

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS**

Ayana Lemos Emrich

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA GERENCIAMENTO DE LODO E
MELHORIA DE DESEMPENHO DE REATORES UASB TRATANDO ESGOTO
DOMÉSTICO**

**Belo Horizonte
2021**

Ayana Lemos Emrich

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA GERENCIAMENTO DE LODO E
MELHORIA DE DESEMPENHO DE REATORES UASB TRATANDO ESGOTO
DOMÉSTICO**

Versão Final

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais.

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Tratamento de águas residuárias

Orientador: Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

Coorientadora: Lívia Cristina da Silva Lobato

Belo Horizonte
2021

E55f Emrich, Ayana Lemos.
Ferramenta computacional para gerenciamento de lodo e melhoria de desempenho de reatores UASB tratando esgoto doméstico [recurso eletrônico] / Ayana Lemos Emrich. – 2021.
1 recurso online (ix, 89 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Carlos Augusto de Lemos Chernicharo.
Coorientadora: Lívia Cristina da Silva Lobato.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 83-89.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Saneamento - Teses.
3. Biorreatores – Teses. 4. Lodo – Saneamento - Teses. 5. Processo decisório – Teses. I. Chernicharo, Carlos Augusto de Lemos. II. Lobato, Lívia Cristina da Silva. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Letícia Alves Vieira - CRB-6/2337
Biblioteca Prof. Mário Werneck - Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE
MINAS GERAIS[ESCOLA DE
ENGENHARIA]

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS]

**ATA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO / TESE**

Às [13:30] horas do dia [30 de abril de 2021], [de forma remota, na Plataforma XXX, da internet], realizou-se a sessão pública para a defesa da [Dissertação] de [Ayana Lemos Emrich]. A presidência da sessão coube ao [Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, orientador]. Inicialmente, [o] presidente fez a apresentação da Comissão Examinadora, aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, assim constituída: [Prof. Dr. Miguel Mansur Aisse, UFPR], Prof. Dr. Marcos von Sperling, UFMG], Profa. Dra. Lívia Cristina da Silva Lobato, coorientadora, UFMG], e [Prof. Dr. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, orientador, UFMG], para julgar, em exame final, o trabalho final intitulado: ["**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA GERENCIAMENTO DE LODO E MELHORIA DE DESEMPENHO DE REATORES UASB TRATANDO ESGOTO**

DOMÉSTICO"] requisito parcial para a obtenção do Grau de MESTRE em SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, Área de Concentração: Saneamento. Após dar conhecimento aos presentes do teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, o Prof. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores e logo após, a Comissão reuniu-se, sem a presença do [candidato] e do público para julgamento e expedição do resultado final. Foram atribuídas as seguintes indicações:

Prof. Dr. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, orientador [Aprovado]

Profa. Dra. Lívia Cristina da Silva Lobato, coorientadora [Aprovado]

Prof. Dr. Marcos von Sperling [Aprovado]

Prof. Dr. Miguel Mansur Aisse [Aprovado]

Pelas indicações, o candidato foi considerado [Aprovado], devendo proceder a pequenas alterações no trabalho, para a sua edição definitiva, a ser entregue no prazo de 2 meses.

O resultado final foi comunicado publicamente ao [candidato] [pelo] presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, [o] presidente encerrou a sessão e lavrou a presente ata que, depois de lida, se aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora.

Belo Horizonte, 30 de abril de 2021.

Assinatura dos membros da banca examinadora:



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, Professor do Magistério Superior**, em 03/05/2021, às 22:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamentono art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Von Sperling, Professor do Magistério Superior**, em 04/05/2021, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lívia Cristina da Silva Lobato, Usuário Externo**, em 05/05/2021, às 16:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Miguel Mansur Aisse, Usuário Externo**, em 05/05/2021, às 22:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0704317** e o código CRC **F5D9DEBF**.

Referência: Processo nº 23072.221963/2021-30

SEI nº 0704317

Criado por [lucasbindaco](#), versão 2 por [lucasbindaco](#) em 03/05/2021 12:55:27.

AGRADECIMENTOS

Mais uma etapa de realização pessoal cumprida, e eu não poderia deixar de agradecer a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa conquista. Fugindo um pouco do ‘comum’ eu queria primeiro agradecer àqueles que mais me apoiaram nessa busca, que foi a equipe do INCT ETEs Sustentáveis, afinal, antes de fazer parte do instituto eu nem pensava, em hipótese alguma, fazer um mestrado. Quando entrei para a equipe, em abril de 2017, eu descobri a paixão pela pesquisa, pela academia, por buscar, cada vez mais, compartilhar e transmitir conhecimento ao meu país. Então, meu muito obrigada a cada um de vocês: Bel, Livia, Lariza, Thiago Bressani, Lucas Vassale, Carlos Chernicharo, Lucas Chamum, Matheus, Thiago Morandi, Rafael, Marise, Gabriel, Suzane e todos que, por alguns momentos, passaram por essa equipe maravilhosa!

Dessa equipe, um agradecimento especial a Livia, minha co-orientadora e a pessoa que mais esteve ao meu lado nessa caminhada. Obrigada por sempre escutar meus desabafos e sempre me apoiar. Livinha, é de coração que eu falo que sem você eu não conseguiria entregar esse trabalho como entreguei! E claro, ao meu orientador, Carlos, que me deu a oportunidade de me envolver em um projeto ao qual tanto me identifiquei e que me deu total liberdade para trabalhar nele e deixar a ‘minha marca’, obrigada pela confiança!

À minha família, em especial mamãe, papai, Clarinha, Rosa, Tia Myroca e Vovô Coronel, que, mesmo as vezes não entendo o projeto ou porque, nunca deixaram de me apoiar incondicionalmente. Entenderam quando eu recusei convites de almoço no fim de semana porque precisava estudar, ou quando eu mostrava o *software* para eles e eles fingiam que entendiam tudo e não economizavam nos elogios. E um agradecimento além de especial ao Rafa, que entendeu quando a mamãe não podia ver desenho com ele a noite porque precisava escrever a dissertação, ou quando a mamãe o deixava ir para casa da vovó ou do vovô para ela poder se dedicar ainda mais. Ele não entende o que é, mas sabe o tanto que isso é importante para mim, e foi sempre muito compreensível, mesmo com tão pouca idade.

Aos meus amigos e primos, que sempre me incentivaram, sempre deixaram claro o quanto estavam orgulhosos da minha conquista e como queriam que a defesa não acontecesse no meio dessa pandemia, para comemorem junto comigo essa conquista. Obrigada Marra, Lara, Bruninha, Manu, Isa, Kaka, Malu, Bela, Marina Mortimer, Vitinho, Digo, Chico, Fer Baldi, Lala, Didi, Nina, Dani, Rah, Manda Nic, Mari Borts, Bella, Paulinha Martins, Lets, Tio Chico, Fer, Joãozinho, Thiago, Larys, Nandinha, Paulinha, Vituxo, Feijão, Nic, e aos outros amigos, que sempre mandaram as melhores energias do mundo. Um agradecimento especial ao meu

colega de mestrado, Fernando, por passar fins de semana escrevendo comigo (remotamente) e me apoiando, principalmente nessa reta final! Consequimos!

Obrigada a todos os professores e professoras da UFMG que passaram pela minha trajetória, tanto na graduação quanto na pós, sou muita grata por todos os ensinamentos compartilhados e por serem inspiração em vários momentos!

Obrigada ao SAAE Itabira, por confiarem no meu trabalho e disponibilizarem dados de monitoramento para que eu pudesse usar como teste no software. Além de todo o conhecimento e experiência compartilhados referentes a rotina operacional da ETE, que foram incorporados no SIG-Lodo. E também a equipe do projeto, Paulo, Lucas, Thiago, Livia e Carlos, afinal, esse trabalho é nosso, construímos juntos, obrigada pelas contribuições!

À equipe do laboratório Transcolar, os professores Marcelo e Lucas e os alunos de iniciação científica, que foram imprescindíveis no desenvolvimento da ferramenta, envolvidos em toda a parte de programação, sempre dispostos, atenciosos e solícitos, mesmo quando eu pedia modificação do código em pleno domingo. Em especial ao Douglas e Tainan, alunos de IC que se tornaram amigos e escutaram vários desabafos durante a trajetória.

Aos colegas do Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG por todo crescimento e conhecimentos compartilhados.

Aos membros da banca, professores Marcos Von Sperling e Miguel Mansur Aisse, pelo aceite do convite e leitura crítica do trabalho

À CAPES, pela concessão da bolsa, e ao CNPq e FAPEMIG, pelo auxílio na pesquisa.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para essa conquista, o meu muito obrigada! A reta final veio em um momento crítico para o nosso país, em que a ciência vem sendo fortemente contestada por representantes do governo e que muitas vidas foram perdidas. Que a ciência continue exercendo o seu papel, de extrema importância, na sociedade, e que seja mais valorizada para a caminhada ser mais leve. Que venham dias melhores para todos nós!

“Devemos tratar igualmente os iguais e desigualmente os desiguais, na medida de sua desigualdade”

Aristóteles

“É justamente a possibilidade de realizar um sonho que torna a vida mais interessante.”

Paulo Coelho

RESUMO

O controle operacional eficaz de estações de tratamento de esgoto (ETE) baseadas em tecnologias anaeróbias só é alcançado se um programa de monitoramento adequado for implementado. No Brasil, os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (reatores UASB) têm sido uma recorrente opção tecnológica para o tratamento do esgoto doméstico. Contudo, deficiências de projeto, construção, operação e gestão em relação ao gerenciamento de lodo acarretam ineficácia, ou até mesmo ausência, de rotinas de descartes de lodo, podendo ocasionar elevada perda de sólidos com o efluente anaeróbio e sobrecarga nas unidades de pós-tratamento, comprometendo o desempenho global do sistema. Embora o desempenho de reatores UASB dependa fundamentalmente de rotinas operacionais apropriadas para o gerenciamento de lodo, observa-se que, em muitos casos, os dados de monitoramento produzidos não são utilizados para subsidiar as tomadas de decisão. O uso de ferramentas computacionais pode contribuir para a sistematização de dados e sua utilização em tomadas de decisão na operação de ETEs, visando garantir o melhor desempenho do sistema de tratamento, no entanto, ainda não é uma realidade no contexto brasileiro. O presente trabalho visou desenvolver uma ferramenta computacional para apoio operacional de ETEs que empregam reatores UASB seguidos de filtros biológicos percoladores (FBP), com funcionalidades para a sistematização dos dados e tomadas de decisão para o correto gerenciamento do lodo. A ferramenta computacional 'SIG-Lodo' (Sistema Integrado para o Gerenciamento de Lodo) permite a apresentação comparativa de potenciais cenários associados a diferentes estratégias de descarte de lodo. O SIG-Lodo se mostrou efetivo para a consolidação de um banco de dados de monitoramento da fase líquida e da fase sólida, permitindo a apresentação desses dados em gráficos por períodos selecionados pelo usuário e a extração, de forma rápida, de informações importantes para a operação da ETE. A partir das análises efetuadas, a ferramenta se mostrou bastante útil para realizar a comparação e definir a melhor estratégia de descarte de lodo a ser adotada na estação, considerando a manutenção de um lodo de melhor qualidade no interior dos reatores UASB, a capacidade de desaguamento do sistema e as rotinas operacionais da estação. O SIG-Lodo amplia a análise crítica e aproxima a equipe operacional às tomadas de decisão para o gerenciamento do lodo em uma ETE.

Palavras-chave: Sistema UASB/FBP; Gerenciamento de lodo; Controle operacional, Tomada de decisão.

ABSTRACT

The effective operational control of anaerobic-based sewage treatment plant (STP) is only achieved if an appropriate monitoring program is implemented. In Brazil, Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASB reactors have been widely adopted for domestic sewage treatment. However, design, construction, operation and management deficiencies concerning sludge management result in ineffective or even absence of sludge disposal routines, which could lead to solids loss with the anaerobic effluent and overload on the post-treatment unit, affecting the overall performance of the system. Although the performance of UASB reactors relies on appropriate operational routines for sludge management, it is observed that, in many cases, the monitoring data produced is not used to support decision making. The use of computational tools contributes to the systematization of data and its use in decision making in the operation of STPs, aiming to guarantee the best performance of the treatment system, however, it is not yet a reality in the Brazilian context. The present work aimed at developing a computational tool for operational support of STPs based on UASB reactors followed by trickling filters, with functionalities for data systematization and decision making for proper sludge management. The computational tool 'SIG-Lodo' (Integrated System for Sludge Management), allows the comparison of potential scenarios associated with different sludge disposal strategies. The SIG-Lodo is used for the consolidation of a monitoring database for the liquid phase and the solid phase, allowing the presentation of this data in graphs for periods selected by the user and a quick extraction of important information for operating the STP. Based on the analyzes carried out, the tool seemed to be very useful to make the comparisons and define the best sludge disposal strategy to be adopted at the STP, considering the maintenance of the quality of the sludge inside the UASB reactors, the dewatering capacity of the system and the operational routines of the STP. The SIG-Lodo expands the critical analysis and brings the operational team closer to the decision making regarding sludge management in a STP.

Keywords: UASB/Trickling filters system; Sludge management; Operational control, Decision making, Computational tool.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxograma de um sistema com reatores UASB seguidos por filtros biológicos percoladores e decantadores secundários	17
Figura 2.2 – Representação esquemática de um reator UASB.....	18
Figura 2.3 – Pontos de amostragem de lodo ao longo da altura do reator UASB: (a) corte esquemático; e (b) vista externa.	26
Figura 2.4 – Leitões de secagem de lodo	30
Figura 2.5 – Sistemas de desagumamento de lodo mecanizados: (a) centrífuga e (b) filtro-prensa	31
Figura 4.1 – Fluxograma das etapas envolvidas no <i>software</i>	38
Figura 4.2 – <i>Layout</i> da tela do <i>software</i> SIG-Lodo referente ao cadastro da ETE, com informações gerais e das unidades que compõem as etapas de tratamento do esgoto ...	47
Figura 4.3 – <i>Layout</i> da tela do <i>software</i> SIG-Lodo referente a fase líquida, para inserção de dados de monitoramento em diferentes pontos de amostragem	48
Figura 5.1 – Fluxograma das telas do SIG-Lodo.....	50
Figura 5.2 – Tela “Panorama da ETE”	52
Figura 5.3 – Fluxograma da ETE do estudo de caso	53
Figura 5.4 – Série histórica das vazões médias diárias afluentes à ETE no período operacional 1 (PO1)	55
Figura 5.5 – Série histórica das vazões médias diárias afluentes à ETE no período operacional 2 (PO2)	55
Figura 5.6 – Série histórica das concentrações de DBO no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, e final da ETE para o período operacional 1.....	56
Figura 5.7 – Série histórica das concentrações de DBO no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, do FBP e final da ETE para o período operacional 2	56
Figura 5.8 – Série histórica das concentrações de DQO no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, do FBP e final da ETE para o período operacional 1	57
Figura 5.9 – Série histórica das concentrações de DQO no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, do FBP e final da ETE para o período operacional 2	57
Figura 5.10 – Série histórica das concentrações de SST no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, do FBP e final da ETE para o período operacional 1	58
Figura 5.11 – Série histórica das concentrações de SST no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, do FBP e final da ETE para o período operacional 2	58
Figura 5.12 – Gráficos box-plot para as vazões afluentes a estação para o período a ser analisado do (a) PO1 e do (b) PO2	59
Figura 5.13 – Gráficos box-plot para (a) DBO, (b) DQO, (c) SSed e (d) SST referente ao PO1	60
Figura 5.14 – Gráficos box-plot para (a) DBO, (b) DQO, (c) SSed e (d) SST referente ao PO2	60
Figura 5.15 – Tela dos gráficos da fase líquida.....	62
Figura 5.16 – Tela apresentando as cargas orgânicas e a produção diária de lodo no sistema para o período operacional 1	64
Figura 5.17 – Tela apresentando as cargas orgânicas e a produção diária de lodo no sistema para o período operacional 2	65
Figura 5.18 – <i>Prints</i> das telas apresentando as massas de lodo no reator UASB 1 e concentrações de sólidos no efluente anaeróbio para o PO1	66

Figura 5.19 – <i>Prints</i> das telas apresentando as massas de lodo no reator UASB 1 e concentrações de sólidos no efluente anaeróbico para o PO2	67
Figura 5.20 – Perfil de lodo nos reatores UASB para o período operacional 1 (PO1)...	68
Figura 5.21 – Perfil de lodo nos reatores UASB para o período operacional 2 (PO2)...	68
Figura 5.22 – Análise do teor de sólidos de (a) SST e (b) SSed em comparação com a massa excedente no reator para o PO1	70
Figura 5.23 – Análise do teor de sólidos de (a) SST e (b) SSed em comparação com a massa excedente no reator para o PO2	70
Figura 5.24 – Tela de resgate dos parâmetros para o desaguamento mecanizado do PO172	
Figura 5.25 – Tela de resgate dos parâmetros para o desaguamento natural do PO2 com perfil de sólidos	73
Figura 5.26 – Fluxograma das iterações para os cálculos dos cenários	74
Figura 5.27 – Cenários de descarte de lodo em um sistema de desaguamento natural quando a estação não realiza o perfil de lodo	76
Figura 5.28 – Cenários de descarte de lodo em um sistema de desaguamento natural quando a estação realiza o perfil de lodo	77
Figura 5.29 – Volume de lodo excedente não descartado para os cenários (a) quando não se realiza e (b) quando se realiza perfil de lodo na ETE.....	78
Figura 5.30 – Cenários considerando apenas o sistema mecanizado como etapa de desaguamento do lodo excedente	80
Figura 5.31 – Cenários considerando o sistema mecanizado em conjunto com o natural como etapa de desaguamento do lodo excedente	81
Figura 5.32 – Semanas necessárias para o descarte do lodo excedente considerando (a) apenas o sistema mecanizado e (b) a combinação entre o sistema mecanizado e natural.....	82
Figura 5.33 – Cenários considerando 7 dias por semana e 8 horas por dia de funcionamento	84
Figura 5.34 – Cenários considerando 5 dias por semana e 8 horas por dia de funcionamento	85
Figura 5.35 – Cenários considerando 5 dias por semana e 12 horas por dia de funcionamento	86
Figura 5.36 – Semanas necessárias para o descarte de lodo considerando o funcionamento do sistema de desaguamento mecanizado em: (a) 7 dias por semana e 8 horas por dia, (b) 5 dias por semana e 8 horas por dia e (c) 5 dias por semana e 12 horas por dia.....	87
Figura 5.37 – Hierarquização dos reatores UASB quando há disponibilidade de dados referente ao perfil de sólidos do PO2.....	90
Figura 5.38 – Hierarquização dos reatores UASB do PO2 quando não há disponibilidade de dados referente ao perfil de sólidos	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Sistemas de apoio à tomada de decisão aplicados ao tratamento de esgoto	35
Tabela 2.2 – Dificuldades/limitações e contribuições pretendidas.....	36
Tabela 4.1 – Banco de dados referente ao monitoramento da fase líquida	39
Tabela 4.2 – Variáveis e parâmetros de interesse do SIG-Lodo	42
Tabela 4.3 – Equações de interesse para desenvolvimento dos algoritmos da ferramenta computacional.....	44
Tabela 5.1 – Dimensões dos reatores UASB e FBP da ETE.....	53
Tabela 5.2 – Pontos de amostragem de lodo dos reatores UASB	54
Tabela 5.3 – Medianas dos dados de monitoramento para o PO1 e PO2.....	61
Tabela 5.4 – Valores típicos utilizados para o cálculo da produção de lodo.....	63
Tabela 5.5 – Tabela resumo dos parâmetros referentes à fase sólida.....	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Reatores UASB: fundamentos teóricos e aplicabilidade	16
2.2	Monitoramento de estações de tratamento de esgoto	19
2.3	Lodo de esgotos	20
2.3.1	Produção de lodo no tratamento de esgoto	20
2.3.2	Problemas relacionados ao lodo excedente	24
2.3.3	Gerenciamento do lodo.....	25
2.4	Ferramentas computacionais	32
2.4.1	Fundamentos.....	32
2.4.2	Ferramentas ou metodologias de apoio a tomada de decisão aplicadas ao tratamento de esgoto	33
2.5	Contribuições pretendidas	36
3	OBJETIVOS	37
3.1	Objetivo geral	37
3.2	Objetivos específicos	37
4	MATERIAL E MÉTODOS	38
4.1	Limitações no gerenciamento de lodo em ETEs com reatores UASB e funcionalidades da ferramenta computacional	38
4.2	Variáveis e parâmetros de interesse.....	38
4.3	Linguagem de programação e layout da ferramenta computacional	46
4.4	Implementação e teste das funcionalidades da ferramenta computacional	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1	Funcionalidades e telas da ferramenta computacional	50
5.2	Implementação e testes das funcionalidades da ferramenta computacional.....	53
5.2.1	Caracterização da ETE em estudo	53
5.2.2	Fase líquida.....	54
5.2.3	Fase sólida	63
5.2.4	Descarte de lodo	71
5.2.5	Hierarquização dos reatores	88
6	CONCLUSÃO.....	92
7	RECOMENDAÇÕES.....	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

1 INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de esgoto (ETE) devem ser dimensionadas, projetadas e implantadas visando o atendimento aos padrões de lançamento de efluentes e do corpo d'água receptor estabelecidos pela legislação ambiental, assim como, desejavelmente, o aproveitamento de subprodutos gerados e o uso do efluente tratado. Para o controle operacional dos sistemas de tratamento, é importante realizar o monitoramento de parâmetros físicos, químicos e biológicos, bem como o levantamento de informações referentes ao funcionamento/operação, a fim de possibilitar, por exemplo, a identificação de eventuais problemas e as medidas necessárias para resolvê-los. Assim, visando garantir o desempenho esperado para uma determinada tecnologia de tratamento, o controle operacional é uma etapa de fundamental importância, dependendo não apenas da aquisição desses dados, mas também de sua utilização. Ademais, pode propiciar a redução dos custos operacionais.

De acordo com um estudo realizado pela Agência Nacional de Águas e de Saneamento Básico (ANA) (2020), os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo – reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) - têm sido uma recorrente opção para o tratamento do esgoto doméstico. O estudo indicou que cerca de 37% das 3.668 ETES inventariadas possuem a tecnologia de reatores anaeróbios como primeiro ou único estágio do processo de tratamento. O efetivo controle operacional, de forma a garantir o desempenho dos reatores UASB no tratamento de esgoto, por exemplo, só poderá ser alcançado se um adequado programa de monitoramento for implementado, assim como, informações operacionais forem coletadas. Isso permite tanto a verificação dos parâmetros operacionais, quanto a otimização de rotinas operacionais. Uma das principais vantagens dos reatores UASB está relacionada à elevada capacidade de retenção da biomassa, que corresponde ao produto sólido (lodo) gerado durante o tratamento de esgoto. Contudo, a adoção de rotinas de descarte de lodo anaeróbio pouco consistentes são um fator no alcance das expectativas de desempenho previstas para a tecnologia.

Tem sido recorrente a operação de reatores UASB com quantidades de lodo acima da capacidade de retenção e armazenamento do compartimento de digestão, o que, via de regra, acarreta perda de sólidos com o efluente. A ineficácia do gerenciamento de lodo nas ETES pode ser causada por deficiências de projeto, construção, operação e aspectos relacionados à gestão. Essa ineficácia pode levar ao aumento do teor de sólidos no efluente dos reatores UASB e, conseqüentemente, ocasionar a redução da eficiência física de retenção/remoção de material

particulado no interior dos reatores, a deterioração da qualidade do efluente e sobrecarga nas unidades de pós tratamento, como, por exemplo, a colmatação do meio suporte de filtros biológicos percoladores (FBP).

De acordo com Spinosa *et al.* (2011), o gerenciamento do lodo em ETE consiste em um dos problemas mais difíceis de ser enfrentado e resolvido. O lodo produzido corresponde a um percentual baixo de volume, quando comparado ao efluente líquido tratado na ETE, porém, seu gerenciamento pode corresponder a quase 50% do custo operacional da estação. Além disso, é crescente a preocupação de se estabelecer estratégias operacionais para o adequado gerenciamento de lodo, buscando a sustentabilidade e a possibilidade de uso do subproduto gerado.

Embora o desempenho de reatores UASB dependa fundamentalmente de rotinas operacionais apropriadas para o gerenciamento de lodo, observa-se que, em muitos casos, os dados de monitoramento produzidos não são utilizados para subsidiar as tomadas de decisão. O uso de ferramentas computacionais poderia ser um facilitador importante nesse sentido, mas ainda não é uma realidade no contexto brasileiro.

Nesse sentido, o presente trabalho visa o desenvolvimento de uma metodologia e uma ferramenta computacional, de livre acesso, para apoio operacional de sistemas UASB/FBP, com funcionalidades para a sistematização dos dados e tomadas de decisão quanto ao gerenciamento do lodo nesses sistemas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Reatores UASB: fundamentos teóricos e aplicabilidade

De acordo com a UN-WATER (2015), em um contexto mundial, apenas 20% dos esgotos gerados são tratados. No Brasil, 45% da população não possui acesso a sistemas de coleta seguida por tratamento de esgoto (ANA, 2017). Diante do enorme déficit sanitário, percebe-se a necessidade por sistemas de tratamento de esgoto com baixos custos de implantação e operação, simplicidade operacional.

Baseado no contexto de déficit, é importante que sejam desenvolvidas e implantadas soluções que considerem as limitações e condições da região que receberá o sistema (NOYOLA *et al.*, 2012), sobretudo tecnologias simplificadas, principalmente, em países em desenvolvimento. Entende-se por tecnologias simplificadas àquelas consideradas adequadas ao nível de investimento e operação local, e que atendam aos padrões exigidos na legislação ambiental, alcançando sustentabilidade aos sistemas (BRESSANI-RIBEIRO, 2015).

Desde meados da década de 1990, vem ocorrendo um rápido aumento no número de ETEs de países que utilizam reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* – UASB) para tratamento do esgoto doméstico, em particular, o Brasil e a Índia, que adotaram amplamente a tecnologia (VAN LIER *et al.*, 2011). As condições climáticas favoráveis e os grandes investimentos em pesquisa e desenvolvimento, fizeram a América Latina, principalmente Brasil, Colômbia e México, a atual pioneiro no uso dos reatores UASB para o tratamento de esgoto doméstico (CHERNICHARO *et al.*, 2015). De acordo com Noyola *et al.* (2012), os reatores UASB estão entre as três tecnologias mais utilizadas nas ETEs da América Latina e Caribe.

Essa tecnologia tem facilitado o acesso ao tratamento de esgoto por países em desenvolvimento. No Brasil, um grande passo para a consolidação do uso dessa tecnologia para o tratamento de esgoto perpassa pelas pesquisas desenvolvidas no âmbito do Programa em Saneamento Básico (PROSAB) (CHERNICHARO *et al.*, 2015). Praticamente todos os estudos de alternativas de tratamento de esgoto no país incluem os reatores UASB como uma das opções de tecnologia para o tratamento a serem avaliadas. Como mencionado anteriormente, um estudo realizado pela ANA (2020), indicou que cerca de 37% das 3.668 ETEs inventariadas possuem os reatores anaeróbios como primeiro ou único estágio do processo de tratamento.

Os reatores UASB consistem em processos anaeróbios de tratamento de esgoto, nos quais a decomposição da matéria orgânica é feita por diversos grupos de microrganismos, que realizam

sua conversão em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia (CHERNICHARO, 2016). Os reatores UASB apresentam vantagens quando comparados aos processos aeróbios, por apresentarem menor produção de lodo, baixo consumo energético, reduzida demanda de área, simplicidade operacional, baixo custo de implantação e tolerância a elevadas cargas orgânicas (CHERNICHARO, 2016). As vantagens citadas, associadas às elevadas temperaturas predominantes no território brasileiro, colaboram para a adoção dessa tecnologia. No entanto, é fundamental ressaltar que os reatores UASB possuem eficiências de remoção de demanda química de oxigênio (DQO) da ordem de 40 a 75% (JORDÃO; PESSÔA, 2014), resultando em uma conseqüente DQO remanescente no efluente, principalmente quando comparado a tecnologias aeróbias de tratamento (VAN LIER *et al.*, 2001; CHERNICHARO *et al.*, 2015).

Nesse contexto de limitação da eficiência de remoção de matéria orgânica, a fim de atingir os padrões estabelecidos pela legislação ambiental, uma etapa de pós-tratamento do efluente de reatores UASB se faz necessária. É comum fazer uso de tecnologias aeróbias para essa etapa, implantando-se sistemas anaeróbios-aeróbios, de forma a explorar as vantagens individuais de cada processo, garantindo, assim, maior eficiência. No Brasil, os filtros biológicos percoladores (FBP) consistem em uma tecnologia amplamente utilizada, e cerca de 15% das ETEs que possuem reatores UASB utilizam FBP seguidos por decantadores secundários (Figura 2.1) como pós-tratamento (ANA, 2020).

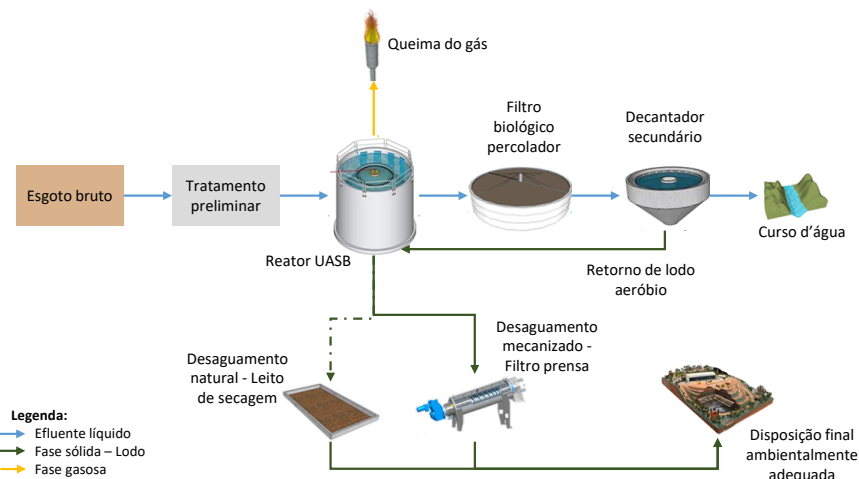


Figura 2.1 - Fluxograma de um sistema com reatores UASB seguidos por filtros biológicos percoladores e decantadores secundários

Na Figura 2.2 é apresentada uma representação esquemática de um reator UASB. O fluxo do líquido no interior dos reatores é ascendente, entrando pelo fundo, e atravessando o leito de lodo, que adsorve grande parte da matéria orgânica pela biomassa. A decomposição anaeróbia da matéria orgânica leva a formação de gases. De forma a reter a biomassa no sistema,

impedindo que ela saia com o efluente, o separador trifásico localizado na parte superior dos reatores UASB possibilita as funções de separação de gases, sólidos e líquido. No separador trifásico, o gás é coletado pela parte superior, no compartimento de gases, e os sólidos que se desgarram da mata de lodo são sedimentados na parte superior externa dessa estrutura, no compartimento de decantação, possibilitando o seu retorno ao compartimento de digestão, impedindo que sejam arrastados junto com o efluente. O efluente sai do compartimento de decantação relativamente clarificado e a concentração de biomassa no reator é mantida elevada (von SPERLING, 2014).

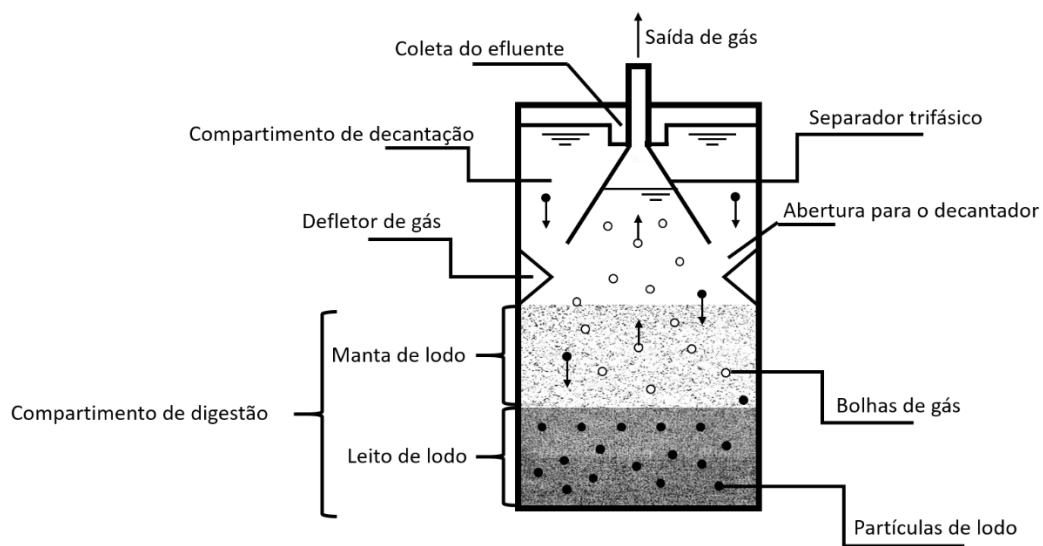


Figura 2.2 – Representação esquemática de um reator UASB.

Fonte: Adaptado de Chernicharo (2017).

O leito de lodo é formado após alguns meses do início de operação do reator UASB, com um lodo bastante concentrado (em torno de 40 a 100 gST.L⁻¹) junto ao fundo do reator. Esse lodo é caracterizado por ser muito denso e com excelentes características de sedimentação. Acima do leito, forma-se a manta de lodo, que corresponde a uma zona de crescimento bacteriano mais disperso, com sólidos apresentando velocidades de sedimentação mais baixas (CHERNICHARO, 2016).

Os reatores UASB, considerados como sistemas de alta taxa, possuem elevada retenção de biomassa, permitindo que operem com baixos tempos de detenção hidráulica e elevados tempos de retenção celular (SOUZA, 2020). Segundo von Sperling (2014), a elevada concentração da biomassa produzida no reator, que cresce dispersa no meio sem a necessidade de um meio suporte, está associada ao reduzido volume dos reatores UASB.

Algumas características importantes sobre o lodo em reator UASB estão relacionadas aos seguintes aspectos: i) elevado grau de estabilização, devido ao elevado tempo de residência celular no sistema de tratamento, o que possibilita o seu encaminhamento a unidades de desidratação, sem necessidade de etapa prévia de tratamento; ii) elevada concentração no lodo de fundo, usualmente da ordem de 3 a 5%, possibilitando o descarte de menores volumes de lodo; iii) facilidade de desidratação; e iv) possibilidade de utilização do lodo desidratado em atividades agrossilvipastoris ou para recuperação de áreas degradadas, por exemplo, desde que higienizado, visando garantir os padrões mínimos de qualidade sanitária.

2.2 Monitoramento de estações de tratamento de esgoto

O desempenho de ETEs é um ponto que exige atenção, principalmente às questões técnicas e operacionais. No entanto, é importante executar ações de gestão, técnicas e de operação, por meio de um monitoramento intensivo, com objetivo de: i) atender aos padrões de lançamento de efluentes; ii) calcular as eficiências de remoção de matéria orgânica e demais poluentes; iii) fornecer informações sobre biomassa no sistema; iv) manter os parâmetros operacionais adequados; v) reportar ao órgão ambiental; e vi) controle operacional (COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2018). O monitoramento de ETEs é extremamente importante para garantir um bom funcionamento, já que permite detectar, precocemente, e identificar a causa de uma falha ou problema que pode afetar negativamente o processo (LIU *et al.*, 2014).

Em relação ao controle operacional, deve-se levantar dados e informações de parâmetros que sejam úteis para avaliação do desempenho dos reatores e demais unidades do sistema, e isso inclui parâmetros físicos, químicos e biológicos, que permitam conhecer a qualidade do esgoto (von SPERLING, 2014). Pode-se dizer, ainda, que a etapa de operação é extremamente importante para a aquisição de dados de desempenho do sistema, que irão possibilitar a melhoria das condições operacionais e a avaliação do cumprimento da legislação ambiental (LEONEL, 2016).

De acordo com Chernicharo *et al.* (2019), o controle operacional eficiente de qualquer ETE que faz uso de tecnologias anaeróbias somente pode ser alcançado se um programa de monitoramento adequado for implementado. Isso permitiria tanto a verificação dos parâmetros operacionais quanto a otimização da rotina operacional. Um programa de monitoramento adequado deve ser amplo o suficiente para incluir todos os aspectos relevantes à operação do sistema de tratamento, sem desconsiderar as realidades locais e a disponibilidade de recursos humanos e materiais.

Em relação ao lodo de esgoto produzido pelo sistema de tratamento, além de monitorar a eficiência e estabilidade do reator, testes devem ser realizados para estabelecer o desenvolvimento quantitativo e qualitativo do lodo no reator UASB e no FBP. Como a concentração de lodo não será uniforme ao longo da altura do reator, as amostras devem ser retiradas em diferentes alturas para facilitar a determinação do perfil de sólidos do fundo para a parte superior do compartimento de digestão (CHERNICHARO *et al.*, 2019).

2.3 Lodo de esgotos

2.3.1 Produção de lodo no tratamento de esgoto

O lodo de esgoto consiste no produto sólido gerado durante o tratamento de esgoto, tanto pelo processo de decantação dos sólidos presentes no efluente quanto pela degradação da matéria orgânica pelos microrganismos, formando uma biomassa. A taxa de produção de lodo depende do sistema utilizado, sendo que, a princípio, todos os processos que fazem uso de tratamento biológicos produzem lodo (von SPERLING, 2014).

O lodo biológico, ou lodo secundário, composto por sólidos biológicos, é formado na etapa biológica do tratamento, e consiste na própria biomassa que cresceu devido ao alimento fornecido pelo esgoto afluyente. Devido às baixas taxas de crescimento dos micro-organismos anaeróbios, há uma baixa produção de sólidos biológicos em sistemas de tratamento anaeróbio, que vem a constituir-se no lodo excedente que deve ser descartado periodicamente. Essa baixa produção de lodo (da ordem de 0,10 a 0,20 kgSST.kgDQO_{apl}⁻¹) firma-se como uma das principais vantagens dos processos anaeróbios em relação aos aeróbios (CHERNICHARO *et al.*, 2016).

Entretanto, como a biomassa microbiana está em constante crescimento no processo de tratamento dos esgotos, caso a parte excedente não seja removida, será acumulada no sistema, podendo, eventualmente, sair com o efluente.

Nos reatores UASB, nos quais predominam processos anaeróbios de digestão, a biomassa fica retida um longo período de tempo, ocorrendo a digestão do próprio material celular, conseqüentemente, produzindo um lodo estabilizado. Já nos FBP, o tempo de permanência dos sólidos no sistema é baixo, com satisfatória disponibilidade de alimentos, sendo assim, os sólidos biológicos possuem maiores teores de matéria orgânica, não podendo ser considerados um lodo de esgoto estabilizado, necessitando de uma posterior etapa de digestão (von SPERLING, 2014).

Uma prática comum em sistemas UASB/FBP tem sido o envio do lodo em excesso nos FBP para os reatores, objetivando a estabilização dos sólidos. Estudos mostram que o envio de lodo aeróbio não deteriorou o desempenho do reator UASB no que diz respeito à remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos suspensos totais (SST) (KASSAB *et al.*, 2010). Porém, existe uma possível associação da perda de sólidos no efluente de reatores UASB com o envio do lodo aeróbio, que, devido a diferentes características, poderia flotar e sair com o efluente. Contudo, Almeida *et al.* (2018) destaca que adequados protocolos de gerenciamento de lodo nas ETEs poderia eliminar os impactos negativos do retorno e lodo aeróbio no sistema, como, por exemplo: i) manutenção de baixas concentrações de lodo nos decantadores secundários, não ultrapassando 1,0% de sólidos totais (ST); ii) estabelecimento do período e vazão de envio do lodo aeróbio para os reatores UASB, e recomenda-se que o envio seja feito no período do dia com menor vazão de esgoto bruto afluente à ETE.

Os processos de estabilização do lodo têm como objetivo mineralizar a fração biodegradável da matéria orgânica presente no lodo, ou seja, remover ou destruir os sólidos voláteis, que pode acontecer pelas vias aeróbia ou anaeróbia. A eficiência desse processo por via anaeróbia pode ser influenciada por diversos fatores: i) remoção de sólidos inertes no tratamento preliminar; ii) concentração do lodo, quando inferiores a 2,5% tendem a reduzir a eficiência da digestão; e iii) presença de substâncias inibidoras e metais pesados. No processo de digestão anaeróbia do lodo aeróbio ocorre a estabilização de 30% da fração orgânica (ANDREOLI, 2001; CHERNICHARO, 2016).

A elevada capacidade de retenção da biomassa, uma das principais vantagens dos reatores UASB, resulta em uma elevada idade de lodo, superior ao tempo de detenção hidráulica (TDH) do reator, permitindo sua estabilização. Essa retenção é decorrente das velocidades ascensionais impostas ao reator, da alta sedimentabilidade do tipo de lodo desenvolvido nesse sistema e da existência do separador trifásico. Esse dispositivo é instalado na parte superior do reator, e objetiva a manutenção do lodo anaeróbio. Isso é possível, inicialmente, devido a separação dos gases, sólidos e líquido, proporcionando condições ótimas de sedimentação do lodo no compartimento de decantação, permitindo a separação do lodo da massa líquida e seu retorno ao compartimento de digestão (LEITÃO *et al.*, 2011; CHERNICHARO, 2016).

De acordo com Chernicharo (2016), a produção de lodo em reator UASB pode ser estimada por meio da Equação 2.1:

$$P_{lodoUASB} = Y_{UASB} \times CO_{apl_{DQO-UASB}} \quad \text{Equação 2.1}$$

em que:

$P_{lodoUASB}$ = produção de lodo no reator UASB (kgSST.d⁻¹);

Y_{UASB} = coeficiente de produção de lodo anaeróbico no UASB (kgSST.kgDQO_{apl}⁻¹); e

$CO_{apl_{DQO-UASB}}$ = carga orgânica aplicada ao sistema (kgDQO.d⁻¹), a qual é obtida pela Equação 2.2 e Equação 2.3:

$$CO_{apl_{DQO-UASB}} = Q_{med} \times C_{DQO-afI UASB} \quad \text{Equação 2.2}$$

$$CO_{apl_{DQO-UASB}} = P \times C_{DQO-per capita} \quad \text{Equação 2.3}$$

em que:

Q_{med} = vazão média de esgoto (m³.d⁻¹);

$C_{DQO-afI UASB}$ = concentração de DQO (kgDQO.m⁻³) afluente ao reator UASB;

P = população atendida (hab); e

$C_{DQO-per capita}$ = contribuição *per capita* de DQO (kgDQO.hab⁻¹.d⁻¹).

Nos FBP, a biomassa cresce aderida ao material de enchimento, diminuindo os espaços vazios e aumentando a velocidade de escoamento. Quando essa atinge um determinado tamanho, causa uma tensão de cisalhamento, que desprende parte do material aderido, sendo uma forma natural de controle da população microbiana no meio. Esse lodo é, na maioria dos casos, separado da massa líquida em decantadores secundários, visando a diminuição de sólidos em suspensão no efluente final (CHERNICHARO, 2016).

Ainda de acordo com Chernicharo (2016), a estimativa de produção de lodo em FBP pode ser obtida por meio da Equação 2.4:

$$P_{lodoFBP} = Y_{FBP} \times CO_{rem_{DBO-FBP}} \quad \text{Equação 2.4}$$

em que:

$P_{lodoFBP}$ = produção de lodo nos FBP (kgSST.d⁻¹);

Y_{FBP} = coeficiente de produção de lodo aeróbico nos FBP (kgSST.kgDBO_{rem}⁻¹); e

$CO_{rem_{DBO-FBP}}$ = diferença entre a carga orgânica afluente ($CO_{DBO-afI FBP}$ – Equação 2.5) e efluente ($CO_{DBO-efI FBP}$ – Equação 2.6) ao FBP (kgDBO.d⁻¹).

$$CO_{DBO-afI FBP} = (Q_{med} \times C_{DBO-afI FBP}) \quad \text{Equação 2.5}$$

$$CO_{DBO-efI FBP} = (Q_{med} \times C_{DBO-efI FBP}) \quad \text{Equação 2.6}$$

em que:

Q_{med} = vazão média de esgoto (m³.d⁻¹);

$C_{\text{DBO-af}}_{\text{FBP}}$ = concentração de DBO ($\text{kgDBO}\cdot\text{m}^{-3}$) afluente ao reator FBP; e

$C_{\text{DBO-ef}}_{\text{FBP}}$ = concentração de DBO ($\text{kgDBO}\cdot\text{m}^{-3}$) efluente do reator FBP;

Já a produção de lodo total no sistema é calculada pela Equação 2.7:

$$P_{\text{lodoTOTAL}} = P_{\text{lodoUASB}} + P_{\text{lodoFBP}} - \left\{ \frac{\text{STV}}{100} \times P_{\text{lodoFBP}} \times \left[\left(\frac{\text{STV}}{\text{ST}} \right) / 100 \right] \right\} \quad \text{Equação 2.7}$$

em que:

$P_{\text{lodoTOTAL}}$ = produção total de lodo no sistema;

STV = grau de estabilização da fração orgânica (sólidos totais voláteis) do lodo aeróbio no reator UASB (%); e

STV/ST = relação entre sólidos totais voláteis (STV) e sólidos totais (ST) presentes no lodo aeróbio (%).

A relação entre sólidos voláteis e sólidos totais indica a fração orgânica de sólidos do lodo, assim como o nível de digestão do lodo. Em lodos não digeridos, como é o caso do lodo de reatores UASB, a relação STV/ST varia entre 75 e 80%, e em lodos digeridos, esse valor se situa entre 60 e 65%. Os sólidos totais são divididos em sólidos em suspensão e dissolvidos, já os sólidos voláteis consistem nos sólidos orgânicos presentes no efluente (ANDREOLI, 2001).

O recebimento de contribuições não consideradas na etapa de projeto, como, por exemplo, lodo de tanques sépticos, lixiviado de aterro sanitário, lodo de estações de tratamento de água etc., aumenta a produção de lodo dos sistemas de tratamento de esgoto (LOBATO *et al.*, 2018). Isso ocorre devido ao fato de que parte da matéria orgânica presente nessas contribuições poderá ser degradada pelos processos biológicos. Sendo assim, haverá aumento da quantidade de lodo. No caso de processo aeróbio, haverá aumento da demanda de oxigênio. Se o processo de tratamento for anaeróbio, haverá pequeno aumento na produção de biogás e aumento na geração de lodo (CAMPOS *et al.*, 2009).

Um estudo realizado em uma ETE de escala plena, projetada para receber apenas efluente doméstico e com envio do lodo aeróbio gerado nos FBP aos reatores UASB, apresentou coeficiente real de produção de lodo 20% superior ao valor considerado no projeto. Isso justificado pelo fato de que a estação recebia contribuições não previstas na etapa de projeto. A produção de lodo acima do esperado pode comprometer toda a operação da ETE, impactando nas rotinas operacionais a serem adotadas para o descarte de lodo e, conseqüentemente, nos sistemas de desaguamento. Portanto, é importante que o projeto defina o valor de Y com a máxima segurança possível, pois afetará diretamente: i) a produção de lodo do reator, ii) o

dimensionamento da unidade de desidratação e iii) o estabelecimento de rotinas de descarte de lodo (LOBATO *et al.*, 2018; CHERNICHARO *et al.*, 2019).

2.3.2 Problemas relacionados ao lodo excedente

De acordo com Lobato *et al.* (2018), diversos reatores UASB no Brasil operam com quantidades de lodo que ultrapassam suas capacidades de retenção e armazenamento. Ainda de acordo com os autores, além da deterioração do efluente e da redução da eficiência física de remoção de material particulado, a perda de sólidos com o efluente dos reatores UASB pode acarretar sobrecarga nas unidades de pós tratamento, como, por exemplo, a colmatação do meio suporte de FBP.

Segundo a COPASA (2018) em um relatório técnico desenvolvido para uma de suas ETEs, o excesso de lodo no sistema impacta a totalidade do tratamento e, também, a gestão da ETE, devido aos seguintes aspectos: i) incremento na formação de espuma; ii) sobrecarga e redução de eficiência dos reatores UASB; iii) sobrecarga, colmatação e redução da eficiência das unidades de pós tratamento; iv) deterioração da qualidade do efluente final; v) recorrência de problemas operacionais no sistema de desidratação do lodo; vi) possível redução do potencial de geração de biogás na ETE; e vii) incremento de problemas com odor e outros.

Uma das causas relacionada à perda de sólidos no efluente de reatores UASB tem sido o envio de lodo aeróbio de FBP, ou outras unidades de pós tratamento, para adensamento e estabilização nessas unidades. Porém, algumas experiências indicam que o uso de protocolos operacionais bem estabelecidos e implementados para o envio desse lodo e para o descarte sistematizado e com frequência adequada do lodo excedente no interior dos reatores UASB, pode fazer frente às dificuldades vinculadas ao gerenciamento do lodo aeróbio na unidade de pós tratamento (LOBATO *et al.*, 2018).

O estabelecimento de rotinas operacionais para o adequado gerenciamento de lodo no interior dos reatores UASB é um ponto importante. Porém, a adoção de rotinas adequadas nas ETEs não é sempre possível, principalmente naquelas de pequeno porte, que apresentam menor disponibilidade de mão de obra qualificada para os serviços (CHERNICHARO *et al.*, 2015). Para o adequado estabelecimento dessas rotinas, é importante que se realize o monitoramento quantitativo e qualitativo do lodo produzido no interior dos reatores UASB, a partir do perfil de lodo e da determinação da massa de sólidos. Para tanto, deve-se possuir um sistema de amostragem que permita a identificação da altura e concentração do lodo no interior do compartimento de digestão.

A ausência ou ineficácia de rotinas operacionais de gerenciamento de lodo pode estar associada a alguns fatores, como: i) insuficiência e/ou erro de instalação nos pontos de amostragem do lodo ao longo do compartimento de digestão do reator; ii) má distribuição ou insuficiência no número de tubulações de descarte; iii) falta de detalhamento dos procedimentos adequados a serem seguidos pelos operadores nos manuais e/ou diretrizes de operação dos reatores; iv) problemas logísticos e administrativos (p.ex.: contrato de prestação de serviço referente ao transporte do lodo não compatível com a frequência necessária, impedindo o descarte de lodo do reator; falta de produtos químicos para o desaguamento mecanizado); v) falha de projeto nos sistemas de desaguamento, os quais podem ser dimensionados com capacidade aquém da produção de lodo ou incompatíveis com as características do lodo a ser desaguado; e vi) sistema de desaguamento mecanizado fora de operação, devido à dificuldade de manutenção preventiva e corretiva (LOBATO *et al.*, 2018).

2.3.3 Gerenciamento do lodo

Diante dos problemas relacionados ao lodo excedente, é essencial o adequado gerenciamento do lodo gerado nos sistemas UASB/FBP.

Uma vez gerado, o lodo deve ser removido do sistema e tratado adequadamente para, em seguida, ser direcionado à sua destinação final. As etapas usuais de tratamento do lodo em um sistema de tratamento de esgoto incluem: i) adensamento, que consiste na redução no teor de água e, conseqüente, redução de volume; ii) estabilização, ou seja, a redução de matéria orgânica (redução de sólidos voláteis); iii) condicionamento, que corresponde a preparação para a desidratação, principalmente em sistemas mecanizados; iv) desidratação ou desaguamento, redução adicional no teor de água; v) higienização, reduzindo a quantidade de organismos patogênicos; e vi) destinação final (ANDREOLI *et al.*, 2007).

Ao se implantar reatores UASB para o tratamento de esgotos domésticos, deve-se prever a operação de descarte de lodo, podendo ser feita de forma automatizada ou manual. Se for realizada de forma automatizada devem ser previstas válvulas automatizadas; caso se opte pelo manual, devem ser previstos os recursos humanos necessários para a realização desta tarefa, que são muito facilmente negligenciadas. O cenário mais pessimista é a não adoção de sistema com válvulas automatizadas e a não previsão ou manutenção dos recursos humanos necessários, levando a uma operação problemática e, conseqüentemente, gerando desconfiança quanto ao desempenho dessa tecnologia (MIKI, 2010).

2.3.3.1 Massas de lodo no interior do reator UASB

Como mencionado, em reatores UASB é importante que se controle a altura e a concentração do lodo formado, a fim de mitigar a perda de sólidos no efluente. Para isso, é absolutamente necessário que o perfil de concentração de sólidos ao longo da altura do compartimento de digestão possa ser determinado com precisão. A forma mais comumente utilizada para esse processo de amostragem consiste na distribuição de registros ao longo do compartimento de digestão (Figura 2.3). Chernicharo (2016) recomenda que esses pontos de amostragem estejam localizados na parede vertical, a intervalos de 50 cm de altura, a partir do fundo do reator UASB, e atingindo a parte inferior do defletor de gases (interface dos compartimentos de digestão e decantação).

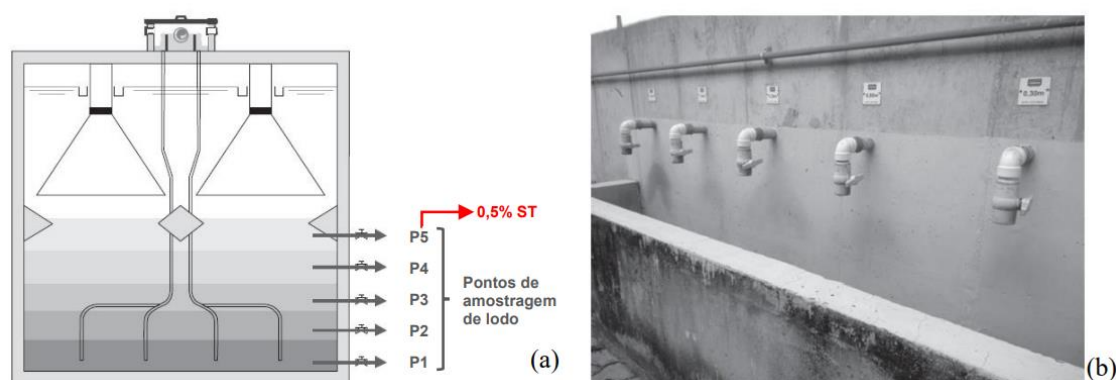


Figura 2.3 – Pontos de amostragem de lodo ao longo da altura do reator UASB: (a) corte esquemático; e (b) vista externa.

Fonte: adaptado de Chernicharo *et al.* (2019).

A partir deste perfil de concentração, a massa total de lodo presente no reator UASB pode ser calculada (van LIER *et al.*, 2011), por meio da Equação 2.8:

$$M_{\text{reator}} = \sum \left(\frac{C_{\text{amostragem}}}{1000} \times V_{\text{amostragem}} \right) \quad \text{Equação 2.8}$$

em que:

M_{reator} = massa de lodo presente no reator UASB no momento de análise do perfil de lodo (kgST);

$C_{\text{amostragem}}$ = concentração de sólidos totais em cada ponto de amostragem (mgST.L⁻¹); e

$V_{\text{amostragem}}$ = volume de influência referente a cada ponto de amostragem (m³).

Esse monitoramento contínuo da biomassa presente no reator UASB possibilita que a equipe operacional tenha maior controle sobre a situação dos sólidos no sistema, já que, além de controlar a altura e concentração do lodo, auxilia na definição das estratégias de descarte. Bressani-Ribeiro *et al.* (2019a) observaram que os reatores UASB com deficiência de

monitoramento da concentração de lodo apresentaram um maior acúmulo de sólidos, devido à ausência ou retirada de lodo excedente em uma frequência não compatível com a efetiva produção no sistema.

A fim de evitar a perda indesejada de sólidos no efluente final, é importante manter a massa de lodo dentro do reator entre um mínimo, correspondente à biomassa necessária para digerir a carga orgânica do afluente, e um máximo, dependente da capacidade de retenção de sólidos do reator UASB (ROSA *et al.*, 2012). A massa mínima deve ser estabelecida considerando a atividade metanogênica específica (AME) e a carga de DQO removida no reator UASB ($\text{kgDQO}_{\text{CH}_4}$) (Equação 2.9).

$$M_{\text{mín}} = \frac{CO_{\text{aplicada}} \times E}{AME} \quad \text{Equação 2.9}$$

Em que:

$M_{\text{mín}}$ = massa mínima de lodo necessária no interior do reator (kgSTV);

CO_{aplicada} = carga orgânica aplicada em termos de DQO ($\text{kgDQO} \cdot \text{d}^{-1}$);

E = eficiência de remoção de DQO aplicada (%); e

AME = atividade metanogênica específica ($\text{kgDQO}_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg STV}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

No balanço de massa da DQO em reatores UASB é necessário considerar todas as parcelas possíveis e importantes, isto é, as parcelas: i) convertidas a metano, seja aquele presente no biogás ou o que escapa dissolvido no efluente ou junto com o gás residual (perdas); ii) utilizadas na redução do sulfato a sulfeto; iii) convertidas em lodo, a qual pode ser subdividida no lodo retido no reator e no lodo que é carregado junto com o efluente; e iv) a que sai solubilizada no efluente. Considera-se que, em média, 65% da DQO aplicada é de fato removida nos reatores UASB (LOBATO, 2011). Caso seja realizado o envio do lodo aeróbio da etapa de pós-tratamento para adensamento e estabilização nos reatores UASB, deve-se considerar essa parcela (bem como o incremento na produção de lodo) no balanço de massa de DQO.

O monitoramento da produção de metano por microrganismos é importante para determinar a capacidade da biomassa anaeróbia no tratamento de certos tipos de efluentes ou resíduos; e a medição da taxa máxima de produção de metano tem sido uma ferramenta útil para isso. Tal quantificação é normalmente avaliada pelo conhecido teste de atividade metanogênica específica (AME), que avalia a capacidade do lodo anaeróbio de converter um substrato orgânico em metano, que apresenta valores típicos entre 0,10 e 0,20 $\text{kgDQO}_{\text{CH}_4} \cdot \text{kgST}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (SOUTO *et al.*, 2010; CHERNICHARO, 2016).

Para definir a massa máxima do lodo que o reator pode armazenar, sem que o lodo passe para o compartimento de decantação e ocorra a perda de sólidos com o efluente, é necessária uma observação atenta dos resultados de sólidos suspensos totais (SST) e sólidos sedimentáveis (SSed) no efluente do reator e as concentrações de sólidos totais (ST) ao longo de toda a altura do compartimento de digestão do reator (perfil do lodo). De forma a evitar a perda de sólidos no efluente, pode ser adotado como parâmetro de controle a concentração de ST do lodo amostrado no ponto mais alto do compartimento de digestão, localizado imediatamente antes do defletor de gás, o qual deve ser mantido sempre abaixo de 0,5% (Figura 2.3) (CHERNICHARO *et al.*, 2019).

Definida a massa de lodo presente no reator, bem como a massa mínima, pode-se calcular a massa de lodo excedente e, a partir da definição das estratégias de descarte, o volume de lodo excedente a se descartar de um reator UASB.

2.3.3.2 Estratégias de descarte de lodo

Com objetivo de alcançar maior flexibilidade operacional, é recomendado que o descarte de lodo seja realizado em duas profundidades do compartimento de digestão do reator UASB: um conjunto de tubulações localizado entre 0,2 e 0,3m e um outro conjunto entre 1,0 e 1,5 m, acima do fundo do reator. O conjunto inferior permitirá o descarte de um lodo mais concentrado, com melhores condições de sedimentabilidade, enquanto o conjunto superior permitirá o descarte de um lodo menos concentrado e com piores condições de sedimentabilidade. Essa configuração busca preservar um lodo de melhor qualidade por mais tempo no reator UASB, que corresponde ao lodo inferior, buscando: i) maior idade do lodo e descarte de um lodo mais estabilizado; ii) manutenção do leito de lodo denso junto ao fundo do reator, atuando como “filtro” para a retenção de sólidos suspensos; iii) menor perda de sólidos para o compartimento de decantação, ao se descartar o lodo superior; e iv) remoção parcial de sólidos inertes com o descarte do lodo inferior (LOBATO *et al.*, 2018).

Nesse sentido, diferentes estratégias de descarte podem ser adotadas, como: descarte de 100% do lodo superior ou do lodo inferior; 50% descarte de lodo superior e 50% do lodo inferior; 30% do lodo inferior e 70% do lodo superior; 40% do lodo inferior e 60% do lodo superior. Chernicharo *et al.* (2019) indicam que uma estratégia que vem sendo recomendada é a de descartar pelo menos 50% da massa de lodo excedente a partir do conjunto superior de tubulações. Adotar um maior percentual de descarte para o lodo superior acarreta em maiores volumes, já que a concentração deste é menor. Porém, isso pode ser compensado pela previsão de um poço de adensamento e homogeneização de lodo antes da unidade de desaguamento. O

descarte do lodo superior ainda favorece a manutenção de reduzidas concentrações de sólidos totais na interface dos compartimentos de digestão e decantação.

O volume de lodo a se descartar depende da estratégia de descarte adotada, e pode ser calculado pela Equação 2.10:

$$V_{\text{lodo}} = \frac{M_{\text{lodo-excedente}}}{\gamma \times C_{\text{lodo}}} \quad \text{Equação 2.10}$$

em que:

V_{lodo} = volume de lodo excedente (m³);

$M_{\text{lodo-excedente}}$ = massa de lodo excedente, dada pela diferença entre a massa presente no reator e a massa mínima (kgST);

γ = massa específica do lodo (kgST.m⁻³), com valor típico entre 1020 e 1040 kgST.m⁻³ (CHERNICHARO, 2016); e

C_{lodo} = concentração de lodo (%) no ponto de descarte.

Ressalta-se que além do descarte da massa de lodo excedente, é necessário considerar nos cálculos também a produção de lodo diária no sistema, notadamente, quando da utilização de sistema de desaguamento mecanizado.

Recomenda-se o descarte de lodo de forma sistemática e com frequência adequada para que o reator opere da forma mais estável possível, garantindo o desempenho da unidade.

2.3.3.3 Desaguamento do lodo

Depois de descartado dos reatores UASB, o lodo deve ser encaminhado para a etapa de desaguamento, que consiste em uma operação unitária em que é realizada a separação do material sólido do líquido presente no lodo, o que resulta em um material com maior concentração de sólidos (METCALF & EDDY, 2013). A remoção de água do lodo é fundamental para redução da massa e volume, e deve ser realizada com o lodo já digerido, e as principais razões para sua realização são: i) redução do custo de transporte para o local de disposição final; ii) melhoria nas condições de manejo do lodo; e iii) diminuição da produção de lixiviado, quando disposto em aterros sanitários (von SPERLING, 2014).

O desaguamento do lodo pode ser realizado por métodos naturais ou mecanizados. Os primeiros fazem uso de evaporação e percolação como principais mecanismos de remoção de água, o que demanda tempo de exposição do lodo, e, conseqüentemente, maiores áreas e volumes para instalação dos sistemas (ANDREOLI *et al.*, 2007). Dentre os sistemas naturais de desaguamento, pode-se citar os leitos de secagem (Figura 2.4)



Figura 2.4 – Leitos de secagem de lodo

Em ETEs com leitos de secagem, a retirada do lodo deve ser realizada com frequência compatível com a capacidade de armazenamento de lodo dos reatores UASB, o tempo médio de secagem (de acordo com as condições climáticas locais) e o contrato com o prestador de serviços referente à remoção e transporte do lodo desidratado. Em relação ao dimensionamento dos leitos de secagem, deve-se considerar o planejamento (frequência e volume) de descarte de lodo e limpeza dos leitos, a fim de evitar sobreposição de descarte de lodo, o que pode acelerar o colmatagem dessas unidades (BRESSANI-RIBEIRO *et al.*, 2019b).

Em leitos de secagem, é importante destacar duas condições de controle, visando o alcance de maior eficiência no desaguamento do lodo: i) a lâmina de lodo, ou seja, a altura do lodo sobre a camada drenante, que não deve exceder 0,35 m; e ii) a taxa de aplicação de sólidos, que consiste na relação entre a massa de sólidos em suspensão no afluente e a área sobre a qual é aplicada, por unidade de tempo, e que não deve ultrapassar o valor de $15 \text{ kgSST.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ (ABNT, 2011).

No caso dos sistemas mecanizados de desaguamento, são utilizados mecanismos de filtração, compactação e centrifugação para remoção da água do lodo. Esses processos aceleram o desaguamento, com unidades compactas e robustas, porém elevam o custo e diminuem a simplicidade operacional (ANDREOLI *et al.*, 2007). Dentre os equipamentos utilizados, pode-se citar as centrífugas (Figura 2.5a) e filtro-prensa (Figura 2.5b).

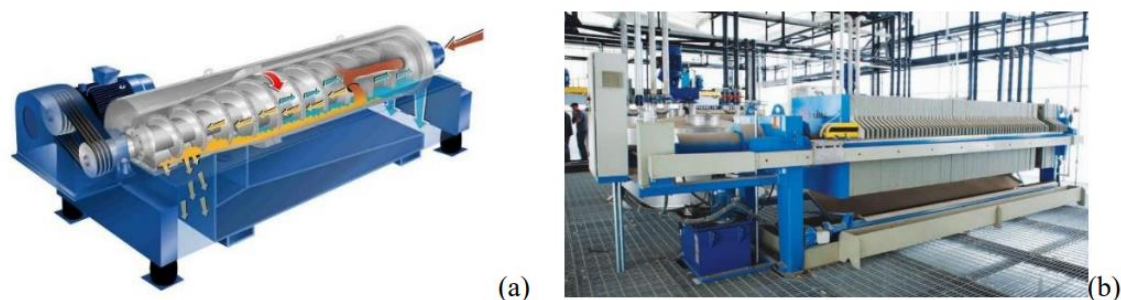


Figura 2.5 – Sistemas de desaguamento de lodo mecanizados: (a) centrífuga e (b) filtro-prensa

A definição da rotina operacional de descarte de lodo deve considerar os seguintes aspectos: i) o horário de trabalho dos operadores; ii) contratos de prestadores de serviço relativos ao transporte do lodo de esgoto desidratado e à manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos; iii) possibilidade de paralisações; e iv) a disponibilidade de produtos químicos e equipamentos reserva. Nas ETEs que utilizam processos de desaguamento mecanizados, a retirada do lodo deve ser realizada diariamente e o volume de descarte deve corresponder à produção diária de lodo do sistema, quando os reatores estiverem em situação normal em relação ao nível de lodo. Em situações com excesso de lodo armazenado nos reatores UASB, a operação de descarte e funcionamento das unidades mecanizadas de desaguamento devem ser intensificadas (BRESSANI-RIBEIRO *et al.*, 2019b).

Depois de desaguado, o lodo deve ser encaminhado para a etapa de disposição final. Dentre as alternativas existentes, pode-se elencar: i) aproveitamento agrícola; ii) recuperação de áreas degradadas; iii) incineração; vi) processos térmicos (pirólise, gaseificação, oxidação úmida, combustão ou co-processamento); v) uso na construção civil; vi) aterros sanitários, entre outros (CHAMHUM-SILVA, 2018). Segundo Sampaio (2013), no Brasil, a forma de disposição de lodo mais comumente utilizada ainda são os aterros sanitários, porém observa-se um esforço para o aproveitamento agrícola. A reutilização do lodo de esgoto é economicamente viável e ambientalmente sustentável, principalmente quando comparada com a destinação para aterros sanitários. Porém, para atingir tais objetivos, é necessário um gerenciamento cuidadoso do lodo de esgoto, não apenas após sua remoção dos reatores UASB ou das ETEs, mas também durante o processo de tratamento (KACPRZAK *et al.*, 2017).

Cabe destacar que, no Brasil, o aproveitamento de lodo de esgoto em solo encontra amparo legal, uma vez que em 2020 foi publicada uma resolução pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), a Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020, que atualiza a Resolução nº 375/2006 e define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, seguindo protocolos e exigências cabíveis, e dá outras providências. Além disso, a resolução

Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG

considera que o uso do lodo de esgoto em solos é uma alternativa de destinação ambientalmente adequada e se enquadra nos princípios de reciclagem de resíduos em consonância com a Lei nº 12.305, de 2010 (BRASIL, 2020).

2.4 Ferramentas computacionais

2.4.1 Fundamentos

A pesquisa, em todas as ciências, há muito se beneficia dos recursos computacionais (PREDIGER e ALLEBRANDT, 2016). Muitas são as possibilidades de uso de plataformas, linguagens e metodologias no desenvolvimento das ferramentas computacionais hoje em dia.

Uma ferramenta computacional pode ser definida como um algoritmo escrito em uma linguagem de programação. O mais importante de uma ferramenta é a sua lógica, o raciocínio utilizado para resolver o problema, ou seja, o algoritmo. Este será composto por diversas variáveis, que consiste em um local na memória principal, isto é, um endereço que armazena um conteúdo. O conteúdo de uma variável pode ser de vários tipos: inteiro, real, caractere, lógico, entre outros. Além disso, as variáveis podem fazer parte de dados de entrada ou saída. O primeiro permite que o usuário digite dados, que é armazenado temporariamente em um registrador e, depois, copiado para a posição de memória indicada no comando. Já os dados de saída são responsáveis por enviar um resultado, uma informação ao usuário. O valor de cada variável é buscado na memória e inserido em um dispositivo de saída. A partir desse comando, o computador pode emitir os resultados e outras mensagens para o usuário a partir da tela do computador ou uma impressora (LOPES e GARCIA, 2002).

As plataformas de *software*, ou *frameworks*, fornecem uma base sobre a qual os desenvolvedores de *software* podem construir programas para uma plataforma específica. Por exemplo, uma estrutura pode incluir classes e funções predefinidas que podem ser usadas para processar entrada, gerenciar dispositivos de *hardware* e interagir com o *software* do sistema, o que simplifica o processo de desenvolvimento (ZUSE, 2013). Dentre as diversas plataformas utilizadas hoje em dia, existe a .NET framework, desenvolvida pela Microsoft, considerado um modelo flexível e produtivo, que suporta várias linguagens de programação (SANT'ANNA, 2021).

Uma linguagem de programação é um método padronizado usado para expressar as instruções de um programa a um computador programável. Ela segue um conjunto de regras sintáticas e semânticas para definir um programa de computador. Através da linguagem de programação são especificados quais dados um computador vai usar; como estes dados serão tratados,

armazenados, transmitidos; e quais ações devem ser tomadas em determinadas circunstâncias (GOTARDO, 2015). Para a definição da melhor linguagem de programação a ser usada no desenvolvimento de uma ferramenta computacional deve-se levar em consideração diversos critérios, como: legibilidade, facilidade de escrita e confiabilidade (SEBESTA, 2018). O Visual C# (ou apenas C#) é uma linguagem de programação da *Microsoft* projetada para criar aplicações diversas, tanto para *Windows*, como para a *Web*, que são executadas no *.NET Framework*. É uma linguagem simples, moderna, segura quanto a tipos e orientada a objetos (SAADE, 2010).

Em relação às metodologias utilizadas para o desenvolvimento de *softwares*, tem-se a prototipagem evolutiva, que envolve a construção de um de *software* que evolui incrementalmente até o sistema final, ou seja, os protótipos evolutivos são criados nas fases iniciais do projeto e refinados ao longo do decorrer do processo de desenvolvimento do *software*. Durante o processo evolutivo de prototipagem, mais atenção é dada à manutenção, confiabilidade e robustez do *software*, além disso, incrementos de funcionalidade são incorporados ao protótipo, que, tendo sua fidelidade gradualmente aumentada, se torna o *software* final (SOARES, 2008). Segundo Soares (2008), o uso de prototipagem pode trazer inúmeras vantagens aos processos de desenvolvimento de *software*, como, por exemplo, a redução dos riscos relacionados às mudanças de requisitos a definições de projetos de interface.

2.4.2 Ferramentas ou metodologias de apoio a tomada de decisão aplicadas ao tratamento de esgoto

A tecnologia da informação tem desempenhado um papel cada vez mais importante no planejamento, projeto e operação de sistemas de tratamento de esgoto. De acordo com Hamouda *et al.* (2009), um sistema, seja ferramenta ou metodologia, de apoio à tomada de decisão consiste em um sistema de informação que auxilia o usuário na escolha de uma solução consistente e quase ótima para um problema específico em um período de tempo reduzido.

Os benefícios de adotar um sistema de apoio à tomada de decisão não consistem apenas na disponibilidade de procedimentos baseados em computador para apoiar as várias fases de um processo de decisão, mas também fornecem uma metodologia para a análise e definição do problema em questão e garante uma avaliação equitativa das alternativas a serem consideradas. Desta forma, se aplicado corretamente, é capaz de promover a precisão e a responsabilização do processo de decisão. Diferentemente de outros campos, os sistemas de apoio à tomada de decisão na engenharia ambiental não são muito difundidos, as decisões são tomadas principalmente com base em opiniões ou experiências pessoais, razões políticas ou apenas

considerando os custos e/ou o impacto ambiental, em vez de realizar avaliações integradas da situação (BERTANZA *et al.*, 2016).

As decisões que envolvem problemas ambientais possuem certa complexidade, pois envolvem vários aspectos multidisciplinares (relacionados a regulamentos, percepção social, restrições técnicas, custos etc.) e partes interessadas com interesses conflitantes (por exemplo, autoridades, empresas privadas, cidadãos). Como outra fonte de complicação, alguns dos muitos fatores a serem considerados são quantitativos e podem ser facilmente medidos ou estimados de forma confiável (por exemplo, consumo de energia), enquanto outros são completamente qualitativos e sua avaliação envolve muita subjetividade (por exemplo, aceitação pública de uma estação de tratamento de esgoto). É difícil levar em consideração todos os aspectos relevantes dentro de uma avaliação e comparação integrada, e nesse contexto, os sistemas de apoio à tomada de decisão podem ser usados para superar tais limitações (BERTANZA *et al.*, 2016). As estações de tratamento de esgoto e os problemas delas oriundos se enquadram nesses problemas ambientais e na complexidade existente para resolvê-los.

A partir de uma extensa revisão de literatura, no que diz respeito ao tratamento de esgoto, foram encontradas algumas ferramentas ou metodologias que auxiliem o processo de tomada de decisão dentro das ETEs, sendo eles referenciados na Tabela 2.1. Nota-se que a maioria deles estão relacionados ao monitoramento de parâmetros físicos, químicos ou biológicos nas ETEs, ou realizam a comparação entre diferentes tipologias de tratamento para determinada localidade. Dos 17 sistemas de apoio à tomada de decisão referenciados, apenas dois estão relacionados ao gerenciamento do lodo, auxiliando na tomada de decisão a respeito da disposição final desse subproduto. Pode-se perceber, então, um gargalo relacionado a ferramentas de apoio à tomada de decisão quanto às rotinas operacionais de descarte de lodo.

Tabela 2.1 – Sistemas de apoio à tomada de decisão aplicados ao tratamento de esgoto

Objetivo do sistema de apoio para tomada de decisão	País	Referência
<i>Software</i> para projeto automatizado de estações de tratamento de águas residuais, nomeado como DATAR.	Espanha	GABALDÓN <i>et al.</i> , 1998.
Programa computacional para o pré-dimensionamento de reatores anaeróbios tipo UASB . O programa denominado “UASBware Retangular” foi focado nos reatores UASB retangulares tratando efluentes essencialmente orgânicos.	Brasil	ROCHA <i>et al.</i> , 1999.
Controladores para regular a razão da alcalinidade intermediária sobre a alcalinidade total abaixo de algum valor desejado sob o qual o processo é assumido para permanecer em condições estáveis e evitar ácidos graxos voláteis.	França	BERNARD <i>et al.</i> , 2001.
Metodologia estruturada comparando os sistemas de tratamento de águas residuais com relação à sustentabilidade.	Holanda	BALKEMA <i>et al.</i> , 2001.
Modelo para prever o desempenho de uma estação de tratamento de águas residuais com base em informações anteriores.	Egito	HAMED <i>et al.</i> , 2004.
Modelo para elaborar o dimensionamento das unidades de tratamento, considerando oito alternativas, compostas de processos biológicos anaeróbios, seguidos de aeróbios, e, a partir desses dados, a estimativa de custo de cada sistema.	Brasil	OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2004.
Ferramenta capaz de orientar os órgãos responsáveis pelas soluções mais eficientes em termos de saúde e segurança para o reaproveitamento agrícola do efluente produzido, bem como auxiliá-los a realizar ações que possam ser sustentáveis.	Espanha	HIDALGO <i>et al.</i> , 2007.
Sistema de monitoramento remoto em tempo real para estações de tratamento de águas residuárias, com o objetivo de fornecer aos operadores uma orientação que lhes permita chegar à estratégia operacional ideal na fase inicial de um problema do processo.	Coréia do Sul	LEE <i>et al.</i> , 2008.
Ferramenta de tomada de decisão independente, que pode ser utilizada na seleção do local das unidades de tratamento de efluentes .	Grécia	VASILOGLOU <i>et al.</i> , 2008.
<i>Software</i> para projetar, simular e otimizar estações de tratamento de águas residuárias . O programa é denominado DESASS (DESign e Simulação de Sistemas de Lodo Ativado) e permite simular os processos físicos, químicos e biológicos mais importantes que ocorrem nas estações de tratamento	Espanha	FERRER <i>et al.</i> , 2008.
Sistema de apoio à decisão que gera diferentes fluxogramas de possibilidade de tecnologias que poderiam ser utilizadas em estações de tratamento de águas residuais	Espanha	GARRIDO <i>et al.</i> , 2010.
Ferramenta com objetivo de definir diferentes áreas agrícolas para receber lodo de esgoto, elaborada em plataforma GIS.	Espanha	PASSUELLO <i>et al.</i> , 2012.
Modelo baseado em mais de 30 parâmetros para a avaliação de estratégias de gerenciamento de lodo de esgoto, com o objetivo de determinar o melhor destino de disposição final do lodo .	Itália	BERTANZA <i>et al.</i> , 2016.
Ferramenta simples para melhorar a gestão de emissões gasosas em estações de tratamento de esgoto (ETEs) baseadas em UASB, considerando diferentes cenários para a gestão de lodo, biogás e emissões gasosas (especialmente sulfeto e metano).	Brasil	CHERNICHARO <i>et al.</i> , 2017.

2.5 Contribuições pretendidas

A partir de uma análise crítica da revisão de literatura, foram estabelecidas dificuldades e limitações associadas ao gerenciamento de lodo e as contribuições pretendidas com o desenvolvimento da ferramenta computacional, conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Dificuldades/limitações e contribuições pretendidas

Dificuldades e limitações	Contribuições pretendidas
<p>Para o atendimento à legislação ambiental, as ETEs produzem dados operacionais, principalmente associados ao desempenho do tratamento biológico da fase líquida. Além disso, o desempenho de reatores UASB depende fundamentalmente de rotinas operacionais apropriadas para o gerenciamento de lodo. No entanto, tais dados são criticamente pouco utilizados para melhorias operacionais.</p>	<p>A ferramenta possibilita a criação de um banco de dados referente aos dados de monitoramento da estação, permitindo uma sistematização desses dados que facilite a tomada de decisão relacionada a operação da ETE.</p>
<p>A definição do perfil de sólidos e a quantificação da massa de lodo presente no interior do reator é de extrema importância para o estabelecimento de estratégias de descarte, que tem por objetivo evitar o passivo de lodo dentro dos reatores UASB. Quanto maior o passivo de lodo presente nos reatores, maior será a perda de qualidade do efluente e a sobrecarga de sólidos nas unidades de pós tratamento.</p>	<p>Com o banco de dados dos perfis de sólidos e a estimativa da produção diária de lodo no sistema UASB/FBP, a ferramenta permitirá o cálculo da massa de lodo presente, massa a ser mantida no reator UASB e excedente no momento previsto para o descarte, permitindo a adoção de estratégias adequadas e eficientes de descarte de lodo, de forma a garantir o desempenho do sistema.</p>
<p>É crescente a preocupação de se adotar estratégias que visem a sustentabilidade e a eficiência da estação. A adoção de rotinas de descarte de lodo pouco consistentes são um fator no alcance das expectativas de desempenho previstas para a tecnologia.</p>	<p>A partir das cargas orgânicas afluentes e massa excedente de lodo nos reatores UASB, a ferramenta executará iterações e apresentará, comparativamente, potenciais cenários e estratégias de descarte de lodo, servindo de interface entre os reatores UASB e a unidade de desaguamento do lodo. A apresentação comparativa de diferentes cenários de descarte de lodo apoiará tomadas de decisão referentes ao gerenciamento de lodo na ETE.</p>
<p>Os reatores UASB, apesar da elevada capacidade de retenção de lodo, possuem um volume compacto, o que leva a um limite de retenção e armazenamento do lodo, ditado pelos volumes do compartimento de digestão do reator. Este limite não deve ser ultrapassado, a fim de evitar perda excessiva de sólidos e deterioração da qualidade do efluente do reator.</p>	<p>Visando uma melhor qualidade do efluente produzido pelos reatores UASB, a ferramenta estabelecerá rotinas de descarte que possibilitem a manutenção de baixas concentrações de lodo na parte superior do compartimento de digestão e a melhoria da qualidade do efluente.</p>

3 OBJETIVOS

3.1 *Objetivo geral*

Desenvolver ferramenta computacional para auxiliar o gerenciamento de lodo em estações de tratamento de esgoto (ETEs) que adotam reatores UASB seguidos por filtros biológicos percoladores (FBP).

3.2 *Objetivos específicos*

- Consolidar as principais limitações acerca do gerenciamento de lodo em ETEs que utilizam reatores UASB seguidos por FBP.
- Definir funcionalidades para uma ferramenta computacional que permita a sistematização dos dados e o adequado gerenciamento de lodo.
- Desenvolver algoritmos para uma ferramenta de gerenciamento de lodo em ETEs que adotam reatores UASB seguidos por FBP.
- Realizar estudo de casos para teste da ferramenta computacional desenvolvida.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A ferramenta computacional, foco dessa pesquisa, foi denominada de SIG-Lodo (Sistema Integrado para o Gerenciamento de Lodo), e desenvolvida com funcionalidades para a quantificação da produção de lodo em sistemas UASB/FBP e da massa de sólidos presente no reator UASB, visando a apresentação comparativa de estratégias de descarte de lodo. A ferramenta ainda permite a sistematização de dados de monitoramento das fases líquida e sólida para a análise do desempenho global da ETE.

4.1 Limitações no gerenciamento de lodo em ETEs com reatores UASB e funcionalidades da ferramenta computacional

A coleta de informações para mapear as principais limitações acerca do gerenciamento de lodo em estações de tratamento de esgoto que adotam sistemas UASB/FBP foi realizada a partir de:

- i) revisão bibliográfica, baseada em literatura especializada; e
- ii) consulta exploratória a profissionais com experiência em operação da tecnologia.

Após ser realizado esse mapeamento, foram definidas, em conjunto com especialistas e profissionais, as funcionalidades do SIG-Lodo necessárias ao adequado gerenciamento de lodo nas ETEs. A partir da definição das funcionalidades, construiu-se um fluxograma inicial (Figura 4.1) para auxiliar o desenvolvimento do SIG-Lodo, o qual foi aprimorado no decorrer do desenvolvimento da ferramenta.

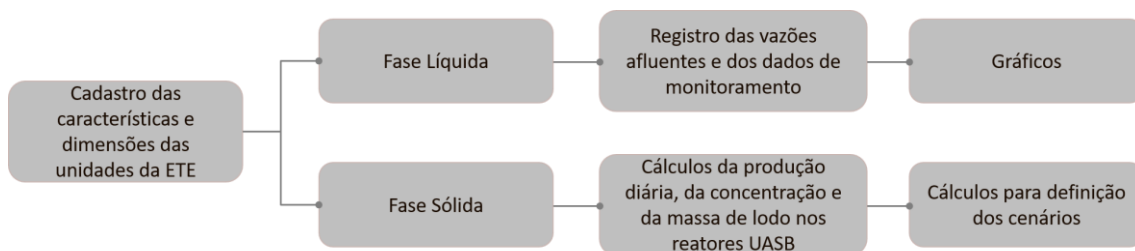


Figura 4.1 – Fluxograma das etapas envolvidas no *software*

4.2 Variáveis e parâmetros de interesse

A partir de informações referentes ao gerenciamento de lodo em sistemas de tratamento de esgoto usando UASB/FBP, foi elaborada uma planilha com o uso do software *Excel* para organização das variáveis, parâmetros e equações de interesse para subsidiar o desenvolvimento da ferramenta computacional. A coleta de informações para elaboração da planilha demonstrativa foi feita a partir de:

- i) revisão bibliográfica baseada em literatura especializada sobre tratamento de esgoto doméstico por sistemas UASB/FBP, e
- ii) consulta exploratória a profissionais com experiência em operação da tecnologia.

Os cálculos para obtenção dos resultados são obtidos a partir de monitoramentos de parâmetros referente aos dados da fase líquida (Tabela 4.1) e da fase sólida do tratamento de esgoto. É importante destacar que a alimentação dos dados referentes a fase líquida pode ser feita para diferentes pontos de monitoramento: i) esgoto bruto; ii) afluente aos reatores UASB; iii) efluente de cada reator UASB individualizado e do conjunto; iv) efluente dos FBP; e v) efluente final. No caso da fase sólida, os dados são referentes às concentrações de ST e STV para obtenção do perfil de lodo no interior do compartimento de digestão dos reatores UASB.

Tabela 4.1 – Banco de dados referente ao monitoramento da fase líquida

Variáveis/Parâmetros	
Vazão Afluente	Nitrogênio Total
DBO Total	Nitrogênio Total Kjeldahl
DBO Filtrada	Nitrogênio Amoniacal
DQO Total	Nitrito
DQO Filtrada	Nitrato
Sólidos Suspensos Totais	pH
Sólidos Sedimentáveis	Alcalinidade
Sólidos Suspensos Voláteis	Temperatura

As variáveis e parâmetros são apresentadas a seguir, de acordo com os pontos de maior interesse da ferramenta, divididas em:

- produção diária de lodo no sistema UASB/FBP;
- quantificação da massa de lodo nos reatores UASB; e
- cenários e estratégias de descarte de lodo.

Produção diária de lodo no sistema UASB/FBP

Visando a estimativa da produção diária de lodo no sistema UASB/FBP, a ferramenta permite o cálculo da carga orgânica aplicada aos reatores UASB e removida nos FBP, a partir de informações fornecidas em relação a caracterização do sistema (número e dimensões das unidades, população atendida, dentre outras) e do banco de dados de monitoramento da fase líquida (Tabela 4.1).

A produção diária de lodo anaeróbio é calculada a partir das seguintes variáveis:

- i) coeficiente de produção de lodo anaeróbico, que pode ser real (medido) ou teórico ($\text{kgSST.kgDQO}_{\text{apl}}^{-1}$); e
- ii) massa específica do lodo (kgST.m^{-3}).

Já a produção diária de lodo aeróbico é calculada a partir das seguintes variáveis:

- i) coeficiente de produção de lodo aeróbico ($\text{kgSST.kgDBO}_{\text{remov}}^{-1}$);
- ii) fração orgânica de sólidos voláteis do lodo aeróbico estabilizada no reator UASB (%);
- iii) relação sólidos voláteis e sólidos totais (%).

A estimativa da produção diária de lodo no sistema é fornecida pelo somatório das parcelas referentes a produção diária de lodo anaeróbico e de lodo aeróbico, deduzida da fração volátil de lodo aeróbico estabilizada no reator UASB.

Quantificação da massa de lodo nos reatores UASB

Para a quantificação do lodo presente nos reatores UASB no momento de descarte, o SIG-Lodo considera o banco de dados implementado referente aos perfis de sólidos dos reatores UASB.

Caso a ETE realize o perfil de sólidos, em concentrações de sólidos totais e sólidos totais voláteis nos pontos de amostragem ao longo da altura do compartimento de digestão, a ferramenta permite a inserção desses dados para a obtenção dos seguintes parâmetros:

- i) massa de lodo presente no reator UASB;
- ii) massa mínima a ser mantida no reator UASB; e
- iii) massa excedente, a qual deve ser descartada.

A partir dos cálculos e do banco de dados de monitoramento, são gerados gráficos para ilustrar a situação do reator:

- i) concentração de sólidos em cada ponto de amostragem ao longo da altura do compartimento de digestão; e
- ii) massa excedente no reator UASB x massa mínima a ser mantida no reator UASB.

Cenários e estratégias de descarte de lodo

A partir da produção diária e massa excedente de lodo nos reatores UASB, o SIG-Lodo executa iterações e apresenta, comparativamente, potenciais cenários e estratégias de descarte de lodo, para sistemas que possuem desaguamento natural e/ou mecanizado. Essas iterações são realizadas entre as variáveis e parâmetros necessários para os cálculos, a fim de considerar a produção de lodo e a capacidade de desaguamento dos sistemas, assim como as rotinas operacionais possíveis.

Desaguamento mecanizado. Para esse tipo de sistema de desaguamento são considerados os seguintes parâmetros operacionais de relevância para a apresentação dos cenários:

- i) percentuais e volume do lodo associados ao descarte de fundo (descarte inferior) e em posição intermediária (descarte superior) no compartimento de digestão dos reatores UASB;
- ii) dias de funcionamento por semana; e
- iii) horas de funcionamento por dia.

Desaguamento natural. Para esse tipo de sistema de desaguamento são considerados:

- i) percentuais e volume do lodo associados ao descarte de fundo (descarte inferior) e em posição intermediária (descarte superior) no compartimento de digestão dos reatores UASB;
- ii) lâmina de lodo na unidade de desaguamento; e
- iii) taxa de aplicação de sólidos.

Cabe ressaltar que as diferentes estratégias de descarte são calculadas considerando o conjunto de reatores UASB que compõem o sistema de tratamento da ETE, ou seja, a rotina escolhida pelo usuário da ferramenta é aplicada em todos os reatores da estação.

Além disso, a ferramenta apresenta uma hierarquização dos reatores de acordo com a concentração na interface do compartimento de digestão ou pelo teor de S_{Sed} no efluente, nos casos em que a estação não realiza o monitoramento do perfil de lodo, auxiliando na tomada de decisão quanto a priorização de descarte de cada reator.

As variáveis e parâmetros de interesse que compõem o banco de dados da ferramenta, com o objetivo de se obter a quantificação da produção de lodo e da massa de sólidos nos reatores UASB são demonstrados na Tabela 4.2.

Equações para desenvolvimento dos algoritmos

Para o desenvolvimento dos algoritmos internos da ferramenta computacional, foram definidas equações visando obter os resultados esperados, conforme apresentado anteriormente. As equações envolvem as variáveis e parâmetros já discutidos e podem ser observadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Variáveis e parâmetros de interesse do SIG-Lodo

Quantificação da produção de lodo no sistema		
Variáveis/ Parâmetros	Forma de obtenção no SIG-Lodo	Valor típico
Vazão média afluyente à ETE ($L.s^{-1}$)	Dado de monitoramento informado pelo usuário	-
Concentração de DQO afluyente ao UASB ($mgDQO.L^{-1}$)	Dado de monitoramento informado pelo usuário ou uso de valor típico	600 $mgDQO.L^{-1}$
Concentração de DQO efluyente do UASB ($mgDQO.L^{-1}$)	Dado de monitoramento informado pelo usuário ou uso de valor típico	250 $mgDQO.L^{-1}$
Concentração de DBO afluyente ao FBP ($mgDBO.L^{-1}$)	Dado de monitoramento informado pelo usuário ou uso de valor típico	90 $mgDBO.L^{-1}$
Concentração de DBO efluyente do FBP ($mgDBO.L^{-1}$)	Dado de monitoramento informado pelo usuário ou uso de valor típico	-
Carga orgânica aplicada aos reatores UASB ($kgDQO.d^{-1}$)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Carga orgânica removida no FBP ($kgDBO.d^{-1}$)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Coefficiente de produção de lodo anaeróbio ($kgSST.kgDQO_{apl}^{-1}$)	Dado de monitoramento informado pelo usuário ou uso de valor típico	0,2 $kgSST.kgDQO_{apl}^{-1}$
Coefficiente de produção de lodo aeróbio ($kgSST.kgDBO_{remov}^{-1}$)	Dado de monitoramento informado pelo usuário ou uso de valor típico	0,75 $kgSST.kgDBO_{remov}^{-1}$
Massa específica do lodo ($kgST.m^{-3}$)	Dado de monitoramento informado pelo usuário ou uso de valor típico	1030 $kgST.m^{-3}$
Estabilização da fração orgânica (STV) do lodo aeróbio (%)	Dado de monitoramento informado pelo usuário ou uso de valor típico	30%
Relações entre sólidos voláteis e sólidos totais do lodo aeróbio (%)	Dado de monitoramento informado pelo usuário ou uso de valor típico	75%
Produção de lodo anaeróbio ($kgST.d^{-1}$)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Produção de lodo aeróbio ($kgST.d^{-1}$)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Produção de lodo no sistema ($kgST.d^{-1}$)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Quantificação da massa de sólidos no reator UASB		
Variáveis/ Parâmetros	Forma de obtenção no SIG-Lodo	Valor típico
Concentração de ST nos pontos de amostragem ($mgST.L^{-1}$)	Dado de monitoramento informado pelo usuário	-
Concentração de STV nos pontos de amostragem ($mgSTV.L^{-1}$)	Dado de monitoramento informado pelo usuário	-
Atividade metanogênica específica ($kgDQO_{CH4}.kgSTV^{-1}.d^{-1}$)	Dado de monitoramento informado pelo usuário ou uso de valor típico	0,15 $kgDQO_{CH4}.kgSTV^{-1}.d^{-1}$
Volumes de influência dos pontos de amostragem (m^{-3})	Dado de projeto da estação informado pelo usuário	-
Massa de lodo presente no reator ($kgST$ e $kgSTV$)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Massa mínima de lodo a ser mantida no reator ($kgST$ e $kgSTV$)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Massa excedente de lodo no reator ($kgST$ e $kgSTV$)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Rotinas de descarte		
Variáveis/ Parâmetros	Forma de obtenção no SIG-Lodo	Valor típico

Percentual de descarte superior (%)	Dado considerado pelo SIG-Lodo	0, 50, 60, 70 ou 100%
Percentual de descarte inferior (%)	Dado considerado pelo SIG-Lodo	100, 50, 40, 30 ou 0%
Concentração média de lodo no ponto de descarte superior (%)	Calculada pelo SIG-Lodo*, informada pelo usuário ou valor típico	2,0 %
Concentração média de lodo no ponto de descarte inferior (%)	Calculada pelo SIG-Lodo*, informada pelo usuário ou valor típico	4,0 %
Volumes de descarte superior e inferior (m ³)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Produção de lodo no sistema (kgST.d ⁻¹)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Massa excedente de lodo no reator (kgST)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-

Rotinas de descarte para o desaguamento mecanizado

Variáveis/ Parâmetros	Forma de obtenção no SIG-Lodo	Valor típico
Tipo de equipamento (centrífuga ou filtro prensa)	Dado de projeto da estação informado pelo usuário	-
Dias de funcionamento (d.semana ⁻¹)	Dado referente à operação do sistema, informado pelo usuário	-
Horas de funcionamento (h.d ⁻¹)	Dado referente à operação do sistema, informado pelo usuário	-
Tempo de ciclo do equipamento (h.ciclo ⁻¹)	Dado de projeto da estação informado pelo usuário	-
Números de ciclos (ciclos.d ⁻¹)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Capacidade volumétrica do equipamento (m ³ .ciclo ⁻¹)	Dado de projeto da estação informado pelo usuário	-
Semanas necessárias para descarte do lodo excedente (semanas)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-

Rotinas de descarte para o desaguamento natural

Variáveis/ Parâmetros	Forma de obtenção no SIG-Lodo	Valor típico
Frequência de descarte (d)	Dado referente à operação do sistema, informado pelo usuário	-
Período entre dois descartes (d)	Dado referente à operação do sistema, informado pelo usuário	-
Número de unidades disponíveis	Dado referente à operação do sistema, informado pelo usuário	-
Largura do leito (m)	Dado de projeto da estação informado pelo usuário	-
Comprimento do leito (m)	Dado de projeto da estação informado pelo usuário	-
Produção de lodo no sistema por tempo de ciclo (kgST.ciclo ⁻¹)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Lâmina de lodo (m)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Taxa de aplicação de sólidos (kgST.m ⁻²)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-
Volume excedente não descartado (m ³)	Calculada pelo SIG-Lodo*	-

*Equações na Tabela 4.3

Tabela 4.3 – Equações de interesse para desenvolvimento dos algoritmos da ferramenta computacional

Parâmetro	Equações	Observações
Carga orgânica aplicada (DQO)	$CO_{\text{apl-DQO}} = (Q_{\text{med}} \times C_{\text{DQO-af}}) \times 0,0864$	$CO_{\text{apl-DQO}}$ = Carga orgânica aplicada (kgDQO.d ⁻¹) Q_{med} = vazão média (L.s ⁻¹) $C_{\text{DQO-af}}$ = concentração média de DQO no afluente (mg.L ⁻¹)
Volume de influência de cada ponto de amostragem	$V_{\text{amostragem-i}} = \{(H_{\text{amostragem-i}} + [(H_{\text{amostragem-i+1}} - H_{\text{amostragem-i}})/2]) \times L_{\text{UASB}} \times B_{\text{UASB}}\}$	$V_{\text{amostragem-i}}$ = Volume de influência do ponto de amostragem (m ³) $H_{\text{amostragem-i}}$ = Altura do ponto de amostragem (m) $H_{\text{amostragem-i+1}}$ = Altura do ponto de amostragem logo acima (m) L_{UASB} = Comprimento do reator UASB (m) B_{UASB} = Largura do reator UASB (m)
Carga orgânica removida (DBO)	$CO_{\text{rem-FBP}} = [(Q_{\text{med}} \times C_{\text{DBO-efl-UASB}}) - (Q_{\text{med}} \times C_{\text{DBO-efl-FBP}})] \times 0,0864$	$CO_{\text{rem-FBP}}$ = carga orgânica removida no FBP (kgDBO.d ⁻¹) $C_{\text{DBO-efl-UASB}}$ = concentração média de DBO no efluente do UASB (mg.L ⁻¹) $C_{\text{DBO-efl-FBP}}$ = concentração média de DBO no efluente do FBP (mg.L ⁻¹)
Produção de lodo no reator UASB	$P_{\text{lodo-UASB}} = CO_{\text{apl}} \times Y_{\text{UASB}}$	$P_{\text{lodo-UASB}}$ = produção de lodo no reator UASB (kgST.d ⁻¹) Y_{UASB} = coeficiente de produção de lodo no reator UASB (kgSST.kgDQO _{apl} ⁻¹)
Produção de lodo nos FBP	$P_{\text{lodo-FBP}} = CO_{\text{rem-FBP}} \times Y_{\text{FBP}}$	$P_{\text{lodo-FBP}}$ = produção de lodo no FBP (kgST.d ⁻¹) Y_{FBP} = coeficiente de produção de lodo no FBP (kgST.kgDBO _{remov} ⁻¹)
Produção de lodo volátil nos FBP	$P_{\text{lodo-volátil-FBP}} = P_{\text{lodo-FBP}} \times STV/ST$	$P_{\text{lodo-volátil-FBP}}$ = produção de lodo volátil no FBP (kgSTV.d ⁻¹) STV/ST = Relação entre sólidos voláteis e sólidos totais
Produção de lodo total no sistema	$P_{\text{lodo}} = P_{\text{lodo-UASB}} + (P_{\text{lodo-FBP}} - (STV/100 \times P_{\text{lodo-volátil-FBP}}))$	P_{lodo} = produção de lodo total no sistema (kgST.d ⁻¹) SV = Estabilização da fração orgânica (STV) do lodo aeróbio (%)
Massa de lodo presente no reator	$M_{\text{reator}} = \sum(C_{\text{p-amostragem-i}}/1000 \times V_{\text{amostragem-i}})$	M_{reator} = Massa de lodo presente no reator (kgST ou kgSTV) $C_{\text{p-amostragem-i}}$ = Concentração de sólidos no ponto de amostragem (mgST.L ⁻¹ ou mgSTV.L ⁻¹) $V_{\text{amostragem-i}}$ = Volume de influência de cada ponto de amostragem (m ³)
Massa mínima de lodo a ser mantida no reator UASB	$M_{\text{mínima}} = (CO_{\text{apl-UASB}} \times 0,65)/AME$	$M_{\text{mínima}}$ = Massa mínima de lodo a ser mantida no reator (kgST) $CO_{\text{apl-UASB}}$ = Carga orgânica aplicada nos reatores UASB (kgDBO.d ⁻¹) AME = Atividade metanogênica específica (kgDQO _{CH4} .kgSTV ⁻¹ .d ⁻¹)
Massa de lodo excedente no reator	$M_{\text{excedente}} = M_{\text{reator}} - M_{\text{mínima}}$	$M_{\text{excedente}}$ = Massa de lodo excedente no reator (kgST ou kgSTV) M_{reator} = Massa de lodo presente no reator (kgST ou kgSTV) $M_{\text{mínima}}$ = Massa mínima de lodo a ser mantida no reator (kgST ou kgSTV)
Volume de lodo superior a ser descartado	$V_{\text{lodo-sup}} = M_{\text{lodo-sup}} / (\gamma \times (C_{\text{lodo-sup}}/100))$	$V_{\text{lodo-sup}}$ = volume de lodo superior $M_{\text{lodo-sup}}$ = Massa de lodo no ponto superior de descarte (kgST) $C_{\text{lodo-sup}}$ = concentração de lodo superior (%) γ = massa específica do lodo (kgST.m ⁻³)
Volume de lodo inferior a ser descartado	$V_{\text{lodo-inf}} = M_{\text{lodo-inf}} / (\gamma \times (C_{\text{lodo-inf}}/100))$	$V_{\text{lodo-inf}}$ = volume de lodo inferior (m ³ a cada Tc ou dia) $M_{\text{lodo-inf}}$ = Massa de lodo no ponto inferior de descarte (kgST) $C_{\text{lodo-inf}}$ = concentração de lodo inferior (%)

Parâmetro	Equações	Observações
Volume de lodo total a ser descartado	$V_{-lodo} = V_{-lodo-sup} + V_{-lodo-inf}$	V_{-lodo} = volume de lodo total a ser descartado (m^3 a cada tempo de ciclo analisado ou dia, se for monitorada a produção de lodo diariamente)
Capacidade volumétrica desaguamento natural	$CV_{-nat} = (L_{-leitos} \times B_{-leitos} \times H_{-leitos}) \times N_{-leitos}$	CV_{-nat} = Capacidade volumétrica do desaguamento natural (m^3) $L_{-leitos}$ = Comprimento dos leitos de secagem (m) $B_{-leitos}$ = Largura dos leitos de secagem (m) $H_{-leitos}$ = Lâmina máxima dos leitos de secagem (m) $N_{-leitos}$ = Número de unidades de leitos de secagem disponíveis
Número de ciclos diário do sistema mecanizado	$N_{ciclos} = \text{Horas}_f / TC_{mec}$	N_{ciclos} = Número de ciclos diário do sistema mecanizado Horas_f = Horas de funcionamento diárias (h) TC_{mec} = Tempo de ciclo do equipamento de desaguamento mecanizado ($h.ciclo^{-1}$)
Capacidade volumétrica desaguamento mecanizado	$CV_{-mec} = N_{ciclos} \times CD_{volume}$	CV_{-mec} = Capacidade volumétrica de desaguamento no dia de funcionamento ($m^3.d^{-1}$) CD_{volume} = Capacidade de desaguamento volumétrica do equipamento ($m^3.ciclo^{-1}$)
Concentração média do lodo nos pontos de descarte	$CM_{lodo-descarte} = \{ST_{p(j)} - [(ST_{p(j)} - ST_{p(i)}) \times (h_{p(j)} - h_{descarte})] / (h_{p(j)} - h_{p(i)})\} / 10000$	$CM_{lodo-descarte}$ = Concentração média do lodo nos pontos de descarte (%) $ST_{p(i)}$ = Massa de lodo no ponto i (acima do ponto de descarte) (kgST) $ST_{p(j)}$ = Massa de lodo no ponto j (abaixo do ponto de descarte) (kgST) $h_{p(i)}$ = Altura do ponto i (acima do ponto de descarte) (m) $h_{descarte}$ = Altura do ponto de descarte (m) $h_{p(j)}$ = Altura do ponto j (abaixo do ponto de descarte) (m)
Taxa de aplicação de sólidos	$TAS = M_{-excedente} / (L_{-leitos} \times B_{-leitos}) \times N_{-leitos}$	TAS = Taxa de aplicação de sólidos ($kgST.m^{-2}$)
Lâmina de lodo	$Lam_{-lodo} = (V_{-lodo}) / (L_{-leitos} \times B_{-leitos} \times N_{-leitos})$	Lam_{-lodo} = Lâmina de lodo (m)
Semanas necessárias para o descarte do lodo excedente	$Semanas = V_{-lodo} / [(CV \times \text{Dias}_f) - (V_{-lodo-produção} \times 7)]$	$Semanas$ = Semanas necessárias para o descarte do lodo excedente CV = Capacidade volumétrica do sistema (m^3) Dias_f = Dias de funcionamento por semana ($d.semana^{-1}$) $V_{-lodo-produção}$ = Volume de produção diária de lodo ($m^3.d^{-1}$)
Volume de lodo não descartado	$V_{-lodo-excedente} = V_{-lodo} + CV_{-nat}$	$V_{-lodo-excedente}$ = Volume de lodo excedente não descartado (m^3)

4.3 Linguagem de programação e layout da ferramenta computacional

A linguagem de programação escolhida para o desenvolvimento da ferramenta foi C# ou C Sharp (desenvolvimento essencialmente baseado em C++), desenvolvida pela Microsoft como parte da plataforma .NET. A escolha desta plataforma baseou-se no fato de que a mesma possui linguagem orientada a objetos, com uma interface de mais fácil compreensão e interação com os usuários. Além disso, o SIG-Lodo foi desenvolvido a partir da metodologia de prototipagem evolutiva.

Para orientar os especialistas em engenharia de software responsáveis pelo desenvolvimento da sequência de programação do SIG-Lodo, foram esboçadas telas modelos no *PowerPoint*, indicando como as variáveis deveriam estar dispostas nas telas. Nas Figura 4.2 e Figura 4.3 são apresentados alguns dos *layouts* desenvolvidos:

CADASTRAR ETE

Nome da ETE	<input type="text"/>	
Local da ETE (cidade-estado)	<input type="text"/>	
População atendida (hab)	<input type="text"/>	
Vazão afluente média (L/s)	<input type="text"/>	Início de plano
	<input type="text"/>	Fim de plano
Tratamento preliminar	<input type="text" value="▼"/>	
Reator UASB	<input type="text"/>	Unidades
Filtros biológicos percoladores	<input type="text"/>	Unidades
Decantador secundário	<input type="text"/>	Unidades
Envio de lodo aos reatores UASB	<input type="text" value="▼"/>	
Observação	Lodo destinado a atividades agrossilvopastoris: 40%	

ETE LABORÉAUX Habra-MS
 População atendida (hab): 100.000
 Vazões médias:
 Início de plano: 85 L/s
 Fim de plano: 150 L/s

Tratamento de fase líquida
 Reatores UASB: 8 unidades
 Filtros biológicos percoladores: 2 unidades
 Decantadores secundários: 2 unidades

Tratamento de fase sólida
 Leitos de secagem: 4 unidades
 Poço de lodo: 2 unidades
 Filtro prensa: 4 unidades

Lodo destinado a atividades agrossilvopastoris: 40%

Desaguamento mecanizado em operação diária	Desaguamento natural	
<input type="text" value="▼"/>	<input type="text" value="▼"/>	Tipo
<input type="text"/>	<input type="text"/>	Unidades
Poço de lodo	<input type="text"/>	Unidades

Figura 4.2 – Layout da tela do software SIG-Lodo referente ao cadastro da ETE, com informações gerais e das unidades que compõem as etapas de tratamento do esgoto

FASE LÍQUIDA

DQO TOTAL

Data da análise (dd/mm/aaaa)

Responsável

Observação

CONCENTRAÇÕES AFLUENTES (mg-DQO/L)	CONCENTRAÇÕES EFLUENTES (mg-DQO/L)	
Esgoto bruto <input type="text"/>	Reator UASB 01 <input type="text"/>	Filtro Biológico Percolador <input type="text"/>
Afluente aos reatores UASB <input type="text"/> ?	Reator UASB 02 <input type="text"/>	Efluente final <input type="text"/>
Ponto de amostragem considerando a vazão de esgoto bruto e vazão de lodo advindo dos decantadores secundários. Este ponto é automaticamente criado quando indicamos o envio de lodo no slide 5 (Cadastrar ETE)..	Reator UASB 03 <input type="text"/>	
	Reator UASB 04 <input type="text"/>	
	Efluente do conjunto de reatores UASB <input type="text"/>	

Figura 4.3 – Layout da tela do software SIG-Lodo referente a fase líquida, para inserção de dados de monitoramento em diferentes pontos de amostragem

4.4 Implementação e teste das funcionalidades da ferramenta computacional

Após a finalização da ferramenta computacional, foram efetuados testes a partir de dados operacionais de uma ETE em escala plena, além de uma avaliação por parte dos operadores e gestores da estação.

Estudo de casos foram realizados, considerando diferentes estratégias (cenários) de descarte de lodo para a escolha da melhor rotina operacional a ser adotada no gerenciamento do lodo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Funcionalidades e telas da ferramenta computacional

O SIG-Lodo foi dividido em quatro telas iniciais, que se desmembram em outras telas secundárias, a fim de melhor organizar a inserção de dados e a apresentação de resultados, como pode ser observado no fluxograma da Figura 5.1.

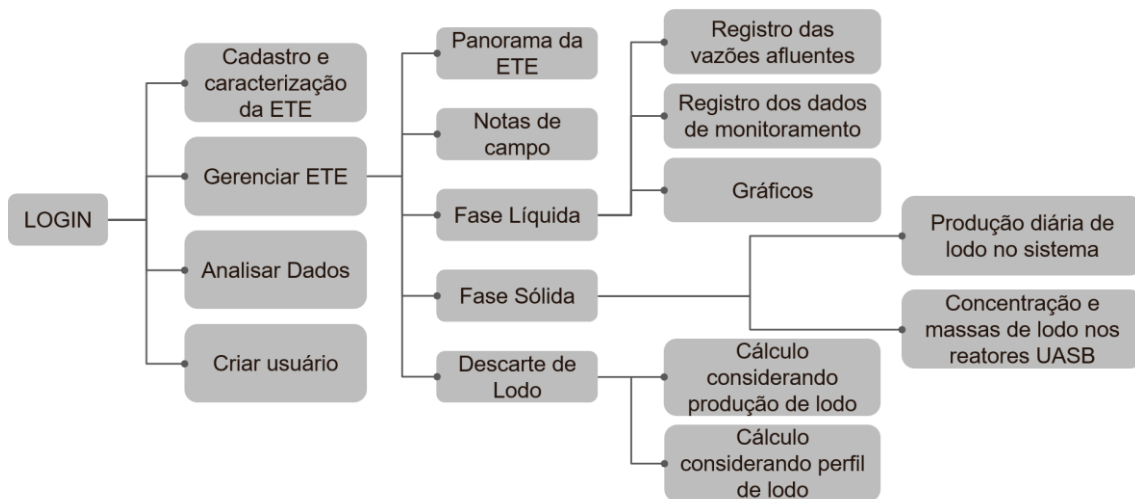


Figura 5.1 – Fluxograma das telas do SIG-Lodo

As duas principais telas são: “Cadastro e caracterização da ETE” e “Gerenciar ETE”. A tela “Cadastro e caracterização da ETE” é a tela a ser preenchida pelo usuário em um primeiro acesso ou quando houver alguma alteração da estação, como, por exemplo, ampliação de unidades. Esse espaço é destinado ao cadastro da ETE e à inserção das características de projeto das unidades, que subsidiarão alguns cálculos nas telas posteriores.

A tela “Gerenciar ETE” corresponde ao espaço para inserção de dados de monitoramento da estação e definição das rotinas operacionais. Ela se divide em outras cinco opções:

- **Panorama da ETE** (Figura 5.2): nessa opção, é possível visualizar gráficos referentes a série histórica da concentração de DQO no esgoto bruto e no efluente final, e, por meio da definição de um período operacional, são mostrados gráficos de barras com informações sobre: i) concentrações médias no esgoto bruto e efluente final, de DQO, DBO e sólidos suspensos totais (SST); e ii) eficiência média de remoção de DQO, DBO e SST. Além disso, são mostradas as principais características da estação e a vazão de esgoto afluente a ETE para o período operacional definido.
- **Notas de campo**: telas nas quais são inseridas observações referentes a operação da estação, como por exemplo, falta de produtos químicos necessários para o desaguamento

mecanizado, paralisações das unidades de desaguamento para manutenção, problemas observados nas unidades de tratamento. Informações importantes para entender a situação da ETE e planejar ações que minimizem alguns problemas operacionais, de forma a garantir o desempenho da estação.

- Fase líquida: telas nas quais podem ser registrados os dados de monitoramento da vazão média afluente a ETE, DBO total, DBO filtrada, DQO total, DQO filtrada, sólidos sedimentáveis (SSed), SST, sólidos suspensos voláteis (SSV), nitrogênio total (NT), nitrogênio total kjedall (NTK), nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$), nitrito ($\text{NO}_2\text{-N}$), nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$), pH, oxigênio dissolvido (OD), alcalinidade e temperatura. Nesse espaço podem ser visualizados gráficos de série histórica para as concentrações afluentes e efluentes e as eficiências para cada um desses parâmetros para um período operacional desejado, assim como gráficos box plot referente às concentrações dos parâmetros no esgoto bruto, efluente UASB e efluente final, e para as eficiências do UASB e global do sistema.
- Fase sólida: telas destinadas aos cálculos da produção de lodo no sistema, à inserção de dados de concentração do lodo nos pontos de amostragem ao longo do compartimento de digestão do reator UASB (perfil de sólidos) e aos cálculos das massas de lodo em cada reator do sistema, mínima a ser mantida e excedente a ser descartada.
- Descarte do lodo: telas em que são apresentados os cenários referentes a diferentes estratégias de descarte de lodo dos reatores UASB do sistema. Os cenários podem ser obtidos para o desaguamento natural, mecanizado ou misto, assim como para casos nos quais há ou não a realização do monitoramento do perfil de lodo nos reatores.

Cabe ressaltar que a sequência de telas foi definida seguindo o passo a passo dos cálculos a serem realizados, para que o usuário tenha maior facilidade em usar o SIG-Lodo e em entender a dinâmica das etapas envolvidas nos cálculos referentes ao gerenciamento de lodo.

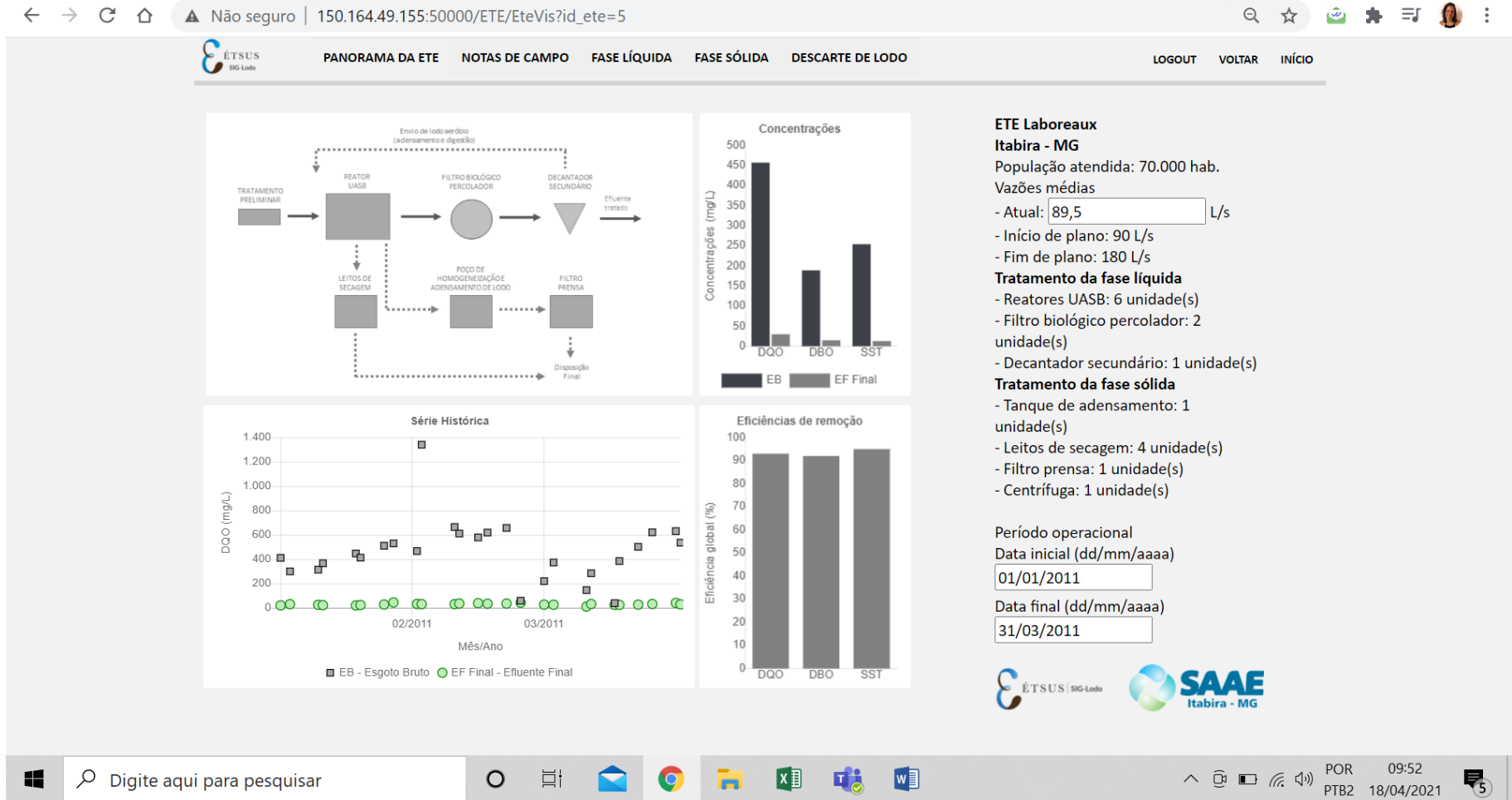


Figura 5.2 – Tela “Panorama da ETE”

5.2 Implementação e testes das funcionalidades da ferramenta computacional

A fim de testar as funcionalidades do SIG-Lodo, é apresentado um estudo de caso, com telas referentes às etapas de inserção de dados e de cálculos realizados, com foco nas telas correspondentes à fase sólida e ao descarte de lodo.

5.2.1 Caracterização da ETE em estudo

O estudo de caso realizado com dados reais de monitoramento de uma estação de médio porte, que atende uma população de 70.000 habitantes. A ETE é composta por oito reatores UASB, seguidos de dois filtros biológicos percoladores e um decantador secundário. O lodo gerado no processo de tratamento é desaguado majoritariamente por um filtro prensa. Além disso, a estação possui quatro leitos de secagem que podem ser usados como rota alternativa para o desaguamento do lodo. O efluente líquido tratado é lançado em curso d'água e o lodo desaguado é encaminhado para a disposição final no aterro sanitário do município. O biogás gerado é queimado em *flare*. O fluxograma da estação pode ser observado na Figura 5.3 – Fluxograma da ETE do estudo de caso

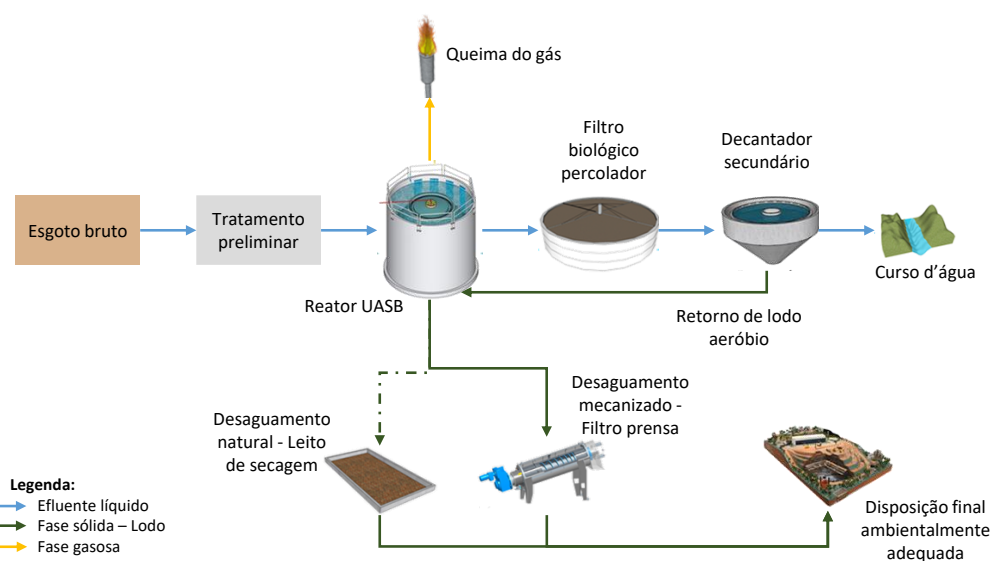


Figura 5.3 – Fluxograma da ETE do estudo de caso

As dimensões dos reatores UASB e dos FBP podem ser observadas na Tabela 5.1. Cabe ressaltar que o estudo de caso foi realizado considerando 6 reatores em operação na estação.

Tabela 5.1 – Dimensões dos reatores UASB e FBP da ETE

Unidade	Dimensões	
Reator UASB	Volume de cada reator (m ³)	605
	Volume total dos reatores (m ³)	4840
	Área de cada reator (m ²)	135

Unidade	Dimensões	
Filtros biológicos percoladores (FBP)	Área total dos reatores (m ²)	1080
	Volume de cada FBP (m ³)	994
	Volume total dos FBP (m ³)	1988
	Área de cada FBP (m ²)	397,6
	Área total dos FBP (m ²)	795,2

Os reatores UASB possuem quatro pontos de amostragem de lodo, com as alturas e volumes de influência apresentados na Tabela 5.2. Além disso, possui dois pontos de descarte, superior e inferior, com alturas de 1,2m e 0,5m, respectivamente, e compartimento de digestão com altura de 2,55m e volume de 343 m³.

Tabela 5.2 – Pontos de amostragem de lodo dos reatores UASB

Prontos de amostragem	Alturas (m)	Volumes de influência (m ³)
Ponto 1 (fundo)	0,5	100,9
Ponto 2	1,0	67,3
Ponto 3	1,5	67,3
Ponto 4	2,0	107,6

5.2.2 Fase líquida

Para o estudo de caso, foram utilizados dados de monitoramento de dois períodos distintos, a fim de comparar a situação da estação no que se refere ao gerenciamento de lodo e o impacto no desempenho da ETE. No período operacional 1 (PO1), têm-se os reatores UASB funcionando de maneira adequada e com pouca massa de lodo excedente (considerando excedente como o que está acima da massa mínima calculada). Já no período operacional 2 (PO2), a estação apresentou problemas operacionais nas unidades de desaguamento, que levaram ao acúmulo excessivo de lodo. É importante avaliar a contribuição da ferramenta SIG-Lodo para duas situações distintas, buscando demonstrar como ela pode auxiliar na operação e gestão da ETE em diferentes condições operacionais. Nos itens seguintes são apresentados resultados consolidados dos principais parâmetros de monitoramento da fase líquida da ETE, nos dois períodos operacionais objeto desse estudo.

Vazões afluentes à ETE

A Figura 5.4 apresenta o gráfico de série histórica referente às vazões do PO1. Nota-se que as vazões médias diárias variaram entre 70 e 100 L.s⁻¹, com vazão média no período em torno de 90 L.s⁻¹. Para o PO2 a variação das vazões médias diárias pode ser observada no gráfico da Figura 5.5. Salvo poucas exceções, as vazões variaram entre 90 e 140 L.s⁻¹, com vazão média no período em torno de 120 L.s⁻¹, valores mais elevados que no período 1.

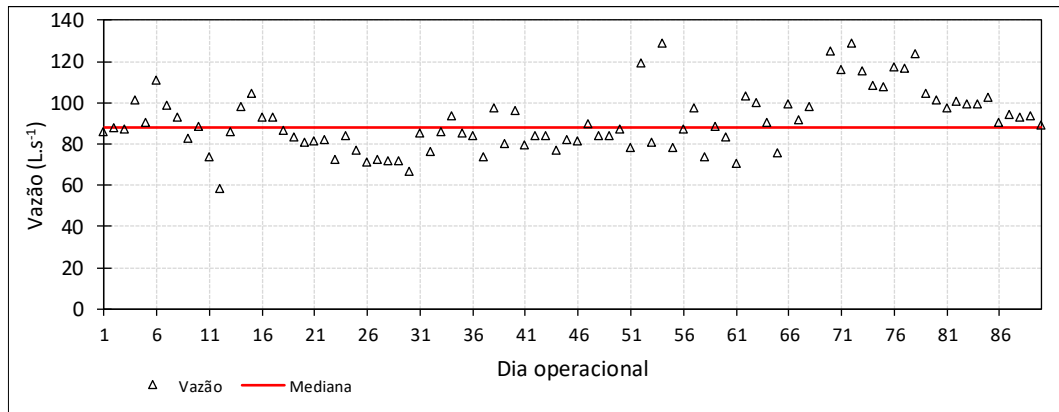


Figura 5.4 – Série histórica das vazões médias diárias afluentes à ETE no período operacional 1 (PO1)

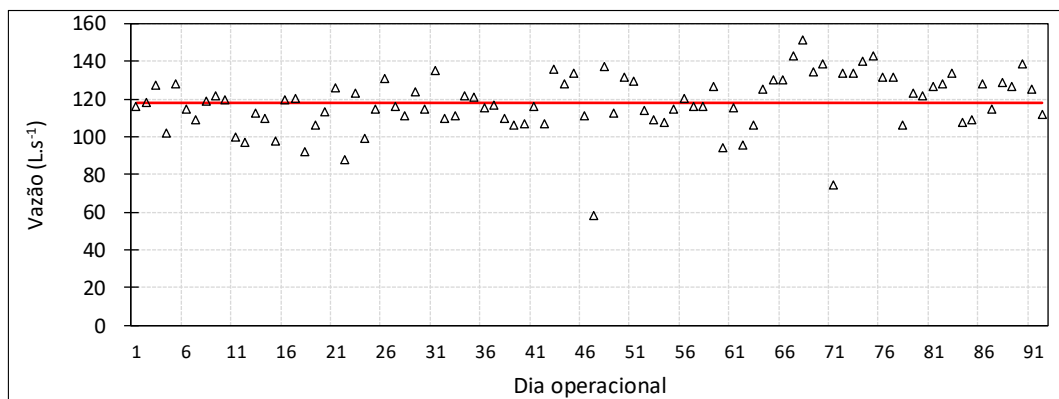
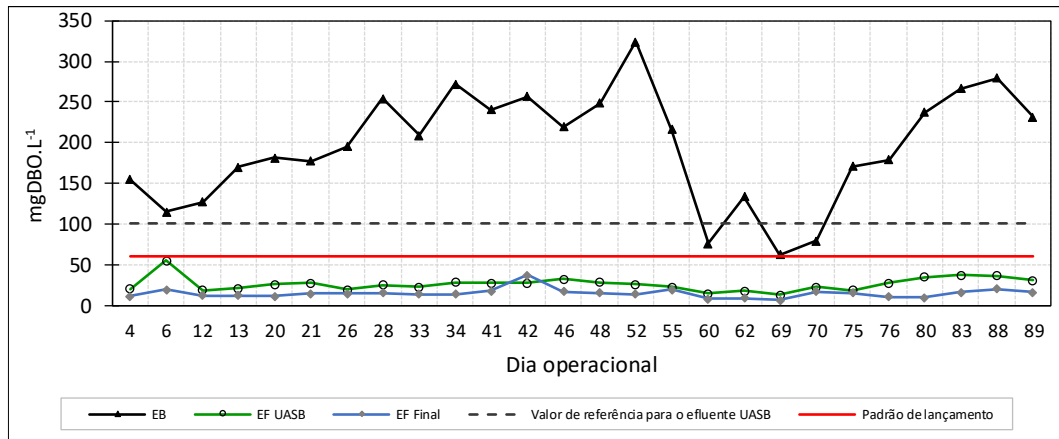


Figura 5.5 – Série histórica das vazões médias diárias afluentes à ETE no período operacional 2 (PO2)

Demanda Bioquímica de Oxigênio

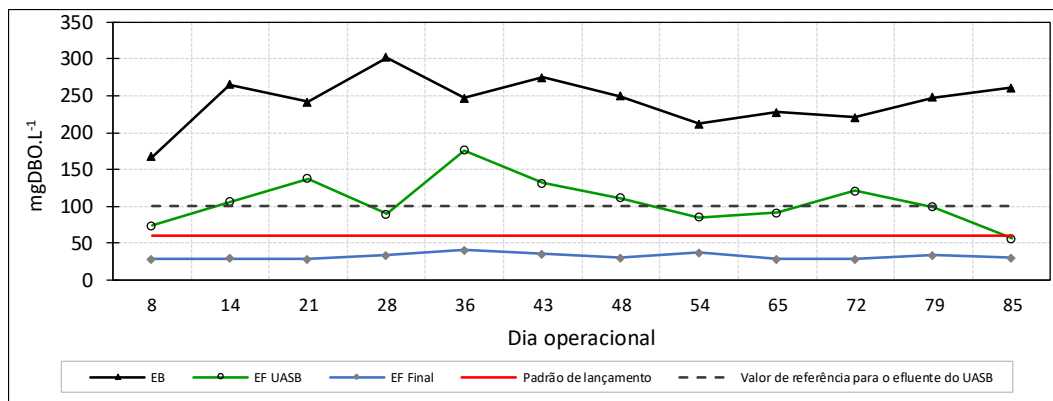
A Figura 5.6 e a Figura 5.7 trazem informações sobre as concentrações de DBO no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, do FBP e final. Pelas séries históricas (Figura 5.6 e Figura 5.7 é possível perceber que:

- As concentrações de DBO no efluente dos reatores UASB permaneceram abaixo da faixa típica de 70 a 100 mg.L⁻¹ (von SPERLING, 2014) em todas as amostras analisadas para o PO1, o que pode ser um indicativo de que não há perda de sólidos no efluente, ao contrário das análises referentes ao PO2, no qual a maioria se encontra acima de 100 mg.L⁻¹, indicando possível deterioração do efluente.
- Para as amostras do efluente final, verifica-se que, nos dois períodos, a concentração de DBO esteve abaixo do padrão de lançamento estabelecido pela Deliberação Normativa (DN) nº 01, de 2008 (DN COPAM/CERH 01/2008) (MINAS GERAIS, 2008), de 60 mg.L⁻¹.



Nota: EB: Esgoto Bruto, EF UASB: efluente dos reatores UASB, EF Final: efluente final da estação, pós decantador secundário.

Figura 5.6 – Série histórica das concentrações de DBO no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, e final da ETE para o período operacional 1



Nota: EB: Esgoto Bruto, EF UASB: efluente dos reatores UASB, EF Final: efluente final da estação, pós decantador secundário.

Figura 5.7 – Série histórica das concentrações de DBO no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, do FBP e final da ETE para o período operacional 2

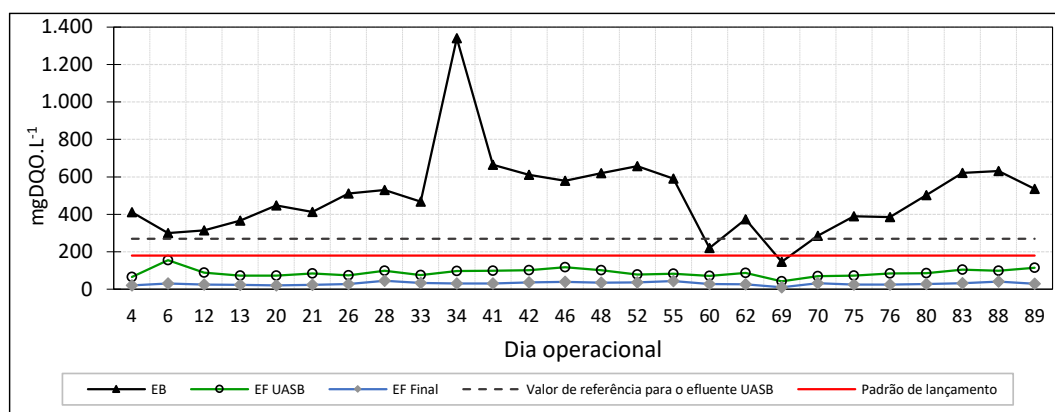
Demanda Química de Oxigênio

A Figura 5.8 e Figura 5.9 apresentam as concentrações de DQO no afluente (esgoto bruto) e nos efluentes de cada unidade da ETE, ao longo dos dois períodos de monitoramento em estudo. Pode-se perceber que:

- As concentrações de DQO afluente à ETE estiveram dentro da faixa esperada de concentração de DQO para esgotos com características tipicamente domésticas (450 a 800 mg.L^{-1}) na maioria das amostras analisadas, para os dois períodos.
- As concentrações de DQO no efluente dos reatores UASB, para o PO1, permaneceram muito abaixo da faixa típica de 180 a 270 mg.L^{-1} (von SPERLING, 2014) em todas as amostras analisadas, indicando que, possivelmente, não há perda de sólidos. Em relação ao PO2, pode-se observar que esses valores foram superiores a faixa típica, estando a maioria acima de 400 mg.L^{-1} . Em alguns casos, as concentrações foram superiores a concentrações do esgoto bruto, o que pode ocorrer devido ao retorno do lodo do decantador secundário,

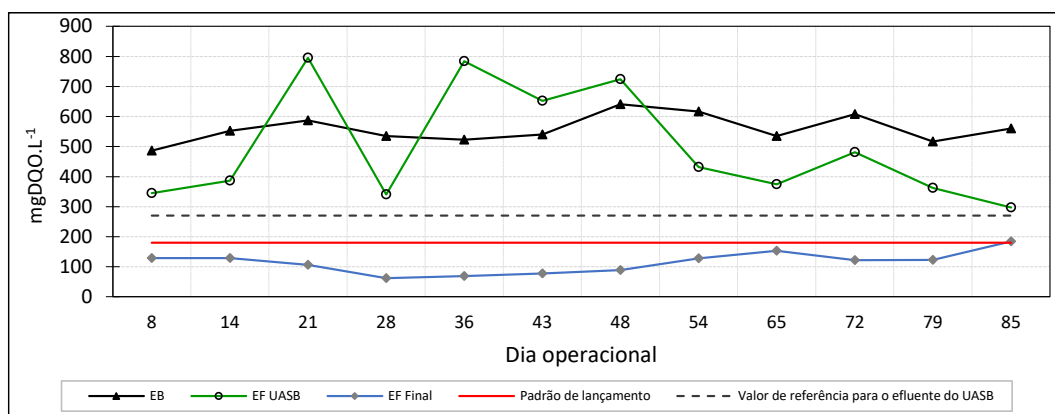
que, provavelmente, está com elevado teor de sólidos, devido à perda de sólidos no efluente dos reatores UASB.

- A concentração de DQO no efluente final da ETE é inferior ao limite de lançamento estabelecido pela Deliberação Normativa (DN) nº 01, de 2008 (180 mg.L^{-1}), excluindo uma amostra do PO2 que apresentou valor de 184 mg.L^{-1} .



Nota: EB: Esgoto Bruto, EF UASB: efluente dos reatores UASB, EF Final: efluente final da estação, pós decantador secundário.

Figura 5.8 – Série histórica das concentrações de DQO no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, do FBP e final da ETE para o período operacional 1



Nota: EB: Esgoto Bruto, EF UASB: efluente dos reatores UASB, EF Final: efluente final da estação, pós decantador secundário.

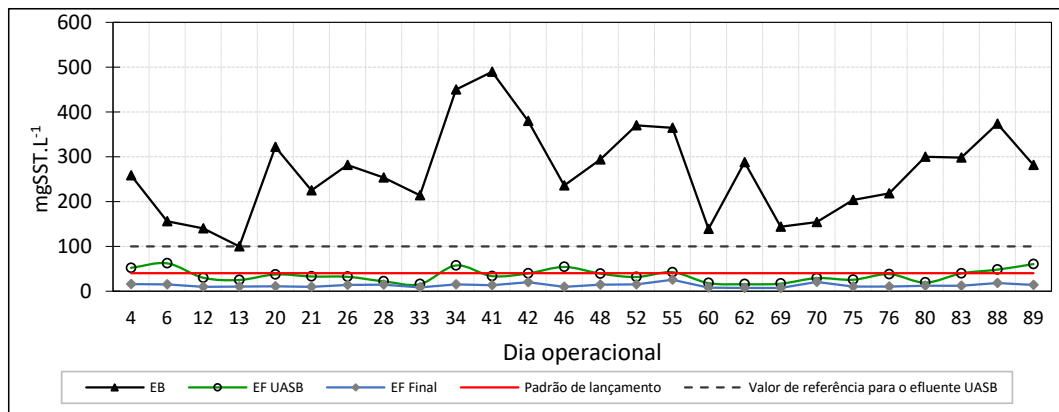
Figura 5.9 – Série histórica das concentrações de DQO no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, do FBP e final da ETE para o período operacional 2

Sólidos Suspensos Totais

Em relação aos SST, a Figura 5.10 e a Figura 5.11 apresentam as concentrações no esgoto bruto e nos efluentes de cada unidade que compõe o sistema de tratamento da estação. Pode-se observar que:

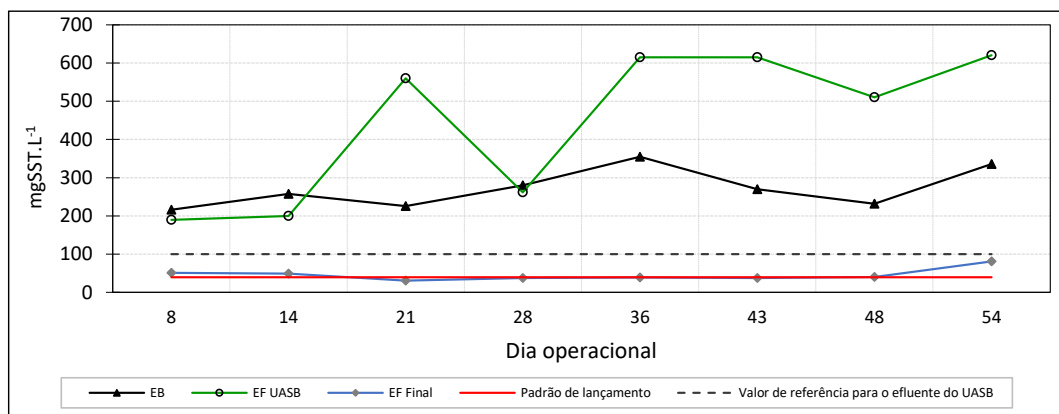
- No PO1 as concentrações de SST no efluente dos reatores UASB estiveram dentro da faixa típica reportada na literatura para efluente de reatores UASB (60 a 100 mg.L^{-1}) para o PO1, o que indica a não ocorrência de perda excessiva de sólidos no efluente dos reatores. O valor mediano no período foi igual a 33 mg.L^{-1} .

- Diferentemente, no PO2 todas as amostras analisadas apresentaram concentrações de SST no efluente dos reatores UASB acima dos valores típicos. O valor mediano no período foi extremamente elevado, igual a 535 mg.L^{-1} , demonstrando inequívoca da elevada perda de sólidos com o efluente.
- As concentrações de SST no efluente final da ETE estiveram abaixo do limite estabelecido pela Deliberação Normativa (DN) nº 01, de 2008, apresentando valores dentro da faixa típica estabelecida na literatura para efluente de reatores UASB seguidos por FBP ($20 \text{ a } 40 \text{ mg.L}^{-1}$) para o PO1. O mesmo não pode ser dito para o PO2, em que 50% das amostras apresentaram valores acima dessa faixa, indicando possível deterioração do efluente devido à perda de sólidos nos reatores UASB.



Nota: EB: Esgoto Bruto, EF UASB: efluente dos reatores UASB, EF Final: efluente final da estação, pós decantador secundário.

Figura 5.10 – Série histórica das concentrações de SST no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, do FBP e final da ETE para o período operacional 1



Nota: EB: Esgoto Bruto, EF UASB: efluente dos reatores UASB, EF Final: efluente final da estação, pós decantador secundário.

Figura 5.11 – Série histórica das concentrações de SST no esgoto bruto, efluente dos reatores UASB, do FBP e final da ETE para o período operacional 2

Definição do período utilizado nos cálculos da fase sólida

Os dados de monitoramento da fase líquida foram utilizados para os cálculos posteriores de fase sólida, referente a produção de lodo. Para isso, selecionou-se um período reduzido no PO1 e PO2, com resultados de monitoramento mais adequados para as análises (vazões mais próximas da mediana (Figura 5.12) e dados de monitoramento de perfil de lodo disponíveis). Para o PO1 o período de análise selecionado foi entre os dias operacionais 1 e 31, e para o PO2 entre os dias 32 e 61.

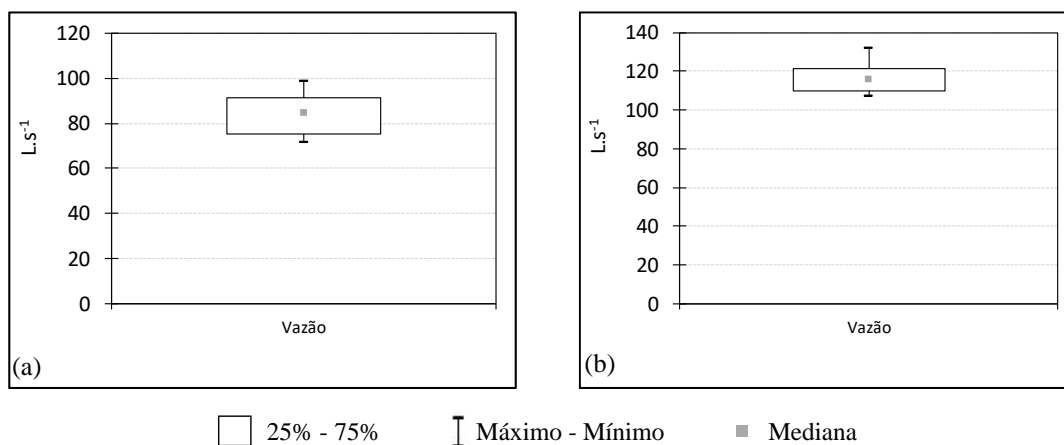


Figura 5.12 – Gráficos box-plot para as vazões afluentes a estação para o período a ser analisado do (a) PO1 e do (b) PO2

Como pode-se perceber pela Figura 5.13 as concentrações de DQO, DBO, SSed e SST do efluente dos reatores UASB e final da ETE em estudo estão dentro das faixas típicas da literatura e dos limites de lançamento estabelecidos pela legislação, para todo período operacional 1, com a estação apresentando desempenho adequado, tanto quanto ao efluente dos reatores UASB quanto ao efluente final. As medianas dos dados de monitoramento para o período escolhido (dia operacional 1 a 31) para análise da produção de lodo são apresentados na Tabela 5.3.

Já para o período operacional 2, de acordo com a Figura 5.14, os dados de monitoramento da fase líquida apresentaram resultados que indicam a deterioração do efluente dos reatores UASB e, conseqüentemente, dos efluentes das unidades de pós tratamento. A perda de sólidos no efluente pode estar relacionada à elevada concentração de SST e SSed no efluente dos reatores UASB. O período selecionado para o estudo tem as medianas dos dados de monitoramento apresentados na Tabela 5.3.

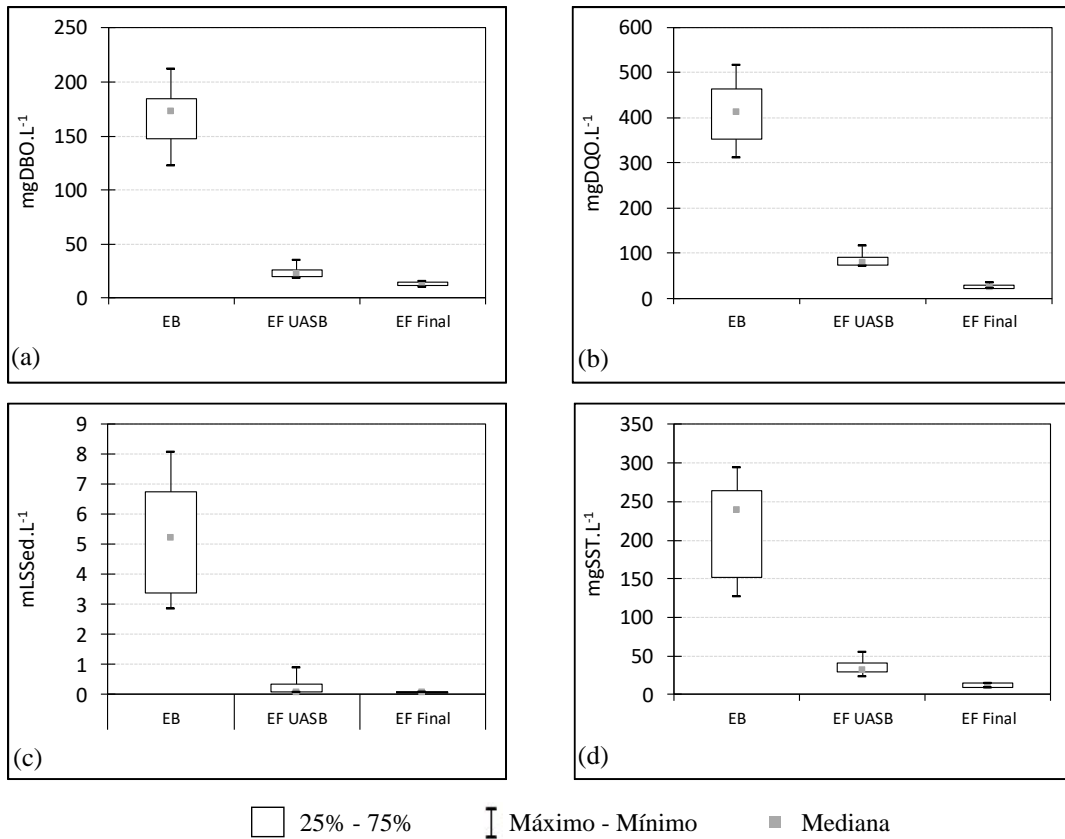


Figura 5.13 – Gráficos box-plot para (a) DBO, (b) DQO, (c) SSed e (d) SST referente ao PO1

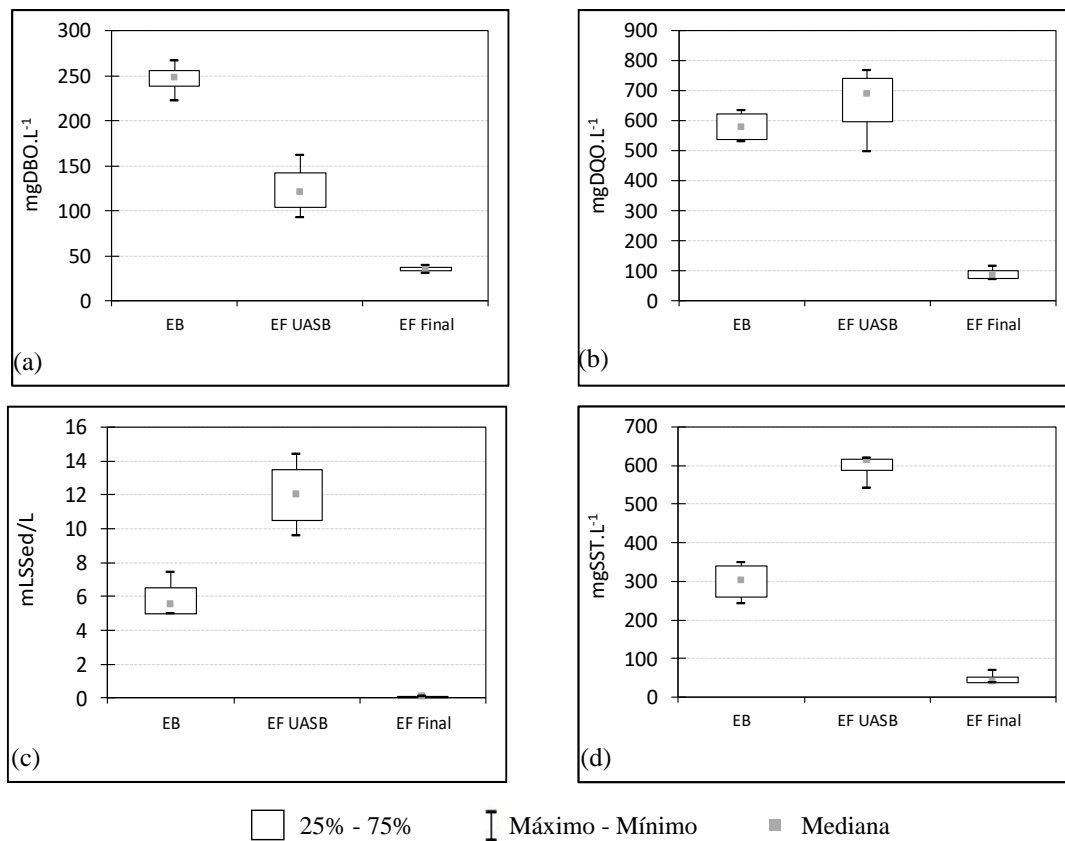


Figura 5.14 – Gráficos box-plot para (a) DBO, (b) DQO, (c) SSed e (d) SST referente ao PO2

Tabela 5.3 – Medianas dos dados de monitoramento para o PO1 e PO2

Parâmetros	Resultados monitorados para o PO1	Resultados monitorados para o PO2
Vazão afluyente	81 L.s ⁻¹	121 L.s ⁻¹
Concentração de DBO no esgoto bruto	174 mgDBO.L ⁻¹	248 mgDBO.L ⁻¹
Concentração de DBO no efluente do UASB	23 mgDBO.L ⁻¹	121 mgDBO.L ⁻¹
Concentração de DBO no efluente final	13 mgDBO.L ⁻¹	36 mgDBO.L ⁻¹
Concentração de DQO no esgoto bruto	412 mgDQO.L ⁻¹	579 mgDQO.L ⁻¹
Concentração de DQO no efluente do UASB	79 mgDQO.L ⁻¹	688 mgDQO.L ⁻¹
Concentração de DQO no efluente final	25 mgDQO.L ⁻¹	84 mgDQO.L ⁻¹
Concentração de SSed no esgoto bruto	5,2 mLSSed.L ⁻¹	5,5 mLSSed.L ⁻¹
Concentração de SSed no efluente do UASB	0,1 mLSSed.L ⁻¹	12 mLSSed.L ⁻¹
Concentração de SST no esgoto bruto	240 mgSST.L ⁻¹	303 mgSST.L ⁻¹
Concentração de SST no efluente do UASB	35 mgSST.L ⁻¹	615 mgSST.L ⁻¹

Todos os dados de monitoramento da fase líquida inseridos, além de serem utilizados para os cálculos da fase sólida, são armazenados em um banco de dados. Na tela “Gráficos” é possível selecionar um período, para o qual são gerados gráficos de série histórica e box plot das concentrações, bem como de eficiência de remoção (Figura 5.15).

Os gráficos e o banco de dados podem auxiliar os gestores e operadores da ETE a avaliarem, de forma mais consistente, o desempenho das unidades, assim como utilizarem os dados de monitoramento para auxílio da operação da estação, realidade que não é observada na maioria das estações no país. Além disso, podem ser utilizados para os relatórios de fiscalização exigidos pelos órgãos de fiscalização ambiental e pelas agências reguladoras dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário.

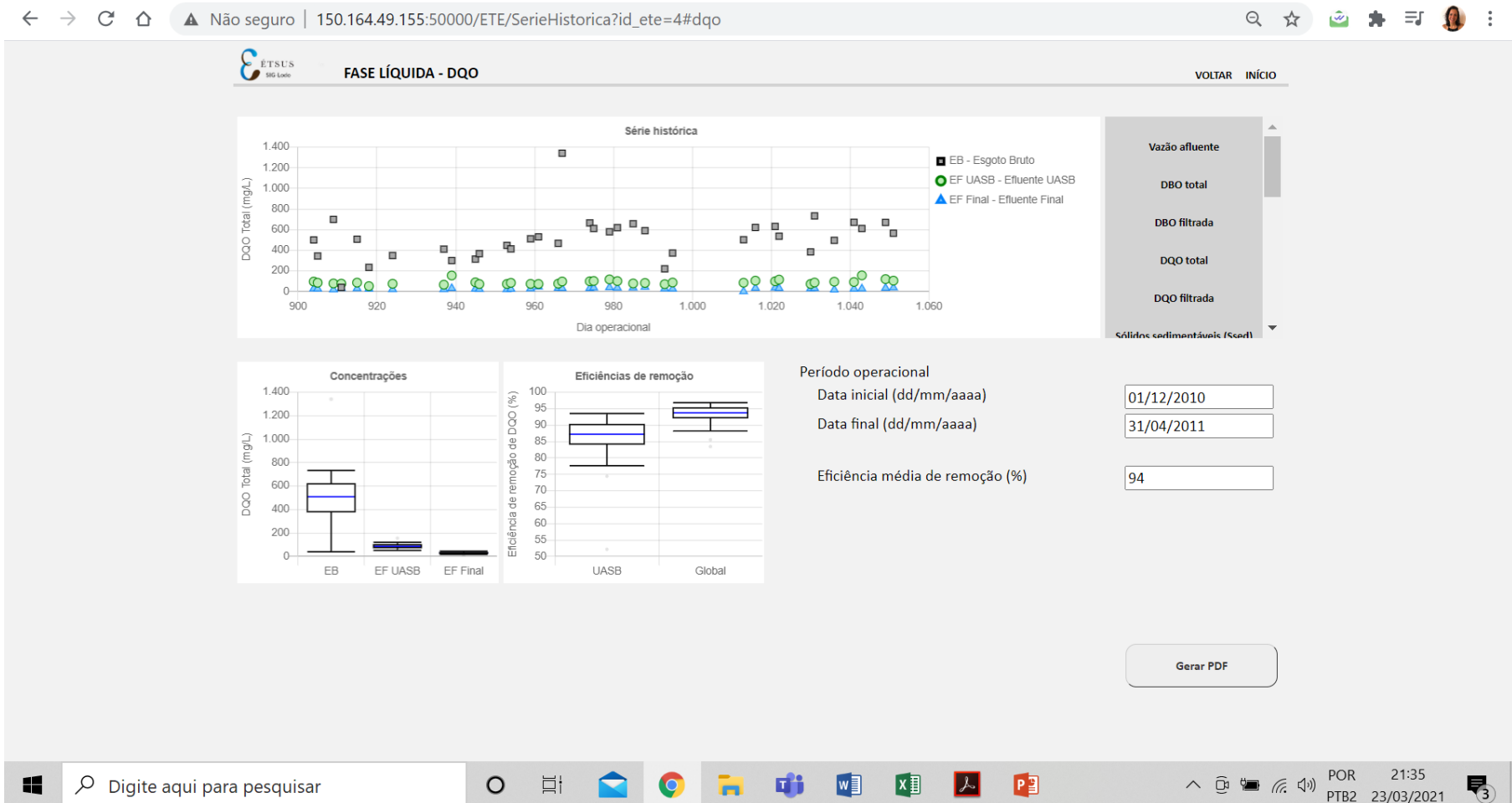


Figura 5.15 – Tela dos gráficos da fase líquida

5.2.3 Fase sólida

Após a inserção dos dados de cadastro, caracterização e de monitoramento da fase líquida da estação, pode-se realizar os cálculos referentes a fase sólida do tratamento de esgoto, principal objetivo da ferramenta SIG-Lodo.

O primeiro cálculo referente a fase sólida consiste na produção diária de lodo na estação, considerando as parcelas aeróbia e anaeróbia. O SIG-Lodo permite o uso de coeficientes de produção de sólidos observados (digitados manualmente) ou valores teóricos típicos. Nesta demonstração, a produção de lodo foi calculada a partir de valores típicos (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Valores típicos utilizados para o cálculo da produção de lodo

Parâmetros	Valores típicos
Coeficiente de produção de lodo anaeróbio	0,2 kgSST.kgDQO _{apl} ⁻¹
Massa específica de lodo	1.030 kgST.m ⁻³
Coeficiente de produção de lodo aeróbio	0,75 kgSST.kgDBO _{remov} ⁻¹
Estabilização da fração orgânica (STV) do lodo aeróbio	30%
Relação entre sólidos voláteis e sólidos totais (STV/ST)	75%

Na Figura 5.17 e na Figura 5.17 são apresentadas as cargas orgânicas aplicada nos reatores UASB e removida nos FBPs, calculadas para os períodos operacionais definidos anteriormente a partir dos dados de monitoramento da fase líquida, assim como a estimativa de produção diária de lodo no sistema.

Nota-se que para o PO2 o valor da produção de lodo foi consideravelmente maior (1.566 kgST.d⁻¹) que o PO1 (611 kgST.d⁻¹). Isso ocorre devido às cargas orgânicas aplicada nos reatores UASB e removida nos FBP, uma vez que para o PO2 esses valores foram de 6.323 kgDQO.d⁻¹ e 404 kgDBO.d⁻¹, respectivamente, enquanto que para o PO1 apresentaram-se com valores de 2.883 kgDQO.d⁻¹ e 45 kgDBO.d⁻¹, respectivamente.

Além da produção diária de lodo, o SIG-Lodo permite a estimativa da massa mínima e da massa excedente individualizada para cada reator da estação, a partir do perfil de sólidos ao longo do compartimento de digestão dos reatores UASB, conforme apresentado na Figura 5.18 e na Figura 5.19, para os dois períodos considerados. Cabe lembrar que a massa mínima é estabelecida considerando a atividade metanogênica específica (AME) e a carga de DQO removida no reator UASB (kgDQOCH₄), utilizando dados de monitoramento da fase líquida do período referido para o cálculo desse último parâmetro. É importante ressaltar que para cada reator UASB que compõe a ETE a ser analisada é possível preencher e construir os gráficos e análises das telas da Figura 5.18 e na Figura 5.19, sendo essas referentes ao reator UASB 1.

← → ↻ 🏠 Não seguro | 150.164.49.155:50000/ETE/ProducaoLodo?id_ete=5 🔍 ☆ 📧 ⚙️ 👤 ⋮

ETSUS 500 Lodo **FASE SÓLIDA - PRODUÇÃO DE LODO** VOLTAR INÍCIO

Período operacional
 Data inicial (dd/mm/aaaa)
 Data final (dd/mm/aaaa)

Cargas Orgânicas	Produção Diária de Lodo
Vazão afluente à ETE (L/s) <input type="text" value="81"/>	Coefficiente de produção de lodo anaeróbio (kg-SST/kg-DQO-aplicada) <input type="text" value="0,2"/>
DQO afluente ao reator UASB (mg-DQO/L) <input type="text" value="412"/>	Massa específica do lodo (kg-ST/m³) <input type="text" value="1030"/>
DQO efluente do reator UASB (mg-DQO/L) <input type="text" value="79"/>	Produção de lodo anaeróbio (kg-ST/d) <input type="text" value="577"/>
DBO afluente ao reator UASB (mg-DBO/L) <input type="text" value="174"/>	Coefficiente de produção de lodo aeróbio (kg-ST/kg-DBO-removida) <input type="text" value="0,75"/>
DBO efluente do reator UASB (mg-DBO/L) <input type="text" value="23"/>	Estabilização da fração orgânica (STV) do lodo aeróbio (%) <input type="text" value="60"/>
DBO efluente do FBP (mg-DBO/L) <input type="text" value="16"/>	Relação entre sólidos voláteis e sólidos totais (STV/ST) (%) <input type="text" value="0,75"/>
Carga orgânica aplicada nos reatores UASB (kg-DQO/d) <input type="text" value="2.883"/>	Produção de lodo aeróbio (kg-ST/d) <input type="text" value="34"/>
Carga orgânica removida no FBP (kg-DBO/d) <input type="text" value="45"/>	Produção diária de lodo no sistema (kg-ST/d) <input type="text" value="611"/>
<input type="button" value="Valores Típicos"/>	<input type="button" value="Valores Típicos"/>

Windows taskbar: Digite aqui para pesquisar | [Icons] | POR 15:26 PTB2 10/04/2021 [Notifications]

Figura 5.16 – Tela apresentando as cargas orgânicas e a produção diária de lodo no sistema para o período operacional 1

ETSUS
ETL Lodo

FASE SÓLIDA - PRODUÇÃO DE LODO

VOLTAR INÍCIO

Período operacional
Data inicial (dd/mm/aaaa)
Data final (dd/mm/aaaa)

Cargas Orgânicas

Vazão afluente à ETE (L/s)
DQO afluente ao reator UASB (mg-DQO/L)
DQO efluente do reator UASB (mg-DQO/L)
DBO afluente ao reator UASB (mg-DBO/L)
DBO efluente do reator UASB (mg-DBO/L)
DBO efluente do FBP (mg-DBO/L)
Carga orgânica aplicada nos reatores UASB (kg-DQO/d)
Carga orgânica removida no FBP (kg-DBO/d)

Valores Típicos

Produção Diária de Lodo

Coefficiente de produção de lodo anaeróbico (kg-SST/kg-DQO-aplicada)
Massa específica do lodo (kg-ST/m³)
Produção de lodo anaeróbico (kg-ST/d)
Coefficiente de produção de lodo aeróbico (kg-ST/kg-DBO-removida)
Estabilização da fração orgânica (STV) do lodo aeróbico (%)
Relação entre sólidos voláteis e sólidos totais (STV/ST) (%)
Produção de lodo aeróbico (kg-ST/d)
Produção diária de lodo no sistema (kg-ST/d)

Valores Típicos

Enviar

Digite aqui para pesquisar

POR 15:15
PTB2 10/04/2021

Figura 5.17 – Tela apresentando as cargas orgânicas e a produção diária de lodo no sistema para o período operacional 2

← → ↻ 🏠 🔒 Não seguro | 150.164.49.155:50000/ETE/FaseSolida?id_ete=5&id_reator=0 🔍 ☆ 🌐 ⚙️ 👤 ⋮

ETESUS **FASE SÓLIDA - REATOR 1** VOLTAR INÍCIO

Período: 01/01/2011 - 31/1/2011
 Data da medição (dd/mm/aaaa): 18/01/2011
 Dia operacional (d): 951
 Responsável:
 Atividade metanogênica específica (kg-DQOCH₄/kg-STV.d): 0,15

Observação:

Teor Médio de Sólidos no Efluente
 Sólidos suspensos totais (mg-SST/L): 14
 Sólidos sedimentáveis (mL-SSed/L): 0,15

Valores Típicos

Concentrações de Lodo	(mg-ST/L)	(mg-STV/L)
Ponto 1 (Fundo):	41.552,00	20.877,00
Ponto 2:	29.445,00	14.988,00
Ponto 3:	21.175,00	8.110,00
Ponto 4:	599,00	264,50

Massa de Lodo	(kg-ST)	(kg-STV)
Presente no reator	7.653	3.685
Mínima a ser mantida no reator	3.470	2.082
Excedente	4.183	1.603

Enviar

Windows taskbar: Digite aqui para pesquisar, icons for network, volume, and system tray showing 13:24 on 11/04/2021.

Figura 5.18 – Prints das telas apresentando as massas de lodo no reator UASB 1 e concentrações de sólidos no efluente anaeróbico para o PO1

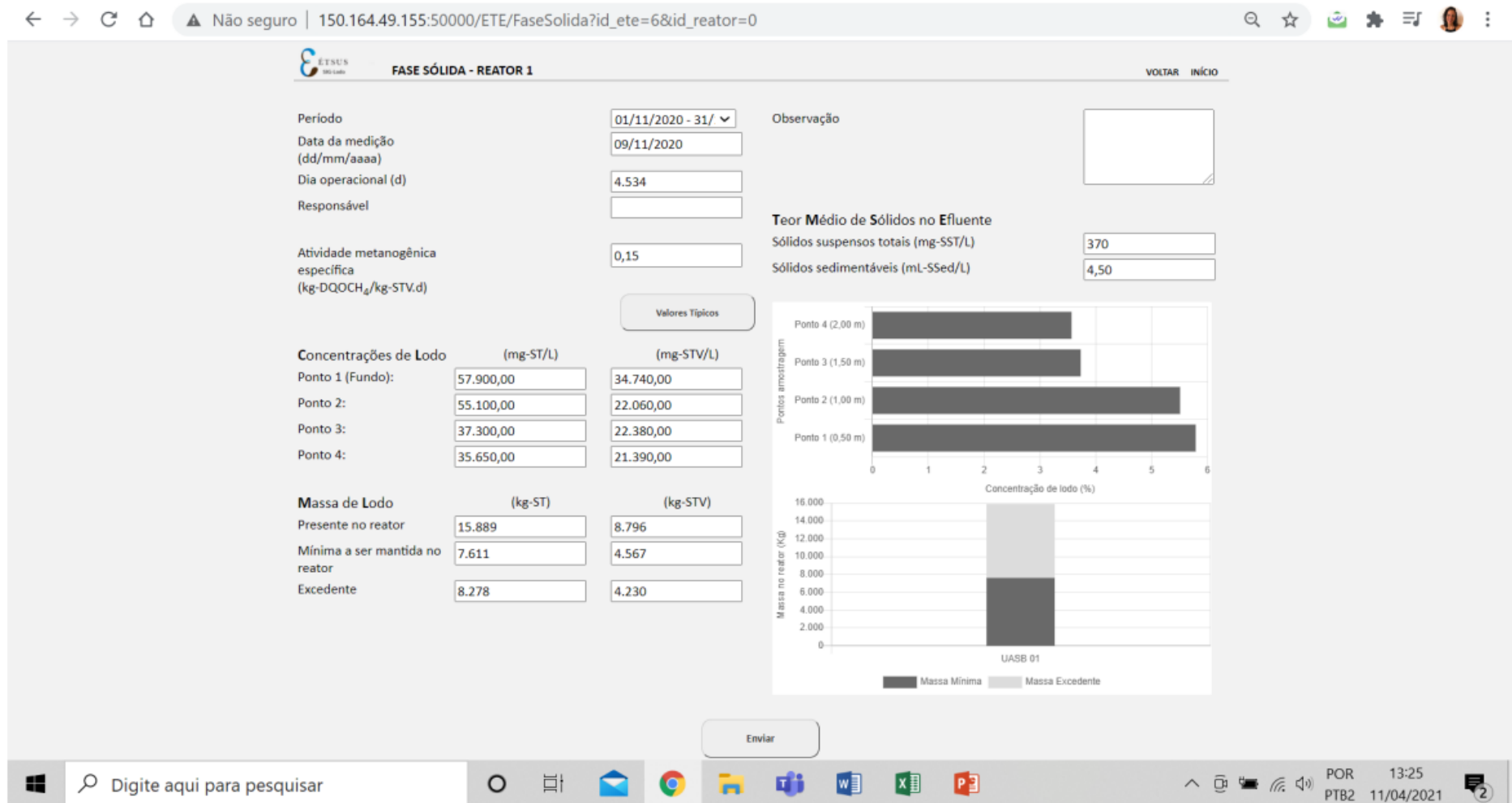


Figura 5.19 – Prints das telas apresentando as massas de lodo no reator UASB 1 e concentrações de sólidos no efluente anaeróbico para o PO2

Na Figura 5.20 e Figura 5.21 são apresentadas as concentrações de ST ao longo da altura do compartimento de digestão (perfil de lodo) para os 6 reatores UASB da estação, considerando os dois períodos analisados. Essas concentrações e, também, de STV, são inseridas pelo usuário no SIG-Lodo. É possível observar que para o PO2, todos os reatores UASB analisados possivelmente estão perdendo sólidos no efluente, já que a concentração de ST no ponto 4 (2,00 m), interface entre os compartimentos de digestão e decantação, se encontra acima de 3%, evidenciando a necessidade de descarte de lodo. Já no PO1, todos os reatores UASB analisados apresentaram a concentração no ponto 4 (2,00 m) em torno de 0,1%, indicando que, possivelmente, não há perda de sólidos no efluente.

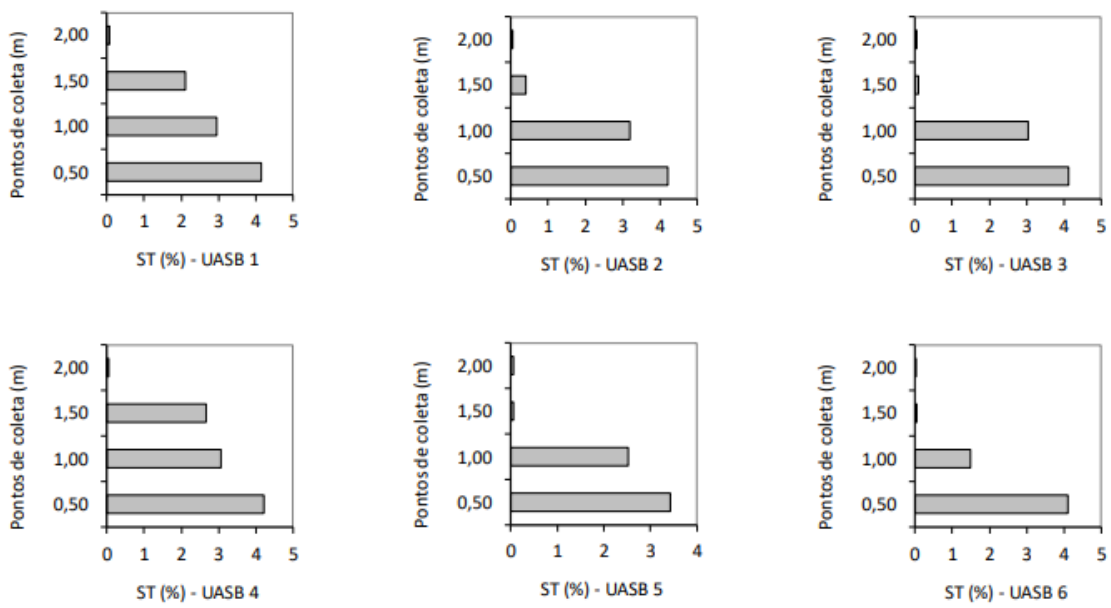


Figura 5.20 – Perfil de lodo nos reatores UASB para o período operacional 1 (PO1)

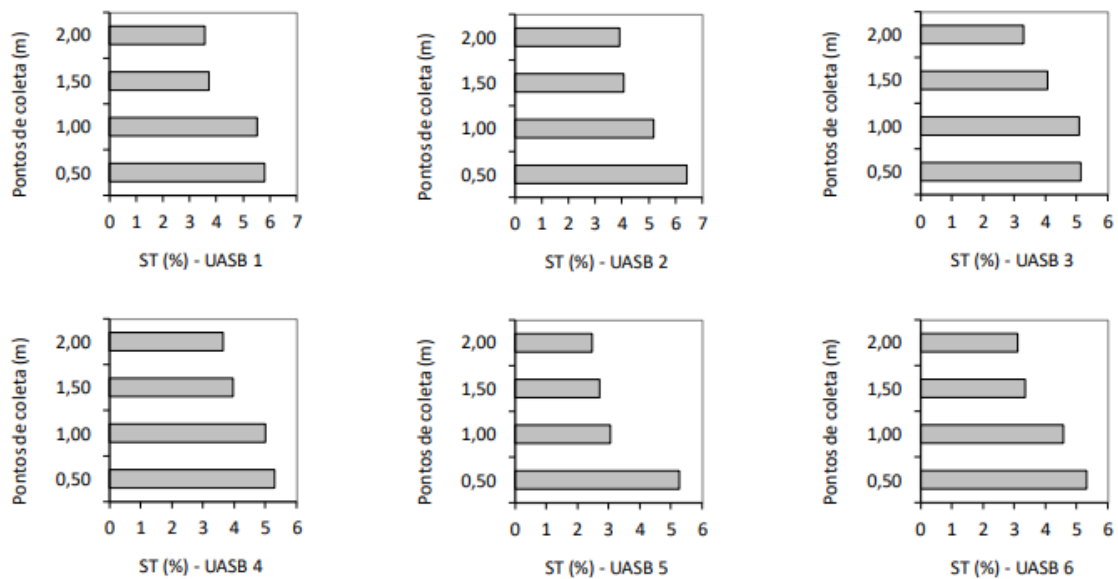


Figura 5.21 – Perfil de lodo nos reatores UASB para o período operacional 2 (PO2)

Para se evitar a perda de sólidos com o efluente nos reatores UASB e, conseqüentemente, sua deterioração o monitoramento da concentração de sólidos totais (ST) no ponto mais alto do compartimento de digestão é de grande relevância. Um valor comumente utilizado como referência consiste em manter a concentração de 0,5% de ST no ponto de amostragem mais elevado (interface do compartimento de digestão com o de decantação).

Com o armazenamento das informações no banco de dados, o SIG-Lodo gera automaticamente o gráfico de perfil de lodo em termos de ST e apresenta os resultados referentes às massas de lodo mínima a ser mantida em cada reator UASB reator e excedente a ser descartada, como foi apresentado na Figura 5.19. Para a massa excedente considera-se o total da massa no interior do reator subtraída da massa mínima. Para o PO1 a massa excedente do reator UASB 1 foi de 4.183 kgST, enquanto que para o PO2 esse valor foi de 8.278 kgST. Já a massa mínima foi de 3.470 kgST para o PO1 e de 7.611 para o PO2. Evidenciando um valor bastante superior para o reator UASB do PO2, que pode ser explicado pelas concentrações de DQO afluente aos reatores UASB, como mencionado no item 5.2.2.

A partir da Figura 5.22 e Figura 5.23, pode-se comparar a concentração de SST e SSed no efluente dos reatores UASB com a massa excedente em kgST. Cabe ressaltar que reatores UASB operados adequadamente (sem excesso de lodo) potencialmente produziram efluentes com concentrações de sólidos sedimentáveis abaixo de 1 mL.L^{-1} , o que pode ser observado para todos os reatores do PO1 (Figura 5.22b), ao contrário do PO2 (Figura 5.23b), em que apenas um dos reatores, o UASB 5, apresentou essa concentração. Nota-se que reatores UASB 1, 2, 3 e 4 apresentam elevadas concentrações de sólidos sedimentáveis no efluente (medianas variando entre 4 e 10 mL.L^{-1}), o que confirma que esses reatores estão com massas e concentrações de lodo acima de suas capacidades de armazenamento, sendo observada perda de sólidos no efluente. Já para os SST, quando a concentração se encontra acima de 100 mgSST.L^{-1} é um indicativo de perda de sólidos no efluente. Nota-se, por exemplo, que em nenhum reator do PO1 (Figura 5.22a) ultrapassou o valor de 40 mgSST.L^{-1} e que todos os reatores do PO2 (Figura 5.23a) indicam possível perda de sólidos.

Além disso, para os gráficos referentes ao PO2 (Figura 5.23), pode-se perceber que quando o reator UASB está com a massa excedente elevada, as concentrações de SST e SSed também são maiores, e apresentam uma tendência em relação a quantidade de lodo presente no reator. Essa tendência é mais clara quando se observa o teor de SSed (Figura 5.23b).

Cabe ressaltar, que para que a massa de lodo a ser descartada e adequados cenários de descarte sejam calculados, é importante que seja realizado o monitoramento contínuo das concentrações

Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG

de lodo em diferentes pontos de amostragem ao longo do compartimento de digestão dos reatores UASB, sendo esses resultados avaliados em conjunto com os dados de monitoramento da fase líquida.

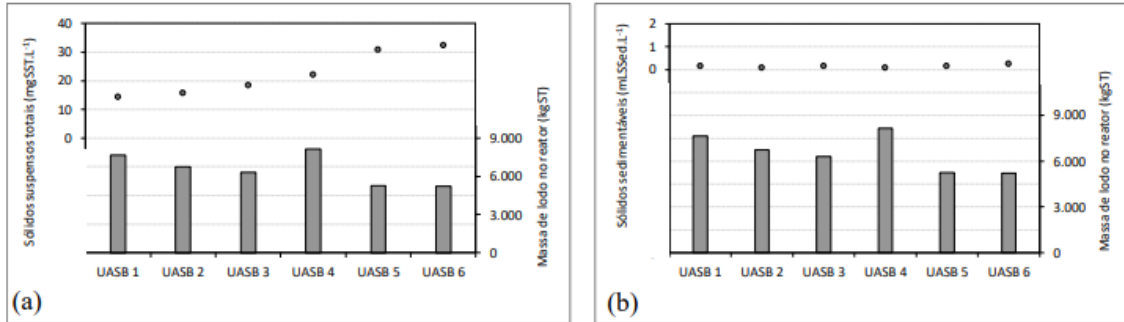


Figura 5.22 – Análise do teor de sólidos de (a) SST e (b) SSed em comparação com a massa excedente no reator para o PO1

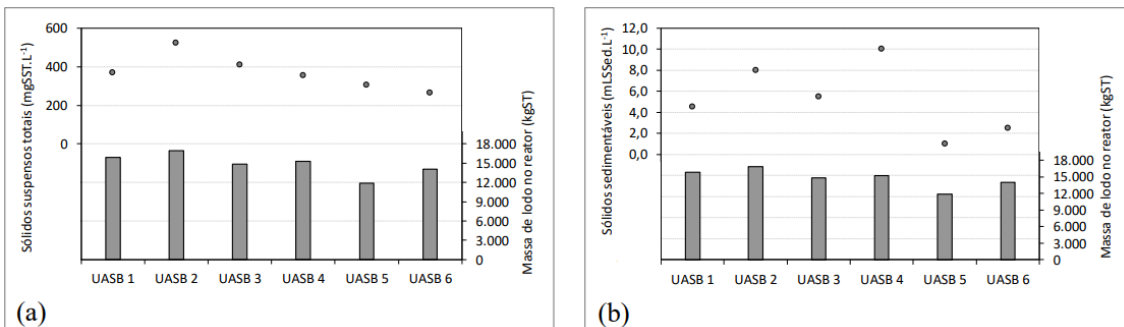


Figura 5.23 – Análise do teor de sólidos de (a) SST e (b) SSed em comparação com a massa excedente no reator para o PO2

Como já mencionado no item de revisão de literatura, quando os reatores UASB trabalham com quantidades de lodos que ultrapassam suas capacidades de retenção e armazenamento, eles podem apresentar: i) perda excessiva de sólidos no efluente, impactando a qualidade do mesmo; ii) redução de eficiência física de remoção de material particulado, devido ao esgotamento da capacidade de retenção e armazenamento; e iii) sobrecarga nas unidades de pós-tratamento, como por exemplo a colmatção do meio suporte dos FBPs. Por isso, é importante que se adote rotinas de descarte de lodo adequadas, visando garantir o desempenho da ETE.

O SIG-Lodo permite, então, com a obtenção desses dados e dos gráficos gerados, que o usuário consiga avaliar, individualmente, a situação dos reatores UASB, a fim de traçar estratégias que busquem minimizar os impactos que podem ser causados à qualidade do efluente dos reatores.

A Tabela 5.5 mostra os valores referentes à fase sólida considerados no SIG-Lodo de acordo com cada período analisado

Tabela 5.5 – Tabela resumo dos parâmetros referentes à fase sólida

Parâmetros	Resultados obtidos para o PO1	Resultados obtidos para o PO2
Produção de lodo	611 kgST.d ⁻¹	1.566 kgST.d ⁻¹
Massa excedente total	18.468 kgST	43.170 kgST
Concentração média de ST ponto de descarte inferior	4,04 %	5,54%
Concentração média de ST ponto de descarte superior	1,98 %	4,30%
Capacidade volumétrica de desaguamento mecanizado instalada	10 m ³ .ciclo ⁻¹	10 m ³ .ciclo ⁻¹
Quantidade de filtro-prensa	1	1
Capacidade volumétrica de desaguamento natural instalada	52,5 m ³ .leito ⁻¹	52,5 m ³ .leito ⁻¹
Quantidade de leitos de secagem	4	4

5.2.4 Descarte de lodo

Com a caracterização do sistema em termos de produção diária de lodo e de massa excedente de lodo em cada reator UASB, e resgate de informações que compõem as etapas anteriores da ferramenta, o SIG-Lodo executa iterações a partir do ícone “Definir cenários”, e apresenta os resultados para os cenários de descarte de lodo.

As variáveis e parâmetros resgatados para os cálculos dos cenários de lodo, as quais são apresentadas na Figura 5.24 e Figura 5.25 (Tabela 5.5), são: i) tipo de equipamento ou sistema de desaguamento; ii) número de unidades instaladas para o desaguamento; iii) capacidade volumétrica instalada para o desaguamento; iv) produção de lodo diária no sistema; v) massa excedente de lodo no sistema. Além disso, alguns parâmetros são definidos, como: i) horas e dias de funcionamento para o desaguamento mecanizado (Figura 5.25); ii) número de unidades disponíveis e lâmina máxima de lodo para o desaguamento natural (Figura 5.24); e iii) período entre dois descartes. Assim como as concentrações médias de lodo nos pontos de descarte e capacidade volumétrica disponível para o desaguamento são calculadas.

DESCARTE DE LODO - DESAGUAMENTO NATURAL

Período Operacional
01/11/2020 - 31/11/2020

Período entre dois descartes (d) 21
Número de unidades disponíveis 4

Desaguamento Natural

Tipo de sistema Leito de secagem
Número de unidades instaladas 4
Lâmina máxima de descarte 0,35
Capacidade volumétrica instalada de desaguamento natural (m³) 210
Capacidade volumétrica disponível de desaguamento natural (m³) 210

Produção diária e Massa de lodo excedente

Produção diária de lodo no sistema (kg-ST/d) 1.566
Massa total de lodo excedente - passivo de lodo no sistema (kg-ST/d) 43.170
Concentração média de lodo no ponto de descarte superior (%) 4,30
Concentração média de lodo no ponto de descarte inferior (%) 5,54

DEFINIR CENÁRIOS

Figura 5.25 – Tela de resgate dos parâmetros para o desaguamento natural do PO2 com perfil de sólidos

A partir das informações resgatadas, inseridas e calculadas, os cenários de lodo são definidos seguindo o fluxograma apresentado na Figura 5.26. Os cálculos podem ser feitos para o desaguamento natural, desaguamento mecanizado ou para a combinação entre os dois sistemas, caso a ETE possua essa possibilidade. A partir dos percentuais de descarte e das concentrações médias, é calculado o volume a ser descartado em cada ponto. No caso do desaguamento natural, a lâmina máxima e a taxa de aplicação de sólidos são verificadas a partir do volume a ser descartado, e assim, determina-se o volume de lodo que ficará remanescente nos reatores, ou seja, que não poderá ser descartado. No caso do desaguamento mecanizado, o número de ciclos do equipamento é definido pela rotina operacional, dias por semana e horas por dia de funcionamento, e assim é determinada a capacidade de processamento diária do sistema, possibilitando o cálculo das semanas necessárias para o descarte de todo o lodo excedente.

Os volumes de lodo não descartados (desaguamento natural) e as semanas necessárias para descarte do volume excedente (desaguamento mecanizado) são calculados de forma a compor os diferentes cenários de descarte que o operador da ETE poderá adotar. Evidentemente, todos os cenários são calculados considerando a capacidade de processamento da unidade de desaguamento que integra a ETE.

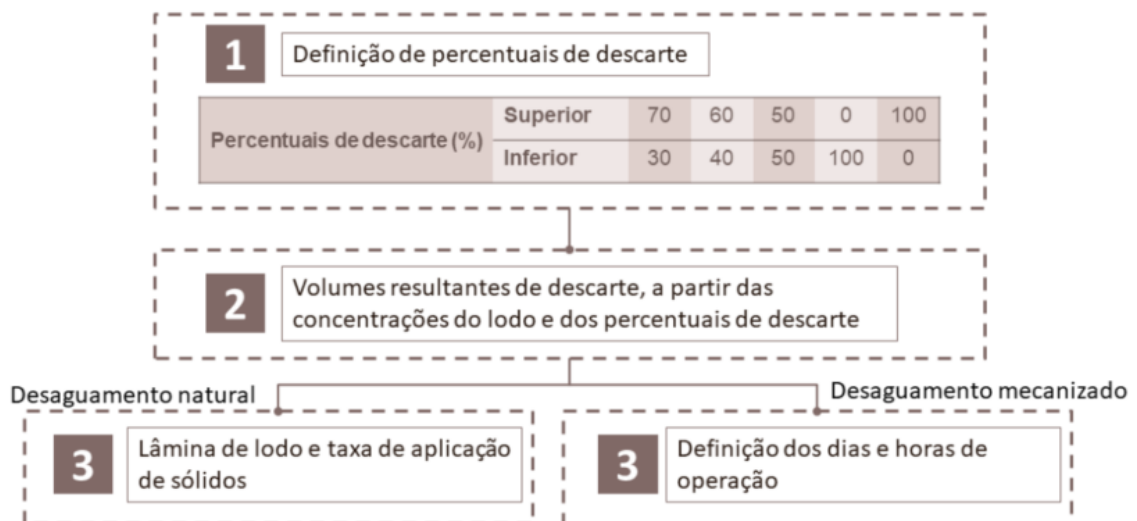


Figura 5.26 – Fluxograma das iterações para os cálculos dos cenários

O SIG-Lodo permite que as estratégias de descarte de lodo sejam calculadas por estações que realizam ou não o perfil de lodo nos reatores UASB. Caso a estação não execute esse monitoramento, o volume de lodo excedente será estimado pelo produto entre a produção diária e o período, em dias, desde o último descarte, a fim de se obter a possível massa acumulada dentro do reator. Para se comparar os resultados que podem ser obtidos considerando ou não o perfil de lodo, calculou-se, para os dados de monitoramento do PO1 da estação em estudo e

considerando o desaguamento natural, os cenários de descarte para as duas situações. Os resultados obtidos para as duas situações são apresentados na Figura 5.27, na Figura 5.28 e na Figura 5.29. Em virtude da série de iterações executadas, o usuário poderá ainda redefinir outros cenários pelo acionamento do ícone “Anterior”.

Cabe ressaltar que os cálculos apresentados na Figura 5.27 foram realizados considerando 21 dias entre dois descartes, que corresponde ao tempo de ciclo comumente adotado no Brasil para o desaguamento de lodo em leitos de secagem. O tempo de ciclo pode variar de acordo com as condições climáticas da localidade da estação e, também, com a logística adotada para remoção do lodo dos leitos de secagem.

Pode-se perceber que, quando a estação não considera o perfil de lodo nos cálculos de descarte de lodo, o volume excedente não descartado é consideravelmente menor (Figura 5.29). Por exemplo, em relação aos cálculos realizados sem considerar o perfil de lodo (Figura 5.27), três cenários se mostraram compatíveis com a altura da lâmina máxima de lodo e com a taxa de aplicação de sólidos, enquanto que na outra situação (Figura 5.28), em que os cálculos consideram o perfil de lodo, apenas um cenário foi compatível, restando um significativo volume de lodo no interior dos reatores UASB que precisariam ser descartados posteriormente. Quando a ETE não realiza o monitoramento da concentração de lodo em diferentes alturas do compartimento de digestão, a fim de se obter a massa de lodo presente no interior do reator UASB, o cálculo do volume de lodo a ser descartado retorna valores subestimados, visto que se considera apenas a produção diária de lodo no sistema, sem avaliar a massa de lodo excedente no interior do reator. Diversas ETEs do Brasil não realizam perfil de lodo, o que pode acarretar uma falsa ideia de adequação do sistema, quando na realidade o compartimento de digestão pode estar com a quantidade de sólidos acima da capacidade de armazenamento e retenção.

Além da análise do volume excedente a ser descartado, a Figura 5.27 e a Figura 5.28 mostram a análise que feita é realizada referente à lâmina de lodo e à taxa de aplicação de sólidos nos leitos de secagem. Nota-se que em alguns cenários aparece a mensagem “Incompatível” no campo referente a essas variáveis, isso acontece quando a lâmina de lodo resultante dos cálculos ultrapassa a lâmina máxima do leito, igual a 0,35 cm para os leitos de secagem da estação analisada, e quando a taxa de aplicação de sólidos ultrapassa o valor de referência de 15 kgST.m⁻³, preconizado pela Norma Brasileira (NBR), da Associação Brasileira de Notas Técnicas (ABNT), nº 12209/2011 (ABNT, 2011), o que deve ser evitado, quando possível.

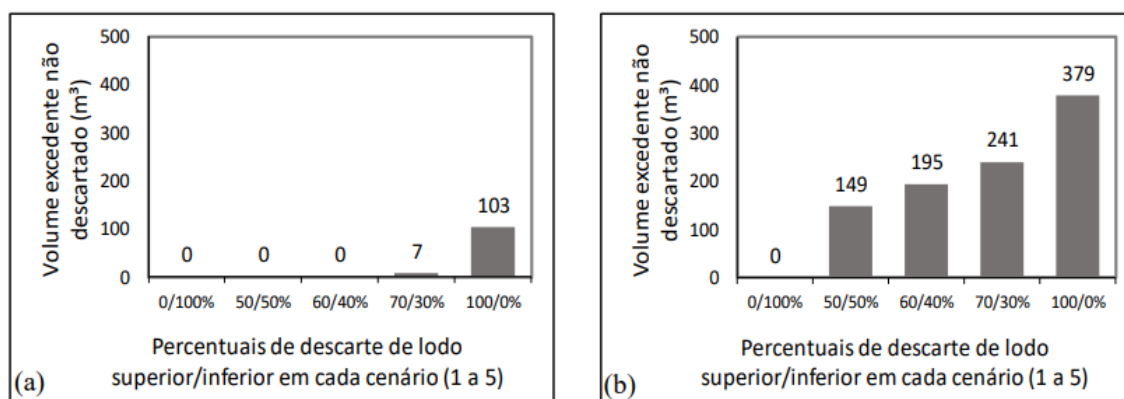


Figura 5.29 – Volume de lodo excedente não descartado para os cenários (a) quando não se realiza e (b) quando se realiza perfil de lodo na ETE

Quando não é possível o monitoramento da qualidade e quantidade de lodo no interior do reator, a partir do perfil de lodo, é importante que o operador ou gestor avalie a qualidade do efluente dos reatores UASB, com base nas concentrações de sólidos sedimentáveis e sólidos suspensos totais, a fim de verificar se está ocorrendo perda de sólidos para as unidades de pós tratamento. Esses resultados podem ser visualizados, para o período definido pelo usuário, em forma de gráficos de série histórica e box plot na tela “Fase líquida”.

Para os cenários de descarte de lodo, a análise foi realizada considerando os dois períodos operacionais definidos no item 5.2.2. No período operacional 1, os reatores UASB apresentavam concentrações de lodo no ponto de amostragem mais alto do compartimento de digestão abaixo de 0,5% ST (Figura 5.20), valor de referência adotado para controle de operação visando evitar a perda de sólidos no efluente. Já no Período operacional 2, os reatores UASB apresentavam elevadas concentrações nesse ponto de amostragem, da ordem de 3,0% ST (Figura 5.21), bem como elevadas massas excedentes, acarretando, conseqüentemente, em perda de sólidos no efluente. Além disso, são apresentados os dados de descarte de lodo referentes ao uso apenas das unidades de desaguamento mecanizado e das unidades de desaguamento mecanizado e natural operando em conjunto na estação.

5.2.4.1 Período operacional 1

A partir dos dados referentes a produção diária e massa excedente de lodo (soma de todos os reatores UASB) calculados para o período operacional 1, e considerando a unidade de desaguamento mecanizado funcionando cinco dias por semana e oito horas por dia, comparou-se duas possibilidades: i) uso apenas do sistema mecanizado; e ii) em conjunto com o sistema natural. No caso do sistema de desaguamento natural, o usuário deve informar a quantidade de leitos disponíveis para receber o lodo, no momento da análise.

Comparando as duas situações, pode-se observar que o número de semanas necessárias para o descarte de lodo excedente, quando os leitos de secagem são utilizados como rota complementar de desaguamento, foi inferior, variando entre 3 e 25 semanas, àquele obtido quando da utilização apenas do sistema mecanizado, que variou entre 5 e 34 semanas (Figura 5.30 e Figura 5.31). Assim, caso a estação também possua um sistema de desaguamento natural instalado para as situações de passivo de lodo nos reatores UASB e de sobrecarga do sistema mecanizado, o mesmo pode ser utilizado.

Considerando os possíveis cenários de descarte (Figura 5.30a e Figura 5.31a), nota-se que dependendo do cenário escolhido são necessárias mais semanas para descarte do volume total de lodo excedente (Figura 5.30b e Figura 5.31b), sendo esse parâmetro influenciado pelo percentual de descarte de lodo superior, já que a concentração desse lodo é menor, resultando em maiores volumes. Por exemplo, considerando o cenário em que se considera o percentual de descarte superior em 70% e 30% para o inferior, o cenário considerando apenas o sistema mecanizado resultou em 34 semanas, 9 semanas a mais quando comprado ao cenário considerando a combinação entre os dois sistemas de desaguamento (24 semanas) (Figura 5.32).

É recomendado se descartar pelo menos 50% de lodo excedente da tubulação superior. Então, mesmo que o menor percentual de descarte superior ou o descarte de todo o lodo do ponto inferior resulte em um número menor de semanas para o descarte de todo lodo excedente, é importante que se considere a viabilidade do descarte nas duas alturas.

← → ↻ 🏠 Não seguro | 150.164.49.155:50000/ETE/DesaguamentoNatMec?id_ete=5&perfil_lodo=1#descarte 🔍 ☆ 🔄 ⚙️ 📁 👤

ETSUS 300 Lodo **DESCARTE DE LODO - DESAGUAMENTO NATURAL E MECANIZADO** VOLTAR INÍCIO

Percentuais e Volumes de Descarte de Lodo

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Percentual de descarte superior (%)	0	50	60	70	100
Percentual de descarte inferior (%)	100	50	40	30	0
Lodo Excedente (passivo de lodo):					
Descarte - ponto superior (m ³)	0	452	542	633	904
Descarte - ponto inferior (m ³)	444	222	178	133	0
Produção de lodo (produção diária):					
Descarte - ponto superior (m ³)	0	15	18	21	30
Descarte - ponto inferior (m ³)	15	7	6	4	0
Capacidade volumétrica de armazenamento do poço de lodo (m ³)					
	50	50	50	50	50
Capacidade volumétrica de desaguamento mecanizado (m ³ /d)					
	40	40	40	40	40
Semanas necessárias para descarte do lodo excedente					
	3	11	16	25	Incompatível
Selecionar cenário	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Anterior ENVIAR

Windows Digite aqui para pesquisar

🔍 📁 📧 🌐 🗂️ 🗄️ 📄 📊 📄

POR 13:34
PTB2 11/04/2021

Figura 5.31 – Cenários considerando o sistema mecanizado em conjunto com o natural como etapa de desaguamento do lodo excedente

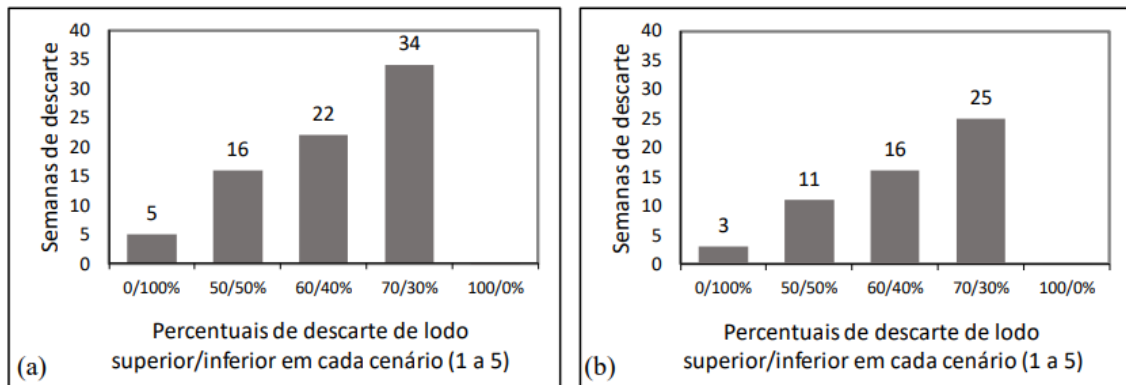


Figura 5.32 – Semanas necessárias para o descarte do lodo excedente considerando (a) apenas o sistema mecanizado e (b) a combinação entre o sistema mecanizado e natural

Cabe ressaltar que para o cálculo da massa excedente foi considerada toda a massa do reator subtraída da massa mínima, por isso o elevado número de semanas, mesmo sem ocorrência de perda de sólidos no efluente. No entanto, a capacidade de armazenamento e retenção do reator UASB, dada pelo volume do compartimento de digestão, é superior à massa mínima considerada e o volume equivalente ocupado do compartimento, logo, com as massas atuais, não está ocorrendo a perda de sólidos. O cálculo da massa excedente dessa forma permite certa segurança operacional da estação, uma vez que, caso ocorra uma paralisação dos descartes de lodo, os reatores ainda teriam capacidade para armazenar e reter o lodo produzido por um determinado período, sem acarretar em deterioração do seu efluente.

A tubulação de descarte em dois pontos ao longo do compartimento de digestão permite maior flexibilidade operacional, possibilitando uma remoção programada do lodo de pior qualidade (superior e menos concentrado) e a preservação do lodo de melhor qualidade (inferior e mais concentrado), objetivando: i) menor perda de sólidos para o compartimento de digestão, melhorando a qualidade do efluente; e ii) remoção de sólidos inertes no descarte do lodo de fundo.

O SIG-Lodo permite, então, que se avalie as vantagens de se utilizar o desaguamento natural para não sobrecarregar a rotina operacional de descarte, quando há um elevado passivo de lodo nos reatores UASB, e diminuir as semanas necessárias, a depender da decisão do operador e gestor da estação. Cabe ressaltar que, no caso da ETE em estudo, os leitos de secagem foram dimensionados para o equivalente a produção diária de lodo de uma semana, tendo como objetivo o seu uso para quando a estação precisar realizar uma paralisação temporária do sistema mecanizado.

Além disso, é possível analisar os volumes de lodo a serem descartados considerando diferentes percentuais de descarte em cada ponto, ponderando os benefícios para a estação em se utilizar

uma ou outra estratégia de descarte, ao mesmo tempo que se avalia as semanas necessárias de acordo com o cenário escolhido. Trazendo as informações em uma mesma tela na ferramenta, a tomada de decisão quanto ao gerenciamento do lodo excedente é facilitada, evitando futuros problemas na estação e nas rotinas operacionais.

5.2.4.2 *Período operacional 2*

Outra análise que o SIG-Lodo permite consiste na alteração das horas e dias de funcionamento do sistema de desaguamento mecanizado. Depois de calcular os cenários com as condições usuais de funcionamento (considerado, para o trabalho, cinco dias por semana e oito horas por dia), o usuário pode recalculá-los, retornando na tela em que são inseridas as informações referentes ao funcionamento do sistema de desaguamento mecanizado, alterando o número de horas e dias de funcionamento. A Figura 5.33, a Figura 5.34, a Figura 5.35 e a Figura 5.36 mostram os cenários considerando, respectivamente, o uso dos sistemas de desaguamento natural e mecanizado e as rotinas operacionais de: i) cinco dias por semana e oito horas por dia; ii) sete dias por semana e oito horas por dia; e iii) cinco dias por semana e doze horas por dia.

Nota-se que a rotina operacional que considera cinco dias por semana e doze horas por dia, resultou em um menor número de semanas necessárias para o descarte do volume de lodo excedente (Figura 5.35), para todas as estratégias de descarte analisadas, variando de 6 a 15 semanas. Considerando a rotina de 7 dias por semana e 8 horas por dia, o número de semanas variou de 7 a 24 (Figura 5.36). Com o uso da ferramenta, então, o operador ou gestor da ETE pode avaliar a melhor rotina de funcionamento do sistema de desaguamento mecanizado a ser adotada, levando em consideração a massa excedente de lodo presente nos reatores, o desempenho das unidades e global da ETE, e os gastos associados aos dias e horas extras pagas aos funcionários, avaliando a melhor estratégia para a estação com alguns poucos comandos.

← → ↻ 🏠 ⚠ Não seguro | 150.164.49.155:50000/ETE/DesaguamentoNatMec?id_ete=6&perfil_lodo=1#descarte 🔍 ☆ 📧 ⚙ 📁 👤 ⋮

ETSUS **DESCARTE DE LODO - DESAGUAMENTO NATURAL E MECANIZADO** VOLTAR INÍCIO

Percentuais e Volumes de Descarte de Lodo

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Percentual de descarte superior (%)	0	50	60	70	100
Percentual de descarte inferior (%)	100	50	40	30	0
Lodo Excedente (passivo de lodo):					
Descarte - ponto superior(m ³)	0	488	585	683	975
Descarte - ponto inferior (m ³)	757	378	303	227	0
Produção de lodo (produção diária):					
Descarte - ponto superior(m ³)	0	18	21	25	35
Descarte - ponto inferior (m ³)	27	14	11	8	0
Capacidade volumétrica de armazenamento do poço de lodo (m ³)	50	50	50	50	50
Capacidade volumétrica de desaguamento mecanizado (m ³ /d)	40	40	40	40	40
Semanas necessárias para descarte do lodo excedente	7	11	13	15	24

Selecionar cenário

Windows taskbar: Digite aqui para pesquisar | [Icons] | POR 14:02 PTB2 11/04/2021

Figura 5.33 – Cenários considerando 7 dias por semana e 8 horas por dia de funcionamento

DESCARTE DE LODO - DESAGUAMENTO NATURAL E MECANIZADO

Percentuais e Volumes de Descarte de Lodo

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Percentual de descarte superior (%)	0	50	60	70	100
Percentual de descarte inferior (%)	100	50	40	30	0
Lodo Excedente (passivo de lodo):					
Descarte - ponto superior(m ³)	0	488	585	683	975
Descarte - ponto inferior (m ³)	757	378	303	227	0
Produção de lodo (produção diária):					
Descarte - ponto superior(m ³)	0	18	21	25	35
Descarte - ponto inferior (m ³)	27	14	11	8	0
Capacidade volumétrica de armazenamento do poço de lodo (m ³)	50	50	50	50	50
Capacidade volumétrica de desaguamento mecanizado (m ³ /d)	40	40	40	40	40
Semanas necessárias para descarte do lodo excedente	Incompatível	Incompatível	Incompatível	Incompatível	Incompatível
Selecione cenário	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figura 5.34 – Cenários considerando 5 dias por semana e 8 horas por dia de funcionamento

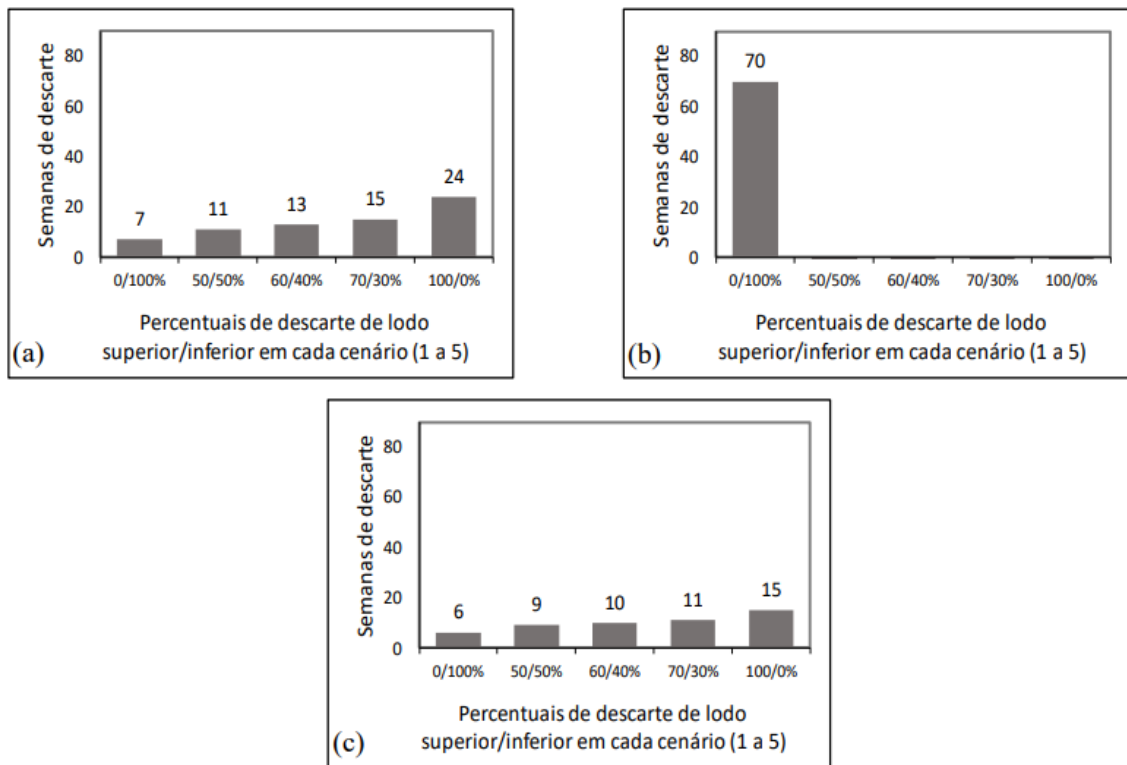


Figura 5.36 – Semanas necessárias para o descarte de lodo considerando o funcionamento do sistema de desaguamento mecanizado em: (a) 7 dias por semana e 8 horas por dia, (b) 5 dias por semana e 8 horas por dia e (c) 5 dias por semana e 12 horas por dia

Cabe ressaltar que, considerando o período de funcionamento usual do sistema de desidratação mecanizado (Figura 5.34), todos os cenários se mostraram incompatíveis, evidenciando o elevado passivo de lodo presente nos reatores UASB. Além de alterar o período de funcionamento da estação, em casos de elevada quantidade de lodo excedente, pode-se optar por rotas alternativas de descarte, como por exemplo, o aluguel de outras unidades do equipamento de desaguamento mecanizado. É importante destacar que, a medida que os leitos de secagem forem liberados, eles poderiam ser utilizados para o descarte do lodo ainda excedente nos reatores UASB.

É importante destacar que quando o SIG-Lodo calcula as semanas necessárias para o descarte do lodo excedente, considerando o uso de equipamentos de desaguamento mecanizado, e o número de semanas é superior a um ano para descarte de todo o lodo excedente no interior do reator UASB, uma mensagem evidenciando a incompatibilidade do sistema é mostrada. O mesmo acontece quando a produção de lodo diária excede a capacidade volumétrica diária do equipamento de desaguamento, indicando que, se as horas por dia de funcionamento do equipamento não forem alteradas ou outras alternativas de descarte não forem adotadas, não é possível remover o lodo no interior do reator (Figura 5.34).

A partir das possibilidades de cenários analisadas, pode-se perceber que, quando a estação acumula uma elevada massa excedente de lodo nos reatores UASB, as consequências para a estação vão além da deterioração da qualidade do efluente. Para solucionar o problema de passivo de lodo, e recuperar o bom desempenho dos reatores, serão necessárias novas alternativas além das disponíveis na ETE, o que acarretaria um aumento das despesas, seja com horas extras para os operadores ou adoção de rotas alternativas para o descarte.

O elevado volume de lodo a ser descartado dos reatores UASB, acarretando em um período elevado para o descarte do lodo excedente, pode ter sido causado devido a problemas operacionais, como: i) descartes de lodo em quantidades e frequências inferiores às realmente necessárias; ii) problemas logísticos e administrativos, que geram dificuldades na operacionalização das unidades de desaguamento, como, por exemplo, a alteração de dias ou horas de trabalho dos operadores; iii) sistemas de desaguamento com capacidades inferiores a produção diária de lodo na ETE; e iv) sistema de desaguamento mecanizado fora de operação, devido à dificuldade de manutenção e ou falta de produtos químicos.

5.2.5 Hierarquização dos reatores

Depois de selecionado o cenário de descarte a ser adotado na rotina operacional do sistema, o SIG-Lodo apresenta uma hierarquização dos reatores UASB quanto à priorização do descarte de lodo.

Para cenários calculados considerando o perfil de lodo do período operacional 2 (Figura 5.37), a variável que define o reator UASB que merece maior atenção na rotina de descarte adequada é a concentração de lodo no ponto de interface dos compartimentos de digestão e de decantação. Já para as estações que não realizam o perfil de lodo (Figura 5.38), a hierarquização é definida pelo teor de sólido sedimentáveis no efluente, uma vez que ele é mais indicativo de perda de sólidos e possui uma análise mais simples e mais barata, o que facilitaria a obtenção do dado para estações de menor porte ou sem disponibilidade de infraestrutura para a realização de análises laboratoriais, o que costuma ser a realidade de ETEs que não realizam perfil de sólidos.

Assim, mesmo que o cenário de descarte seja definido baseado na produção diária de lodo do sistema e no somatório da massa excedente de todos os reatores UASB, o usuário consegue analisar a rotina de priorização de descarte, buscando a melhoria do efluente final da estação, analisando qual reator pode estar causando maior impacto na perda de sólidos no efluente e, conseqüentemente, acarretando em sobrecarga para as unidades de pós tratamento. Essa análise é importante uma vez que, estando um reator em condições adequadas de operação, poderia ser

feito o descarte de lodo após os outros reatores, a fim de se alcançar uma melhor condição para a estação de forma mais rápida e consistente. Além disso, essa análise permite que o usuário avalie se algum reator precisa de rotas alternativas de descarte de lodo com maior urgência, por estar contribuindo de forma mais significativa para a piora na qualidade do efluente.

DESCARTE DE LODO – HIERARQUIZAÇÃO DOS REATORES UASB

Situação dos Reatores UASB

Período operacional

Início

Fim

Reator UASB	Concentração do ponto de amostragem (%)		Massa excedente a ser descartada (kgST)	Volume de lodo a ser descartado (m ³)	
	Interface dos compartimentos	Fundo		Superior	Inferior
UASB 2	3,9	6,4	9960	147	45
UASB 4	3,6	5,3	8341	127	46
UASB 1	3,6	5,8	8946	132	45
UASB 3	3,3	5,1	7922	118	45
UASB 6	3,1	5,3	7091	122	39
UASB 5	2,5	5,3	4913	116	27

Figura 5.37 – Hierarquização dos reatores UASB quando há disponibilidade de dados referente ao perfil de sólidos do PO2

DESCARTE DE LODO – HIERARQUIZAÇÃO DOS REATORES UASB

Situação dos Reatores UASB

Periodo operacional

Início

Fim

Reator UASB	Teor de sólidos sedimentáveis no efluente (mL-Ssed/L)	Concentração de sólidos suspensos totais no efluente (mg-SST/L)
UASB 4	10,0	356
UASB 2	8,0	524
UASB 3	5,5	412
UASB 1	4,5	370
UASB 6	2,5	266
UASB 5	1,0	305

Figura 5.38 – Hierarquização dos reatores UASB do PO2 quando não há disponibilidade de dados referente ao perfil de sólidos

6 CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para auxiliar o gerenciamento de lodo em ETEs que fazem uso de reatores UASB seguidos por filtros biológicos percoladores. Para tal, investigou-se as principais limitações do gerenciamento de lodo a fim de determinar as principais funcionalidades necessárias à ferramenta, que foi denominada SIG- Lodo (Sistema Integrado de Gerenciamento de Lodo).

O SIG-Lodo se mostrou efetivo para a consolidação de um banco de dados de monitoramento da fase líquida e da fase sólida, permitindo a apresentação desses dados em gráficos por períodos selecionados pelo usuário e a extração, de forma rápida, de informações importantes para a operação da ETE. Essa sistematização dos dados em uma única ferramenta pode auxiliar os gestores e operadores da ETE a avaliarem, de forma mais consistente o desempenho das unidades e global da estação. Além disso, os dados e gráficos podem ser utilizados para os relatórios de fiscalização ambiental e exigidos pelas agências reguladoras de abastecimento de água e esgotamento sanitário.

Em relação aos cenários, a partir das análises efetuadas, considerando dois períodos operacionais distintos – com e sem passivo de lodo nos reatores UASB, a ferramenta se mostrou bastante útil para realizar a comparação e definir a melhor estratégia de descarte de lodo a ser adotada na estação, considerando a manutenção de um lodo de melhor qualidade no interior dos reatores UASB, a capacidade de desaguamento do sistema e as rotinas operacionais da estação.

A ferramenta permite, também, a avaliação individualizada de cada reator UASB em relação a quantidade e qualidade do lodo presente no compartimento de digestão, a partir dos gráficos de perfil de lodo e dos cálculos referentes a massa presente e excedente no reator. Com isso, o SIG-Lodo se mostrou eficiente para traçar estratégias que busquem minimizar os impactos do excesso de lodo no interior dos reatores à qualidade do efluente dos reatores.

O SIG-Lodo tem o propósito de servir de interface entre às unidades de produção de lodo (reatores UASB e FBP) e a unidade de processamento de lodo (desidratação), fornecendo subsídios para que o operador decida sobre um plano efetivo de descarte de lodo excedente. Os diferentes cenários de descarte apresentados ampliam sobremaneira a análise crítica e a aproximação da equipe operacional das tomadas de decisão para o gerenciamento do lodo da ETE, considerando ainda um banco de dados de monitoramento apropriadamente sistematizado.

7 RECOMENDAÇÕES

A partir da avaliação dos resultados obtidos no presente trabalho, recomenda-se para a condução de trabalhos futuros:

- Quantificar o coeficiente de produção de lodo, aeróbio e anaeróbio, a partir dos dados de monitoramento da fase líquida e sólida, bem como de dados operacionais, como frequência e descartes do lodo e concentrações e vazões de envio do lodo dos decantadores secundário aos reatores UASB, e informações referentes às outras contribuições recebidas na ETE (lodo de tanque séptico e lodo de ETA e lixiviados de aterros sanitários). Com base nesses dados é possível realizar o balanço de massa no sistema, com vistas a possibilitar a quantificação da produção de lodo diária de forma mais precisa e condizente com a realidade da estação.
- Validar o SIG-Lodo, acompanhando as melhorias que o uso do *software* pode promover à rotina operacional da estação e ao melhor controle da quantidade de lodo dentro dos reatores UASB, visando otimizar o gerenciamento de lodo e garantir o desempenho da ETE.
- Otimizar o sistema de alimentação de dados de entrada do SIG-Lodo a partir de planilhas de Excel previamente preenchidas e/ou da automatização do monitoramento da estação.
- Comparar o controle da quantidade de lodo nos reatores e os gastos dispendidos com o gerenciamento de lodo antes e após a implementação do *software* na estação.
- Desenvolver manual de utilização do software.
- Fornecer material (gráficos e tabelas, por exemplo) que permitam a otimização de relatórios a serem enviados para agências de regulação, através dos dados inseridos e resultados obtidos no SIG-Lodo.
- Desenvolver nova função para o software, permitindo o dimensionamento das unidades de desaguamento para estações em fase de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12209: *Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários*. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2011, 57p.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas* / Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017. 88 p

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Atlas esgotos: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil* / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 44 p. 2020.

ANDREOLI, C., V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Volume 6 - Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 1 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2007. 483 p.

ANDEOLI, C. V. (coordenador). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. 282 p.

BALKEMA, A. J., PREISIG, H. A., OTTERPOHL, R., LAMBERT, A. J. D., WEIJERS, S. R. Developing a model based decision support tool for the identification of sustainable treatment options for domestic wastewater. *Water Science and Technology*, v. 43, n. 7, p. 265-269, 2001.

BERNARD, O., POLIT, M., HADJ-SADOK, Z., PENGGOV, M., DOCHAIN, D., ESTABEN, M., LABAT, P. Advanced monitoring and control of anaerobic wastewater treatment plants: software sensors and controllers for an anaerobic digester. *Water Science and Technology*, v. 43, n. 7, p. 175–182, 2001.

BERTANZA, G., BARONI, P., CANATO, M. Ranking sewage sludge management strategies by means of Decision Support Systems: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 110, p. 1-15, 2016.

BRASIL. *Resolução CONAMA nº 468, de 19 de agosto de 2020* - Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Disponível em: < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>>. Acesso em: abr. 2021.

BRESSANI-RIBEIRO, T., CHAMHUM-SILVA, L. A., CHERNICHARO, C. A. L. Constraints, performance and perspectives of anaerobic sewage treatment: lessons from full- Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG

scale sewage treatment plants in Brazil. *Water Science & Technology*, v. 80, n. 3, p. 418-425, 2019a.

BRESSANI-RIBEIRO, T., CHERNICHARO, C. A. L., LOBATO, L. C. S, NEVES, P. P. N. Chapter 4: Design of UASB reactors for sewage treatment. In: Chernicharo C. A.L e Bressani-Ribeiro T. (Editors) *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation*. IWA Publishing – London UK. 420p., 2019b.

BRESSANI-RIBEIRO, T. *Sistema UASB/FBP submetido a hidrograma típico de vazão: avaliação do uso de meio suporte baseado em espuma de poliuretano e operação sem decantadores secundários* 2015. 173 p. (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

CAMPOS, J.R.; POVINELLI, S.C.S.; AISSE, M.M.; SOUZA, M.A.A.; SAMWAYS, G.; SOBRINHO, P.A. Tratamento Combinado de Lodo de Tanque Séptico e de Fossas com Esgoto Sanitário. In: Andreoli, C.V. (coordenador); *Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final*. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 388p.

CHAMHUM-SILVA, L. A. *Identificação e avaliação de áreas potenciais de uso agrícola do lodo de estações de tratamento de esgoto sanitário nas bacias dos Rio Velhas, Jequitaiá e Pacuí*. 2018, 141p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

CHERNICHARO, C. A. L., BRANDT, E. M. F., BRESSANI-RIBEIRO, T., MELO, V. R., BIANCHETTI, F. J., MOTA FILHO, C. R., MCADAM, E. Development of a tool for improving the management of gaseous emissions in UASB-based sewage treatment plants. *Water Practice & Technology*, v. 12, n. 4, p. 917-926, 2017.

CHERNICHARO, C. A. L, BRESSANI-RIBEIRO, T., LOBATO, L. C. S. Chapter 6: Operation of UASB reactors for sewage treatment. In: Chernicharo C. A.L e Bressani-Ribeiro T. (Editors) *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation*. IWA Publishing – London UK. 420p., 2019.

CHERNICHARO, C.A.L.; *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Volume 5 - Reatores Anaeróbios*. 1 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2016. 379 p.

- CHERNICHARO, C.A.L.; VAN LIER, J., B.; NOYOLA, A.; BRESSANI-RIBEIRO, T. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Environmental Science and Biotechnology*, v. 14, n.4, p. 649-679, 2015.
- COLLIVIGNARELLI, M. C.; BERTANZA, G.; ABBÀ, A.; DAMIANI, S. Process auditing and performance improvement in a mixed wastewater-aqueous waste treatment plant. *Water Science & Technology*, v. 77, n. 4, p. 891-898, 2018.
- COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais. *Diagnóstico técnico operacional de estações de tratamento de esgoto da COPASA: ETE Onça - Belo Horizonte*. Belo Horizonte, 2018. 76 p.
- FERRER, J., SECO, A., SERRALTA, J., RIBES, J., MANGA, J., ASENSI, E., MORENILLA, J. J., LLAVADOR, F. DESASS: A software tool for designing, simulating and optimising WWTPS. *Environmental Modelling & Software*, v. 23, n. 1, p. 19-26, 2008.
- GABALDÓN, C., FERRER, J., SECO, A., MARZAL, P. A software for the integrated design of wastewater treatment plants. *Environmental Modelling & Software*, v. 13, p. 31-44, 1998.
- GARRIDO, M., RIU, A., FLORES-ALSINA, X., RODRÍGUEZ-RODA, I., POCH, M. Development of a DSS for the generation of WWTP configuration alternatives. *International Congress on Environmental Modelling and Software*, 2010.
- GOTARDO, R. Linguagem de programação I. Rio de Janeiro: SESES, 2015. 200 p.
- HAMED, M. M., KHALAFALLAH, M. G., HASSANIEN, E. A. Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks. *Environmental Modelling & Software*, v. 19, p. 919-928, 2004.
- HAMOUDA, M. A., ANDERSON, W. B., HUCK, P. M. Decision support systems in water and wastewater treatment process selection and design: a review. *Water Science & Technology*, v. 60, n. 7, p. 1757-1770, 2009.
- HIDALGO, D., IRUSTA, R., MARTINEZ, L., FATTA, D., PAPADOPOULOS, A. Development of a multi-function software decision support tool for the promotion of the safe reuse of treated urban wastewater. *Desalination*, v. 215, p. 90-103, 2007.
- JORDÃO, E. P; PESSÔA, C.A. *Tratamento de Esgotos Domésticos* 7ª edição, Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária – ABES, 2014, 1087 p.

KACPRZAKA, M., NECZAJA, E., FIJAŁKOWSKIA, K., GROBELAKA, A., GROSSERA, A., WORWAGA, M., RORATA, A., BRATTEBOB, H., ALMÅSC, A., SINGHC, B. R. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, v. 156, p. 39-46, 2017.

KASSAB, G.; HALALSHEH, M.; KLAPWIJK, A.; FAYYAD, M.; VAN LIER, J.B. Sequential anaerobic-aerobic treatment for domestic wastewater – A review. *Bioresource Technology*, v. 101, p. 3299-3310, 2010.

LEE, M. W.; HONG, S. H.; CHOI, H.; KIM, J. H.; LEE, D. S.; PARK, J. M. Real-time remote monitoring of small-scaled biological wastewater treatment plants by a multivariate statistical process control and neural network-based software sensors. *Process Biochemistry* v. 43, p. 1107-1113, 2008.

LEITÃO, R.C.; SANTAELLA, S.T.; VAN HAANDEL, A.C.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. The effect of operational conditions on the hydrodynamic characteristics of the sludge bed in UASB reactors. *Water Science and Technology*, v. 64, n. 9, p. 1935-41, 2011.

LEONEL, L. F. *Desempenho de estações de tratamento de esgoto – uma análise de sistemas de lagoas de estabilização de pequeno e médio porte integrada à avaliação da qualidade dos corpos hídricos na UGRHI 12 – Baixo Pardo/Grande*. 2016. 206p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Hidráulica e Saneamento – SHS, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2016.

LIU, Y.; PAN, Y.; SUN, Z.; HUANG, D. Statistical monitoring of wastewater treatment plants using variational Bayesian PCA. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 53, n. 8, p. 3272-3282, 2014

LOBATO, L.C.S. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico*, 2011, 187p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Geras, 2011.

LOBATO, L.C.S.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; 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*, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

LOPES, A., GARCIA, G. *Introdução à programação*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2002.

METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment, and reuse*. New York: Metcalf & Eddy, Inc., 5 th. Ed., 2013, 2018p

MIKI, M.K. Dilemas do UASB. *Revista DAE*, n. 183, p. 25-37, 2010.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa conjunta COPAM/CERH nº 01/2008. *Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*. Publicação – Diário do Executivo – “Minas Gerais” – 13/05/2008

NOYOLA, A.; PADILLA-RIVERA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J.M.; GÜERRECA, L.P.; HERNÁNDEZ-PADILLA, F. Typology of municipal wastewater treatment technologies in Latin America. *Clean - Soil, Air, Water*, v. 40, n. 9, p. 926-932, 2012.

OLIVERIA, S. V. W. B. *Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário*. 2004. 293 f. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2004.

PASSUELLO, A., CADIACH, O., PEREZ, Y., SCHUHMACHER, M. A spatial multicriteria decision making tool to define the best agricultural areas for sewage sludge amendment. *Environment International*, v. 38, n. 1, p. 1-9, 2012.

PREDIGER, R. P., ALLEBRANDT, S. L. Uso de softwares em pesquisa qualitativa. *XXI Jornada de Pesquisa*. 2016.

ROCHA, K. M., OLIVEIRA, F. M., COTA, R. S., CHERNICHARO, C. A. L., VON SPERLING, M. Desenvolvimento de software para pré-dimensionamento de reatores anaeróbios de manta de lodo – UASB. *20º Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais*. ABES, 1999.

ROSA, A. P., LOBATO, L. C. S., CHERNICHARO, C. A. L., MARTINS, D. C. R. B., MACIEL, F. M., BORGES, J. M. Improving performance and operational control of UASB reactors via proper sludge and scum discharge routines. *Water Practice & Technology*, v. 7, n. 3, 11 p., 2012.

SAADE, J. *C# : guia do programador*. São Paulo: Novatec Editora, 2010.

SANT'ANNA, M. *.NET Framework*. 2021. Disponível em: <http://www.linhadecodigo.com.br/artigo/7/net-framework.aspx>. Acesso em: 17 mar. 2021.

SEBESTA, R. W. *Conceitos de linguagens de programação*. São Paulo: Bookman editora ltda, 9ª edição, 2018, 758 p.

- SOARES, B. C. *Requisitos para utilização de prototipagem evolutiva nos processos de desenvolvimento de software baseado na Web*. Belo Horizonte: UFMG, 2008
- SOUTO, T.F., AQUINO, S.F., SILVA, S.Q., CHERNICHARO, C.A.L. Influence of incubation conditions on the specific methanogenic activity test. *Biodegradation*, n. 21, p. 411-424, 2010.
- SOUZA, C. L. *Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 127 p., 2010.
- SPINOSA, L., AYOL, A., BAUDEZ, J. C., CANZIANI, R., JENICEK, P., LEONARD, A., RULKENS, W., XU, G., VAN DIJK, L. Sustainable and Innovative Solutions for Sewage Sludge Management. *Water*, v. 3, p.702-717, 2011.
- UN-WATER, The United Nations inter-agency mechanism on all freshwater related issues, including sanitation. *Wastewater Management - Analytical Brief*. 2015. Disponível em: <http://www.unwater.org/fileadmin/user_upload/unwater_new/docs/UNWater_Analytical_Brief_Wastewater_Management.pdf>. Acesso em: set. 2019.
- VAN LIER, J.B.; TILCHE, A.; AHRING, B. K.; MACARIE, H.; MOLETTA, R.; DOHANYOS, M. New perspectives in anaerobic digestion. *Water Sci Technol.*, v. 43, p. 1-18, 2001.
- VAN LIER, J. B., VASHI, A., VAN DER LUBBE, J., HEFFERNAN, B. Anaerobic sewage treatment using UASB reactors: Engineering and operational aspects. In: Fang, H.H.P. (Editor) *Environmental anaerobic technology: applications and new developments*. Imperial College Press – London UK. p. 59 - 87, 2011.
- VASILOGLOU, V., LOKKAS, F., GRAVANIS, G. New tool for wastewater treatment units location. *Desalination*, v. 248, p. 1039-1048, 2008.
- VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Volume 1 – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2014. 470 p.
- ZUSE, H. *A framework of software measurement*. Walter de Gruyter – Berlim. 784 p. 1945.