram dimensionadas as diversas estruturas de tratamento de lodo consideradas neste estudo, realizando-se alguns ajustes, como a consideração da captura de sólidos nas centrífugas (95 %) e as alterações de massa úmida e volume a depender da umidade do lodo. Na sequência apresentam-se os dados principais e os resultados obtidos dos dimensionamentos das unidades de tratamento de lodo.

Nas Tabelas 30 a 33 apresentam-se os resultados referentes aos Leitos de Secagem e às Centrífugas, isoladamente e em paralelo, respectivamente.

TABELA 30 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DOS LEITOS DE SECAGEM

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|
| | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 |
| Dimensões do leito (m x m) | 5 x 10 | 5 x 10 | 6 x 20 | 6 x 20 | 6 x 20 | 6 x 20 |
| Nº de Leitos calculado | 1,87 | 3,73 | 3,11 | 6,22 | 12,44 | 24,88 |
| Nº de Leitos adotado | 2 | 4 | 4 | 8 | 14 | 26 |
| Área total (m²) | 100 | 200 | 480 | 960 | 1.680 | 3.120 |

FONTE: O autor (2019).

TABELA 31 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DOS LEITOS DE SECAGEM COM CENTRÍFUGAS EM PARALELO (OPÇÃO MISTA)

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 |
| Dimensões do leito (m x m) | 6 x 20 | 6 x 20 | 6 x 20 | 6 x 20 |
| Nº de Leitos calculado | 4,14 | 8,29 | 12,32 | 16,42 |
| Nº de Leitos adotado | 6 | 10 | 14 | 18 |
| Área total (m²) | 720 | 1.200 | 1.680 | 2.160 |

FONTE: O autor (2019).

TABELA 32 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DAS CENTRÍFUGAS

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| TDH no Tq. Equalização (h) | 20 | 20 | 20 | 19 | 18 | 16 | 14 |
| Volume do Tq. Equalização (calculado) (m ³) | 34 | 68 | 103 | 130 | 154 | 171 | 225 |
| Volume do Tq. Equalização (adotado) (m ³) | 35 | 70 | 100 | 130 | 160 | 170 | 225 |
| Vazão da Centrífuga (m³/h) | 10 | 10 | 10 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Regime de funcionamento (h/d) | 4,1 | 8,2 | 12,3 | 5,5 | 6,8 | 8,6 | 12,8 |
| Obs.: Área necessária – EDL (m ²) | 420 | 420 | 420 | 475 | 475 | 475 | 475 |

FONTE: O autor (2019).

NOTAS: TDH = Tempo de Detenção Hidráulica; EDL = Edifício de Desidratação de Lodo.

TABELA 33 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DAS CENTRÍFUGAS PARALELAS AOS LEITOS DE SECAGEM (OPÇÃO MISTA)

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|---|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 |
| TDH no Tq. Equalização (h) | 20 | 20 | 18 | 16 |
| Volume do Tq. Equalização (calculado) (m ³) | 23 | 46 | 62 | 73 |
| Volume do Tq. Equalização (adotado) (m ³) | 25 | 45 | 60 | 75 |
| Vazão da Centrífuga (m³/h) | 5 | 10 | 10 | 10 |
| Regime de funcionamento (h/d) | 5,5 | 5,5 | 8,2 | 10,9 |
| Obs.: Área necessária – EDL (m ²) | 420 | 420 | 420 | 420 |

FONTE: O autor (2019).

NOTAS: TDH = Tempo de Detenção Hidráulica; EDL = Edifício de Desidratação de Lodo.

Na Tabela 34, a seguir, apresentam-se os resultados dos dimensionamentos das Wetlands Construídas para Lodo (WCL).

TABELA 34 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DAS WCL

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|--|-----------------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 | 240 |
| Área Necessária (m ²) | 237 | 473 | 946 | 1.892 | 3.784 | 7.569 | 11.353 |
| Nº unidades | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 6 |
| Largura adotada (m) | 8 | 10 | 14 | 16 | 22 | 35 | 35 |
| Comprimento adotado (m) | 15 | 16 | 24 | 30 | 44 | 55 | 55 |
| Área útil total (m²) | 240 | 480 | 1.008 | 1.920 | 3.872 | 7.700 | 11.550 |

FONTE: O autor (2019).

Quanto à Estabilização Alcalina Prolongada, conforme descrito no Item 4.2.2.4, foram dimensionadas duas estruturas principais: o pátio de cura e, quando da aplicação mecanizada de cal ao lodo, o sistema de armazenamento e aplicação de cal. Nas Tabelas 35 a 37, apresentam-se os resultados obtidos.

TABELA 35 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DA EAP: PÁTIOS DE CURA PARA LODO DE LEITOS DE SECAGEM

| Descrição | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|--|-----------------------|------------|--------------|--------------|
| | 20 | 40 | 80 | 160 |
| Massa Seca de lodo (kgST/d) | 311 | 622 | 1.244 | 2.488 |
| Taxa de aplicação (kgST/m ² .ano) | 350 | 350 | 350 | 350 |
| Área total (m²) | 324 | 649 | 1.297 | 2.595 |

FONTE: O autor (2019).

TABELA 36 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DA EAP: SILO DE CAL E PÁTIOS DE CURA PARA OPÇÃO MISTA DE DESAGUAMENTO

| Descrição | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|---|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 |
| Lodo centrifugado | | | | |
| Massa Seca de lodo (kgST/d) | 788 | 1.576 | 2.364 | 3.152 |
| Massa de cal (kg/ano) | 315 | 630 | 946 | 1.261 |
| Volume do Silo de cal (m ³) | 14 | 55 | 55 | 55 |
| Tempo estimado de reposição da cal (d)* | 29 | 57 | 38 | 28 |
| Área necessária – Pátio de cura (m ²) | 822 | 1.643 | 2.465 | 3.287 |
| Lodo dos Leitos de Secagem | | | | |
| Massa Seca de lodo (kgST/d) | 415 | 829 | 1.244 | 1.659 |
| Área necessária – Pátio de cura (m ²) | 432 | 865 | 1.297 | 1.730 |
| Área total (m²) | 1.254 | 2.508 | 3.763 | 5.017 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: *Adotada massa específica da cal de 650 kg/m³ (MARTINS; HARMEL, 2012).

TABELA 37 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DA EAP: SILO DE CAL E PÁTIOS DE CURA PARA LODO DESAGUADO EM CENTRÍFUGAS

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|---|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| Massa de lodo (kg/d) | 1.182 | 2.364 | 3.546 | 4.728 | 5.910 | 7.387 | 11.081 |
| Massa de cal (kg/d) | 473 | 946 | 1.418 | 1.891 | 2.364 | 2.955 | 4.432 |
| Volume de cal para 30 dias | 21,82 | 43,64 | 65,46 | 87,28 | 109,10 | 136,38 | 204,57 |
| Volume do Silo de cal (m ³) | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 110 | 110 |
| Tempo de estimado-reposição da cal (d) | 76 | 38 | 25 | 19 | 15 | 24 | 16 |
| Área total (m²) | 1.233 | 2.456 | 3.698 | 4.930 | 6.163 | 7.704 | 11.556 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: Adotada massa específica da cal de 650 kg/m³ (MARTINS; HARMEL, 2012).

Na Tabela 38, a seguir, apresentam-se os resultados obtidos no dimensionamento dos Secadores Térmicos.

TABELA 38 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DOS SECADORES TÉRMICOS: CAPACIDADE DO SECADOR

| Parâmetro | Vazão da ETE (L/s) | | | | | | |
|--|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| Massa Seca de Lodo (kgSS/d) | 1.244 | 2.488 | 3.732 | 4.977 | 6.221 | 7.776 | 11.664 |
| Concentração inicial do lodo (%) | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Regime de Operação (h/d) | 4,1 | 8,2 | 12,3 | 5,5 | 6,8 | 8,6 | 12,8 |
| Massa de lodo úmido (20 % ST) (kg/h) | 1.515 | 1.515 | 1.515 | 4.545 | 4.545 | 4.545 | 4.545 |
| Capacidade do Secador (kg lodo/h) | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 4.500 | 4.500 | 4.500 | 4.500 |

FONTE: O autor (2019).

Como pode-se observar, devido à adoção de regimes de funcionamento compatíveis com aqueles das centrífugas, os resultados se dividem em dois patamares. Com isto, a partir de contato com fornecedores, foram adotados secadores térmicos de 2.000 kg/h e 4.500 kg/h, respectivamente, para as demandas calculadas.

Na Tabela 39 apresentam-se os resultados do gasômetro, bem como do balanço energético realizado para verificação da autonomia do sistema utilizando biogás. Como esta não foi atingida para os casos em estudo, apresenta-se também o consumo mensal estimado de gás GLP.

TABELA 39 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DOS SECADORES TÉRMICOS (GASÔMETRO E BALANÇO DE ENERGIA)

| Parâmetro | Vazão da ETE (L/s) | | | | | | |
|---|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| Produção de Biogás-UASB (Nm ³ /d) ^a | 588 | 1.175 | 1.763 | 2.350 | 2.938 | 3.672 | 5.508 |
| Volume estimado - Gasômetro (m ³) | 206 | 411 | 617 | 823 | 1.028 | 1.285 | 1.928 |
| Gasômetro adotado (m³)^b | 340 | 540 | 810 | 970 | 970 | 2.100 | 2.100 |
| Massa de lodo seco (80 % ST) (kg/h) | 379 | 379 | 379 | 1.136 | 1.136 | 1.136 | 1.136 |
| Massa de água evaporada (kg/h) ^c | 1.136 | 1.136 | 1.136 | 3.409 | 3.409 | 3.409 | 3.409 |
| E térmica requerida (kcal/h/1000) | 1.136 | 1.136 | 1.136 | 3.408 | 3.409 | 3.409 | 3.409 |
| E térmica disponível (kcal/d/1000) ^d | 3.701 | 7.403 | 11.104 | 14.806 | 18.507 | 23.134 | 34.700 |
| E térmica disponível (kcal/h/1000) | 901 | 901 | 901 | 2.704 | 2.704 | 2.704 | 2.704 |
| Déficit energético (kcal/h/1000) | 235 | 235 | 235 | 704 | 704 | 704 | 704 |
| Consumo de GLP (kg/d)^e | 87 | 174 | 261 | 347 | 434 | 543 | 814 |

FONTE: O autor (2019).

NOTAS: a) Considerado 85 Nm³ biogás/m³ esgoto; b) Gasômetros adotados conforme os modelos apresentados por Valente (2015); c) Diferença entre massa úmida e massa seca; d) Considerado o PCI do biogás de 6.300 kcal/m³ (75% CH₄); e) Considerado PCI do GLP=11.100 kcal/kg.

Observou-se, a partir destes resultados, que o biogás foi suficiente para o suprimento de 79 % da energia térmica necessária (independentemente da vazão), havendo necessidade, portanto, da complementação com outra fonte energética. Para tanto, neste estudo considerou-se o uso do gás GLP.

5.2.2 Custos das Tecnologias de Tratamento de Lodo

5.2.2.1 Custos de Implantação – CAPEX

a) Leitos de Secagem

Com os dados fornecidos pela SANEAGO foi calculado o valor unitário de 689,19 R\$/m². Atualizando-se esse valor com base no INCC (média de 4,34 % a.a. entre fev/2017 e jan/2019), o custo unitário passou a ser de 747,76 R\$/m².

A partir dos dados de Baréa (2013), obtiveram-se os seguintes custos de implantação de leitos de secagem: 938,65 R\$/m² para leitos com dimensões de 5 x 10 m e 525,93 R\$/m² para leitos com dimensões 6 x 20 m, diferença esta que pode ser atribuída aos ganhos de escala nas construções. Pacheco (2011), por outro lado, trabalhou apenas com leitos de secagem de 5 x 10 m, a partir dos quais obteve-se um custo unitário de 551,55 R\$/m². Atualizando-se esses valores para janeiro de 2019, obtiveram-se, respectivamente, 1.348,95 R\$/m², 775,81 R\$/m² e 890,89 R\$/m².

Com base nesses valores e, uma vez que no dimensionamento foi considerada a cobertura dos leitos, estabeleceu-se o custo unitário de 900 R\$/m² para os leitos de secagem da menor ETE (vazão de 5 L/s), e uma redução de 2 % para cada próxima vazão considerada, devido aos ganhos de escala. Para os casos com desaguamento misto (leitos paralelos às centrífugas), em que a menor vazão é de 80 L/s, o primeiro valor adotado foi de 850 R\$/m². Nas Tabelas 40 e 41 apresentam-se os resultados obtidos de custo de implantação dos leitos de secagem.

TABELA 40 – CAPEX DE LEITOS DE SECAGEM

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 |
| Área total (m ²) | 100 | 200 | 480 | 960 | 1.680 | 3.120 |
| Custo unitário (R\$/m ²) | 900,00 | 882,00 | 864,36 | 847,07 | 830,13 | 813,53 |
| Custo total (R\$) | 90.000 | 176.400 | 414.893 | 813.190 | 1.394.621 | 2.538.210 |

Fonte: O autor (2019).

TABELA 41 – CAPEX DE LEITOS DE SECAGEM (OPÇÃO MISTA)

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------|------------------|------------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 |
| Área total (m ²) | 720 | 1.200 | 1.680 | 2.160 |
| Custo unitário (R\$/m ²) | 850,00 | 833,00 | 816,34 | 800,01 |
| Custo total (R\$) | 612.000 | 999.600 | 1.371.451 | 1.728.029 |

Fonte: O autor (2019).

NOTA: Na “Opção Mista” os leitos recebem apenas 1/3 do lodo gerado na ETE; o restante é desidratado em centrífugas.

b) Centrífugas

Conforme explanado no Item 4.2.4.1-b, o custo de implantação das centrífugas foi estimado com base em dois projetos existentes da SANEAGO, adaptados para o presente estudo e atualizados para janeiro de 2019. Para os dados da ETE 01 mencionada (data-base fevereiro de 2017), o INCC médio obtido foi de 4,34 % a.a. Já a ETE 02 (data-base agosto de 2014), o INCC aplicado foi de 5,71 % a.a. Foi mantida a estrutura orçamentária da SANEAGO, com quatro grupos de custo: Construção Civil, Equipamentos, Materiais Hidráulicos e Materiais Elétricos.

Os custos unitários obtidos para os Tanques de Equalização foram de 1.077,00 R\$/m³ e 1.726,32 R\$/m³, respectivamente, para os volumes de 235 m³ e 82 m³. Adotou-se, para cálculo, o valor médio de 1.400,00 R\$/m³.

Nas Tabelas 42 e 43 apresentam-se os resultados obtidos de custo de implantação dos Edifícios de Desidratação de Lodo para as alternativas de Centrífugas e Centrífugas paralelas aos Leitos de Secagem (opção mista).

TABELA 42 – CAPEX DE CENTRÍFUGAS

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|---|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| Vazão da Centrífuga (m ³ /h) | 10 | 10 | 10 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Volume do Tanque de Equalização (m ³) | 35 | 70 | 100 | 130 | 160 | 170 | 225 |
| Construção Civil: EDL (R\$) | 277.942 | 277.942 | 277.942 | 363.724 | 363.724 | 363.724 | 363.724 |
| Construção Civil: TE (R\$) | 49.000 | 98.000 | 140.000 | 182.000 | 224.000 | 238.000 | 315.000 |
| Equipamentos (R\$) | 1.041.299 | 1.041.299 | 1.041.299 | 1.928.685 | 1.928.685 | 1.928.685 | 1.928.685 |
| Materiais Hidráulicos (R\$) | 38.167 | 38.167 | 38.167 | 48.078 | 48.078 | 48.078 | 48.078 |
| Materiais Elétricos (R\$) | 45.888 | 45.888 | 45.888 | 102.578 | 102.578 | 102.578 | 102.578 |
| Total (R\$) | 1.452.422 | 1.501.537 | 1.543.647 | 2.625.546 | 2.667.656 | 2.681.766 | 2.759.071 |

Fonte: O autor (2019).

Notas: EDL = Edifício de Tratamento de Lodo; TE = Tanque de Equalização.

TABELA 43 – CAPEX DE CENTRÍFUGAS PARALELAS AOS LEITOS (OPÇÃO MISTA)

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|---|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 |
| Vazão da Centrífuga (m ³ /h) | 5 | 10 | 10 | 10 |
| Volume do Tanque de Equalização (m ³) | 25 | 45 | 60 | 75 |
| Construção Civil: EDL (R\$) | 277.942 | 277.942 | 277.942 | 277.942 |
| Construção Civil: TE (R\$) | 35.000 | 63.000 | 84.000 | 105.000 |
| Equipamentos (R\$) | 833.039 | 1.041.299 | 1.041.299 | 1.041.299 |
| Materiais Hidráulicos (R\$) | 30.534 | 38.167 | 38.167 | 38.167 |
| Materiais Elétricos (R\$) | 36.711 | 45.888 | 45.888 | 45.888 |
| Total (R\$) | 1.213.226 | 1.466.297 | 1.487.297 | 1.508.297 |

Fonte: O autor (2019).

Notas: EDL = Edifício de Tratamento de Lodo; TE = Tanque de Equalização.

Como pode-se observar, a partir dos dimensionamentos das centrífugas, foram utilizados os orçamentos das ETEs 01 e 02 descritas na metodologia (Item 4.2.4.1-b), gerando-se assim dois patamares de custos, em que boa parte dos itens foram basicamente os mesmos para diferentes portes de ETE, representando situações em que o mesmo EDL atenderia aos diversos casos (com a variação do regime de funcionamento das centrífugas). Os Tanques de Equalização, entretanto, foram dimensionados caso a caso, o que levou à obtenção de custos graduais conforme o porte da ETE.

Além disso, algumas peculiaridades devem ser destacadas, tais como: os valores obtidos junto aos fornecedores de centrífugas ficaram na faixa de R\$ 300 mil para as centrífugas de 10 m³/h e R\$ 700 mil para as centrífugas de 30 m³/h, ambas para lodo afluyente com 3 % de ST. Para os Equipamentos, Materiais Hidráulicos e Elétricos da ETE com uma centrífuga de 5 m³/h (ETE com 80 L/s com desaguamento misto), adotou-se 80 % dos custos obtidos para as centrífugas de 10 m³/h.

c) Wetlands Construídos para Lodo - WCL

A empresa consultada, especializada em projetos de Wetlands Construídos, informou a faixa de custo de R\$ 200 a R\$ 300 por m² construído. Já o orçamento preliminar realizado (considerando-se uma Wetland com área de 968 m² e profundidade 2 m), resultou no valor total de R\$ 173.547,85 (ver detalhes no Apêndice 5), ou seja, aproximadamente R\$ 180/m². O valor obtido inferior à faixa mencionada pela empresa de referência pode estar associado a diversos fatores, tais como a solução de impermeabilização considerada, a distância média de bota-fora do material escavado, o custo unitário dos materiais de enchimento da camada filtrante, entre outros. Sendo assim, para o presente estudo adotou-se o valor de R\$ 300/m², e, considerando-se os ganhos de escala, uma redução de 2 % deste para cada salto de vazão da ETE. Na Tabela 44 apresentam-se os resultados obtidos.

TABELA 44 – CAPEX DE WETLANDS PARA LODO

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 | 240 |
| Área útil (m ²) | 240 | 480 | 1.008 | 1.920 | 3.872 | 7.700 | 11.550 |
| Custo unitário (R\$/m ²) | 300 | 294 | 288 | 282 | 277 | 271 | 266 |
| Custo Total (R\$)* | 72,00 | 141,12 | 290,42 | 542,13 | 1.071,42 | 2.088,06 | 3.069,44 |

Fonte: O autor (2019).

NOTA: *Valores em milhares de R\$.

d) Estabilização Alcalina Prolongada

Conforme exposto no item 4.2.4.1-d, o custo de implantação do processo de EAP foi dividido em duas partes: aplicação da cal e pátios de cura. Quanto aos pátios, verificaram-se os valores de R\$ 824,35 /m² e R\$ 691,94 /m², respectivamente, para o CUB de Galpão Industrial dos estados do Paraná e de Goiás, com data-base em janeiro de 2019. Com a média desses valores sendo de R\$ 756,97 /m², adotou-se o valor de R\$ 760,00 /m², porém, com redução de 2 % para cada acréscimo de vazão, devido aos ganhos de escala.

Nas Tabelas 45, 46 e 47, apresentam-se os resultados obtidos. Cabe lembrar que não foi considerada a EAP para ETEs com vazão inferior à 20 L/s.

TABELA 45 – CAPEX EAP: LODO DE LEITOS DE SECAGEM

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------|----------------|------------------|
| | 20 | 40 | 80 | 160 |
| Área de pátio (m ²) | 324 | 649 | 1.297 | 2.595 |
| Custo Unitário (R\$/m ²) | 760 | 745 | 730 | 715 |
| Custo Total (R\$) | 246.521 | 483.182 | 947.037 | 1.856.192 |

Fonte: O autor (2019).

TABELA 46 – CAPEX EAP: LODO DE LEITOS DE SECAGEM PARALELOS ÀS CENTRÍFUGAS (OPÇÃO MISTA)

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|---|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 |
| Volume do Silo de cal (m ³) | 14 | 55 | 55 | 55 |
| Custo Equipamentos (R\$) | 547.284 | 734.304 | 734.304 | 734.304 |
| Área necessária - Lodo dos leitos (m ²) | 432 | 865 | 1.297 | 1.730 |
| Área necessária - Lodo centrifugado (m ²) | 822 | 1.643 | 2.465 | 3.287 |
| Custo Unitário - Pátio (R\$/m ²) | 760 | 745 | 730 | 715 |
| Custo Pátio de Cura (R\$) | 953.216 | 1.868.304 | 2.746.406 | 3.588.638 |
| Custo total (equipamentos + pátio) (R\$) | 1.500.500 | 2.602.608 | 3.480.710 | 4.322.942 |

Fonte: O autor (2019).

TABELA 47 – CAPEX EAP: LODO DESAGUADO EM CENTRÍFUGAS

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|--|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| Volume do Silo de cal (m ³) | 14 | 55 | 55 | 55 | 55 | 110 | 110 |
| Custo Equipamentos (R\$)* | 619 | 734 | 734 | 842 | 842 | 1.217 | 1.217 |
| Área de pátio necessária (m ²) | 1.233 | 2.465 | 3.698 | 4.930 | 6.163 | 7.704 | 11.556 |
| Custo Unitário - Pátio (R\$/m ²) | 760 | 745 | 730 | 715 | 701 | 687 | 673 |
| Custo do Pátio de Cura (R\$)* | 937 | 1.836 | 2.699 | 3.527 | 4.320 | 5.292 | 7.780 |
| Custo total (equipamentos + pátio) (R\$)* | 1.556 | 2.570 | 3.433 | 4.369 | 5.163 | 6.510 | 8.997 |

Fonte: O autor (2019).

NOTA: *Valores em milhares de R\$.

Observa-se que os custos dos equipamentos de caleação se repetem em alguns casos, principalmente quando os volumes dos silos são os mesmos. Porém, foram feitas algumas adaptações, como no caso das ETEs com vazões de 160 e 240 L/s, em que se mantiveram os custos dos periféricos (alimentador volumétrico, misturador, etc.) associados ao silo de 14 m³, devido à menor vazão de cal, mas o valor do silo foi relativo ao de 55 m³, o que justifica um valor menor do que nos casos das ETEs de 320 e 400 L/s. Já para as vazões de 500 e 750 L/s, dobrou-se o valor do silo de 55 m³, mas mantiveram-se os valores dos periféricos associados a estes.

e) Secagem Térmica

Apresentam-se na Tabela 48 os resultados do CAPEX dos Secadores Térmicos.

TABELA 48 – CAPEX SECAGEM TÉRMICA

| Parâmetro | Vazão da ETE (L/s) | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| Capacidade do Secador (kg/h) | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 4.500 | 4.500 | 4.500 | 4.500 |
| Custo Secador (R\$)* | 2.225,0 | 2.225,0 | 2.225,0 | 4.840,0 | 4.840,0 | 4.840,0 | 4.840,0 |
| Custo Gasômetro (R\$)* | 326,1 | 473,8 | 553,7 | 646,0 | 646,0 | 719,9 | 719,9 |
| Custo Filtragem do Biogás (R\$)* | 353,4 | 422,9 | 492,3 | 561,8 | 631,3 | 718,1 | 935,2 |
| A - Custo Equipamentos (R\$)* | 2.904,5 | 3.121,6 | 3.271,1 | 6.047,8 | 6.117,3 | 6.278,0 | 6.495,1 |
| B - Obras Civis (R\$)* | 87,13 | 93,65 | 98,13 | 181,43 | 183,52 | 188,34 | 194,85 |
| Custo Total (A + B) (R\$)* | 2.991,6 | 3.215,3 | 3.369,2 | 6.229,3 | 6.300,8 | 6.466,3 | 6.689,9 |

Fonte: O autor (2019).

NOTA: *Valores em milhares de R\$; Considerado 3 % do custo dos Equipamentos para as Obras Civis (ver item 4.2.4.1-e).

Destaca-se que o custo do secador com capacidade para 2.000 kg/h foi adotado como a média entre duas cotações obtidas, de diferentes fornecedores, enquanto que o custo do secador para 4.500 kg/h foi adotado pela duplicação do valor obtido, de um único fornecedor, para um secador de 2.250 kg/h. O sistema de filtragem de biogás teve seu custo estimado por interpolação linear a partir dos valores apresentados por Valente (2015), atualizados para janeiro de 2019, já que as populações limites de ambos os trabalhos são bastante próximas.

5.2.2.2 Custos de Operação – OPEX

Neste tópico são apresentados, além dos custos de operação, os principais dados utilizados e resultados intermediários que levaram a esses, permitindo uma melhor interpretação do trabalho. Os custos finais, em VPL, serão apresentados de maneira mais objetiva, no item 5.3.

a) Leitos de Secagem

Na Tabela 49, são apresentados os resultados obtidos em relação à operação dos leitos de secagem.

TABELA 49 – DADOS E OPEX DOS LEITOS DE SECAGEM

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | |
|---|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 |
| Nº total de leitos | 2 | 4 | 4 | 8 | 14 | 26 |
| Nº de leitos utilizados por descarga | 1 | 2 | 2 | 4 | 7 | 13 |
| Volume de lodo descartado (m³) | 25 | 50 | 120 | 240 | 420 | 780 |
| Percentual do compartimento de digestão do UASB (%) | 23 | 23 | 28 | 28 | 24 | 23 |
| Área de uma unidade de Leito (m²) | 50 | 50 | 120 | 120 | 120 | 120 |
| Frequência de descarte do UASB (d) | 10 | 10 | 12 | 12 | 10 | 10 |
| Nº de limpezas no ano | 36,50 | 36,50 | 30,42 | 30,42 | 36,50 | 36,50 |
| Massa removida por limpeza (t)* | 3 | 6 | 15 | 30 | 50 | 100 |
| Massa anual removida (t/ano) | 114 | 227 | 454 | 727 | 1.211 | 3.633 |
| A - Custo de remoção (R\$/ano) | 2.270,59 | 4.541,18 | 9.082,37 | 18.164,74 | 36.329,47 | 72.658,94 |
| Área total limpa (m²/ano) | 1.825 | 3.650 | 7.300 | 14.600 | 30.660 | 56.940 |
| B - Custo de limpeza (R\$/ano) | 3.650,00 | 7.300,00 | 14.600,00 | 29.200,00 | 61.320,00 | 113.880,00 |
| Custo total (A + B) (R\$/ano) | 5.920,59 | 11.841,18 | 23.682,37 | 47.364,74 | 97.649,74 | 186.538,94 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: *Considerado lodo a 25 % de ST e massa específica de 1.030 kg/m³.

Conforme explanado no item 4.2.4.2-a, considerou-se o custo de remoção de lodo dos leitos (A) como de “Pessoal”, e o custo de limpeza dos leitos (B) como de “Manutenção”. Sendo assim, observando-se os valores apresentados, verificou-se que o custo de Pessoal e Manutenção dos leitos de secagem representam, respectivamente, 40 % e 60 % do custo de operação.

Esta mesma proporção foi observada para os leitos de secagem paralelo às centrífugas, cujos resultados apresentam-se na Tabela 50.

TABELA 50 – DADOS E OPEX DOS LEITOS DE SECAGEM PARALELOS ÀS CENTRÍFUGAS

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|---|-----------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 |
| Nº total de leitos | 6 | 10 | 14 | 18 |
| Nº de leitos utilizados por descarga | 3 | 5 | 7 | 9 |
| Volume de lodo descartado (m ³) | 180 | 300 | 420 | 540 |
| Percentual do compartimento de digestão do UASB | 10,42 | 8,68 | 8,10 | 7,81 |
| Área de um leito (m ²) | 120 | 120 | 120 | 120 |
| Frequência de descarte do UASB (d) | 14 | 11 | 10 | 10 |
| nº de limpezas no ano | 26,07 | 33,18 | 36,50 | 36,50 |
| Massa removida por limpeza (t)* | 23 | 37 | 49 | 66 |
| Massa anual removida (t/ano) | 604,89 | 1.209,77 | 1.798,31 | 2.397,75 |
| A - Custo de remoção (R\$/ano) | 12.097,71 | 24.195,43 | 35.966,18 | 47.954,90 |
| Área total limpa (m ² /ano) | 9.386 | 19.909 | 30.660 | 39.420 |
| B - Custo de limpeza (R\$/ano) | 18.771,43 | 39.818,18 | 61.320,00 | 78.840,00 |
| Custo total (A + B) (R\$/ano) | 30.869,14 | 64.013,61 | 97.286,18 | 126.794,90 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: *Considerado lodo a 25 % de ST e massa específica de 1.030 kg/m³.

b) Centrífugas

Nas Tabelas 51 e 52 apresentam-se os dados e resultados do custo com Pessoal para as centrífugas.

TABELA 51 – CUSTO COM PESSOAL NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| Operador de sistemas (R\$/h) | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 |
| Horas dedicadas (h/d) | 5,11 | 9,21 | 13,32 | 6,47 | 7,84 | 9,55 | 13,83 |
| Técnico industrial (R\$/h) | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 |
| Horas dedicadas (h/d) | 1,02 | 1,84 | 2,66 | 1,29 | 1,57 | 1,91 | 2,77 |
| Custo total (R\$/ano)* | 122,42 | 220,87 | 319,32 | 155,24 | 188,05 | 229,07 | 331,62 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: * Valores em milhares de R\$.

TABELA 52 – CUSTO COM PESSOAL NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS PARALELAS AOS LEITOS DE SECAGEM (OPÇÃO MISTA)

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|-------------------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 |
| Operador de sistemas (R\$/h) | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 |
| Horas dedicadas (h/d) | 6,47 | 6,47 | 9,21 | 11,95 |
| Técnico industrial (R\$/h) | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 |
| Horas dedicadas (h/d) | 1,29 | 1,29 | 1,84 | 2,39 |
| Custo total (R\$/ano)* | 155,24 | 155,24 | 220,87 | 286,50 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: * Valores em milhares de R\$.

Quanto ao custo de manutenção, obteve-se um valor unitário médio de R\$ 277,78 /m³.d/ano com os dados de contrato e operação da SANEAGO. Entretanto, foi destacado pelos profissionais da operação que a manutenção é intensa devido à presença recorrente de materiais fibrosos no lodo, onerando o processo. Sendo assim, como no presente estudo considerou-se o processamento de lodo secundário (mais homogêneo), adotou-se o valor unitário de R\$ 220,00 /m³.d/ano, correspondente a cerca de 80 % do valor observado para o lodo primário.

Nas Tabelas 53 e 54 apresentam-se os resultados do OPEX de manutenção das centrífugas.

TABELA 53 – CUSTO COM MANUTENÇÃO NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|--|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| Porte da centrífuga (m ³ /h) | 10 | 10 | 10 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Regime de funcionamento (h/d) | 4,11 | 8,21 | 12,32 | 5,47 | 6,84 | 8,55 | 12,83 |
| Custo Unitário de manutenção (R\$/m ³ .d/ano) | 220,00 | 220,00 | 220,00 | 220,00 | 220,00 | 220,00 | 220,00 |
| Custo total (R\$/ano)* | 9,03 | 18,07 | 27,10 | 36,13 | 45,17 | 56,46 | 84,69 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: * Valores em milhares de R\$.

TABELA 54 – CUSTO COM MANUTENÇÃO NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS PARALELAS AOS LEITOS DE SECAGEM (OPÇÃO MISTA)

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|---|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 |
| Porte da centrífuga (m ³ /h) | 5 | 10 | 10 | 10 |
| Regime de funcionamento (h/d) | 5,47 | 5,47 | 8,21 | 10,95 |
| Custo de Unitário de manutenção (R\$/m ³ .d/ano) | 220,00 | 220,00 | 220,00 | 220,00 |
| Custo total (R\$/ano)* | 6,02 | 12,04 | 18,07 | 24,09 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: * Valores em milhares de R\$.

Observa-se que os valores obtidos ficaram relativamente altos se comparados com o que os fornecedores geralmente informam, que é de 1,5 a 3 % do custo dos equipamentos. Nas condições deste estudo, os custos de manutenção variaram de 2,2 % a 11,3 % do custo de investimento das centrífugas, aumentando conforme o porte e o regime de operação previsto para a essas.

Quanto à energia elétrica, o valor médio calculado da Tarifa de Consumo foi de R\$ 497,63 /MWh (ver Apêndice 4). Adotou-se o valor de R\$ 0,50 /kWh, que, aplicando-se 15 % de desconto (concedido para empresas de saneamento), resulta em R\$ 0,43 /kWh. Quanto à Tarifa de Demanda, foi adotada em R\$ 25,00 /kW, que

passou a R\$ 21,25 /kW devido ao desconto. Nas Tabelas 55 e 56 são apresentados os resultados.

TABELA 55 – CUSTO COM ENERGIA ELÉTRICA NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS

| Descrição | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|--|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| Capacidade da centrífuga (m ³ /h) | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 |
| Regime de funcionamento (h/d) | 4,1 | 8,2 | 12,3 | 5,5 | 6,8 | 8,6 | 12,8 |
| Potência instalada (kW) | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 |
| Potência consumida (kW) | 10,5 | 10,5 | 10,5 | 35,0 | 35,0 | 35,0 | 35,0 |
| Acréscimo equip. periféricos (kW) | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 7,0 |
| Potência consumida total (kW) | 12,6 | 12,6 | 12,6 | 42,0 | 42,0 | 42,0 | 42,0 |
| Custo Consumo energia (R\$/kWh) | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| Custo Demanda energia (R\$/kW) | 21,25 | 21,25 | 21,25 | 21,25 | 21,25 | 21,25 | 21,25 |
| Custo total (R\$/ano)* | 11,24 | 19,26 | 27,29 | 46,38 | 55,30 | 66,44 | 94,31 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: * Valores em milhares de R\$.

TABELA 56 – CUSTO COM ENERGIA ELÉTRICA NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS PARALELAS AOS LEITOS DE SECAGEM

| Descrição | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|--|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 |
| Capacidade da centrífuga (m ³ /h) | 5,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| Regime de funcionamento (h/d) | 5,5 | 5,5 | 8,2 | 10,9 |
| Potência instalada (kW) | 11,0 | 15,0 | 15,0 | 15,0 |
| Potência consumida (kW) | 7,7 | 10,5 | 10,5 | 10,5 |
| Acréscimo equip. periféricos (kW) | 1,5 | 2,1 | 2,1 | 2,1 |
| Potência consumida total (kW) | 9,2 | 12,6 | 12,6 | 12,6 |
| Custo Consumo energia (R\$/kWh) | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| Custo Demanda energia (R\$/kW) | 21,25 | 21,25 | 21,25 | 21,25 |
| Custo total (R\$/ano)* | 10,20 | 13,91 | 19,26 | 24,62 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: * Valores em milhares de R\$.

Por fim, nas Tabelas 57 e 58 são apresentados os custos relativos a produtos químicos na operação das centrífugas.

TABELA 57 – CUSTO COM PRODUTOS QUÍMICOS NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS

| Descrição | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| Consumo de polímero (kg/ano) | 2.271 | 4.541 | 6.812 | 9.082 | 11.353 | 14.191 | 21.287 |
| Custo unitário (R\$/kg) | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| Custo total (R\$/ano)* | 29,52 | 59,04 | 88,55 | 118,07 | 147,59 | 184,49 | 276,73 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: * Valores em milhares de R\$.

TABELA 58 – CUSTO COM PRODUTOS QUÍMICOS NA OPERAÇÃO DE CENTRÍFUGAS PARALELAS AOS LEITOS DE SECAGEM

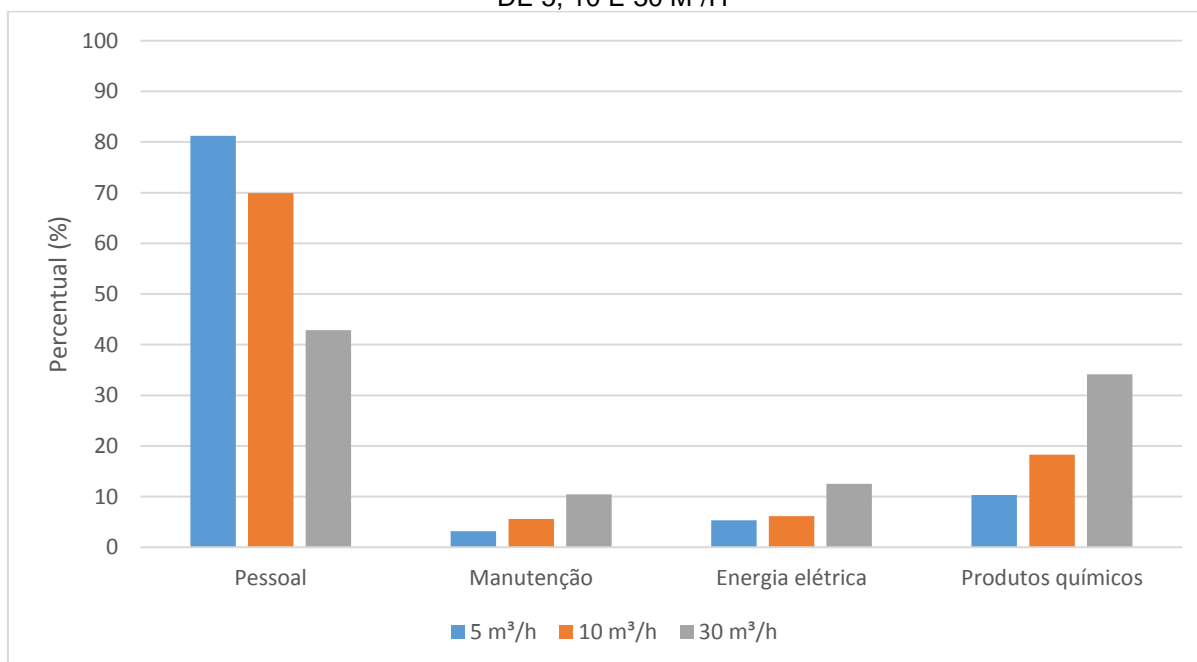
| Descrição | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|-------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 |
| Consumo de polímero (kg/ano) | 1.514 | 3.027 | 4.541 | 6.055 |
| Custo unitário (R\$/kg) | 13 | 13 | 13 | 13 |
| Custo total (R\$/ano)* | 19,68 | 39,36 | 59,04 | 78,71 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: * Valores em milhares de R\$.

Apresenta-se, na Figura 39, a proporção entre os custos operacionais calculados para as centrífugas, sendo estes os valores médios para cada porte de centrífuga considerado.

FIGURA 39 – RELAÇÃO ENTRE OS COMPONENTES DO OPEX DAS CENTRÍFUGAS DE 5, 10 E 30 M³/H



FONTE: O autor (2019).

Verifica-se que o custo de Pessoal se apresentou como o mais expressivo entre os componentes do OPEX. Porém, sua expressividade é reduzida conforme aumenta-se o porte da centrífuga, que, por estar relacionado à quantidade de lodo processado, também aumenta o consumo dos demais insumos (principalmente produtos químicos), enquanto que o custo de pessoal tende a diminuir devido à redução do regime de operação. Em média, os custos com pessoal, manutenção, energia elétrica e produtos químicos representaram, respectivamente, 65 %, 6 %, 8 % e 21 %.

c) Wetlands Construídos para Lodo – WCL

Os resultados do OPEX dos WCLs apresentam-se nas Tabelas 59 a 61.

TABELA 59 – CUSTO COM PESSOAL NA OPERAÇÃO DE WCL

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 | 240 |
| Operador de sistemas (R\$/h) | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 |
| Horas dedicadas (h/d) | 0,20 | 0,21 | 0,22 | 0,24 | 0,30 | 0,40 | 0,50 |
| Custo total (R\$/ano) | 3.781,24 | 3.901,91 | 4.143,27 | 4.625,98 | 5.591,40 | 7.522,25 | 9.453,09 |

FONTE: O autor (2019).

TABELA 60 – CUSTO COM MANUTENÇÃO NA OPERAÇÃO DE WCL

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|---|-----------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 | 240 |
| Área total de WCL (m ²) | 240 | 480 | 1.008 | 1.920 | 3.872 | 7.700 | 11.550 |
| Frequência anual de roçada | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Custo unitário Roçada Densa (R\$/m ²) | 2,16 | 2,16 | 2,16 | 2,16 | 2,16 | 2,16 | 2,16 |
| Custo total (R\$/ano) | 1.037 | 2.074 | 4.355 | 8.294 | 16.727 | 33.264 | 49.896 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: WCL = Wetlands Construídos Para Lodo.

Verificou-se que, a medida em que se aumenta a área de WCL, os custos de manutenção anual tornam-se mais expressivos em relação ao de Pessoal, passando de 22 % para 84 % dos custos totais anuais, para a faixa de vazões considerada.

Conforme explanado no Item 4.2.4.2-c, além do corte periódico das plantas das Wetlands, foi considerada a remoção do lodo acumulado após 10 anos de uso. Este custo foi calculado e trazido a Valor Presente Líquido, para então ser somado aos custos de manutenção, apenas uma vez. Seu cálculo apresenta-se na Tabela 61.

TABELA 61 – CUSTO COM MANUTENÇÃO DA WCL: REMOÇÃO DO LODO

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|---|-----------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 | 240 |
| Área total de WCL (m ²) | 240 | 480 | 1.008 | 1.920 | 3.872 | 7.700 | 11.550 |
| Altura de composto formado (m) | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 |
| Escavação manual (R\$/m ³) | 34,12 | 34,12 | 34,12 | 34,12 | 34,12 | 34,12 | 34,12 |
| Escavação mecânica (R\$/m ³) | 7,07 | 7,07 | 7,07 | 7,07 | 7,07 | 7,07 | 7,07 |
| Volume escavado manualmente (m ³) | 26 | 48 | 101 | 192 | 387 | 770 | 1.155 |
| Volume escavado mecanicamente (m ³) | 238 | 528 | 1.109 | 2.112 | 4.259 | 8.470 | 12.705 |
| Custo total de escavação (R\$)* | 2.581 | 5.371 | 11.279 | 21.483 | 43.324 | 86.155 | 129.233 |
| Custo total de escavação (R\$) - VPL | 1.375 | 2.861 | 6.008 | 11.444 | 23.080 | 45.897 | 68.846 |

FONTE: O autor (2019).

NOTAS: WCL-Wetlands Construídos Para Lodo; *Valores aplicados ao 10º ano de operação, trazidos a valor presente com taxa de juros de 6,50 % ao ano.

d) Estabilização Alcalina Prolongada – EAP

A apresentação dos resultados do OPEX da EAP está dividida em três partes:

i) EAP de lodo desaguado em leitos de secagem; ii) EAP de lodo desaguado em leitos de secagem e centrífugas (opção mista); iii) EAP de lodo desaguado em centrífugas.

Na Tabela 62 apresentam-se os resultados do item “i”.

TABELA 62 – OPEX DA EAP PARA LODO DE LEITOS DE SECAGEM

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|---|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | 20 | 40 | 80 | 160 |
| PESSOAL | | | | |
| Volume de lodo removido dos leitos (m ³ /ano) | 110,2 | 220,4 | 440,9 | 881,8 |
| Transporte de lodo em jericá 90 L, 100 m (R\$/m ³)* | 57,15 | 57,15 | 57,15 | 57,15 |
| Custo de transporte do lodo (R\$/ano) | 6.299,24 | 12.598,48 | 25.196,96 | 50.393,92 |
| Massa de cal (t/ano) | 45,4 | 90,8 | 181,6 | 363,3 |
| Transporte da cal para o local de aplicação, 30 m (R\$/t)** | 50,72 | 50,72 | 50,72 | 50,72 |
| Custo de transporte da cal (R\$/ano) | 2.303,29 | 4.606,58 | 9.213,15 | 18.426,31 |
| Custo Total (R\$/ano) | 8.602,53 | 17.205,06 | 34.410,11 | 68.820,22 |
| PRODUTOS QUÍMICOS | | | | |
| Massa Seca de lodo (kgST/ano) | 113.530 | 227.059 | 454.118 | 908.237 |
| Massa de cal (kg/ano) | 45.412 | 90.824 | 181.647 | 363.295 |
| Custo Total (R\$/ano) | 21.343,56 | 42.687,13 | 85.374,26 | 170.748,52 |
| OUTROS | | | | |
| Massa Seca de lodo (t ST/ano) | 114 | 227 | 454 | 908 |
| Massa de lodo higienizado (t/ano)*** | 324 | 649 | 1.297 | 2.595 |
| Volume de lodo higienizado (m ³ /ano) | 341 | 683 | 1.366 | 2.732 |
| Nº de lotes/ano | 2 | 2 | 4 | 4 |
| Apoio agrônômico (R\$/ano) | 1.303,97 | 2.607,94 | 5.215,87 | 10.431,75 |
| Análises laboratoriais (R\$/ano) | 5.833,33 | 5.833,33 | 11.666,67 | 11.666,67 |
| Mistura/empilhamento com Retro-escavadeira (R\$/ano) | 491,68 | 983,35 | 1.966,71 | 3.933,42 |
| Carga com Pá-carregadeira (R\$/ano) | 512,16 | 1.024,33 | 2.048,65 | 4.097,31 |
| Custo Total (R\$/ano) | 8.141,14 | 10.448,95 | 20.897,90 | 30.129,14 |
| Total Geral (R\$/ano) | 38.087,24 | 70.341,14 | 140.682,27 | 269.697,88 |

FONTE: O autor (2019).

NOTAS: *Adaptado da Composição 88039 do SINAPI; **Adaptado da Composição 89194 do SINAPI; ***Considerado lodo com 35 % de ST.

Como a “opção mista” refere-se, basicamente, à soma das parcelas das demais opções (com as devidas compatibilizações), apresentam-se, na Tabela 63, os resultados referentes ao item (iii), e, posteriormente, na Tabela 64, do item (ii), mais resumidamente, facilitando a visualização dos resultados.

TABELA 63 – OPEX DA EAP PARA LODO DE CENTRÍFUGAS

| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|--|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| PESSOAL | | | | | | | |
| Agente de Operação - Custo horário (R\$) | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 |
| Horas dedicadas (h/d) | 0,41 | 0,82 | 1,23 | 0,55 | 0,68 | 0,86 | 1,28 |
| Técnico industrial - Custo horário (R\$) | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 |
| Horas dedicadas (h/d) | 0,08 | 0,16 | 0,25 | 0,11 | 0,14 | 0,17 | 0,26 |
| Custo Total (R\$/ano) | 9.844,70 | 19.689,40 | 29.534,09 | 13.126,26 | 16.407,83 | 20.509,79 | 30.764,68 |
| MANUTENÇÃO | | | | | | | |
| Custo Equipamentos (R\$) | 621.973 | 730.597 | 730.597 | 830.426 | 830.426 | 1.200.103 | 1.200.103 |
| Taxa de manutenção (% do custo equipamento) | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 |
| Custo Total (R\$/ano) | 9.329,59 | 10.958,96 | 10.958,96 | 12.456,38 | 12.456,38 | 18.001,54 | 18.001,54 |
| PRODUTOS QUÍMICOS | | | | | | | |
| Massa Seca de lodo (kgST/ano) | 431.412 | 862.825 | 1.294.237 | 1.725.650 | 2.157.062 | 2.696.328 | 4.044.492 |
| Massa de cal (kg/ano) | 172.565 | 345.130 | 517.695 | 690.260 | 862.825 | 1.078.531 | 1.617.797 |
| Custo Total (R\$/ano) | 81.105,55 | 162.211,09 | 243.316,64 | 324.422,18 | 405.527,73 | 506.909,66 | 760.364,50 |
| OUTROS | | | | | | | |
| Massa Seca de lodo (t ST/ano) | 431 | 863 | 1.294 | 1.726 | 2.157 | 2.696 | 4.044 |
| Massa de lodo higienizado (t/ano) | 1.233 | 2.465 | 3.698 | 4.930 | 6.163 | 7.704 | 11.556 |
| Nº de lotes/ano | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Apoio agrônômico (R\$/ano) | 4.955,08 | 9.910,16 | 14.865,24 | 19.820,32 | 24.775,40 | 30.969,25 | 46.453,88 |
| Análises laboratoriais (R\$/ano) | 11.666,67 | 11.666,67 | 11.666,67 | 17.500,00 | 17.500,00 | 17.500,00 | 17.500,00 |
| Mistura/empilhamento com Retro-escavadeira (R\$/ano) | 1.868,37 | 3.736,75 | 5.605,12 | 7.473,49 | 9.341,86 | 11.677,33 | 17.516,00 |
| Carga com Pá-carregadeira (R\$/ano) | 1.946,22 | 3.892,44 | 5.838,67 | 7.784,89 | 9.731,11 | 12.163,89 | 18.245,83 |
| Total (R\$/ano) | 20.436,34 | 29.206,02 | 37.975,69 | 52.578,70 | 61.348,38 | 72.310,47 | 99.715,70 |
| Total Geral (R\$/ano) | 120.716,18 | 222.065,46 | 321.785,38 | 402.583,53 | 495.740,32 | 617.731,46 | 908.846,42 |

FONTE: O autor (2019).

TABELA 64 – OPEX DA EAP PARA LODO DE LEITOS DE SECAGEM PARALELOS ÀS CENTRÍFUGAS (OPÇÃO MISTA)

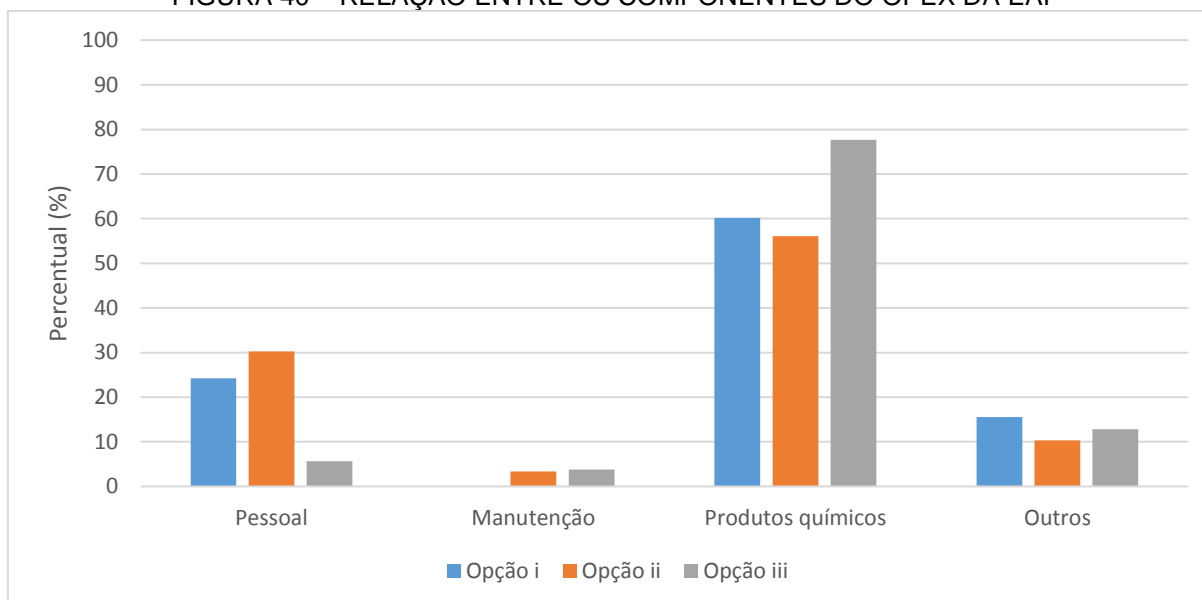
| Descrição | Vazão de Esgoto (L/s) | | | |
|------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 |
| Pessoal | 49.759,66 | 86.393,06 | 128.682,50 | 171.576,67 |
| Manutenção | 8.209,26 | 11.014,56 | 11.014,56 | 11.014,56 |
| Produtos químicos | 82.528,45 | 165.056,90 | 247.585,35 | 330.113,80 |
| Outros* | 20.590,20 | 29.513,72 | 38.437,25 | 53.194,12 |
| Custo Total (R\$/ano) | 161.087,57 | 291.978,25 | 425.719,67 | 565.899,15 |

FONTE: O autor (2019).

NOTAS: *Apoio agrônômico, realização de análises e movimentação do lodo em pátio.

Na Figura 40 apresentam-se graficamente os componentes do OPEX da EAP, para as três opções mencionadas.

FIGURA 40 – RELAÇÃO ENTRE OS COMPONENTES DO OPEX DA EAP



FONTE: O autor (2019).

NOTAS: Opção i = EAP de lodo desaguado em leitos de secagem; Opção ii = EAP de lodo desaguado em leitos de secagem (1/3) e centrífugas (2/3); Opção iii = EAP de lodo desaguado em centrífugas. Os gráficos apresentados referem-se aos valores médios de cada opção, abrangendo toda a faixa de vazão em que cada uma foi considerada.

Conforme esperado, os produtos químicos são a parcela de maior relevância no processo de EAP. “A opção ii” apresenta um custo de pessoal maior que as demais pois a aplicação manual da cal ao lodo torna-se onerosa; na “Opção iii”, por outro lado, este processo seria mecanizado, portanto, com baixo custo de pessoal. Observa-se que a parcela relativa de custo com produtos químicos na opção iii é majorada uma vez que esta foi considerada para vazões mais altas, em que o consumo de cal aumenta mais rapidamente do que os demais itens.

Em geral, obtiveram-se os percentuais de 20 %, 4 %, 65 % e 13 %, respectivamente, para os custos com pessoal, manutenção, produtos químicos e outros (apoio agrônômico, realização de análises e movimentação de lodo em pátio) na operação da EAP.

e) Secagem Térmica

Na Tabela 65 apresentam-se os resultados do OPEX dos secadores térmicos.

TABELA 65 – RESULTADOS DO OPEX DE SECADORES TÉRMICOS

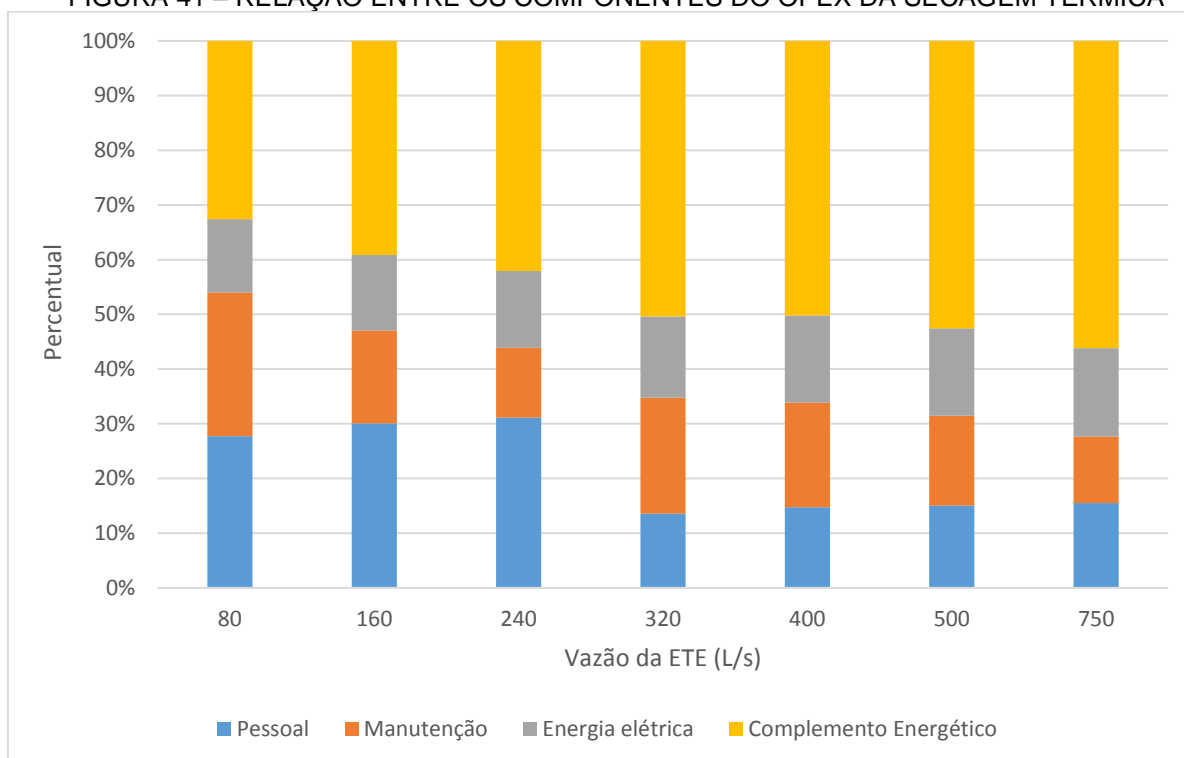
| Parâmetro | Vazão de Esgoto (L/s) | | | | | | |
|----------------------------------|-----------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 500 | 750 |
| PESSOAL | | | | | | | |
| Operador de sistemas (R\$) | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 | 51,80 |
| Horas dedicadas (h/d) | 5,11 | 9,21 | 13,32 | 6,47 | 7,84 | 9,55 | 13,83 |
| Técnico industrial (R\$) | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 | 69,44 |
| Horas dedicadas (h/d) | 1,02 | 1,84 | 2,66 | 1,29 | 1,57 | 1,91 | 2,77 |
| Custo Total (R\$/ano)* | 122,42 | 220,87 | 319,32 | 155,24 | 188,05 | 229,07 | 331,62 |
| MANUTENÇÃO | | | | | | | |
| Custo Equipamentos (R\$) | 2.904 | 3.121 | 3.271 | 6.048 | 6.117 | 6.278 | 6.495 |
| Taxa de manutenção (%) | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 |
| Custo Total (R\$/ano)* | 116,18 | 124,86 | 130,84 | 241,91 | 244,69 | 251,12 | 259,80 |
| ENERGIA ELÉTRICA | | | | | | | |
| Capacidade do Secador (kg/h) | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 4.500 | 4.500 | 4.500 | 4.500 |
| Regime de Operação (h/d) | 4,1 | 8,2 | 12,3 | 5,5 | 6,8 | 8,6 | 12,8 |
| Potência instalada (kW) | 95,0 | 95,0 | 95,0 | 220,0 | 220,0 | 220,0 | 220,0 |
| Potência consumida (kW) | 66,5 | 66,5 | 66,5 | 154,0 | 154,0 | 154,0 | 154,0 |
| Custo Consumo energia (R\$/kWh) | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| Custo Demanda energia (R\$/kW) | 21,25 | 21,25 | 21,25 | 21,25 | 21,25 | 21,25 | 21,25 |
| Custo Total (R\$/ano)* | 59,32 | 101,67 | 144,03 | 170,06 | 202,76 | 243,63 | 345,81 |
| COMPLEMENTO ENERGÉTICO | | | | | | | |
| Déficit energético (Kcal/d/1000) | 964 | 1.928 | 2.893 | 3.857 | 4.821 | 6.026 | 9.040 |
| PCI GLP (kcal/kg) | 11.100 | 11.100 | 11.100 | 11.100 | 11.100 | 11.100 | 11.100 |
| Consumo GLP (kg/d) | 87 | 174 | 261 | 347 | 434 | 543 | 814 |
| Consumo GLP (kg/mês) | 2.606 | 5.212 | 7.818 | 10.424 | 13.030 | 16.288 | 24.431 |
| Custo unitário GLP (R\$/kg) | 4,60 | 4,60 | 4,60 | 4,60 | 4,10 | 4,10 | 4,10 |
| Custo Total (R\$/ano)* | 143,85 | 287,70 | 431,56 | 575,41 | 641,08 | 801,35 | 1202,02 |
| Total Geral (R\$/ano)* | 441,77 | 735,11 | 1025,75 | 1142,62 | 1276,58 | 1525,17 | 2139,26 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: *Valores em milhares de R\$.

Na Figura 41 apresentam-se graficamente os componentes do OPEX da Secagem Térmica.

FIGURA 41 – RELAÇÃO ENTRE OS COMPONENTES DO OPEX DA SECAGEM TÉRMICA



FONTE: O autor (2019).

Verificou-se com os resultados que o Complemento Energético, no caso, considerado como gás GLP, tornou-se o principal insumo na operação dos secadores térmicos, mesmo tendo sido considerada a utilização de todo o biogás produzido nas ETEs. Conforme apresentado no Item 5.2.1, com o biogás foi possível suprir 79 % da demanda energética dos secadores para tornar o lodo com 20 % de umidade.

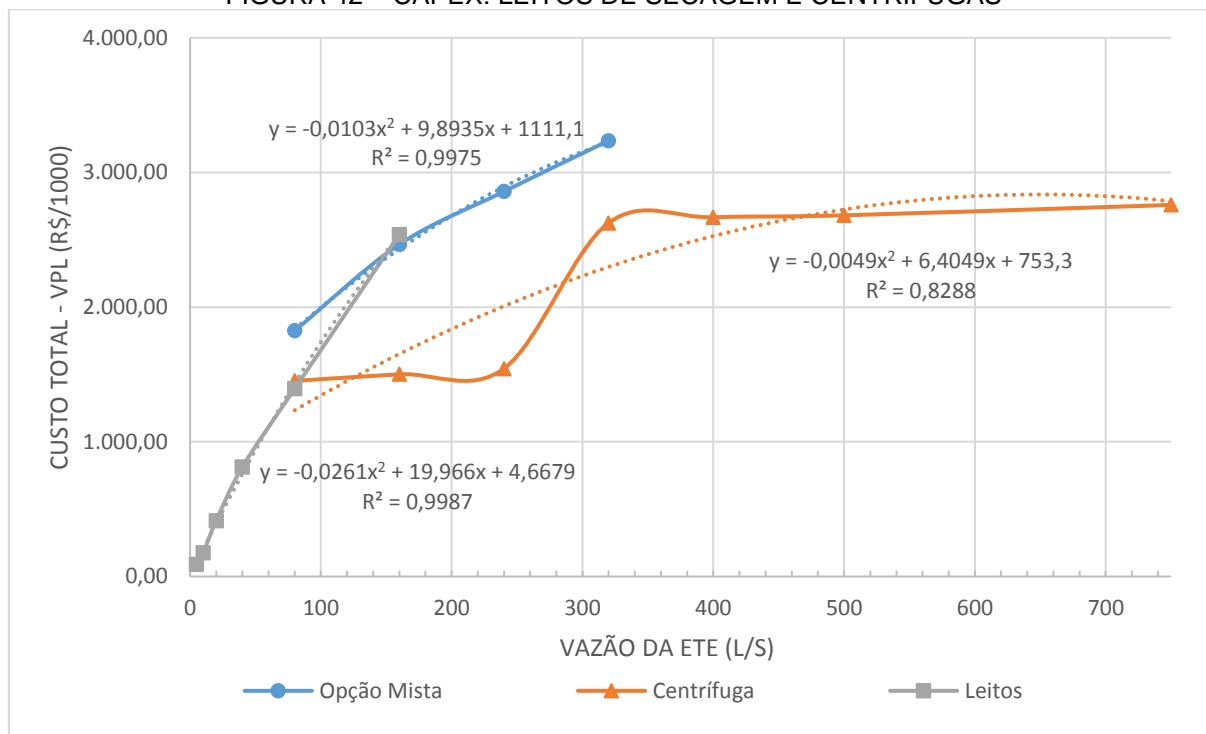
O custo de Pessoal, assim como no caso das centrífugas, foi bastante reduzido quando do aumento do porte do equipamento. Em média, os valores obtidos foram de 21 %, 18 %, 15 % e 46 % para Pessoal, Manutenção, Energia Elétrica e Complemento Energético, respectivamente. Se analisados separadamente os custos para as faixas de vazão 80 a 240 L/s e 320 a 750 L/s, os custos referentes à Complementação Energética passam a ser de 38 % e 52 %, respectivamente. Quanto aos custos de Pessoal, decrescem de 30 % para 15 %; Manutenção, de 19 % para 17 %, e Energia Elétrica, de 14 % para 16 %.

5.2.2.3 Avaliação dos Custos Totais

Para a avaliação dos custos totais foram geradas curvas dos custos de CAPEX e de CAPEX + OPEX, permitindo-se verificar o impacto da consideração dos custos operacionais nos custos totais.

Primeiramente, quanto ao desaguamento, compararam-se as alternativas de leitos de secagem e centrífugas, bem como a opção mista, conforme apresenta-se nas Figuras 42 e 43.

FIGURA 42 – CAPEX: LEITOS DE SECAGEM E CENTRÍFUGAS



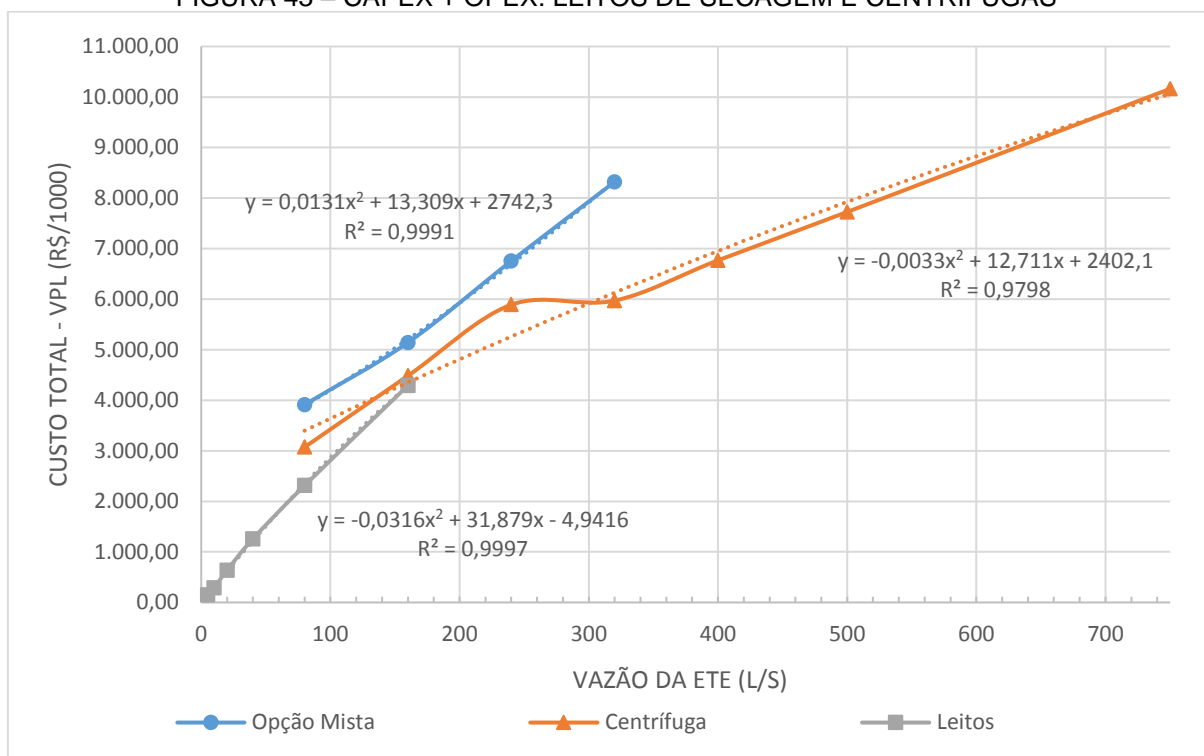
FONTE: O autor (2019).

NOTA: Consideradas Centrífugas de 10 m³/h para ETEs com vazões até 240 L/s e de 30 m³/h para ETEs com vazões acima de 320 L/s (exceto na opção mista, com uma centrífuga para 5 m³/h para a ETE com 80 L/s).

Como pode-se observar, as curvas dos leitos de secagem e das centrífugas se cruzaram próximo à vazão de 80 L/s, aproximando-se dos resultados de Baréa (2013). A opção mista mostrou-se mais onerosa que a utilização apenas dos leitos ou das centrífugas, encontrando a curva dos leitos apenas para a vazão de 150 L/s, quando estes tendem a se tornar inviáveis também pelos requisitos de área, ou seja, indicando um momento em que opções mecanizadas de desaguamento tornam-se mais vantajosas.

Cabe destacar também que a opção mista, da forma em que foi considerada, não possui necessariamente a vantagem de flexibilização operacional, por exemplo, permitindo o descarte do lodo nos leitos caso as centrífugas deixem de funcionar. Isto aconteceria caso fossem dimensionados leitos adicionais na alternativa das centrífugas. No caso, a vazão de lodo foi dividida em 1/3 e 2/3 para o dimensionamento dos leitos e das centrífugas, respectivamente.

FIGURA 43 – CAPEX + OPEX: LEITOS DE SECAGEM E CENTRÍFUGAS



FONTE: O autor (2019).

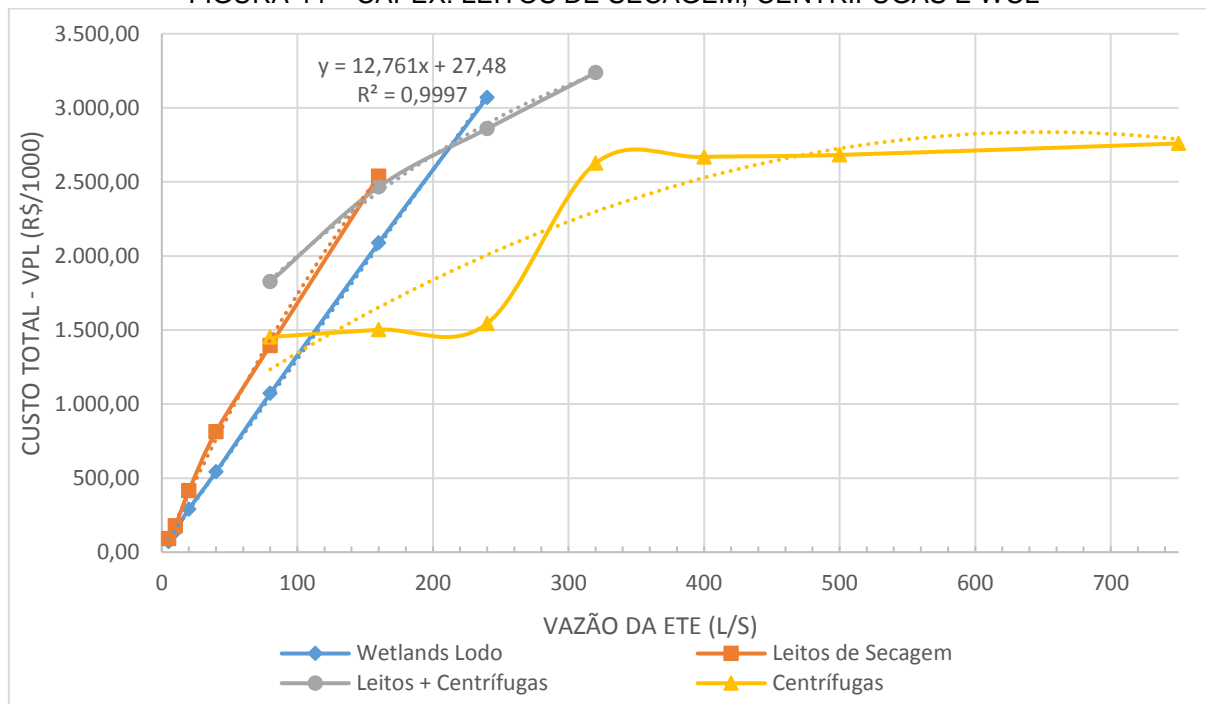
Verificou-se que, quando considerados os custos operacionais, as centrífugas deixam de ser mais econômicas a partir dos 80 L/s, sendo mais onerosas para todas as vazões consideradas, ainda que havendo uma convergência dos custos nas vazões em torno de 160 L/s. A opção mista manteve-se como a mais dispendiosa, sendo um dos motivos o elevado custo de equipamentos mesmo com vazões reduzidas de lodo.

É interessante notar que a curva das centrífugas tornou-se mais homogênea quando considerado o OPEX, mesmo havendo sido adotados dois patamares de equipamentos. A definição dos portes das centrífugas (10 e 30 m³/h) foi realizada respeitando-se regimes de funcionamento de até 13 h/d (aproximadamente), buscando-se a não operação destas em horários de pico de energia e período noturno. Nota-se que as inclinações dos trechos antes de 240 L/s e depois de 320 L/s são diferentes, indicando um barateamento do custo operacional quando utilizados equipamentos de maior porte, porém, pela homogeneidade da curva, tem-se um indicativo de que a forma como foi adotado está aproximando-se da solução ideal, ou seja, de que os valores de vazão mencionados podem ser balizadores para a definição do porte e regime de operação das centrífugas. Seria interessante que mais estudos

fossem realizados neste sentido, inclusive, com regimes de funcionamento superiores aos considerados neste trabalho.

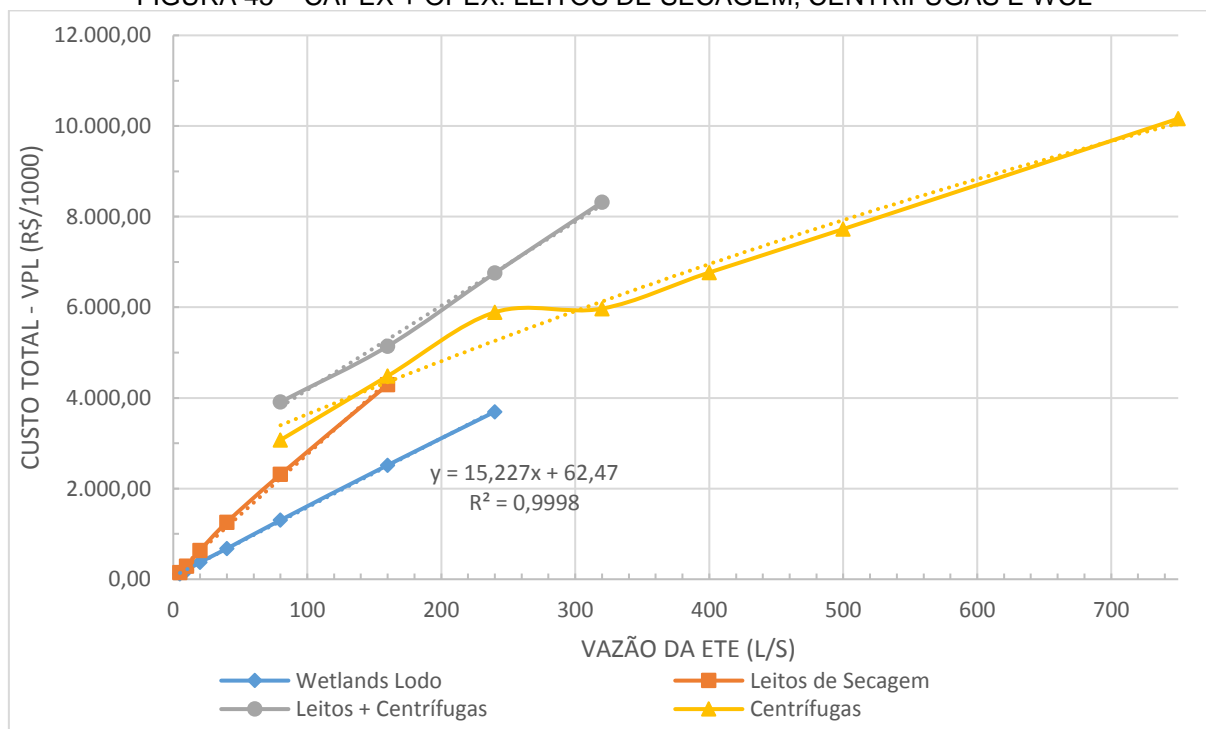
Apresenta-se nas Figuras 44 e 45 o comparativo dessas alternativas com os Wetlands Construídos para Lodo (WCL).

FIGURA 44 – CAPEX: LEITOS DE SECAGEM, CENTRÍFUGAS E WCL



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 45 – CAPEX + OPEX: LEITOS DE SECAGEM, CENTRÍFUGAS E WCL



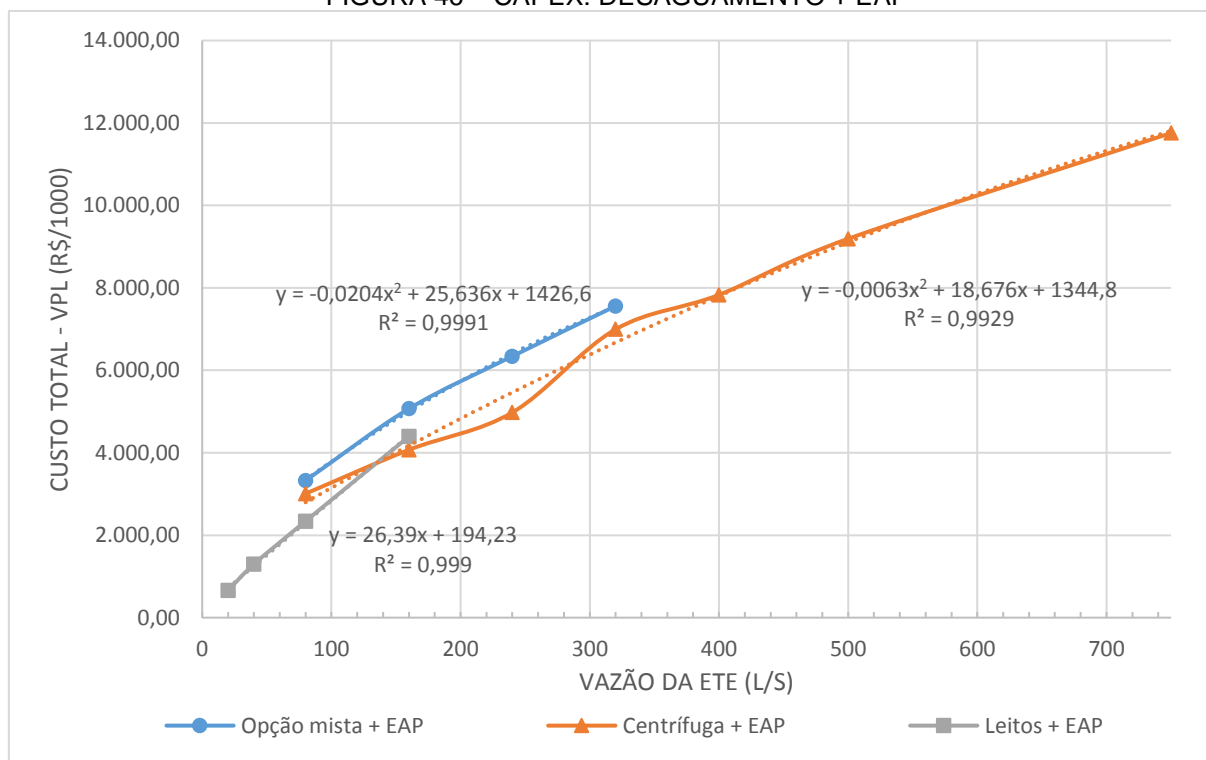
FONTE: O autor (2019).

Verificou-se que os WCLs são construtivamente mais econômicos que os leitos de secagem, para vazões equivalentes. O CAPEX desses ultrapassou o das centrífugas para vazões acima de 110 L/s, porém, quando considerado o OPEX, os WCLs mostraram-se como a opção mais econômica entre as avaliadas.

Comparando-se os WCLs com a opção mista, o CAPEX desses é inferior para vazões de até 220 L/s, mas, novamente, quando considerado o OPEX, os WCLs mantêm-se mais econômicos em toda a faixa de vazão considerada (5 a 240 L/s).

Nas Figuras 46 e 47, apresentam-se os resultados referentes à higienização de lodo, primeiramente, acrescentando-se os custos da Estabilização Alcalina Prolongada aos custos de desaguamento, já que foram consideradas diferentes concepções quanto à EAP, a depender da forma de desaguamento.

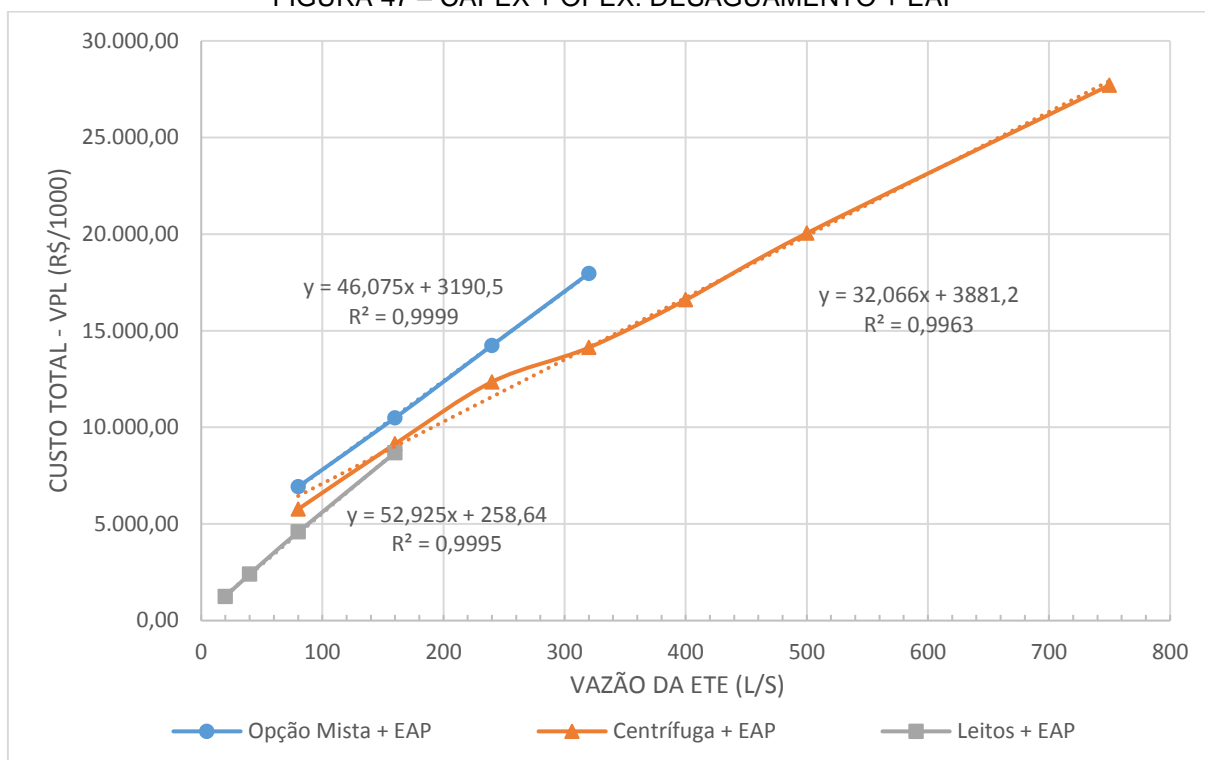
FIGURA 46 – CAPEX: DESAGUAMENTO + EAP



FONTE: O autor (2019).

Como pode-se observar, quando considerada a higienização do lodo por EAP, os leitos de secagem permanecem mais viáveis que as centrífugas até a faixa de 130 L/s, principalmente devido ao custo elevado do sistema de caleação mecanizada, adotado para higienização do lodo centrifugado. A opção mista permaneceu a mais onerosa.

FIGURA 47 – CAPEX + OPEX: DESAGUAMENTO + EAP

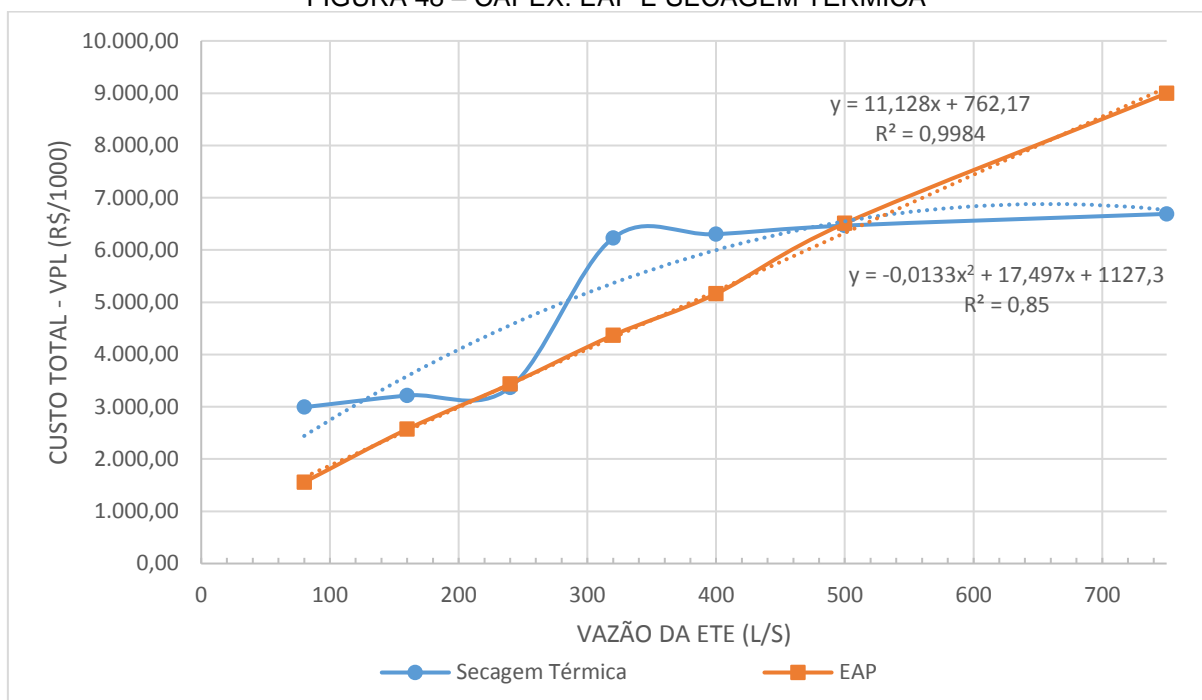


FONTE: O autor (2019).

Assim como nos casos anteriores, a consideração dos custos operacionais provocou uma linearização dos custos totais. A combinação de leitos de secagem + EAP apresentou-se mais econômica que a de centrífugas + EAP, e a opção mista de desaguamento + EAP novamente resultou em custos mais elevados que as demais alternativas. Desta forma, notou-se que a consideração da EAP não alterou a ordem de economicidade das alternativas de desaguamento de lodo, quando considerado CAPEX + OPEX.

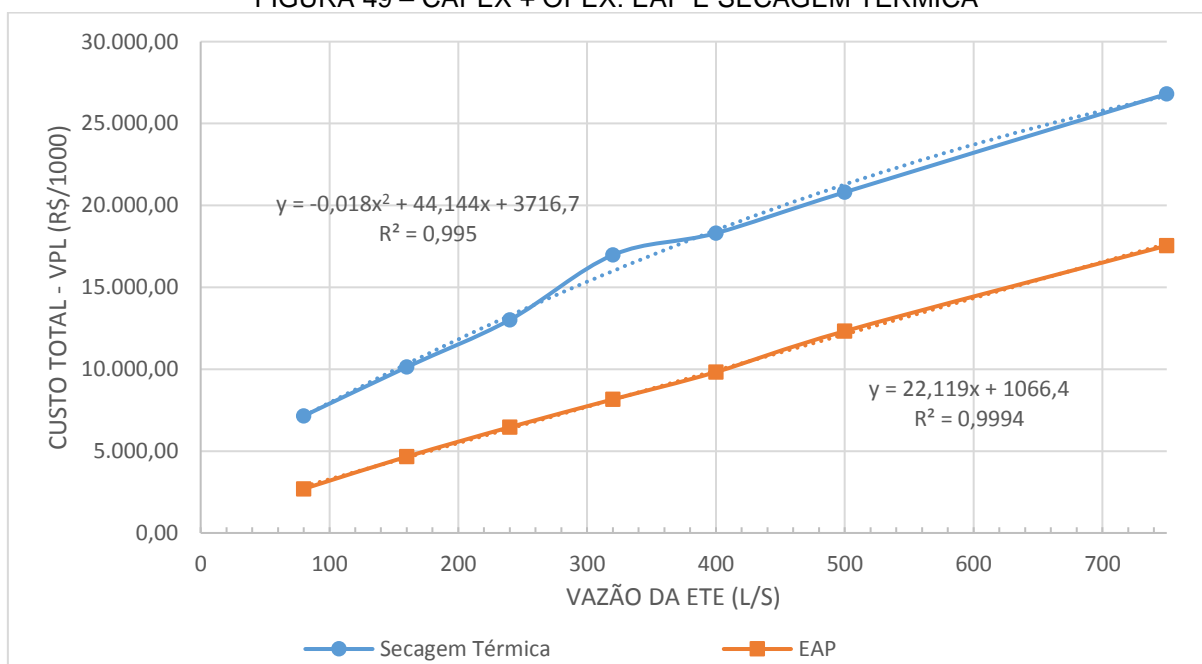
Nas Figuras 48 e 49, estão comparadas as alternativas de EAP e Secagem Térmica, sendo que a Secagem só foi considerada para vazões acima de 80 L/s.

FIGURA 48 – CAPEX: EAP E SECAGEM TÉRMICA



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 49 – CAPEX + OPEX: EAP E SECAGEM TÉRMICA



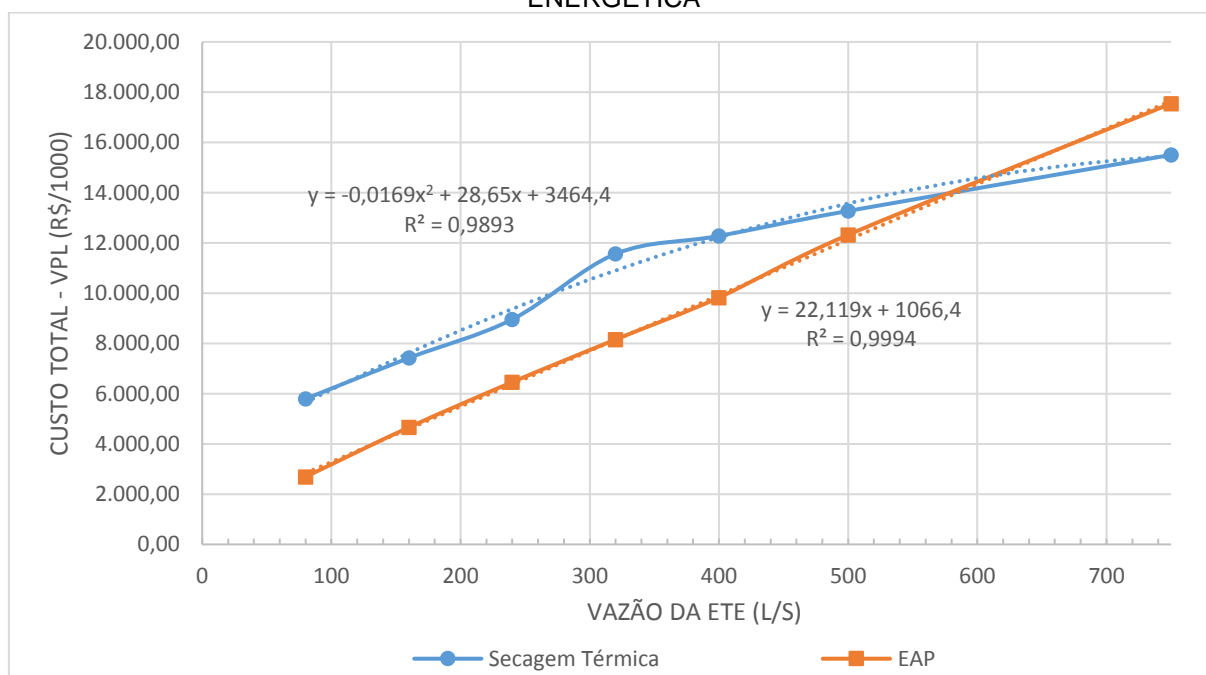
FONTE: O autor (2019).

Verificou-se que, em termos de custo de implantação, a secagem térmica só se tornou mais vantajosa que a EAP a partir de vazões próximas a 500 L/s, porém, quando considerados os custos de operação, a EAP mantém-se como mais econômica para toda a faixa de vazão considerada. Isto se deve, principalmente, devido ao elevado custo com complementação energética (mesmo considerando-se

o aproveitamento pleno do biogás) e de pessoal comparativamente à EAP, que, para essa faixa de vazão, teve seu custo de pessoal bastante reduzido uma vez que a mistura de cal ao lodo seria mecanizada.

Para a verificação do impacto dos custos de complementação energética no OPEX da Secagem Térmica, apresentam-se, na Figura 50, as curvas de custo geradas sem a consideração desse item.

FIGURA 50 – CAPEX + OPEX: EAP E SECAGEM TÉRMICA SEM COMPLEMENTAÇÃO ENERGÉTICA



FONTE: O autor (2019).

Como pode-se observar, quando desconsiderado o custo de complementação energética para a secagem térmica, esta passa a ser mais econômica que a EAP para ETEs com vazões acima de 570 L/s, aproximadamente. No entanto, esta situação implica em um déficit energético para se atingir o teor de 80 % de ST no lodo seco, conforme as premissas adotadas neste estudo.

Cabe mencionar também que, apesar do custo com energia elétrica não ter se destacado no OPEX da secagem térmica, este, isoladamente, foi equivalente a cerca de 45 % dos custos operacionais da EAP. A potência dos secadores térmicos foi estimada exclusivamente com base em informações de fabricantes (lebrando que, no caso das centrífugas, foram solicitadas medições em campo, à SANEAGO, para fins de verificação e análise de sensibilidade), e pode ser mais um ponto de aprofundamento para a composição dos custos operacionais desta tecnologia.

Por fim, a mesma consideração feita para as centrífugas, quanto à adequabilidade do porte dos equipamentos, cabe para os secadores térmicos, sugerindo que as vazões de 240 L/s e 320 L/s sejam referências para a escolha do porte do secador, para as condições deste estudo.

5.3 FERRAMENTAS DE AUXÍLIO EM ESTUDOS DE CONCEPÇÃO

Apresentam-se nas Tabelas 66 a 69 as Ferramentas de Auxílio em Estudos de Concepção desenvolvidas no presente trabalho, reforçando-se que foram consideradas as seguintes premissas:

- ETE composta por UASB + Pós-tratamento aeróbio (Lodos Ativados ou Filtro Biológico Percolador, com ou sem descarte de lodo aeróbio de excesso ao UASB);
- Coeficiente de produção de sólidos de 0,30 kgST/kgDQOaplicada;
- Não foi considerado o custo de aquisição de área;
- Não foi considerado o custo de transporte e disposição final do lodo.

TABELA 66 – FERRAMENTA F1: FUNÇÕES CUSTO DAS ALTERNATIVAS DE DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DE LODO

| Alternativa | Vazão da ETE (L/s) | FUNÇÃO CUSTO* | |
|--|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | | CAPEX | CAPEX + OPEX** |
| DESAGUAMENTO | | | |
| Leitos de Secagem | 5 a 160 | $y = -0,0261x^2 + 19,966x$ | $y = -0,0316x^2 + 31,879x$ |
| Leitos + Centrífugas | 80 a 320 | $y = -0,0103x^2 + 9,8935x + 1.111$ | $y = 0,0131x^2 + 13,309x + 2.742$ |
| Centrífugas | 80 a 750 | $y = -0,0049x^2 + 6,4049x + 753$ | $y = -0,0033x^2 + 12,711x + 2.402$ |
| Wetlands Construídos para Lodo | 5 a 240 | $y = 12,761x + 27$ | $y = 15,227x + 63$ |
| HIGIENIZAÇÃO | | | |
| EAP (Lodo de leitos) | 20 a 160 | $y = 11,482x + 22$ | $y = 27,075x + 72$ |
| EAP (1/3 Lodo de leitos + 2/3 Lodo de centrífugas) | 80 a 320 | $y = -0,0102x^2 + 15,742x + 316$ | $y = 27,527x + 867$ |
| EAP (Lodo de centrífugas) | 80 a 750 | $y = 11,128x + 762$ | $y = 22,119x + 1.066$ |
| Secagem Térmica | 80 a 750 | $y = 2057,1\ln(x) - 6.580$ | $y = 29,198x + 5.948$ |
| DESAGUAMENTO + HIGIENIZAÇÃO | | | |
| Leitos + EAP | 20 a 160 | $y = 26,39x + 194$ | $y = 52,925x + 259$ |
| (Leitos + Centrífugas) + EAP | 80 a 320 | $y = -0,0204x^2 + 25,636x + 1.427$ | $y = 46,075x + 3.191$ |
| Centrífugas + EAP | 80 a 750 | $y = -0,0063x^2 + 18,676x + 1.345$ | $y = 32,066x + 3.881$ |
| Centrífugas + Secagem Térmica | 80 a 750 | $y = -0,0182x^2 + 23,902x + 1.881$ | $y = -0,021x^2 + 56,86x + 6.119$ |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: *Nas equações, y = custo em milhares de R\$ e x = vazão da ETE em L/s; **OPEX em VPL considerando-se 15 anos de operação e taxa de juros de 6,5 % ao ano; EAP = Estabilização Alcalina Prolongada.

TABELA 67 – FERRAMENTA F2: CAPEX E OPEX DE ALTERNATIVAS DE DESAGUAMENTO DE LODO

| Vazão da ETE (L/s) | P.E. (hab) | Leitos de Secagem | | Leitos de Secagem + Centrifugas | | Centrifugas | | Wetlands Construídos para Lodo | |
|--------------------|------------|-------------------|----------------|---------------------------------|----------------|-------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
| | | CAPEX (R\$/1.000) | OPEX (R\$/ano) | CAPEX (R\$/1.000) | OPEX (R\$/ano) | CAPEX (R\$/1.000) | OPEX (R\$/ano) | CAPEX (R\$/1.000) | OPEX (R\$/ano) |
| 5 | 3.323 | 90 | 5.921 | - | - | - | - | 72 | 4.818 |
| 10 | 6.646 | 176 | 11.841 | - | - | - | - | 141 | 5.976 |
| 20 | 13.292 | 415 | 23.682 | - | - | - | - | 290 | 8.498 |
| 40 | 26.585 | 813 | 47.365 | - | - | - | - | 542 | 12.920 |
| 80 | 53.169 | 1.395 | 97.649 | 1.825 | 222.012 | 1.452 | 172.212 | 1.071 | 22.318 |
| 160 | 106.338 | 2.538 | 186.539 | 2.466 | 284.567 | 1.502 | 317.236 | 2.088 | 40.786 |
| 240 | 159.508 | - | - | 2.859 | 414.523 | 1.544 | 462.260 | 3.069 | 59.349 |
| 320 | 212.677 | - | - | 3.236 | 540.714 | 2.626 | 355.823 | - | - |
| 400 | 265.846 | - | - | - | - | 2.668 | 436.107 | - | - |
| 500 | 332.308 | - | - | - | - | 2.682 | 536.463 | - | - |
| 750 | 498.462 | - | - | - | - | 2.759 | 787.352 | - | - |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: Com o OPEX anual podem-se calcular diferentes valores de VPL a depender do tempo e da taxa de juros considerados.

TABELA 68 – FERRAMENTA F3: CAPEX E OPEX DE ALTERNATIVAS DE HIGIENIZAÇÃO DE LODO

| Vazão da ETE (L/s) | P.E. (hab) | EAP (Lodo de Leitos) | | EAP (Lodo de Leitos + Centrífugas) | | EAP (Lodo de centrífugas) | | Secagem Térmica | |
|--------------------|------------|----------------------|----------------|------------------------------------|----------------|---------------------------|----------------|-------------------|----------------|
| | | CAPEX (R\$/1.000) | OPEX (R\$/ano) | CAPEX (R\$/1.000) | OPEX (R\$/ano) | CAPEX (R\$/1.000) | OPEX (R\$/ano) | CAPEX (R\$/1.000) | OPEX (R\$/ano) |
| 5 | 3.323 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 10 | 6.646 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 20 | 13.292 | 247 | 38.087 | - | - | - | - | - | - |
| 40 | 26.585 | 483 | 70.341 | - | - | - | - | - | - |
| 80 | 53.169 | 947 | 140.682 | 1.501 | 161.088 | 1.556 | 120.674 | 2.992 | 441.770 |
| 160 | 106.338 | 1.856 | 269.698 | 2.603 | 291.978 | 2.570 | 222.121 | 3.215 | 735.112 |
| 240 | 159.508 | - | - | 3.481 | 425.720 | 3.433 | 321.841 | 3.369 | 1.025.747 |
| 320 | 212.677 | - | - | 4.323 | 565.899 | 4.369 | 402.764 | 6.229 | 1.142.619 |
| 400 | 265.846 | - | - | - | - | 5.163 | 495.921 | 6.301 | 1.276.582 |
| 500 | 332.308 | - | - | - | - | 6.510 | 617.992 | 6.466 | 1.525.170 |
| 750 | 498.462 | - | - | - | - | 8.997 | 909.107 | 6.690 | 2.139.256 |

FONTE: O autor (2019).

NOTA: Com o OPEX anual podem-se calcular diferentes valores de VPL a depender do tempo e da taxa de juros considerados.

TABELA 69 – FERRAMENTA F4: CUSTOS TOTAIS, REQUISITO DE ÁREA E DESTINAÇÃO DE LODO PARA AS ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO DE LODO

| Vazão da ETE (L/s) | P. E. (hab) | Desaguamento | Higienização | Custo Total - VPL 15 anos (R\$/1.000) | Área Necessária (m²) | Destinação do Lodo | | |
|--------------------|-------------|------------------|--------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------|---------|--------------------------|
| | | | | | | Massa (t/ano) | C (%) | Frequência de Transporte |
| 5 | 3.323 | - | - | - | - | 1.892 | 3 | 10 dias |
| | | LSE | - | 145,67 | 100 | 227 | 25 | 20 dias |
| | | WCL | - | 118,68 | 240 | 95 | 60 | 10 anos |
| 10 | 6.646 | - | - | - | - | 3.784 | 3 | 10 dias |
| | | LSE | - | 287,74 | 200 | 454 | 25 | 20 dias |
| | | WCL | - | 200,17 | 480 | 189 | 60 | 10 anos |
| 20 | 13.292 | - | - | - | - | 7.569 | 3 | 10 dias |
| | | LSE | - | 637,57 | 480 | 908 | 25 | 20 dias |
| | | LSE | EAP | 1.242,21 | 804 | 545 | 50 | Semestral |
| | | WCL | - | 376,34 | 1.008 | 378 | 60 | 10 anos |
| 40 | 26.585 | - | - | - | - | 15.137 | 3 | 10 dias |
| | | LSE | - | 1.258,54 | 960 | 1.816 | 25 | 20 dias |
| | | LSE | EAP | 2.403,12 | 1.609 | 1.090 | 50 | Semestral |
| | | WCL | - | 675,06 | 1.920 | 757 | 60 | 10 anos |
| 80 | 53.169 | LSE | - | 2.312,79 | 1.680 | 3.633 | 25 | 20 dias |
| | | LSE | EAP | 4.582,61 | 2.977 | 2.180 | 50 | Trimestral |
| | | LSE + Centrífuga | - | 3.912,73 | 1.140 | 4.087 | 20 e 25 | Variável |
| | | LSE + Centrífuga | EAP | 6.927,88 | 2.394 | 2.107 | 50 | Trimestral |
| | | Centrífuga | - | 3.071,68 | 420 | 4.314 | 20 | Diária |
| | | Centrífuga | EAP | 5.762,25 | 1.653 | 2.071 | 60 | Trimestral |
| | | Centrífuga | S.T. | 10.217,12 | 630 | 1.135 | 80 | Trimestral |
| | | WCL | - | 1.304,36 | 3.872 | 1.514 | 60 | 10 anos |
| 160 | 106.338 | LSE | - | 4.292,17 | 3.120 | 7.266 | 25 | 20 dias |
| | | LSE | EAP | 8.684,25 | 5.715 | 4.360 | 50 | Trimestral |
| | | LSE + Centrífuga | - | 5.141,59 | 1.620 | 8.174 | 20 e 25 | Variável |
| | | LSE + Centrífuga | EAP | 10.489,57 | 4.128 | 4.214 | 50 | Trimestral |
| | | Centrífuga | - | 4.484,41 | 420 | 8.628 | 20 | Diária |
| | | Centrífuga | EAP | 9.143,33 | 2.885 | 4.142 | 50 | Trimestral |
| | | Centrífuga | S.T. | 14.611,69 | 630 | 2.271 | 80 | Trimestral |
| 240 | 159.508 | WCL | - | 2.517,45 | 7.700 | 3.027 | 60 | 10 anos |
| | | LSE + Centrífuga | - | 6.756,37 | 2.100 | 12.261 | 20 e 25 | Variável |
| | | LSE + Centrífuga | EAP | 14.239,98 | 5.863 | 6.321 | 50 | Trimestral |
| | | Centrífuga | - | 5.890,13 | 420 | 12.942 | 20 | Diária |
| | | Centrífuga | EAP | 12.349,65 | 4.118 | 6.212 | 50 | Trimestral |
| 320 | 212.677 | Centrífuga | S.T. | 18.904,09 | 630 | 3.406 | 80 | Trimestral |
| | | WCL | - | 3.696,33 | 11.550 | 4.541 | 60 | 10 anos |
| | | LSE + Centrífuga | - | 8.320,48 | 2.580 | 16.348 | 20 e 25 | Variável |
| | | LSE + Centrífuga | EAP | 17.964,38 | 7.597 | 8.428 | 50 | Bimestral |
| | | Centrífuga | - | 5.971,23 | 475 | 17.256 | 20 | Diária |
| 400 | 265.846 | Centrífuga | EAP | 14.127,50 | 5.405 | 8.283 | 50 | Bimestral |
| | | Centrífuga | S.T. | 22.944,17 | 712,5 | 4.541 | 80 | Bimestral |
| | | Centrífuga | - | 6.768,23 | 475 | 21.571 | 20 | Diária |
| 500 | 332.308 | Centrífuga | EAP | 16.593,94 | 6.638 | 10.354 | 50 | Bimestral |
| | | Centrífuga | S.T. | 25.072,33 | 712,5 | 5.676 | 80 | Bimestral |
| | | Centrífuga | - | 7.725,95 | 475 | 26.963 | 20 | Diária |
| 750 | 498.462 | Centrífuga | EAP | 20.046,55 | 8.179 | 12.942 | 50 | Bimestral |
| | | Centrífuga | S.T. | 28.532,92 | 712,5 | 7.096 | 80 | Bimestral |
| | | Centrífuga | - | 10.162,28 | 475 | 40.445 | 20 | Diária |
| 750 | 498.462 | Centrífuga | EAP | 27.707,54 | 12.031 | 19.414 | 50 | Bimestral |
| | | Centrífuga | S.T. | 36.966,90 | 712,5 | 10.643 | 80 | Bimestral |

FONTE: O autor (2019).

NOTAS:

- 1) LSE = Leitos de Secagem; EAP = Estabilização Alcalina Prolongada; WCL = Wetlands Construídas para Lodo; ST = Secagem Térmica.
- 2) Quanto à frequência de transporte, consideraram-se: para o lodo a 3 % de ST, frequência adotada como a de descarte do UASB; Para lodo dos leitos de secagem, frequência próxima do tempo de ciclo ($t_c=18$ dias); para o lodo centrifugado, transporte diário caso não haja área sobrando na ETE; para a opção mista, variável, sendo o lodo dos leitos com frequência de 20 dias e, o lodo centrifugado, diária; para lodo higienizado, frequência adotada conforme a frequência de amostragem estabelecida na CONAMA 375/06.
- 3) A área de Pátio de Cura para EAP pode ser calculada pela diferença das áreas das opções de desaguamento com e sem EAP;
- 4) Para cálculo da massa de lodo a ser transportada da WCL, considerar 10 vezes o valor apresentado;
- 5) As massas de lodo a serem transportadas podem ser recalculadas proporcionalmente caso haja alteração do coeficiente de produção de sólidos, que, neste caso, foi considerado de 0,30 kgST/kgDQOaplicada;
- 6) Maiores detalhes dos cálculos da quantidade de lodo a ser transportada apresentam-se no Apêndice 6 desta dissertação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho pôde-se avaliar os custos de desaguamento e higienização de lodo de esgoto, obtendo-se resultados que permitem comparações e análises de viabilidade de alternativas, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de Estudos de Concepção, atingindo-se, assim, o objetivo geral desta dissertação.

Os resultados do Objetivo Específico A (investigação de questões não consolidadas, variáveis ou pouco abordadas na literatura) possibilitaram um refinamento dos critérios e parâmetros adotados no presente estudo. Alguns resultados dos Objetivos Específicos A e B (avaliação do CAPEX e OPEX de desaguamento e higienização de lodo) foram complementares, a exemplo da definição de faixas de vazão viáveis de tratamento de lodo, por diferentes tecnologias, e da escolha do regime de operação de equipamentos para pré-dimensionamentos.

Dentre os esclarecimentos obtidos em resposta ao Objetivo Específico A, podem-se destacar:

- O coeficiente de produção de sólidos em sistemas de tratamento por UASB seguido de pós-tratamento aeróbio deve ser cuidadosamente definido em Estudos de Concepção, já que se trata de um parâmetro fundamental de dimensionamento. Para o presente estudo, assumiu-se o mesmo coeficiente para UASB + Lodos Ativados Convencional e UASB + FBP, independentemente da realização ou não do descarte de lodo aeróbio de excesso aos reatores UASB, com base nas análises realizadas dos dados apresentados por von Sperling e Gonçalves (2014) (ver item 5.1.1);
- Existem novas alternativas de fluxograma da fase sólida para ETEs com reatores UASB + Pós-tratamento aeróbio, emergentes visando suprir dificuldades operacionais do procedimento de descarte de lodo aeróbio de excesso nos reatores UASB. Em resumo, considera-se uma unidade adicional para adensamento e/ou homogeneização do lodo de excesso (anaeróbio e/ou aeróbio), com diversas configurações possíveis. Em casos de desaguamento do lodo por centrífuga, tal unidade provavelmente pode fazer o papel do tanque de equalização (que já seria necessário para o desaguamento), sendo relativamente pequena a alteração de concepção. Já no caso de desaguamento natural, esta nova unidade tem um impacto econômico relativamente maior, pois não seria inicialmente prevista.

Verificaram-se, também, nas entrevistas realizadas, fluxogramas em que o decantador secundário da ETE era utilizado como adensador de lodo, especialmente em casos em que a ETE operava aquém de sua capacidade nominal e o lodo aeróbio de excesso era relativamente bem estabilizado.

- Tanques de Equalização de lodo para o desaguamento em centrífugas podem ser dimensionados em função de valores de TDH inversamente proporcionais à quantidade de lodo produzida, para se tornarem viáveis economicamente e operacionalmente. Utilizaram-se, neste estudo, TDHs entre 14 e 20 horas, com o limite inferior delimitado pelo tempo de parada previsto para as centrífugas. Pouco se encontra na literatura a respeito da energia necessária para homogeneização da massa de lodo.
- A otimização do dimensionamento de leitos de secagem, visando redução de área, considerando-se as estruturas convencionais, é mais viável em termos de redução do tempo de ciclo, já que a taxa de aplicação de sólidos pode ser limitada por fatores como a concentração do lodo excedente e a altura da borda livre. Neste sentido, a consideração da etapa após o desaguamento pode permitir que o lodo seja removido mais rapidamente dos leitos, e o uso de cobertura aumenta a confiabilidade do processo. Em geral, o tempo de ciclo de 18 dias, em leitos cobertos, permite a obtenção de teores de sólidos acima da ordem de 25 %.
- Tendo-se verificado uma lacuna na literatura quanto à EAP, em especial, ao dimensionamento dos pátios de cura, foi proposta uma metodologia de cálculo análoga à do dimensionamento de leitos de secagem. Com base na experiência prática da SANEPAR, definiram-se uma taxa de aplicação de sólidos e um tempo de ciclo para a estimativa da área necessária. Os valores obtidos foram de até 350 kgST/m² e de 1 ano de tempo de ciclo, considerando-se as seguintes premissas: a) o lodo atinge, ao final do período de estocagem, cerca de 50 % de ST; b) A taxa de aplicação de cal é entre 40 e 50 % da massa seca de lodo; c) Os montes de lodo são elevados a até 3,50 m de altura, com auxílio de maquinário e paredes laterais; d) Os pátios são cobertos e com piso impermeabilizado.

Quanto aos custos de implantação e operação dos processos de tratamento de lodo (Objetivo Específico B), sem considerarem-se os custos com aquisição de área e destinação final do lodo, verificou-se que:

- O custo de implantação de centrífugas pode ser inferior ao de leitos de secagem para ETEs com vazões acima de 80 L/s, porém, considerando-se os custos operacionais, os leitos são mais econômicos mesmo para vazões de até 160 L/s (limite máximo considerado para leitos de secagem). A opção mista, considerando-se 1/3 do lodo desaguado em leitos e 2/3 em centrífugas, possui custo mais elevado de implantação e operação.
- Os Wetlands Construídos para Lodo têm custo de implantação inferior ao das centrífugas para ETEs com até 120 L/s. Quando considerados os custos operacionais, tornam-se a alternativa mais econômica dentre as estudadas para toda a faixa de vazão considerados (5 a 240 L/s).
- Ao se considerar a higienização do lodo por EAP, em termos de custo de implantação das unidades de desaguamento, as centrífugas tornaram-se mais econômicas que os leitos apenas a partir de 130 L/s (devido aos equipamentos de caleação). Porém, quando considerado o OPEX, os leitos mantiveram-se mais econômicos para ETEs de até 160 L/s.
- Comparando-se a EAP com a Secagem Térmica, o custo de implantação da secagem térmica mostrou-se mais econômica para ETEs a partir de 500 L/s. Quando considerados os custos de operação, a EAP manteve-se mais econômica para toda a faixa de vazão estudada (80 a 750 L/s).
- Quando desconsiderado o custo de complementação energética para a Secagem Térmica, esta passa a ser mais econômica que a EAP para ETEs com vazões acima de 580 L/s.

Apresentam-se, a seguir, mais algumas considerações de destaque referentes aos resultados dos Objetivos Específicos A e B:

- Os custos com complementação energética para a secagem térmica representaram quase 50 % dos custos operacionais desta alternativa, mesmo considerando-se o pleno aproveitamento do biogás produzido nos reatores UASB. Entretanto, destaca-se que os outros insumos (pessoal, manutenção e energia elétrica) também elevaram significativamente o OPEX da secagem térmica, comparativamente à EAP. Uma das razões

para isto é que a EAP exige menor grau de sofisticação e atenção operacional, sendo a própria cal o principal custo desta alternativa.

- Destacou-se, também, o custo com pessoal referente às centrífugas, que representou 65 % dos custos operacionais. Os produtos químicos (polímero) foram o segundo item mais oneroso, representando 21 %. O custo com manutenção também foi relativamente alto, superior aos valores usuais de literatura, equiparando-se ao custo com energia elétrica.
- Quanto ao regime de operação das centrífugas e secadores térmicos, foram evitados os horários de ponta (período de 3 horas em que o custo de energia elétrica é elevado) e o período noturno (das 22:00 hr às 06:00 hr), restando, portanto, no máximo 13 horas diárias para fins de pré-dimensionamento. Apesar de não ter sido realizada uma análise comparativa com regimes de funcionamento mais prolongados e equipamentos menores, acredita-se que a medida adotada é mais vantajosa, já que o custo de operação se mostrou bastante representativo em relação ao custo dos equipamentos.
- Acredita-se que as capacidades dos equipamentos consideradas neste trabalho podem servir como uma referência de ordem de grandeza. Essas foram adotadas de modo a manterem regimes de operação inferiores a 13 h/d. Como os resultados de custo de implantação assemelharam-se a outros estudos, e as inclinações das curvas de custo (CAPEX + OPEX) não destoaram das demais alternativas, entende-se que os resultados obtidos apresentaram-se dentro da normalidade. Em suma, para ETEs com vazões de 80 a 240 L/s adotaram-se centrífugas de 10 m³/h, e, a partir de 320 L/s, 30 m³/h. Para as vazões entre 240 L/s e 320 L/s, poderia ser adotado um valor médio. Quanto aos secadores térmicos, mantiveram-se as vazões limítrofes mencionadas e as capacidades adotadas foram de, respectivamente, 2.000 e 4.500 kg/h (em massa de lodo a 20 % de ST).

Por fim, quanto às Ferramentas de Auxílio em Estudos de Concepção (Objetivo Específico C), foram desenvolvidas considerando-se ETEs com reatores UASB + Pós-tratamento aeróbio e os parâmetros de dimensionamento apresentados na Tabela 19. Apresentaram-se 4 Ferramentas: F1) Funções custo das alternativas de desaguamento e higienização de lodo; F2) Custos de implantação e operação de

alternativas de desaguamento de lodo; F3) Custos de implantação e operação de alternativas de higienização de lodo; F4) Custos totais, requisitos de área e destinação de lodo para diferentes alternativas de tratamento de lodo.

A F1 permite a estimativa do CAPEX, CAPEX + OPEX (considerando-se 15 anos de operação) e OPEX (pela diferença dos itens anteriores) de diferentes alternativas de desaguamento e higienização de lodo, para qualquer vazão dentro do intervalo sugerido na própria tabela. As F2 e F3 permitem, além de uma estimativa direta do custo de implantação, o cálculo do OPEX em VPL para diferentes valores de horizonte de projeto e taxas de juros, uma vez que apresenta o custo anual de operação. Já a ferramenta F4, possibilita estimativas de custo de aquisição de área e de transporte e disposição final do lodo, itens de grande variabilidade regional e que podem ser decisivos em Estudos de Concepção.

Desta forma, o uso complementar das Ferramentas permite a aplicação em uma ampla gama de situações, variando-se a vazão, condições econômicas e até logísticas de cada realidade.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES

Quanto às investigações de questões relacionadas ao dimensionamento de estruturas de tratamento de lodo (Objetivo Específico A), concluíram-se:

- Os coeficientes de produção de sólidos (kgST/kgDQOaplicada) provenientes de Lodos Ativados e Filtros Biológicos Percoladores como pós-tratamento de reatores UASB podem ser considerados similares;
- Apresentaram-se diferentes alternativas de fluxograma da fase sólida, em ETEs com reatores UASB + Pós-tratamento aeróbio, para contornar as dificuldades operacionais do descarte de lodo aeróbio de excesso nos reatores UASB (para adensamento e digestão);
- Tempo de operação de 13 h/d pode ser um valor máximo de referência para o dimensionamento econômico de equipamentos de desaguamento de lodo, pois permite o “desligamento” em horas que a operação é mais onerosa;
- Tanques de Equalização de lodo podem ser dimensionados com TDH inversamente proporcional à quantidade de lodo produzido, superiores ao tempo em que as centrífugas ficam fora de operação e, preferencialmente, inferiores a 24 horas;
- O dimensionamento de leitos de secagem pode ser otimizado, preferencialmente pela redução do tempo de ciclo, se considerados o uso de coberturas e o teor de sólidos que se pretende atingir, para a etapa seguinte de tratamento do lodo.
- Foi proposta uma metodologia de cálculo para a área de pátios de higienização do lodo por Estabilização Alcalina Prolongada, análoga à dos leitos de secagem, com parâmetros de até 350 kgST/m² e tempo de ciclo de 1 ano.

Já quanto a avaliação dos custos de desaguamento e higienização de lodo (Objetivo Específico B), as conclusões obtidas, desconsiderando-se os custos de aquisição de área e transporte e disposição final do lodo, foram:

- O CAPEX dos leitos de secagem superou o das centrífugas para ETEs com vazões acima de 80 L/s. Porém, considerando-se CAPEX + OPEX, os leitos mantiveram-se mais econômicos para toda a faixa de vazão em que foram considerados (5 a 160 L/s);
- A opção mista de desaguamento, com 1/3 do lodo sendo desaguado em leitos de secagem e 2/3 em centrífugas, apresentou-se mais onerosa que cada opção individualmente;
- A consideração da EAP, após o desaguamento, elevou de 80 para 130 L/s a vazão em que o CAPEX dos leitos de secagem passa a ser superior ao das centrífugas;
- Os Wetlands Construídos para Lodo apresentaram CAPEX superior ao das centrífugas para ETEs acima de 120 L/s, mas, quando considerado CAPEX + OPEX, resultaram na alternativa de desaguamento mais econômica;
- A EAP apresentou-se mais econômica que a Secagem Térmica para ETEs de até 500 L/s, em termos de CAPEX, e para toda a faixa de vazão quando considerado CAPEX + OPEX;
- A complementação energética foi o principal custo operacional da secagem térmica (média de 46 %), mesmo com o aproveitamento pleno do biogás produzido nos reatores UASB. Para vazões de 80 a 240 L/s, o custo de pessoal também foi bastante representativo (média de 30 %);
- O principal custo na operação das centrífugas foi de pessoal (média de 65 %), seguido pelos produtos químicos (21 %), energia elétrica (8 %) e manutenção (6 %).

Finalmente, quanto às Ferramentas de Auxílio em Estudos de Concepção (Objetivo Específico C), concluiu-se:

- Desenvolveram-se, neste estudo, 4 ferramentas (F1, F2, F3 e F4) que permitem a avaliação econômica de alternativas de desaguamento e higienização de lodo proveniente de ETEs com reatores UASB + Pós-tratamento aeróbio. Juntas, as ferramentas podem contemplar diversas realidades, variando-se: vazão da ETE, horizonte de projeto, taxas de juros e custos de aquisição de área e destinação final do lodo.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Tendo-se verificado algumas questões que, ao longo deste estudo, mostraram-se de maior complexidade ou que fugiam do escopo desta dissertação, mas que poderiam enriquecer o conhecimento científico a respeito do processamento e custos associados ao tratamento de lodo de esgoto, fazem-se, a seguir, algumas recomendações de temas para trabalhos futuros.

- Desenvolver mais estudos relativos a coeficientes de produção de sólidos em reatores UASB e sistemas UASB + Pós-tratamento aeróbio;
- Avaliar diferentes fluxogramas da fase sólida em ETEs com reatores UASB e pós-tratamento aeróbio, como a possibilidade de utilização de decantador secundário para adensamento de lodo aeróbio de excesso, relativamente bem estabilizado, e a mistura dos lodos anaeróbio e aeróbio de excesso em tanque de equalização, suprimindo a etapa de digestão do lodo aeróbio previamente ao desaguamento;
- Estudar mecanismos de mistura em Tanques de Equalização e da energia necessária para manter o lodo homogeneizado, bem como novas configurações de tanques visando melhor eficiência operacional;
- Estudar alternativas de energia complementar ao biogás para a Secagem Térmica de lodo em ETEs com reatores UASB + pós-tratamento aeróbio, bem como realizar um aprofundamento nos cálculos de consumo energético desta alternativa;
- Elaborar composições unitárias, expressas em R\$/m³.h⁻¹ de lodo processado (por exemplo), de custos de operação de sistemas de tratamento de lodo;
- Estudar mais a fundo o ponto ótimo de regime de operação X porte dos equipamentos mecânicos de tratamento de lodo, em termos técnico-econômicos e operacionais;
- Elaborar, a partir das planilhas desenvolvidas no presente estudo, um software para a avaliação econômica de alternativas de desaguamento e higienização de lodo, tendo como principais dados de entrada a vazão, a concentração de DQO e o coeficiente de produção de sólidos.

REFERÊNCIAS

- ALBRECHT EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA. **Contato pessoal**. Joinville-SC, março de 2018.
- ALFA LAVAL. **Catálogo técnico** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: <pedrolwcerqueira@gmail.com>. Outubro de 2018.
- ALMEIDA, P. G. S.; RIBEIRO, T. B.; SILVA, B. S.; AZEVEDO, L. S.; CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 6: qualidade do efluente. **Revista DAE – Edição especial**, v. 66, n. 214, p. 90-108, 2018.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa 414/2010 – Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 15 set. 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>>. Acesso em setembro de 2018.
- AISSE, M. M.; ALÉM SOBRINHO, P. **Tratamento de efluentes de Reatores Anaeróbios**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Universidade de São Paulo, 2002.
- AISSE, M. M.; ANDREOLI, F. N. Estudo da desidratação do lodo anaeróbio, obtido em reator tipo Ralf, através do uso de leito de secagem e de centrifuga tipo decanter. I Seminário sobre Gerenciamento de Biossólidos do Mercosul, 1998. **Anais...** Curitiba: SANEPAR, 1998.
- AISSE, M. M.; LOBATO, M. B.; JURGENSEN, D.; PENHA, R. C. R.; ALÉM SOBRINHO, P. Estudo econômico comparativo de sistemas de tratamento de efluentes anaeróbios no estado do Paraná (Brasil). XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2002. **Anais...** Cancún: AIDIS, 2002.
- AISSE, M. M.; van HAANDEL, A.; von SPERLING, M.; CAMPOS, J. R.; CORAUCCI FILHO, B.; ALÉM SOBRINHO, P. **Tratamento e destino final do lodo gerado em reatores anaeróbios**. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). Tratamento de Esgotos Sanitários por Processos Anaeróbios e Disposição Controlada no Solo. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p.271-300.
- ALÉM SOBRINHO, P. A.; JORDÃO, R. P. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios – Uma análise crítica. In: CHERNICHARO, C. A. L. (Coord.) **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico - PROSAB, 2001. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/apoio-e-financiamento-externa/historico-de-programa/prosab/produtos>>. Acesso em agosto de 2018.
- ALÉM SOBRINHO, P. A.; TSUTIYA, M. T. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. 2ª Ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- AMARAL, K. G. C. **Avaliação da sustentabilidade no gerenciamento do lodo e biogás, em estações de tratamento de esgotos, utilizando a técnica de ACV**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná. 2018.
- ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CHERUBINI, C.; TELES, C. R.; CARNEIRO, C.; FERNANDES, F. Higienização do lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord). **Resíduos**

Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. p. 87-117 (Cap 4).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12.209:** Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BANCO CENTRAL DO BRASIL - BCB. **Focus: Relatório de Mercado - 31 de agosto de 2018.** Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/pec/GCI/PORT/readout/R20180831.pdf>>. Acesso em setembro de 2018.

BARÉA, P. B. **Desaguamento e higienização de lodo de esgotos sanitários: pré-dimensionamento e estimativas de custos de implantação.** Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR, 2013.

BASTOS, R. K. X.; ASSUNÇÃO, F. A. L.; ROSA, A. P.; HENRIQUE, C. S.; SOUZA, A. C. **Gerenciamento de lodo em um sistema UASB + BF.** 2006. (Congresso)

BEECHER, N. Moving forward the sustainabel and welcome uses of a global resource. In: LEBALANC, R. J.; MATTHEWS, P.; RICHARD, R. P. (Ed). **Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge ans Biossolids Management.** Malta: Progree Press, 2008.

BIELSCHOWSKY, M. C. **Modelo de gerenciamento de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos: aplicação do caso da bacia da baía de Guanabara.** Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2014.

BITTENCOURT, S. **Gestão de processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: aplicabilidade da Resolução CONAMA 357/06.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná. 2014.

BITTENCOURT, S.; AISSE, M. M.; SERRAT, B. M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do Paraná, Brasil. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.22, n.6. Rio de Janeiro: ABES, 2017a. p. 1129-1139

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M. Regulamentação brasileira quanto à frequência de monitoramento de lodo de esgoto para uso agrícola: estudo de caso do estado do Paraná. São Paulo: **Revista DAE**, n. 203, v. 65, p. 21-31, mai/ago. 2017b.

BRASIL. Decreto nº 7983 de 8 de abril de 2013. Estabelece regras e critérios para elaboração do orçamento de referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos dos orçamentos da União, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 09 abril. 2013.

BRASIL. Lei 12.305 de 2 agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama n.375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 ago. 2006.

BRASIL. Ministério das Cidades: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA). **Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB):** Mais Saúde com Qualidade de Vida e Cidadania. Brasília, 2014. 215p. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/PlanSaB/plansab_texto_editado_para_download.pdf>. Acesso em: 08/09/2017.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL – CEF. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil - SINAPI**: Manual de metodologias e conceitos. v. 2. 2014.

CANZIANI, J. R. F.; OSAKI, M.; MASSARDO, M.; PEGORINI, E.S. Análise Econômica para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto da ETE-Belém. **SANARE**, Curitiba, janeiro a junho de 1999, v. 11, p. 51-58

CARMONA, J. C. L. **Recuperação de nitrogênio e fósforo na forma de estruvita a partir de lodo gerado em processo biológico de tratamento de esgoto**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-01092017-144919/>>. Acesso em: agosto, 2018.

CASSINI, S. T.; CHERNICHARO, C. A. L.; ANDREOLI, C. V.; FRANÇA, F.; BORGES, E. S. M.; GONÇALVES, R. F. Hidrólise e atividade anaeróbia em lodos. In: CASSINI, S. T (Coordenador). **Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2003. p. 12-52 (Cap. 2).

CERQUEIRA, P. L. W.; AISSE, M. M. Dimensionamento de leitos de secagem para desaguamento de lodo aneróbio: uma análise crítica. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017. **Anais...** São Paulo: ABES, 2017.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016. 379p (Volume 5)

CHERNICHARO, C. A. L.; RIBEIRO, T. B.; GARCIA, G. B.; LERMONTOV, A.; PLATZER, C. J.; POSSETI, G. R. C.; ROSSETO, M. A. L. L. R. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. São Paulo: **Revista DAE**, nº 213, v. 66, p. 5-19, out/dez. 2018

CHERNICHARO C. A. L.; van LIER, J.; NOYOLA, A.; RIBEIRO, T. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**. 2015.

DOMINIAK, D.; CHRISTEN, M. L.; KEIDING, K.; NIELSEN, P. H. Sludge quality aspects of full-scale reed bed drainage. **Water Research**, nº 45, 2011. p. 6453 – 6460.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual Prático para Compostagem de Biossólidos**. Universidade Estadual de Londrina. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico - PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 1999. 84 p.

FERNANDES, F.; SOUZA, S. G. de. Estabilização de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. p.29-55.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. FRANÇA, M.; CHERUBINI, C. Desinfecção e Secagem Térmica do lodo de esgoto anaeróbio em leito de secagem pelo uso de biogás. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003. **Anais...** Joinville: ABES, 2003.

FLORIPES, T. C.; CHERNICHARO, C. A. L.; MOTA FILHO, C. R. Avaliação do descarte de excesso de lodo secundário de FBP sobre o desempenho de reatores UASB em escala plena: estudo de caso da ETE Laboreaux – Itabira-MG. São Paulo: **Revista DAE**, nº 211, v. 66, p. 89-104, jul/set. 2018.

FORBES, R. H. Solids Process Design and Management, Chapter 5: Design Approach. **Water Environmental Federation**. Editors: Timothy G. Shea and Michael D. Moore. 2012. p.105-146.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L. van HAANDEL, A.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. Fundamentos do Tratamento Anaeróbio. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 29-52.

GONÇALVES, R. F.; LUDUCIVE, M.; LIMA, M. R. P.; RAMALDES, D. L. C.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; ANDREOLI, C. V. Desidratação de lodo de esgotos. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. p.57-86.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; von SPERLING, M. Remoção da umidade de lodo de esgotos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2014. p.157-258 (Cap. 5).

GRUPO PIERALISI. **Consulta técnica** [mensagem pessoal]. Mensagens recebida por: <pedrolwcerqueira@gmail.com>. Dezembro de 2018.

IMHOFF, K. **Manual de tratamento de águas residuárias**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1986.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Demográfico de 2010**. Disponível em:< <https://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em Julho de 2018.

JORDÃO, E. P. Eficiência energética em tratamento de esgotos. São Paulo, **Revista DAE**, n.177, p. 15-19, maio, 2008.

JORDÃO, E. P. É possível economizar energia nas estações de tratamento de esgoto?.Ponto de Vista. São Paulo, **Revista DAE**, n. 200, p. 6-12, set./dez. 2015.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8ª Edição. Rio de Janeiro: ABES, 2017. 916 p.

KATO, M. T.; ANDRADE NETO, C. O.; CHERNICHARO, C. A. L.; FORESTI, E.; CYBIS, L. F. Configurações de reatores anaeróbios. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 53-100.

KOLECKA, K.; OBARSKA-PEMPKOWIAK, H.; GAJEWSKA, M. Polish experience in operation of sludge treatment reed beds. **Ecological Engineering**, nº 120, 2018. p. 405 – 410.

LETTINGA, G.; ROERSMA, R.; GRIN, P. Anaerobic Treatment of Raw Domestic Sewage at Ambient Temperatures Using a Granular Bed UASB Reactor. **Biotchnology and Bioengineering**, vol. XXV, 1983. p. 1701-1723

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgotos domésticos**. Tese de Doutorado. UFMG – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte – MG, 2011.

LOBATO, L. C. S.; RIBEIRO, T. B.; SILVA, B. S.; flórez, c. a. d.; neves, p. n. p.; CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 3: Gerenciamento de lodo e espuma. **Revista DAE – Edição especial**, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

LUCCA, P. V.; SAMWAYS, G.; AISSE, M. M. Estudo dos custos de implantação e operação de coleta e tratamento de esgotos sanitário para pequenas comunidades. 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011. **Anais...** Porto Alegre: ABES, 2011.

LUDUVICE, M.; FERNADES, F. Principais tipos de transformação e descarte do lodo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2014. p.397-420 (Cap. 9).

LUDUVICE, M. Processos de Estabilização de Lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2014. p.121-156 (Cap. 4).

MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 7ª Edição. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2007.

MANJATE, E. **Behaviour evaluation of vertical flow constructed wetlands for treatment of domestic sewage and septic tank sludge**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG, 2016.

MARTINS, C. M.; HARMEL, D. **Proposição de novas técnicas para a caracterização de cal hidratada para a construção civil em contrapartida às especificações da NBR 7175**. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. 2012.

McCARTY, P. L. **Anaerobic Processes**. Short Course on Design Aspects of Biological Treatment, International Association of Water Pollution Research. England, 1974.

MIKI, M. K.; ALÉM SOBRINHO, P.; van HAANDEL, A. C. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos - condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. In: ANDREOLI, C. V (Coord.). **Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p.49-107 (Cap. 4).

MIKI, M. K. Preparador de polímero em pó para condicionamento de lodo em ETE. **Revista Hydro**, ano XI, nº 128, junho 2017. Aranda Editora. 2017. Disponível em:<<http://www.arandanet.com.br/assets/revistas/hydro/2017/junho/index.php#page=12>>. Acesso em agosto, 2018.

MIRANDA, L. P.; OLIVEIRA, C. R.; GONÇALVES, R. F. Fracionamento do descarte de lodo de excesso em reatores UASB visando a otimização da operacionalização dos leitos de secagem. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017. **Anais...** São Paulo: ABES, 2017.

MORETTO, S.R.O.; PUPPI, R.F.K.; PEGORINI, E.S.; INOUE, P.S.; OLIVEIRA, G.G. Medidas da densidade do lodo proveniente de digestão anaeróbia. 2011. **Revista Hypertexto**. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2011_1/DensidadeLodo/index.htm>. Acesso em: 11/6/2018

MORTARA, F. C. **Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, S. V. W. B. **Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário**. Tese de doutorado. Departamento de Administração, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, 2004.

PACHECO, R. P. **Custos para implantação de sistemas de esgotamento sanitário**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. 2011.

PARANÁ. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Resolução SEMA n. 21, de 30 de junho de 2009. Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento. **Diário Oficial do Estado do Paraná**, Curitiba, PR, 30 jun. 2009.

PEDROZA, M. M.; MOREIRA, E. A.; CAVALCANTI, P. F. F.; ALÉM SOBRINHO, P.; ANDREOLI, C. V.; van HAANDEL, A. Aplicação de Leitões de Secagem para Secagem de Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Esgotos. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p.109-158 (Cap. 5).

PEGORINI, E.S.; ANDREOLI, C. V., SOUZA, M.L.P.; FERNANDES, F. DOETZER, B; FERREIRA, A. C. Produção e disposição final de lodo de esgoto na reciclagem agrícola da região metropolitana de Curitiba – PR. In: Simpósio sobre Biossólidos no Âmbito do Mercosul, 2003. **Anais...** São Paulo, 2003.

PINTO, M. T. Higienização de Lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2014. p.259-296 (Cap. 6).

POMPEO, R. P. **Influência da estocagem prolongada de lodos de esgoto, em diferentes condições operacionais, na redução de patógenos, visando a reciclagem agrícola**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná. 2015.

PONTES, P. P.; CHERNICHARO, C. A. L. Efeito do retorno de lodo aeróbio sobre as características da biomassa presente em reatores UASB tratando esgoto sanitário. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n.2. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 223-234

POSSETTI, G. R. C.; JASINSKI, V. P.; ANDREOLI, C. V.; BITTENCOURT, S.; CARNEIRO, C. Sistema térmico de higienização de lodo de esgoto movido a biogás para ETEs de médio e pequeno porte. XV Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SILUBESA, 2012. **Anais...** Belo Horizonte: APESB, ABES, 2012.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; GERVASONI, R.; ALTHOFF, C. A.; CARNEIRO, C. Investigação Experimental de um Sistema Piloto de Secagem Térmica de Lodo Movido a Biogás. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2015.

PRATA, L. V. **Método para a seleção de Secadores Térmicos de lodo proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto**. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Católica do Paraná. Curitiba, 2016.

REAMI, L. **Aplicação de métodos multicriteriais de apoio à tomada de decisão para escolha de tratamento de esgoto: Estudo de caso de Restinga SP**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2011.

REAMI, L.; CORAUCCI FILHO, B. Estimativas de custos unitários de implantação de estações de tratamento de esgotos. In: 26º Encontro Técnico AESabesp/Fenasan, Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, 2015. **Anais...** São Paulo: AESABESP, 2015.

ROSA, A. P.; CHERNICHARO, C. A. L.; MELO, G. C. B. Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. **Revista DAE**, n. 140, p. 55-62, jan./abr. 2015.

ROSA, A. P.; CONSECA, J. A.; FULLANA, A.; MELO, G. C. B.; BORGES, J. M.; CHERNICHARO, C. A. L. Energy potential and alternative usages of biogás and sludge from

UASB reactors: case study of the Laboreaux wastewater treatment plant. **Water Science & Technology**, 73.7. p. 1680-1690. 2016.

ROSS, B. Z. L. **Escuma de reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico em escala real: produção, caracterização e proposição de parâmetros para seu gerenciamento.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná. 2015.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Norma Técnica Sabesp NTS 287:** Sistema de desaguamento de lodo utilizando centrífuga tipo decanter. São Paulo: SABESP, 2011.

SALIBA, P. D.; von SPERLING, M. Performance evaluation of large sewage treatment plant in Brazil, consisting of UASB reactor followed by activated sludge. **Water Science & Technology**, IWA Publishing. 2017.

SAMPAIO, A. O. Afinal, queremos ou não viabilizar o uso agrícola do lodo produzido em estações de esgoto sanitário? Uma avaliação crítica da Resolução CONAMA 375. Nota técnica. São Paulo: **Revista DAE**, nº 193, set/dez 2013.

SANEAGO – Companhia de Saneamento de Goiás. **Tabela de Preços: Composições Analíticas**, fevereiro, 2017. Disponível em: <<http://www.saneago.com.br/2016/arquivos/construcao-civil/Composicoes-Analiticas.pdf>>. Acesso em dezembro de 2018.

SANEAGO – Companhia de Saneamento de Goiás. **Contato pessoal.** Superintendência de Estudos e Projetos – SUESP, Gerência de Gestão de Projetos do Entorno – E-GGE (Sede). Goiânia, novembro, 2018.

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. **Contato pessoal.** Gerência de Tratamento de Esgoto - GTESG/ Gerência de Processo Esgoto – GPEG. Curitiba, jun./dez., 2018.

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. **Manual de Projetos de Saneamento – MPS.** 2017. Disponível em: <<http://site.sanepar.com.br/informacoes-tecnicas/1749>>. Acesso em: novembro, 2018.

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. **Tabela de Preços Unitários Compostos**, junho, 2018b. Disponível em: <http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/informacoes-tecnicas/tabelas-de-precos/jun2018_s_bdi-contratos_mos_4a_ed_v00_publica.pdf>. Acesso em dezembro de 2018.

SILVA, B. S. **Desempenho de reator UASB em escala plena no tratamento de esgoto sanitário e adensamento simultâneo de lodo ativado em excesso do pós-tratamento.** Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2018.

SILVA, S. M. C. P.; FERNANDES, F.; SOCCOL, V. T.; MORITA, D. M. Principais Contaminantes do lodo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2014. p.67-117 (Cap. 3).

SILVA FILHO, J. A.; van HAANDEL, A. C. Estabilização de lodo de pós-tratamento anaeróbio na unidade de pré-tratamento anaeróbio. Artigo Técnico. **Revista DAE**, n. 194, janeiro-abril, 2014.

SINDUSCON - SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Custo Unitário Básico (CUB/m²): principais aspectos**. Belo Horizonte: SINDUSCON-MG, 2007. 112p.

SOARES, S. R. A. Modelagem do processo de desidratação de lodo anaeróbico em leitos de secagem simulados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.5, n.2, p.313-319, 2001.

SUNTTI, C.; MAGRI, M. E.; PHILIPPI, L. S. Filtros plantados com macrófitas de fluxo vertical aplicados na mineralização e desaguamento de lodo de tanque séptico. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 1. ABES, 2011. p. 63 – 72.

TCHOBANOGLIOUS, G.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. 5th Ed. Metcalf & Eddy/AECOM. New York: Mc Graw-Hill, 2014. 2018p.

UGGETTI, E.; FERRER, I.; LLORENS, E.; GARCÍA, J. Sludge treatment Wetlands: A review on the state of the art. **Biosource technology**. n^o 101, 2010. p. 2905 – 2912.

UNESCO - UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2017 – Resumo Executivo**. WWAP, 2017. Disponível em <<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002475/247552por.pdf>>. Acesso em agosto de 2018.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **A plain English guide to the EPA 503 part biosolids rule**. Washington: USEPA, 1994. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/a_plain_english_guide_to_the_epa_part_503_biosolids_rule.pdf>. Acesso em: 28/10/2014.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge**. USEPA, 2003. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-04/documents/control_of_pathogens_and_vector_attraction_in_sewage_sludge_july_2003.pdf>. Acesso em: 29/10/2017.

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de Tratamento de Esgoto no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

VAN HAANDEL, A. C.; CAVALCANTI, P. F. F. Geração e Composição de Lodo de Sistemas de Tratamento de Esgotos Sanitários. In: ANDREOLI, c. v. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. 1^a ed. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

VAN HAANDEL, A. C.; CAVALCANTI, P. F. F.; MEDEIROS, E. J. S.; SILVA, J. K. M. Estratégia de descarga de lodo de excesso de reatores UASB tratando esgoto municipal. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1999.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbico de esgotos: um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande: Epgraf, 1994.

VINCENT, J.; MOLLE, P.; WISNIEWSKI, C.; LIÉNARD, A. Sludge drying reed beds for septage treatment: Towards design and operation recommendations. **Bioresource Technology**, n^o 102, 2011. p. 8327 – 8330.

VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2014. p.11-14 (Cap. 1).

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2014. p.15-66 (Cap. 2).

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 1ª edição. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996. (Volume 1)

VON SPERLING, M. **Lodos ativados**. 4ª Ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: SEGRAC, 2016.

WAGNER, L. G.; POSSETTI, G. R. C.; CARNEIRO, C.; URBANETZ JUNIOR, J. Sistema térmico de higienização e secagem de lodo de esgoto movido a energia solar e biogás. 10º Congresso sobre Geração Distribuída de Energia e Meio Ambiente Rural – AGRENER GD, 2015. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo – USP, 2015.

WETLANDS CONSTRUÍDOS. **Orçamento-Dissertação** [mensagem recebida]. Mensagem recebida por: <pedrolwcerqueira@gmail.com>. Novembro de 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - ENTREVISTAS COM PROFISSIONAIS DO SANEAMENTO

Perguntas realizadas aos profissionais da SANEPAR e da SANEAGO:

- a) Quais os procedimentos adotados para o gerenciamento do lodo de excesso nas ETEs com reatores UASB e pós-tratamento aeróbio?
- b) Como têm sido contornadas as dificuldades operacionais relacionadas ao descarte de lodo aeróbio de excesso aos reatores UASB?
- c) Qual o regime de operação diário das centrífugas?
- d) Quais os critérios para a definição do regime ideal de operação de centrífugas e secadores térmicos?
- e) Como podem ser dimensionados os Tanques de Equalização para atendimento aos requisitos técnicos do desaguamento em centrífugas?
- f) Há alguma recomendação quanto ao tempo de detenção nos Tanques de Equalização?
- g) Qual o sistema de mistura do lodo nos Tanques de Equalização, e as principais dificuldades encontradas nesta operação?
- h) Qual o tempo de ciclo geralmente adotado para o desaguamento em leitos de secagem, e o teor de sólidos final obtido no lodo?
- i) O tempo de ciclo e/ou o teor de sólidos final são alterados em épocas de chuva? Qual o impacto disso na ETE?
- j) Como é feita a mistura de cal ao lodo para a higienização por EAP?
- k) Como são dispostos os lotes de lodo em pátio, após a caleação? Quais os equipamentos utilizados?

Perguntas realizadas aos fornecedores de centrífugas e secadores térmicos:

- a) Quais as capacidades limitantes dos equipamentos, e as recomendadas para as vazões de lodo consideradas neste estudo?
- b) Qual o regime de funcionamento recomendado para o funcionamento adequado dos equipamentos?
- c) Quais os requisitos de energia elétrica de cada equipamento?

APÊNDICE 2 - ÍNDICE NACIONAL DE CUSTOS DA CONSTRUÇÃO

Apresentam-se, na Tabela A2.1, os valores históricos do INCC utilizados para atualização dos custos referenciais considerados neste trabalho. Cada valor representa o índice acumulado dos 12 meses anteriores ao valor divulgado no mês.

TABELA A2.1 - DADOS HISTÓRICOS DO INCC-DI (% 12 MESES)

| INCC – DI | Ano | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| jan | 6,86 | 8,34 | 6,99 | 6,92 | 6,14 | 4,15 |
| fev | 7,18 | 8,04 | 6,98 | 7,17 | 6,26 | 3,60 |
| mar | 7,18 | 7,80 | 7,34 | 7,18 | 5,76 | 3,69 |
| abr | 7,16 | 7,96 | 6,89 | 7,28 | 5,16 | 4,02 |
| mai | 7,56 | 7,75 | 5,74 | 6,36 | 5,73 | 3,60 |
| jun | 8,00 | 7,23 | 6,97 | 6,46 | 4,70 | 3,64 |
| jul | 7,80 | 7,52 | 6,76 | 6,40 | 4,50 | 3,96 |
| ago | 7,86 | 7,26 | 7,30 | 6,09 | 4,57 | 3,75 |
| set | 8,09 | 6,96 | 7,37 | 6,21 | 4,28 | 3,92 |
| out | 8,14 | 6,87 | 7,57 | 6,05 | 4,38 | 3,96 |
| nov | 8,16 | 6,97 | 7,46 | 5,87 | 4,54 | 3,78 |
| dez | 8,09 | 6,95 | 7,48 | 6,13 | 4,25 | 3,84 |

FONTE: Adaptado de SINDUSCON-PR (2019)¹.

NOTA: Considerou-se também o índice de janeiro de 2019, de 4,03 %.

Na sequência apresentam-se os dados utilizados para cálculo.

TABELA A2.2 - DADOS DE CÁLCULO PARA ATUALIZAÇÃO DE CUSTOS REFERENCIAIS

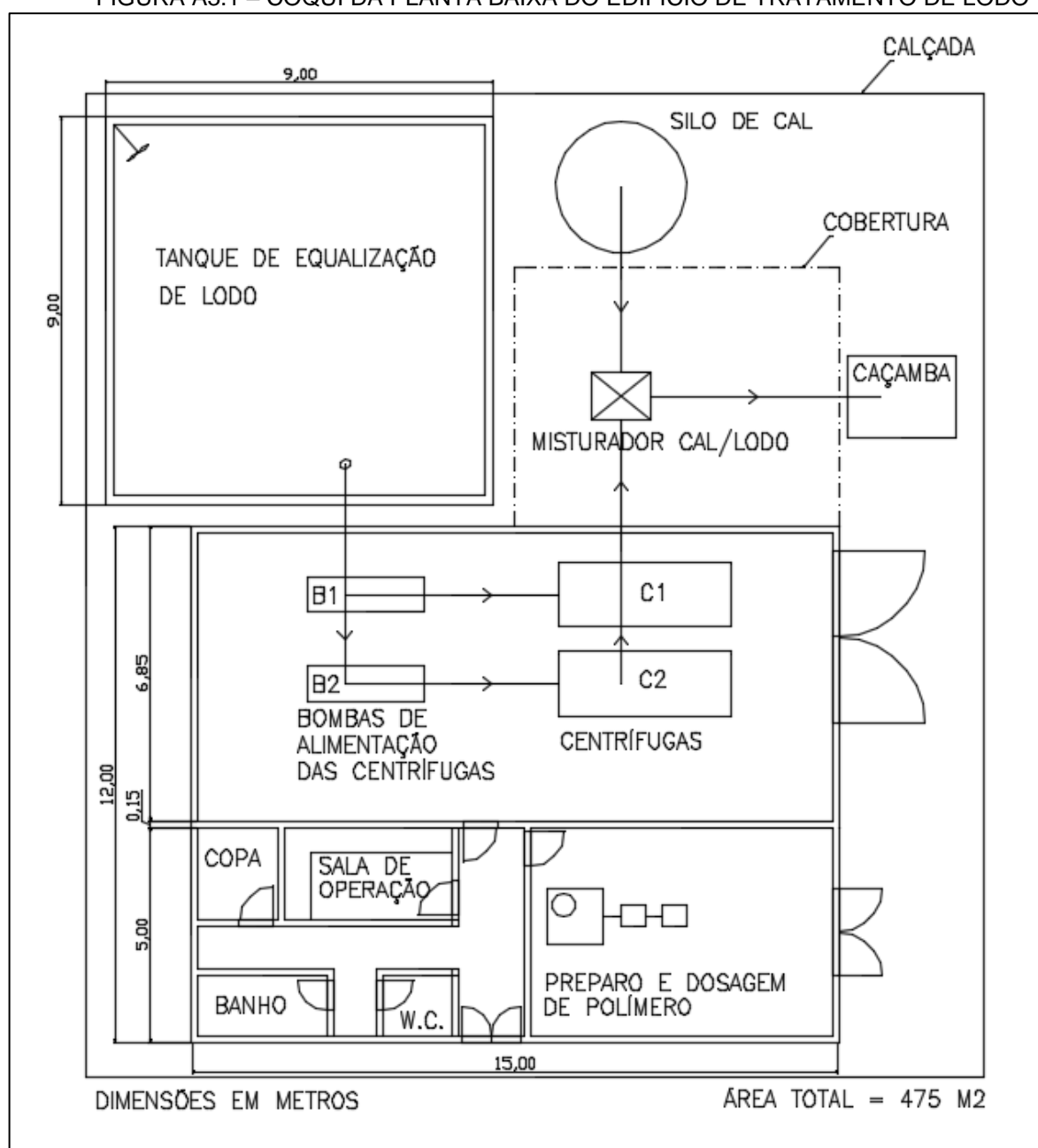
| Unidade | Referência | Período | INCC médio | "n" anos |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------|------------|----------|
| Leitos de Secagem | SANEAGO (2018) | fev/17 - jan/19 | 4,34 | 1,92 |
| | Baréa (2013) | jan/13 - jan/19 | 6,23 | 6 |
| | Pacheco (2011) | mai/11 - jan/19 | 6,53 | 7,58 |
| Edifício de Desidratação de Lodo | SANEAGO (2018) - ETE 01 | fev/17 - jan/19 | 4,34 | 1,92 |
| | SANEAGO (2018) - ETE 02 | ago/14 - jan/19 | 5,71 | 4,33 |

¹ SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO NO ESTADO DO PARANÁ - SINDUSCON-PR. Dados disponíveis em: <<https://sindusconpr.com.br/incc-di-fgv-310-p>>. Acesso em março de 2019. 2019.

APÊNDICE 3 - PLANTA DO EDIFÍCIO DE DESIDRATAÇÃO DE LODO

Apresenta-se, na Figura A3.1, um croqui da Planta Baixa do EDL considerado no presente estudo, conforme projetos fornecidos pela SANEAGO. O desenho abaixo refere-se ao EDL para centrífugas de 36 m³/h (duas unidades, sendo uma de reserva). O EDL para a centrífuga de 10 m³/h foi bastante semelhante, reduzindo-se as dimensões do Tanque de Equalização e da área de acondicionamento das centrífugas, totalizando cerca de 420 m².

FIGURA A3.1 – COQUI DA PLANTA BAIXA DO EDIFÍCIO DE TRATAMENTO DE LODO



APÊNDICE 4 - TARIFAS DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

TABELA A4.1 – TARIFAS DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA O SETOR DE SANEAMENTO, FAIXA DE TENSÃO A4, NO BRASIL EM 2018

| Empresa | Tarifa Média com Impostos (R\$/MWh) |
|--|-------------------------------------|
| AME - AMAZONAS DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S/A | 534,95 |
| BOA VISTA - RORAIMA ENERGIA S.A | 345,27 |
| CEA - COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO AMAPÁ | 468,51 |
| CEAL - COMPANHIA ENERGÉTICA DE ALAGOAS - CEAL | 401,97 |
| CEBDIS - CEB DISTRIBUIÇÃO S.A. | 476,40 |
| CEDRI - COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DA REGIÃO DE ITARIRI | 632,01 |
| CEEE-D - COMPANHIA ESTADUAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CEEE-D | 632,77 |
| CELESC-DIS - CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A | 535,55 |
| CELG-D - CELG DISTRIBUIÇÃO S.A. | 638,78 |
| CELPA - CENTRAIS ELÉTRICAS DO PARÁ S.A. - CELPA | 539,80 |
| CELPE - COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO | 361,36 |
| CEMAR - COMPANHIA ENERGÉTICA DO MARANHÃO | 474,06 |
| CEMIG-D - CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A | 542,96 |
| CEPISA - COMPANHIA ENERGÉTICA DO PIAUÍ | 554,97 |
| CEPRAG - COOPERATIVA DE ELETRICIDADE PRAIA GRANDE | 724,66 |
| CERAÇÁ - COOPERATIVA DISTRIBUIDORA DE ENERGIA VALE DO ARAÇÁ | 352,33 |
| CERAL DIS - COOPERATIVA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE ARAPOTI | 472,35 |
| CERBRANORTE - COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO DE BRAÇO DO NORTE | 482,42 |
| CERGal - COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO ANITA GARIBALDI LTDA | 627,27 |
| CERGRAL - COOPERATIVA DE ELETRICIDADE DE GRAVATAL | 496,63 |
| CERILUZ - COOPERATIVA REGIONAL DE ENERGIA E DESENVOLVIMENTO IJUÍ LTDA | 472,56 |
| CERIM - COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL ITU-MAIRINQUE | 493,85 |
| CERIPA - COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL DE ITAÍ-PARANAPANEMA-AVARÉ | 503,14 |
| CERON - CENTRAIS ELÉTRICAS DE RONDÔNIA SA CERON | 383,17 |
| CERPALO - COOPERATIVA DE ELETRICIDADE DE PAULO LOPES | 530,14 |
| CERPRO - COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL DA REGIÃO DE PROMISSÃO | 360,98 |
| CERRP - COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO DE SÃO JOSÉ | 481,12 |
| CERTAJA - COOPERATIVA REGIONAL DE ENERGIA TAQUARI JACUI | 637,60 |
| CERTEL - COOPERATIVA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA TEUTÔNIA | 472,34 |
| CERTREL - COOPERATIVA DE ENERGIA TREVISO | 514,32 |
| CFLO - COMPANHIA FORÇA E LUZ DO OESTE | 506,48 |
| CHESP - COMPANHIA HIDROELÉTRICA SÃO PATRÍCIO - CHESP | 551,21 |
| CNEE - COMPANHIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA | 439,24 |
| COCEL - COMPANHIA CAMPOLARGUENSE DE ENERGIA | 566,32 |
| COELBA - COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA | 331,36 |
| COOPERA - COOPERATIVA PIONEIRA DE ELETRIFICAÇÃO | 389,85 |
| COOPERALIANÇA - COOPERATIVA ALIANÇA | 419,25 |
| COOPERCOCAL - COOPERATIVA ENERGÉTICA COCAL | 347,62 |
| COOPERLUZ - COOPERATIVA DISTRIBUIDORA DE ENERGIA FRONTEIRA NOROESTE | 615,38 |
| COPEL-DIS - COPEL DISTRIBUIÇÃO S.A. | 561,65 |
| COPREL - COPREL COOPERATIVA DE ENERGIA | 509,08 |
| COSERN - COMPANHIA ENERGÉTICA DO RIO GRANDE DO NORTE COSERN | 459,35 |

| Empresa | Tarifa Média com Impostos (R\$/MWh) |
|--|--|
| CPFL JAGUARI - COMPANHIA JAGUARI DE ENERGIA | 465,89 |
| CPFL LESTE PAULISTA - COMPANHIA LESTE PAULISTA DE ENERGIA | 430,02 |
| CPFL MOCOCA - COMPANHIA LUZ E FORÇA DE MOCOCA | 421,93 |
| CPFL- PIRATININGA - COMPANHIA PIRATININGA DE FORÇA E LUZ | 492,39 |
| CPFL SANTA CRUZ - COMPANHIA LUZ E FORÇA SANTA CRUZ | 425,36 |
| CPFL SUL PAULISTA - COMPANHIA SUL PAULISTA DE ENERGIA | 375,15 |
| CPFL-PAULISTA - COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ | 478,51 |
| CRELUZ-D - COOPERATIVA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA CRELUZ-D | 524,14 |
| DEMEI - DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ENERGIA DE IJUÍ | 551,56 |
| DMED - DME DISTRIBUIÇÃO S.A. - DMED | 359,63 |
| EBO - ENERGISA BORBOREMA - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A | 384,74 |
| EDEVP - EMPRESA DE DISTRIBUICAO DE ENERGIA VALE PARANAPANEMA S.A. | 490,41 |
| EDP ES - ESPÍRITO SANTO DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA S.A. | 645,91 |
| EDP SP - EDP SÃO PAULO DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA S.A. | 481,93 |
| EEB - EMPRESA ELÉTRICA BRAGANTINA S.A. | 491,06 |
| ELEKTRO - ELEKTRO REDES S.A. | 525,65 |
| ELETROACRE - COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ACRE | 309,79 |
| ELETROCAR - CENTRAIS ELÉTRICAS DE CARAZINHO SA | 597,32 |
| ELETROPAULO - ELETROPAULO METROPOLITANA ELETRICIDADE DE SÃO PAULO S.A. | 446,25 |
| ELFSM - EMPRESA LUZ E FORÇA SANTA MARIA S.A. | 686,70 |
| EMG - ENERGISA MINAS GERAIS - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A. | 546,92 |
| EMS - ENERGISA MATO GROSSO DO SUL - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A. | 497,66 |
| EMT - ENERGISA MATO GROSSO - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A. | 592,87 |
| ENEL CE - COMPANHIA ENERGETICA DO CEARA | 514,36 |
| ENEL RJ - AMPLA ENERGIA E SERVIÇOS S.A. | 521,79 |
| ENF - ENERGISA NOVA FRIBURGO - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A. | 730,98 |
| EPB - ENERGISA PARAÍBA - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A | 435,41 |
| ESE - ENERGISA SERGIPE - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A | 359,82 |
| ESS - ENERGISA SUL-SUDESTE - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A. | 487,43 |
| ETO - ENERGISA TOCANTINS DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A. | 589,42 |
| FORCEL - FORÇA E LUZ CORONEL VIVIDA LTDA | 375,32 |
| HIDROPAN - HIDROPAN DISTRIBUICAO DE ENERGIA S.A. | 540,23 |
| IENERGIA - IGUAÇU DISTRIBUIDORA DE ENERGIA ELÉTRICA LTDA. | 500,05 |
| LIGHT - LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S A | 569,54 |
| RGE - RIO GRANDE ENERGIA SA | 552,56 |
| RGE SUL - RGE SUL DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A. | 610,31 |
| SULGIPE - COMPANHIA SUL SERGIPANA DE ELETRICIDADE | 462,47 |
| MÉDIA | 497,63 |
| DESVIO PADRÃO | 92,91 |

FONTE: Adaptado de ANEEL (2019)².

² ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição: Consumidores, Consumo, Receita e Tarifa Média – Empresa, Classe de Consumo e Nível de Tensão.** Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>>. Acesso em fevereiro de 2019.

APÊNDICE 5 - ORÇAMENTO PRELIMINAR DE WETLANDS PARA LODO

TABELA A5.1 - ORÇAMENTO PRELIMINAR DE WETLAND CONSTRUÍDO PARA LODO

| DESCRIÇÃO | UD | QUANT. | CUSTO UNITÁRIO (R\$) | CUSTO TOTAL (R\$) |
|--|--------------------|-----------|----------------------|-------------------|
| MOVIMENTO DE TERRA | | | | |
| ESCAVAÇÃO DE MATERIAL DE 1A CATEGORIA COM RETROESCAVADEIRA | M ³ | 2.950,00 | 7,29 | 21.505,50 |
| REGULARIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO FUNDO DE LAGOA | M ² | 968,00 | 0,50 | 484,00 |
| REGULARIZAÇÃO DAS RAMPAS DOS DIQUES | M ² | 520,00 | 0,66 | 343,20 |
| SUB-TOTAL (R\$) | | | | 22.332,70 |
| CARGA, TRANSPORTES E DESCARGA DE MATERIAL ESCAVADO (BOTA-FORA) | | | | |
| CARGA MECANIZADA (COM A PÁ FRONTAL DA RETROESCAVADEIRA) EM CAMINHÃO BASCULANTE - MATERIAL DE 1ª CATEGORIA | M ³ | 2.950,00 | 2,75 | 8.112,50 |
| *TRANSPORTE E DESCARGA DE MATERIAL DE 1ª OU 2ª CATEGORIA (M ³ X KM) - EM CAMINHÃO BASCULANTE CAP. 10 M ³ | M ³ XKM | 14.750,00 | 1,85 | 27.287,50 |
| ESPALHAMENTO DE MATERIAL EM BOTA FORA PROVENIENTE DE ESCAVAÇÃO | M ³ | 2.950,00 | 1,50 | 4.425,00 |
| SUB-TOTAL (R\$) | | | | 39.825,00 |
| IMPERMEABILIZAÇÃO | | | | |
| FILME DE POLIETILENO | M ² | 1.486,00 | 2,35 | 3.492,10 |
| SUB-TOTAL (R\$) | | | | 3.492,10 |
| DIVERSOS | | | | |
| PLANTIO DE GRAMA PLACAS COM MANUTENÇÃO POR 45 DIAS | M ² | 465,00 | 17,06 | 7.932,90 |
| LASTRO DE AREIA | M ³ | 112,16 | 132,43 | 14.852,93 |
| LASTRO DE BRITA | M ³ | 218,01 | 91,71 | 19.993,94 |
| LASTRO DE RACHÃO | M ³ | 509,10 | 121,72 | 61.967,98 |
| POÇO DE VISITA EM ANÉIS DE CONCRETO DIÂMETROS 60 CM (CHAMINÉ) E 90 CM (BALÃO), INCLUINDO ANEL TAMPÃO DE CONCRETO, PROFUNDIDADE = 2,0 M | UD | 2,00 | 1.575,15 | 3.150,30 |
| SUB-TOTAL (R\$) | | | | 107.898,05 |
| TOTAL (R\$) | | | | 173.547,85 |

Notas: *Considerado Bota-fora a 5 km de distância; Valores calculados considerando-se uma Wetland de 22 x 44 x 2 m (largura x comprimento x profundidade).

APÊNDICE 6 - PLANILHA DE CÁLCULO DAS QUANTIDADES DE LODO

Neste tópico apresentam-se as quantidades calculadas de lodo, utilizando-se a Fórmula (5) do texto da dissertação. Calculou-se também a quantidade de cal para os casos com EAP, que foi somada à massa de lodo caleado.

TABELA A6.1 – MASSA DE LODO A SER TRANSPORTADA, POR TECNOLOGIA DE TRATAMENTO E VAZÃO, EM TONELADAS POR ANO

| Vazão de Esgoto (L/s) | Produção de Sólidos (kgSST/ano) | Lodo Líquido | Leitos de Secagem | | | Opção Mista | | | | | Centrífugas | | | WCL | Secagem Térmica |
|-----------------------|---------------------------------|--------------|-------------------|-----|--------------|-----------------|----------------------|------------|-------|--------------|-------------|-------|--------------|-------|-----------------|
| | | | Lodo | Cal | Lodo Caleado | Lodo dos Leitos | Lodo das Centrífugas | Total Lodo | Cal | Lodo Caleado | Lodo | Cal | Lodo Caleado | | |
| 5 | 56.765 | 1.892 | 227 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 95 | - |
| 10 | 113.530 | 3.784 | 454 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 189 | - |
| 20 | 227.059 | 7.569 | 908 | 91 | 545 | - | - | - | - | - | - | - | - | 378 | - |
| 40 | 454.118 | 15.137 | 1.816 | 182 | 1.090 | - | - | - | - | - | - | - | - | 757 | - |
| 80 | 908.237 | - | 3.633 | 363 | 2.180 | 1.211 | 2.876 | 4.087 | 351 | 2.107 | 4.314 | 345 | 2.071 | 1.514 | 1.135 |
| 160 | 1.816.474 | - | 7.266 | 727 | 4.360 | 2.422 | 5.752 | 8.174 | 702 | 4.214 | 8.628 | 690 | 4.142 | 3.027 | 2.271 |
| 240 | 2.724.710 | - | - | - | - | 3.633 | 8.628 | 12.261 | 1.054 | 6.321 | 12.942 | 1.035 | 6.212 | 4.541 | 3.406 |
| 320 | 3.632.947 | - | - | - | - | 4.844 | 11.504 | 16.348 | 1.405 | 8.428 | 17.256 | 1.381 | 8.283 | - | 4.541 |
| 400 | 4.541.184 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 21.571 | 1.726 | 10.354 | - | 5.676 |
| 500 | 5.676.480 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 26.963 | 2.157 | 12.942 | - | 7.096 |
| 750 | 8.514.720 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 40.445 | 3.236 | 19.414 | - | 10.643 |

NOTAS: WCL = Wetlands Construídos para Lodo; Considerada a aplicação de 40 % em relação aos ST do lodo.

TABELA A6.2 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS CONSIDERADA NO LODO DE SAÍDA DA ETE, CONFORME A ORIGEM

| Origem do lodo | Concentração de ST (%) | Origem do lodo | Concentração de ST (%) |
|-------------------------------------|------------------------|--|------------------------|
| Lodo líquido removido do UASB | 3 | Lodo caleado removido dos Pátios de Cura | 50 |
| Lodo removido dos Leitos de Secagem | 25 | Lodo removido das WCLs (após 10 anos) | 60 |
| Lodo removido das Centrífugas | 20 | Lodo removido da Secagem Térmica | 80 |