

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-graduação em Saneamento,

Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Saulo Nonato de Souza

**ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS PARA O ENVIO DE LODO AERÓBIO PARA
ADENSAMENTO E ESTABILIZAÇÃO EM REATORES UASB: ESTUDO DE CASO
DE UMA ESTAÇÃO EM ESCALA PLENA**

Belo Horizonte

2020

Saulo Nonato de Souza

**ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS PARA O ENVIO DE LODO AERÓBIO PARA
ADENSAMENTO E ESTABILIZAÇÃO EM REATORES UASB: ESTUDO DE CASO
DE UMA ESTAÇÃO EM ESCALA PLENA**

Versão Final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento.

Linha de pesquisa: Tratamento de Águas Residuárias

Orientador: Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

Belo Horizonte

2020

S729e

Souza, Saulo Nonato de.

Estratégias operacionais para o envio de lodo aeróbio para adensamento e estabilização em reatores UASB [recurso eletrônico] : estudo de caso de uma estação em escala plena / Saulo Nonato de Souza. – 2020.

1 recurso online (ix, 84 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Carlos Augusto de Lemos Chernicharo.

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

Bibliografia: f. 69-72.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Saneamento - Teses. 3. Reator UASB - Teses. 4. Digestão - Teses. 5. Lodo - Teses. I. Chernicharo, Carlos Augusto Lemos. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)

Ficha catalográfica: Roseli Alves de Oliveira - CRB6/2121
Biblioteca Profº Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Estratégias Operacionais Para O Envio de Lodo Aeróbio Para Adensamento e Estabilização Em Reatores Uasb: Estudo de Caso de Uma Estação Em Escala Plena

SAULO NONATO DE SOUZA

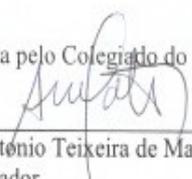
Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


Prof. CARLOS AUGUSTO DE LEMOS CHERNICHARO

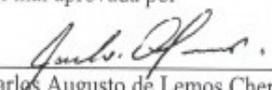

Prof. CLAUDIO LEITE DE SOUZA


Prof. PAULO GUSTAVO SERTÓRIO DE ALMEIDA

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH


Prof. Antonio Teixeira de Matos
Coordenador

Versão Final aprovada por


Prof. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo
Orientador

Belo Horizonte, 28 de fevereiro de 2020.

*Dedico este trabalho a minha querida avó
Dona Tonha (in memoriam).*

AGRADECIMENTOS

À minha querida esposa Mara, por acreditar em mim, pelo incentivo e apoio incondicional. Às minhas queridas filhas Cecília e Clarice, pela paciência e companhia sempre agradáveis.

Ao professor Carlos pela orientação, ensinamentos, por acreditar no projeto de pesquisa e pelas oportunidades de crescimento pessoal e profissional. Aos professores e funcionários do PPGSMARH, que contribuem para o nosso aprendizado.

Aos meus pais, Marlene e Adonai, por sempre me apoiarem e incentivarem a buscar o conhecimento. As minhas queridas irmãs Marcele e Jayne, pelo carinho e apoio. À vó Tonha (*in memoriam*), pela referência pessoal e exemplo.

À COPASA, em especial a Gerente Estephânia Foscarini e ao Superintendente David Bichara, pelo apoio e por viabilizarem a execução do projeto.

Aos colegas Filipe e Pollyane, pelo incentivo e motivação para encarar o desafio de ingressar no Programa, além das conversas sempre produtivas.

Aos colegas Luiz Estevão e Fernando, por acreditarem na pesquisa e pelas relevantes contribuições na implementação das atividades operacionais na ETE. Aos operadores da ETE Mateus Leme: Carlos, Cristiano, Deusdete, Fernando, José Luiz e Marcio. Ao Claudio, pelo apoio na realização dos descartes de espuma, lodo e realização de coletas. Ao apoio nas diversas atividades realizadas pelos colaboradores Alexandre, Joécio, Luciano, Paulo e estagiária Isabella. Sem o apoio de todos vocês este trabalho não teria sido realizado.

Aos colegas do PPGSMARH, que contribuíram com ideias, ensinamentos e compartilhamento de conhecimento.

Aos professores Cláudio Leite e Paulo Almeida, pelo aceite do convite em participarem da banca examinadora e leitura crítica do trabalho.

A professora Sílvia Oliveira, pela oportunidade de aprendizado e contribuição com a análise estatística dos dados.

Aos colegas Sirlei, Fidelande e toda a equipe do laboratório da COPASA/SPTE, pela realização das análises físico-químicas necessárias à efetivação da pesquisa. A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Podemos julgar nosso progresso pela coragem de nossas perguntas
e pela profundidade de nossas respostas, por nossa vontade
de abraçar o que é verdadeiro e não o que parece bom”.*

Carl Sagan

RESUMO

O presente trabalho buscou avaliar, em uma ETE em escala plena constituída de reator UASB, pós-tratamento por filtros biológicos percoladores (FBP) e sistema de desidratação com leitos de secagem, o efeito de diferentes estratégias de envio de lodo aeróbio gerado nos FBP para adensamento e digestão em reatores UASB. Foram avaliados os impactos hidráulicos e de desempenho nos reatores UASB, assim como na estação como um todo. Para tal, foram definidas 4 fases para o estudo, nas quais foram testados diferentes protocolos de envio de lodo aeróbio para o reator UASB. Foram monitorados os parâmetros DQO e SST no afluente (esgoto bruto + lodo aeróbio excedente + lodo de tanque séptico), no efluente do reator UASB e no efluente final da ETE. Durante 3 fases o protocolo de envio do lodo excedente aeróbio foi realizado de forma contínua (Fase DC1 - $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ e $TDH_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$; Fase DC2 $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ e $TDH_{\text{UASB}} = 12,7 \text{ h}$; Fase DC3 - $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ e $TDH_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$), enquanto na fase 4 o envio do lodo excedente aeróbio foi realizado somente no período noturno, no horário de 0h as 01h (Fase DN - $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ e $TDH_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$). O regime de recebimento de lodo de tanque séptico, somado às vazões afluentes de esgoto bruto e de lodo excedente aeróbio, implicaram em uma aparente sobrecarga hidráulica nos reatores UASB durante as fases DC1, DC3 e DN, nas quais apenas um reator UASB estava em operação. As verificações realizadas mostraram que nestas três fases os parâmetros hidráulicos TDH, Vasc e TDHcd estiveram com valores medianos acima ou abaixo dos limites recomendados em norma (NBR 12.209/2011), principalmente no período entre as 11h e 23h. As diferentes estratégias testadas para envio do lodo excedente aeróbio não impactaram os parâmetros hidráulicos da unidade de pós-tratamento (FBP+DS). Os reatores UASB apresentaram eficiências de remoção de DQO que variaram de 53 % na fase DC1, a 61 % na fase DC2, enquanto que as eficiências de remoção de SST variaram de 61 % na fase DC2 a 73 % na fase DC3. Ressalta-se que não foi identificada diferença significativa entre os valores observados. As concentrações medianas de SST no efluente tratado dos reatores UASB não apresentaram diferença significativa e variaram de 70 mg/L na fase DC3 a 89 mg/L na fase DC2. Os valores medianos de DQO no efluente tratado dos reatores UASB não apresentaram diferença significativa entre as fases DC1, DC2 e DN, com variação de 208 mg/L na fase DC1 a 231 mg/L na fase DN. Aparentemente os protocolos de descartes de lodo excedente testados, de forma contínua e intermitente, não implicaram em concentrações diferentes significativamente ($\alpha = 0.05$) para o parâmetro DQO no efluente do decantador secundário. Em 100% dos resultados a ETE atendeu ao padrão de lançamento previsto na legislação ambiental para a eficiência de remoção de DQO e para as concentrações de DQO e SST no efluente final da estação. A concentração de DQO no efluente do decantador secundário variou de 63 mg/L na fase DC2, a 88 mg/L na fase DC3. Enquanto que os valores medianos de SST no efluente do DS variaram de 20 a 29 mg/L. O gerenciamento do lodo excedente anaeróbio foi realizado com concentrações de ST que variaram de 1,0 a 1,5% o que imprimiu uma sobrecarga de lâmina de lodo nos leitos de secagem da ETE, em decorrência dos elevados volumes de lodos descartados por ciclo. No geral, não foi observada sobrecarga na taxa de aplicação de sólidos nos leitos. O lodo excedente aeróbio, enviado para adensamento e digestão nos reatores UASB, apresentou valores de concentrações medianas de ST que variaram de 0,04% na fase DC2 a 0,45% na fase DN. Os resultados gerais da pesquisa indicaram que os protocolos de envio do lodo excedente aeróbio, para adensamento e digestão nos reatores UASB, não comprometeram o desempenho global da estação e dos reatores UASB quando avaliados separadamente, indicando que podem ser adotados como estratégia operacional na ETE Mateus Leme ou testados em outras estações em escala plena.

Palavras-chave: Reator UASB, Adensamento, Digestão, Lodo Excedente Aeróbio, Protocolo de descarte.

ABSTRACT

The present work sought to evaluate, in a full-scale WWTP made up of a UASB reactor, post-treatment by trickling filters (TF) and dehydration system with drying beds, the effect of different strategies for sending aerobic sludge generated in the TF to densification and digestion in UASB reactors. The hydraulic and performance impacts on the UASB reactors, as well as on the station as a whole, were evaluated. To this end, 4 phases were defined for the study, in which different protocols for sending aerobic sludge to the UASB reactor were tested. The COD and TSS parameters were monitored in the affluent (raw sewage + excess aerobic sludge + septic tank sludge), in the effluent from the UASB reactor and in the final effluent from the WWTP. During 3 phases, the protocol for sending excess aerobic sludge was carried out continuously (Phase DC1 - $Q_{lodo} = 1.5 \text{ L / s}$ and $HDT_{UASB} = 6.1 \text{ h}$; Phase DC2 $Q_{lodo} = 1.0 \text{ L / s}$ and $HDT_{UASB} = 12.7 \text{ h}$; Phase DC3 - $Q_{lodo} = 1.0 \text{ L / s}$ and $HDT_{UASB} = 7.8 \text{ h}$), while in phase 4 the sending of excess aerobic sludge was performed only at night, at the time of 0h to 01h (Phase DN - $Q_{lodo} = 6.6 \text{ L / s}$ and $HDT_{UASB} = 7.8 \text{ h}$). The regime of receiving sludge from septic tank, added to the affluent flows of raw sewage and excess aerobic sludge, implied an apparent hydraulic overload in the UASB reactors during phases DC1, DC3 and DN, in which only one UASB reactor was in operation. The checks carried out showed that in these three phases the hydraulic parameters HDT, V_{up} and HDT_{cd} were with median values above or below the limits recommended in the standard (NBR 12.209 / 2011), mainly between 11 am and 11 pm. The different strategies tested for sending excess aerobic sludge did not impact the hydraulic parameters of the post-treatment unit (TF). The UASB reactors showed COD removal efficiencies that ranged from 53% in the DC1 phase, to 61% in the DC2 phase, while the TSS removal efficiencies ranged from 61% in the DC2 phase to 73% in the DC3 phase. It is noteworthy that there was no significant difference between the observed values. The median concentrations of TSS in the treated effluent of the UASB reactors did not show significant difference and varied from 70 mg/L in the DC3 phase to 89 mg/L in the DC2 phase. The median COD values in the treated effluent from the UASB reactors did not show any significant difference between the DC1, DC2 and DN phases, with a variation from 208 mg/L in the DC1 phase to 231 mg/L in the DN phase. Apparently the protocols for the disposal of excess sludge tested, continuously and intermittently, did not imply significantly different concentrations ($\alpha = 0.05$) for the COD parameter in the effluent of the WWTP. In 100% of the results, the WWTP met the release standard provided for in the environmental legislation for the efficiency of COD removal and for the concentrations of COD and TSS in the final effluent of the station. The COD concentration in the effluent from the WWTP ranged from 63 mg/L in the DC2 phase to 88 mg/L in the DC3 phase. While the median TSS values at the outlet of the secondary sedimentation unit ranged from 20 to 29 mg/L. The management of the excess anaerobic sludge was carried out with ST concentrations ranging from 1.0 to 1.5%, which caused an overload of sludge in the drying beds of the WWTP, due to the high volumes of sludge discarded per cycle. In general, no overhead was observed in the rate of application of solids in the beds. The excess aerobic sludge, sent for densification and digestion in the UASB reactors, presented values of median ST concentrations that varied from 0.04% in the DC2 phase to 0.45% in the DN phase. The general results of the research indicated that the protocols for sending excess aerobic sludge, for densification and digestion in the UASB reactors, did not compromise the overall performance of the station and of the UASB reactors when evaluated separately, indicating that they can be adopted as an operational strategy at WWTP Mateus Leme or tested at other stations at full scale.

Keywords: UASB reactor, densification, digestion, aerobic excess sludge, disposal protocol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Representação esquemática de um reator UASB retangular.	20
Figura 3.2: Fluxograma típico de uma ETE composta de Reator UASB e FBP.....	26
Figura 4.1: Planta geral da ETE Mateus Leme, com indicação das linhas de fluxo das fases líquida e sólida, e indicação dos pontos de monitoramento da fase líquida.....	32
Figura 4.2: Vista panorâmica da ETE Mateus Leme	33
Figura 4.3: Planta baixa da Elevatória de Esgoto Bruto (EEB)	35
Figura 4.4: Vista geral da Elevatória de Esgoto Bruto (EEB)	35
Figura 4.5: Planta da linha de recalque responsável pelo bombeamento do esgoto bruto, lodo excedente aeróbio e lodo de tanque séptico.....	36
Figura 4.6: Vista geral do Sistema Preliminar e da parte superior da caixa de areia aerada ..	37
Figura 4.7: Planta de cobertura dos reatores UASB com indicação das caixas distribuidoras de vazão responsáveis pelo encaminhamento do afluente para a parte interna das unidades.	38
Figura 4.8: Vista geral e superior dos reatores UASB	38
Figura 4.9: Representação interna dos reatores UASB.....	39
Figura 4.10: Vista geral das unidades de pós-tratamento (FBP+DS)	40
Figura 4.11: Corte do DS e da Caixa de manobra da descarga de lodo excedente aeróbio e espuma sobrenadante	40
Figura 4.12: Vista geral do DS, EEB e detalhe da válvula de descarga do lodo excedente aeróbio.	41
Figura 4.13: Vista geral do Sistema de queima de biogás	41
Figura 4.14: Vista geral dos leitos de secagem	42
Figura 4.15: Vista do reator UASB com indicação dos pontos de coleta de amostras de lodo anaeróbio.	45
Figura 4.16: Corte do reator UASB com detalhamento dos tubos de coleta de amostras de lodo anaeróbio instalados na parte interna da unidade.	45
Figura 5.1: Vazões afluentes e tempos de detenção hidráulica observados nos reatores UASB da ETE Mateus Leme durante as fases da pesquisa	48
Figura 5.2: Box-plot dos TDH observados durante as fases do estudo considerando o período de 24 horas.....	49
Figura 5.3: Box-plot das velocidades ascensionais observadas durante as fases do estudo considerando o período de 24 horas.Fonte: elaborado pelo autor (2020)	50
Figura 5.4: Box-plot das velocidades nas estruturas de passagem para os compartimentos de decantação observadas durante as fases do estudo considerando o período de 24 horas.....	50

Figura 5.5: Box-plot das Taxas de Aplicação Superficial no compartimento de decantação dos reatores UASB considerando o período de 24 horas.	53
Figura 5.6: Box-plot dos tempos de detenção hidráulica na zona de decantação dos reatores UASB observadas durante as fases do estudo considerando o período de 24 horas.	54
Figura 5.7: Box-plot das concentrações de DQO e SST afluentes aos reatores UASB durante as fases estudadas.	60
Figura 5.8: Série temporal das concentrações de DQO (mg/L) afluentes e efluentes dos reatores UASB da ETE Mateus Leme.	61
Figura 5.9: Série temporal das concentrações de SST (mg/L) afluentes e efluentes dos reatores UASB da ETE Mateus Leme	61
Figura 5.10: Box-plot das concentrações de DQO e SST efluentes dos reatores UASB durante as fases estudadas.	62
Figura 5.11: Box-plot das eficiências de remoção de DQO e SST dos reatores UASB durante as fases estudadas.	65
Figura 5.12: Concentração de Sólidos Totais ao longo da altura do compartimento de digestão dos reatores UASB durante as fases testadas.	67
Figura 5.13: Box-plot do teor de ST nos quatro pontos de amostragem ao longo da altura dos reatores UASB e de acordo com cada fase realizada.	68
Figura 5.14: Box-plot das concentrações de DQO e SST efluentes do Decantador Secundário durante as fases estudadas.	72
Figura 5.15: Box-plot do teor de ST na linha de descarte de lodo excedente aeróbio do DS.	73
Figura 5.16: Box-plot das eficiências de remoção de DQO e SST da ETE Mateus, considerando todas as unidades de tratamento disponíveis	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 :Principais parâmetros hidráulicos de dimensionamento de reatores UASB operados a temperaturas entre 22 e 25 °C.....	25
Tabela 3.2: Principais parâmetros dos Filtros Biológicos Percoladores de Alta taxa.....	27
Tabela 3.3: Resumo dos trabalhos em escala piloto, demonstração e plena sobre envio de lodo aeróbio excedente para adensamento e digestão em reatores UASB tratando esgoto doméstico	29
Tabela 4.1: Principais dimensões das unidades que integram a ETE Mateus Leme.....	33
Tabela 4.2: Fases e estratégias operacionais de descarte de lodo excedente aeróbio.....	43
Tabela 5-1: Estatística descritiva resumida dos parâmetros hidráulicos nas 04 fases de estudo avaliadas	51
Tabela 5-2: Estatística descritiva resumida dos parâmetros hidráulicos nas 04 fases de estudo avaliadas	54
Tabela 5-3: Estatística descritiva referente as Taxas de Aplicação Hidráulica do FBP e Taxa de Escoamento Superficial do DS da ETE Mateus Leme	56
Tabela 5-4: Testes de comparações múltiplas dos parâmetros hidráulicos.....	57
Tabela 5-5: Estatística descritiva referente às concentrações de DQO e SST afluentes aos reatores UASB da ETE Mateus Leme.....	59
Tabela 5-6: Testes de comparações múltiplas dos valores de concentrações afluentes de DQO e SST aos reatores UASB.....	59
Tabela 5-7: Estatística descritiva referente às concentrações de DQO e SST efluentes dos reatores UASB da ETE Mateus Leme.....	62
Tabela 5-8: Testes de comparações múltiplas dos valores de concentrações efluentes de DQO e SST dos reatores UASB.....	63
Tabela 5-9: Estatística descritiva referente à eficiência de remoção de DQO e SST dos reatores UASB da ETE Mateus Leme	65
Tabela 5-10: Testes de comparações múltiplas dos valores de eficiência de remoção de DQO e SST dos reatores UASB.....	66
Tabela 5-11: Volume de lodo excedente anaeróbio e massa de ST descartados durante as fases estudadas.....	69
Tabela 5-12: Estatística descritiva referente às concentrações de DQO e SST efluentes do Decantador Secundário da ETE Mateus Leme.....	72
Tabela 5-13: Testes de comparações múltiplas dos valores de concentrações efluentes de DQO e SST nos Decantadores Secundários.....	73

Tabela 5-14: Estatística descritiva referente às eficiências de remoção de DQO e SST considerando todas as unidades de tratamento da ETE Mateus Leme	75
Tabela 5-15: Testes de comparações múltiplas dos valores de eficiência de remoção de DQO e SST considerando todas as unidades da ETE Mateus Leme em funcionamento	76
Tabela 5-16: Dados de gerenciamento do lodo excedente anaeróbico e taxas observadas nos leitos de secagem	77

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AME – Atividade Metanogênica Específica
CDV – Caixa distribuidora de vazão
CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental
COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DN – Deliberação Normativa
DQO – Demanda Química de Oxigênio
DS – Decantador Secundário
EEB – Elevatória Esgoto Bruto
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
FBP – Filtro Biológico Percolado
H₂S – Sulfeto de Hidrogênio
NBR – Norma Brasileira
pH – Potencial Hidrogeniônico
SST – Sólidos Suspensos Totais
ST – Sólidos Totais
TAH – Taxa de Aplicação Hidráulica
TAS – Taxa de Aplicação Superficial
TDH – Tempo de Detenção Hidráulica
TP – Tratamento Preliminar
UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	13
SUMÁRIO.....	14
1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 OBJETIVO GERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 REATORES UASB: CONCEITOS E FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	19
3.1.1 <i>Contextualização e fundamentação teórica sobre reatores UASB</i>	19
3.1.2 <i>Lodo gerado nos processos anaeróbios</i>	20
3.1.3 <i>Gerenciamento de lodo excedente em reatores UASB</i>	21
3.1.4 <i>Desaguamento do lodo excedente anaeróbio – Leitões de Secagem</i>	22
3.1.5 <i>Desvantagens do processo anaeróbio e necessidade de pós-tratamento</i>	23
3.1.6 <i>Diretrizes técnicas para projetos de reatores UASB</i>	24
3.2 COMBINAÇÃO TRATAMENTO AERÓBIO/ANAERÓBIO.....	25
3.2.1 <i>Filtro biológico Percolador</i>	26
3.3 GERENCIAMENTO DO LODO AERÓBIO.....	27
3.4 ENVIO DO LODO AERÓBIO PARA REATORES UASB: RESUMO DE ESTUDOS EM ESCALA PILOTO E PLENA ..	28
4 MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1 DESCRITIVO DAS UNIDADES DE ESTUDO: ETE MATEUS LEME	32
4.2 FASES DO ESTUDO.....	42
4.3 PARÂMETROS DE MONITORAMENTO E METODOLOGIA UTILIZADA – FASE LÍQUIDA	43
4.4 PARÂMETROS DE MONITORAMENTO E METODOLOGIA UTILIZADA – FASE SÓLIDA	44
4.5 ESTATÍSTICA ANALÍTICA E TRATAMENTO DOS DADOS.....	46
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5.1 IMPACTO DAS DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO DE LODO SOBRE OS PARÂMETROS HIDRÁULICOS OPERACIONAIS DOS REATORES UASB E DA UNIDADE DE PÓS-TRATAMENTO	48
5.1.1 <i>Verificações hidráulicas dos reatores UASB</i>	48
5.1.2 <i>Verificações hidráulicas das unidades de pós-tratamento</i>	55
5.1.3 <i>Síntese das verificações hidráulicas dos reatores UASB e da unidade de pós-tratamento</i>	56
5.2 IMPACTO DO REGIME DE ALIMENTAÇÃO E DE ENVIO DE LODO SECUNDÁRIO SOBRE O DESEMPENHO DOS REATORES UASB	58

5.2.1	<i>Caracterização do esgoto bruto afluente aos reatores</i>	58
5.2.2	<i>Verificação da qualidade do efluente dos reatores</i>	60
5.2.3	<i>Verificação das eficiências dos reatores UASB</i>	64
5.2.4	<i>Verificação dos perfis de lodo dos reatores</i>	67
5.2.5	<i>Síntese das verificações de desempenho dos reatores UASB</i>	70
5.3	IMPACTO DO REGIME DE ALIMENTAÇÃO E DO ENVIO DE LODO SECUNDÁRIO SOBRE O DESEMPENHO DA UNIDADE DE PÓS-TRATAMENTO (FBP+DS)	71
5.4	IMPACTO DO REGIME DE ALIMENTAÇÃO E DE ENVIO DE LODO SECUNDÁRIO SOBRE O DESEMPENHO GLOBAL DA ETE	74
5.4.1	<i>Verificação da eficiência global da ETE</i>	74
5.5	IMPACTO DO REGIME DE ALIMENTAÇÃO E DE ENVIO DE LODO SECUNDÁRIO SOBRE O DESEMPENHO DOS LEITOS DE SECAGEM DA ETE.....	77
6	CONCLUSÕES	79
6.1	IMPACTO DAS ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS DE ENVIO DE LODO SOBRE OS PARÂMETROS HIDRÁULICOS DOS REATORES UASB E DA UNIDADE DE PÓS TRATAMENTO DA ETE	79
6.2	IMPACTO DAS ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS DE ENVIO DE LODO SOBRE O DESEMPENHO DOS REATORES UASB	79
6.3	IMPACTO DAS ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS DE ENVIO DE LODO SOBRE O DESEMPENHO DA UNIDADE DE PÓS TRATAMENTO (FBP+DS)	80
6.4	IMPACTO DAS ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS DE ENVIO DE LODO SOBRE O DESEMPENHO GLOBAL DA ETE MATEUS LEME	80
6.5	IMPACTO DAS ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS DE ENVIO DE LODO SOBRE O DESEMPENHO DOS LEITOS DE SECAGEM DA ETE MATEUS LEME.....	81
7	RECOMENDAÇÕES	82
8	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas anaeróbios para o tratamento de esgoto doméstico possui grande aceitação no Brasil. Chernicharo et al. (2018) reportaram que em uma amostra de 1.667 ETEs, localizadas em seis estados mais o Distrito Federal, representando uma capacidade instalada de tratamento de cerca de 51,1% da população urbana no Brasil, 658 unidades tinham instalados reatores anaeróbios. Entre os reatores anaeróbios utilizados tem destaque o do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), por se tratar de sistema que apresenta uma série de vantagens em relação aos processos clássicos aeróbios mecanizados (CHERNICHARO, 2007), muito embora possua como desvantagem intrínseca a limitada eficiência de remoção de matéria orgânica, normalmente da ordem de 70%. Todavia, a complementação da remoção de DBO e DQO pode ser conseguida por meio de sistemas de pós-tratamento aeróbios, dentre os quais os filtros biológicos percoladores (FBP) têm sido uma das tecnologias mais empregadas no Brasil (CHERNICHARO et al., 2018). Segundo Von Sperling (2014), o sistema UASB/FBP apresenta eficiências típicas de remoção de DBO entre 80% e 93%. Estes valores seriam suficientes para garantir, na grande maioria dos casos, o cumprimento da legislação ambiental vigente no Estado de Minas Gerais no que tange ao padrão de lançamento de efluentes referente à eficiência de remoção de DBO.

Em sistemas convencionais de tratamento de esgoto (ex. lodos ativados convencional), os sólidos biológicos aeróbios produzidos são adensados e usualmente tratados em digestores anaeróbios de lodo. De forma a simplificar o gerenciamento do lodo, em sistemas combinados anaeróbio/aeróbio (ex. reatores UASB seguidos de lodos ativados ou de filtros biológicos percoladores), foi proposto por Van Haandel e Lettinga (1994) o envio do lodo aeróbio excedente para adensamento e digestão nos reatores UASB existentes. Desta forma, foi possível simplificar o fluxograma das estações e aumentar a viabilidade econômica para sua implantação. Alem Sobrinho e Jordão (2001) destacam que a combinação dos processos anaeróbio e aeróbio em uma mesma ETE reúne as principais vantagens dos sistemas convencionais com a inovação do espessamento e digestão do lodo no reator UASB, além de permitir a redução dos custos de construção e operação, pois a planta não exige a implantação de unidades específicas para o adensamento e digestão do lodo aeróbio.

Apesar de apresentar vantagens adicionais no tratamento do esgoto, existem poucos estudos na literatura especializada sobre o impacto do envio do lodo aeróbio para adensamento e estabilização em reatores anaeróbios, considerando estações de tratamento em escala plena

(GONÇALVES, 2015). Além disso, os estudos já realizados indicaram que houve interferência no desempenho dos reatores UASB durante a fase de operação com o recebimento de lodo aeróbio. Ademais, diante das variações e condições de controle em uma estação em escala plena, faz-se necessário avaliar diferentes estratégias de envio do lodo aeróbio para os reatores anaeróbios, de modo a verificar quais são menos impactantes ao funcionamento dos reatores e ao desempenho global da estação de tratamento, possibilitando assim o estabelecimento de protocolos mais sistematizados para tal prática operacional.

Chernicharo et al. (2018) destacam ainda que apesar das reconhecidas vantagens dos reatores do tipo UASB, há problemas que limitam o desempenho operacional destas unidades. Assim, faz-se necessária a realização de esforços com o objetivo de solucionar tais problemas. Lobato et al. (2018) ressaltam que o correto gerenciamento dos subprodutos gerados no tratamento de esgoto, lodo e espuma, é essencial para o tratamento de problemas nas rotinas operacionais e alcance das eficiências esperadas para os sistemas de tratamento. Para tal, é necessário estabelecer rotinas operacionais de manejo destes subprodutos. É nesse contexto que o presente trabalho pretendeu contribuir, avaliando, em uma ETE de médio porte (população equivalente de projeto de 10.560 hab.), diferentes estratégias de envio de lodo aeróbio gerado em filtros biológicos percoladores para adensamento e digestão em reatores UASB. Foram avaliados os impactos hidráulicos e de desempenho nos reatores UASB, assim como na estação como um todo, além do desempenho dos leitos de secagem existentes na estação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar estratégias operacionais para possibilitar o envio de lodo aeróbio para adensamento e estabilização em reatores UASB, estudo de caso realizado em uma estação de tratamento de esgoto em escala plena.

2.2 Objetivos específicos:

- Avaliar o impacto das diferentes estratégias de gerenciamento de lodo testadas sobre os parâmetros hidráulicos dos reatores UASB e da unidade de pós tratamento da ETE;
- Avaliar o impacto das diferentes estratégias de gerenciamento de lodo testadas sobre o desempenho dos reatores UASB de uma ETE em escala plena;
- Avaliar o impacto das diferentes estratégias de gerenciamento de lodo sobre o desempenho da unidade da pós-tratamento (FBP) de uma ETE em escala plena;
- Avaliar o impacto das diferentes estratégias de gerenciamento de lodo sobre o desempenho global de uma ETE em escala plena;
- Avaliar o impacto das diferentes estratégias de gerenciamento de lodo testadas sobre o desempenho dos leitos de secagem de uma ETE em escala plena.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Reatores UASB: conceitos e fundamentos teóricos

3.1.1 Contextualização e fundamentação teórica sobre reatores UASB

O processo anaeróbio apresenta vantagens frente ao processo aeróbio, pois tem um menor consumo energético para operação do sistema, permite a geração de biogás e consequente possibilidade de aproveitamento energético, tem uma menor produção de lodo, apresenta tolerância a elevadas cargas orgânicas, aplicabilidade em pequenas e grandes escalas e a produção de sólidos é cerca de 2 a 8 vezes menor que em sistemas aeróbios (CHERNICHARO, 2007). O autor comenta ainda que em sistemas aeróbios ocorre a conversão a gás carbônico de 40 a 50% da matéria orgânica disponível, do montante remanescente de 30 a 40% é convertida em lodo (biomassa microbiana) e de 5 a 15% sai do reator junto com o efluente tratado. Em contrapartida, nos reatores anaeróbios cerca de 13 a 15% do material orgânico aplicado é convertido em biomassa, 3 a 7% é utilizado na redução de sulfato, 11 a 17% é convertido a metano e é perdido no efluente tratado dos reatores, 20 a 39% é convertido a metano e está presente no biogás coletado, 30 a 40% não é convertida e é perdida dissolvida no efluente tratado dos reatores, 2 a 3% é convertida a metano e perdida em emissões fugitivas (LOBATO et al, 2012).

Os sistemas anaeróbios de alta taxa tem como característica a existência de mecanismos de retenção de biomassa, o que permite que os reatores operem com baixos tempos de detenção hidráulica e elevados tempos de retenção celular. Entre as tecnologias de tratamento anaeróbio, tem destaque os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo, tradução de *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* – UASB, que possuem tal prerrogativa. As primeiras unidades tiveram origem na década de 70, na Holanda, após trabalhos desenvolvidos na Universidade de Wageningen (CHERNICHARO, 2007). Segundo Von Sperling (2014), nos reatores de manta de lodo, a biomassa cresce dispersa no meio sem a presença de um meio suporte. O volume do reator é reduzido, pois a biomassa presente na unidade tem concentrações elevadas de sólidos. O funcionamento do reator consiste na distribuição do esgoto afluente no fundo do reator de forma que possa haver o contato da matéria orgânica com a biomassa presente. A FIG. 3.1 representa um esquema de funcionamento de um reator UASB.

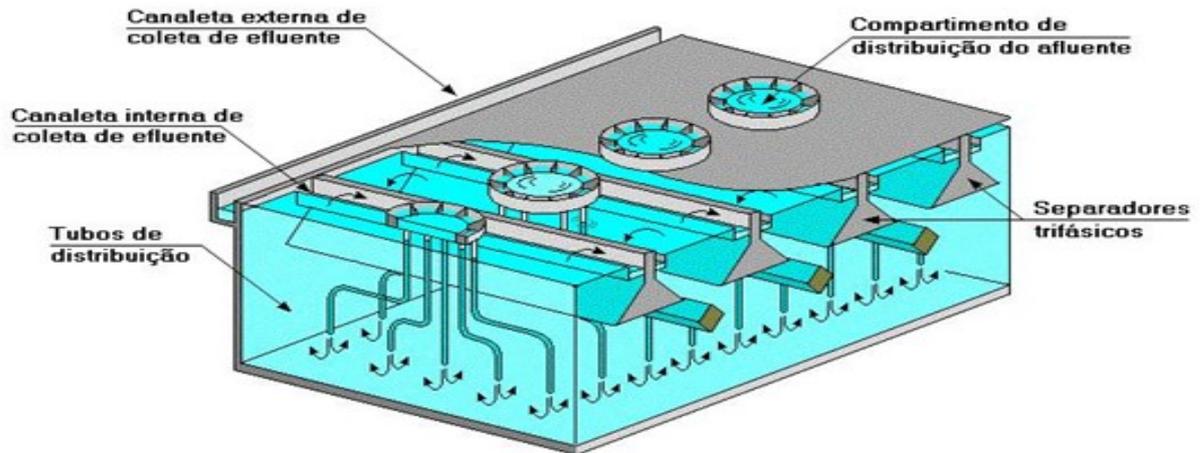


Figura 3.1: Representação esquemática de um reator UASB retangular.

Fonte: adaptado de Chernicharo (2007)

A decomposição da matéria orgânica no interior do reator depende de atividade microbiana e é um processo bioquímico complexo e sequencial, onde ocorre a decomposição de moléculas complexas, como proteínas, lipídios e carboidratos, em moléculas menores e que estarão dissolvidas (FORESTI et al., 1999; CHERNICHARO, 2007). Segundo Chernicharo (2007), o processo de degradação ocorre em 4 fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Além destas, ocorre a fase de redução do sulfato e formação de sulfetos. A predominância desta fase, denominada sulfetogênese, depende da composição química do substrato afluente ao reator e às suas condições operacionais.

3.1.2 Lodo gerado nos processos anaeróbios

Os processos de tratamento de esgoto geram subprodutos sólidos como material gradeado, areia, espuma, lodo primário, lodo secundário e lodo químico que necessitam ser devidamente tratados. Assim, é essencial a existência de unidades que permitam seu adequado gerenciamento. A quantidade de lodo gerado em um processo de tratamento depende da tecnologia utilizada (VON SPERLING, 2014).

O lodo excedente gerado em reatores anaeróbios é estabilizado na própria unidade e a taxa de geração e produção depende do tipo de afluente e de sua composição (CHERNICHARO, 2007). O autor reporta uma produção de 0,10 a 0,20 kg SST/kgDQO_{aplicada} e destaca as seguintes características importantes:

- Apresenta elevado grau de estabilização da matéria orgânica de forma que não é necessário uma unidade adicional para tratamento;
- Apresenta menores volumes para serem gerenciados, pois sua concentração média usual é de cerca de 3 a 5% de teor de sólidos;
- Tem maior facilidade de desidratação;
- Potencial para aplicação do lodo seco na agricultura, desde que sejam tomados os devidos cuidados com higienização.

Lobato et al. (2018) destaca que a produção de lodo em um reator anaeróbio pode ser impactada pelo recebimento na ETE de contribuições não previstas na elaboração do projeto da estação. São exemplos destas contribuições: lodo de tanques sépticos, lixiviado de aterros sanitários, lodo químico de estações de tratamento de água, efluentes não domésticos. Os autores citaram um estudo realizado em uma ETE em escala plena onde foi constatado um acréscimo de 20% na produção de lodo prevista em projeto em decorrência do recebimento de lodo químico de uma estação de tratamento de águas fluviáveis, de lodo de tanques sépticos e lixiviado de aterro sanitário. Destacaram ainda que a produção de lodo acima da quantidade prevista em projeto pode comprometer o sistema de desaguamento de lodo excedente e as rotinas operacionais de descarte previamente estabelecidas.

3.1.3 Gerenciamento de lodo excedente em reatores UASB

Em estações de tratamento de esgoto, a não realização de rotinas operacionais adequadas para o descarte de lodo excedente anaeróbio tem resultado em graves problemas operacionais e de perda de eficiência do sistema de tratamento. Lobato et al. (2018), com o objetivo de contribuir para o adequado gerenciamento dos subprodutos sólidos nas estações de tratamento de esgoto propuseram os seguintes aprimoramentos relacionados ao gerenciamento do descarte de lodo excedente anaeróbio:

- Realizar o monitoramento das concentrações de sólidos suspensos totais e sólidos sedimentáveis no efluente do reator, assim como das concentrações de sólidos totais (ST) ao longo de toda a altura do compartimento de digestão do reator UASB, buscando-se avaliar qual a quantidade em massa de lodo na parte interna do reator em que se inicia o processo de perda de sólidos no efluente tratado da unidade;

- Na ausência de dados de monitoramento do efluente dos reatores UASB realizar a manutenção da concentração de ST do lodo, amostrado no ponto mais elevado do compartimento de digestão, sempre abaixo de 0,5% de teor de sólidos;
- Estimar a quantidade da produção de lodo excedente no reator UASB e processar a sua retirada considerando: 50% da massa a ser removida através da tubulação superior de descarte de lodo excedente, cuja altura recomendada situa-se entre 1,00 a 1,50 m de altura do fundo do reator UASB; 50% restante removida via tubulação inferior, localizada entre 0,20 e 0,30 m do fundo do reator. Tal estratégia ainda poderá favorecer a manutenção de baixas concentrações de ST nos pontos mais altos da câmara de digestão de lodo do reator UASB;
- Prever uma unidade de adensamento e homogeneização de lodo que receba o descarte de lodo excedente antes de ser encaminhado para o sistema de desidratação da estação. O adensamento é necessário pois a realização do descarte utilizando a recomendação listada acima ocasionará a retirada de lodo com concentração de teor de sólidos menor que o descrito na literatura para lodo de reatores UASB (3 a 5%);

3.1.4 Desaguamento do lodo excedente anaeróbio – Leitos de Secagem

O desaguamento é uma operação unitária em uma estação de tratamento de esgoto em que é realizada a separação do material sólido do líquido presentes no lodo, o que resulta em um material com maior concentração de sólidos (METCALF & EDDY, 2013). Sua execução reduz os custos de transporte para o local de disposição final, melhora as condições de manejo do lodo, aumenta o poder calorífico devido à redução da umidade, diminui os volumes para disposição em aterro sanitário e utilização na agricultura, além de reduzir a quantidade de lixiviados em aterros sanitários quando dispostos nestes locais (VON SPERLING, 2014).

Metcalf & Eddy (2013) lista as seguintes alternativas para a realização do desaguamento de lodos: centrífugas; prensas desaguadoras; filtros prensa; prensas rotativas; extrusora; eletrodesaguamento; leitos de secagem de lodo; lagoas de lodo. Nesta revisão bibliográfica são abordados apenas os leitos de secagem pois é a tecnologia de desaguamento existente na ETE em estudo.

Os leitos de secagem, constituídos com sistema de drenagem composto de areia e pedras, geralmente são utilizados em pequenas e médias comunidades. O lodo é desaguado pela drenagem da água, por gravidade, através do leito de areia, e pela evaporação de parcela da

umidade, pela superfície. Geralmente é feito um descarte com lâmina de lodo variando de 0,20 a 0,30 m. Esta tecnologia apresenta como vantagens os menores custos de operação e implantação, operação simplificada e elevado teor de sólidos no lodo seco. Como desvantagens apresenta elevada demanda de área para implantação, o desempenho é dependente de condições climáticas favoráveis, a remoção do lodo pode ser trabalhosa e tem potencial para emissão de odores, além de apresentar potencial para atrair insetos (METCALF & EDDY, 2013).

Chernicharo (2007) recomenda para lodo de reatores UASB uma taxa nominal de aplicação de sólidos nos leitos de secagem de 10 a 15 kg ST/m², enquanto que a Norma NBR 12.209/2011 recomenda uma taxa máxima de 15 kg ST/m² e uma lâmina de lodo sobre a superfície drenante de 0,35 m.

3.1.5 Desvantagens do processo anaeróbio e necessidade de pós-tratamento

Os sistemas anaeróbios apresentam algumas vantagens frente aos processos aeróbios. No entanto, Foresti (1999) e Chernicharo (2007) destacam as seguintes desvantagens desses sistemas:

- Efluente tratado com qualidade eventualmente insuficiente para atender os padrões previstos na legislação ambiental;
- A partida do processo pode ser demorada se comparada com sistemas aeróbios e pode demandar um lodo inóculo para a realização da sua partida;
- Sensibilidade do processo a mudanças das condições ambientais (pH, temperatura, sobrecargas orgânicas e hidráulicas);
- Emissão de odores;
- Demanda maior atenção aos processos corrosivos;
- Dificuldade no gerenciamento da espuma gerada nos reatores;
- Limitação na remoção de nutrientes: nitrogênio e fósforo.

O efluente tratado em um reator anaeróbio pode apresentar uma DQO com valor variando no intervalo de 180 a 270 mg/L e apresenta uma eficiência média de remoção deste parâmetro entre 55 a 70% (VON SPERLING, 2014). Desta forma, podem não atender aos requisitos de concentração efluente e de eficiência de remoção de DQO estabelecidos na Resolução

Ambiental vigente (CONAMA 430/2011) e assim faz-se necessário que sejam projetadas unidades de pós-tratamento.

Metcalf & Eddy (2013) ressalta que uma adequada caracterização do afluente, o correto dimensionamento do sistema, o conhecimento e habilidade operacional podem gerenciar ou evitar os problemas supracitados. Há também preocupação com o controle de corrosão e odor em sistemas de tratamentos anaeróbios. Este tipo de tratamento gera o sulfeto de hidrogênio (H_2S) causador de problemas com odor e, em ambientes com umidade, pode ser convertido biologicamente em ácido sulfúrico, corrosivo para uma série de materiais.

3.1.6 Diretrizes técnicas para projetos de reatores UASB

O projeto de reatores tipo UASB que operam com esgoto doméstico, de baixa concentração de matéria orgânica, tem como premissa o dimensionamento pelo critério de carga hidráulica. Neste cenário, a velocidade ascensional nos compartimentos de digestão e decantação tem relevante importância. Velocidades elevadas podem ocasionar a perda de biomassa no sistema e interferir diretamente no desempenho do processo de tratamento (CHERNICHARO, 2007).

Chernicharo (2007) ressalta que a sobrecarga hidráulica em reatores, como o tempo de detenção hidráulica menor que o recomendado, ou velocidade ascensional maior que o recomendado, pode prejudicar o funcionamento do sistema pois pode ocasionar a perda excessiva de biomassa através do arraste de lodo com o efluente tratado no reator. Além disso, pode ocorrer a redução no tempo de residência celular com conseqüente redução do nível de estabilização do lodo e comprometimento do sistema de tratamento.

Na Tabela. 3.1 a seguir são apresentados os principais parâmetros hidráulicos que devem ser considerados no projeto de reatores UASB operados na faixa de temperatura entre 22 e 25 °C (ABNT, 2011).

Tabela 3.1 :Principais parâmetros hidráulicos de dimensionamento de reatores UASB operados a temperaturas entre 22 e 25 °C.

Parâmetro	Unidade	Valores de referência		
		Vazão média	Vazão máxima	Picos temporários
Tempo detenção hidráulica	h	≥ 7,0	≥ 4	
Velocidade ascensional	m/h	≤ 0,7	≤ 1,2	1,5 a 2,0
Velocidade através das aberturas para o decantador	m/h	≤ 2,5	≤ 4,0	
Taxa de aplicação superficial na zona de decantação	(m ³ /m ² .h)	-	≤ 1,2	-
Tempo detenção hidráulica no compartimento de decantação	h	≥ 1,5	≥ 1,2	-

Fonte: ABNT (2011)

Adicionalmente, existem recomendações para as alturas do reator, conforme a seguir (ABNT, 2011)

- Altura útil total do reator: 4,0 a 6,0 m
- Altura compartimento de decantação: mínima 1,5 m
- Altura do compartimento de digestão: mínima de 2,5 m

3.2 Combinação tratamento Aeróbio/Anaeróbio

Além das limitações para remoção de matéria orgânica, Chernicharo (2007) destaca as limitações do processo de tratamento com reatores UASB na remoção de microrganismos patogênicos e dos nutrientes fósforo e nitrogênio, o que pode implicar no comprometimento dos corpos d'água receptores de efluentes tratados.

Uma alternativa ao processo anaeróbio seria a implantação de sistemas convencionais constituídos de decantadores primários, seguidos de tratamento biológico aeróbio como lodos ativados ou filtro biológico percolador, com a necessidade de unidade para realizar o tratamento dos lodos primário e secundário (adensadores e digestores de lodo). Entretanto, Alem Sobrinho e Jordão (2001) consideram que uma estação de tratamento de esgoto constituída de reator UASB seguido de tratamento biológico aeróbio, com o lodo secundário sendo enviado para digestão no próprio reator UASB, possibilita a redução do tamanho das unidades responsáveis pelo processo aeróbio, além da redução substancial dos custos operacionais.

3.2.1 Filtro biológico Percolador

Os filtros biológicos percoladores (FBP) são sistemas aeróbios compostos de um tanque não submerso de tratamento de esgotos preenchido com material suporte (pedras, material plástico ou espumas), em que, após a aplicação, o esgoto afluyente percola em direção ao fundo do tanque. Esta percolação através do meio suporte permite o desenvolvimento bacteriano na superfície do material de enchimento na forma de um biofilme. A degradação da matéria orgânica ocorre através do contato entre o esgoto afluyente o biofilme formado (GONÇALVES, 2001).

O fornecimento de oxigênio para os microrganismos ocorre usualmente no Brasil de forma natural através da circulação de ar pelos espaços vazios existentes no meio suporte. A matéria orgânica fica retida nos espaços vazios existente entre o material do meio suporte o tempo suficiente para sua estabilização. À medida que ocorre o aumento do biofilme ocorre a redução dos espaços vazios e o consequente aumento na velocidade de escoamento do fluido. Ao atingir determinado valor, esta velocidade causa uma tensão de cisalhamento que remove o material aderido. Assim, ocorre o controle natural da biomassa e a retenção de lodo que sai do filtro é realizada nos decantadores secundários (CHERNICHARO, 2007). O lodo aeróbio retido nesta etapa deve ser encaminhado para adensamento e estabilização, seja em um digestor de lodo ou em um reator anaeróbio tipo UASB, a exemplo do que ocorre na ETE em estudo. A FIG 3.2 a seguir, apresenta o fluxograma típico de uma ETE composta por reator UASB e o pós-tratamento por filtro biológico percolador.

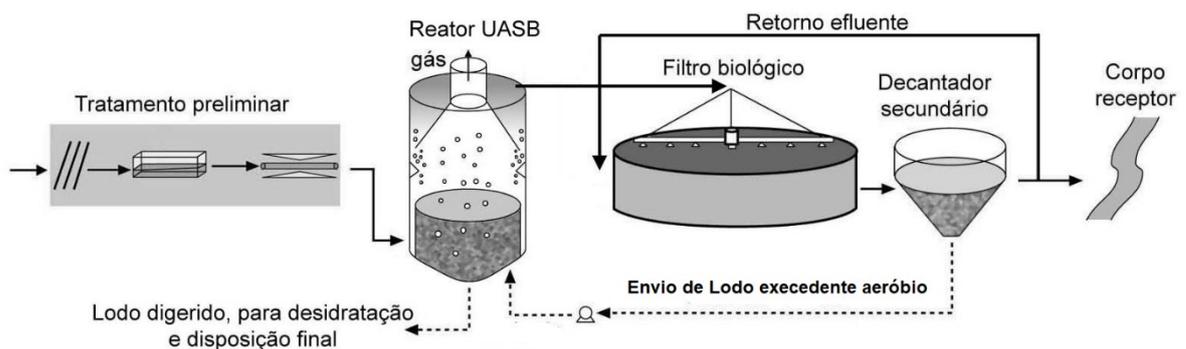


Figura 3.2: Fluxograma típico de uma ETE composta de Reator UASB e FBP.

Fonte: adaptado de Chernicharo (2007)

Os filtros biológicos percoladores geralmente são classificados em função da carga hidráulica ou da carga orgânica a que são submetidos. Geralmente são utilizados os do tipo Alta taxa após

os reatores anaeróbios. Chernicharo (2007) relata que estas unidades operam de forma satisfatória com as seguintes taxas apresentadas na Tabela 3.2:

Tabela 3.2: Principais parâmetros dos Filtros Biológicos Percoladores de Alta taxa

Condições Operacionais	CHERNICHARO (2007)	NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011)
Taxa Aplicação Hidráulica (m ³ /m ² .d)	10,0 a 30,0	≤ 50
Carga Orgânica Volumétrica (kg DBO/m ³ .d)	0,5 a 1,0	≤ 1,2
Profundidade (m)	2,0 a 3,0	≤ 3,0

Adicionalmente, o autor relata que os decantadores secundários utilizados após os filtros biológicos percoladores são dimensionados pelo critério da taxa de escoamento superficial. Para profundidade do decantador de 3,5 m, é recomendada uma taxa de escoamento superficial de 24 m³/m².d para a vazão média e de 48 m³/m².d para a vazão máxima.

3.3 Gerenciamento do lodo aeróbio

Em FBP de alta carga o meio suporte é submetido a taxas bastante superiores às aplicadas em filtros de taxas baixa e intermediária. Nesses casos, o lodo biológico excedente gerado não está estabilizado (VON SPERLING, 2014). Geralmente, nestas unidades sem a ocorrência de nitrificação, apresenta uma produção de lodo na faixa de 0,8 a 1,0 kg SST/kg DBO_{removida}. A relação SSV/SST varia de 0,75 a 0,85, o que confirma a não estabilização e a necessidade de digestão do lodo gerado nesta etapa (GONÇALVES et al, 2001). Devido à elevada concentração de matéria orgânica ainda presente, faz-se necessário o tratamento onde o principal processo utilizado é a digestão anaeróbia. Metcalf & Eddy (2013) destaca que como consequência do tratamento do lodo aeróbio é possível estabilizar o material orgânico, reduzir o seu volume, facilitar o processo de remoção de umidade e permitir o seu reúso para diversas aplicações.

A estimativa da produção e do volume de lodo em FBP pode ser feita utilizando as seguintes equações (GONÇALVES et al, 2001):

$$P_{lodo} = Y \times DBO_{removida} \quad (3.1)$$

$$V_{lodo} = \frac{P_{lodo}}{\gamma \times C} \quad (3.2)$$

em que:

P_{lodo} : produção de lodo no FBP (kgSST/d)

Y : coeficiente de produção de lodo no FBP (kgSST/kgDBO_{removida})

$DBO_{removida}$: massa de DBO removida no FBP (kgDBO/d)

V_{lodo} : produção volumétrica de lodo (m³/d)

γ : densidade do lodo (usualmente da ordem de 1000 a 1040 kg/m³)

C : concentração do lodo removido do decantador secundário (usualmente na faixa de 1 %)

Lobato et al. (2018) destacam que o envio de lodo aeróbio excedente para adensamento e digestão em reatores UASB tem sido apontado por operadores de ETEs em escala plena como uma das causas da perda de sólidos no efluente dessas unidades. Esta perda estaria relacionada às características do lodo excedente aeróbio que supostamente seriam diferentes da composição do lodo anaeróbio existente nos reatores UASB. Entretanto, os autores destacam que experiências práticas em que o estabelecimento e implementação de protocolos operacionais para o envio desse lodo aos reatores UASB e o correto gerenciamento do lodo excedente anaeróbio, contornaram as dificuldades relatadas com essa prática. Almeida et al. (2018) corrobora com o relatado e cita dois trabalhos realizados em escala plena em que foi verificado que a perda de sólidos no efluente tratado dos reatores estava relacionada à ausência de gerenciamento adequado do lodo gerado na ETE, seja do lodo excedente anaeróbio e aeróbio. Os autores relatam ainda a recomendação para o envio do lodo retido em decantadores secundários no período em que é registrada a menor vazão afluente à estação de tratamento, geralmente durante a madrugada. Tal estratégia tem o objetivo de manter o lodo de menor sedimentabilidade, produzido na etapa de pós-tratamento, na região do reator UASB em que o lodo apresenta maior concentração de ST.

3.4 Envio do lodo aeróbio para reatores UASB: Resumo de estudos em escala piloto e plena

Gonçalves (2015) cita que o tratamento do lodo aeróbio conjuntamente com o esgoto afluente foi proposto por van Haandel e Letinga (1994), sendo que posteriormente vários trabalhos técnicos sobre o assunto foram realizados em escala piloto e demonstração. O autor destaca o consenso entre os autores pesquisados sobre a aplicabilidade e não observação de impactos

negativos do envio do lodo excedente aeróbio para adensamento e digestão nos reatores anaeróbios. Além disso, foram observados pontos positivos como o aumento na produção de metano, redução da produção total de lodo e aumento da atividade metanogênica específica. Na TAB. 2.3 a seguir é apresentado um resumo dos trabalhos reportados na revisão bibliográfica realizada por Gonçalves (2015), que retratam estudos realizados em escala piloto e demonstração, somados a resultados de outros trabalhos realizados em escala piloto e plena.

Tabela 3.3: Resumo dos trabalhos em escala piloto, demonstração e plena sobre envio de lodo aeróbio excedente para adensamento e digestão em reatores UASB tratando esgoto doméstico

Fonte	Origem do Lodo Secundário	Resultados Efluente UASB		Eficiência de Remoção UASB	
		DQO (mg/L)	SST (mg/L)	DQO (%)	SST (%)
Sousa (1996)	Reatores Sequenciais de Batelada	58,1	38	86	85
Freire et al (1999)		114	30	84	85
Coura e van Haandel (1999)		315	90	60	73
Gonçalves et al (1999)	Lodo Ativado	101	34	91	94
Consentino et al (2005)		167	-	76	-
Caseiro et al (2006)		239	72	67	42
Silva e van Haandel (2014)		170	275	60	-
Silva (2018)*		205 (1)	279 (1)	-	-
Bof et al (1999)		136	41	79	76
Aisse et al (2001)	Biofiltro Aerado	162	78	57	50
Wanke et al (2002)	Submerso	66	15	88	94
Gonçalves et al (2002)		186	77	64	63
Pontes (2003)		104	66	75	-
Almeida et al. (2009) (2)	Filtro Biológico	107 e 174	35 e 51	65 e 67	74 e 76
Pontes e Chernicharo (2009)	Percolador	164	42	65	81
Chernicharo et al. (2014)*		200 e 162	115 e 86	-	-
Gonçalves (2015)*		200	60	75	85

Fonte - Adaptado de Gonçalves (2015).

*: trabalhos realizados em escala plena;

(1): resultados aqui listados referem-se ao período reportado pelo autor em que foi ajustado o sistema de gerenciamento de lodo da ETE;

(2): resultados aqui apresentados retraram as concentrações e eficiências de remoção observadas em dois reatores UASB distintos operando com esgoto bruto afluente e lodo excedente aeróbio produzido nas unidades de pós-tratamento (FBP), com TDH de 7,7 e 8,5 horas;

No estudo em escala piloto (reatores com volumes de 480 L) realizado por Silva e van Haandel (2014) foi mostrada a possibilidade de uso do reator UASB para o tratamento de esgoto simultaneamente com o lodo ativado excedente. Houve redução na eficiência do tratamento anaeróbio de 78 para 75% após o envio do lodo aeróbio excedente, a concentração média de lodo nos reatores UASB foi mantida na faixa de 22.200 a 25.000 mg/L de sólidos totais, a AME observada esteve dentro da faixa esperada para reatores UASB tratando esgoto doméstico e houve uma tendência dos reatores anaeróbios em expulsar o lodo aeróbio que não pode ser digerido, o que ocasionou um aumento na concentração de sólidos no efluente dos reatores UASB.

Em estudo realizado na ETE Onça (população equivalente de 1 milhão de habitantes), em Belo Horizonte, cujo tratamento é composto de reatores UASB seguidos de filtros biológicos percoladores e decantadores secundários, Chernicharo et al. (2014) avaliaram o impacto do envio do lodo aeróbio excedente no desempenho dos reatores UASB. Foram utilizados 4 dos 24 reatores UASB existentes na estação. No estudo, apenas 2 reatores receberam lodo aeróbio e as 4 unidades trabalharam com um tempo de detenção médio de 7 horas. Foi observado no estudo que houve aumento na concentração de sólidos no efluente dos reatores UASB que receberam o lodo aeróbio. No entanto, os autores atribuíram este fato à concentração elevada no lodo aeróbio dos decantadores, cerca de 3 a 4% de teor de sólidos. Além disso, foi observado no período de estudo que o sistema de desidratação de lodo dos reatores UASB estava com sua capacidade limitada, pois somente um dos dois equipamentos mecânicos de desidratação estava em funcionamento.

Nas fases 4 e 5 do estudo realizado por Chernicharo et al. (2014), foi possível aumentar a quantidade de lodo desidratado nos reatores UASB e foi percebida melhora significativa na qualidade do efluente dos reatores que recebiam lodo excedente aeróbio. As concentrações medianas efluentes observadas de DQO nos reatores que receberam o lodo aeróbio foram de 200 e 162 mgDQO/L e nos reatores sem o recebimento do lodo foram de 165 e 174 mgDQO/L, enquanto que as concentrações de SST efluentes nos reatores com lodo aeróbio foram de 115 e 86 mg/L, e nos reatores sem lodo aeróbio foram de 68 e 56 mg/L, indicando ainda um prejuízo na qualidade do efluente tratado das unidades.

Com o objetivo de colaborar e evoluir no conhecimento sobre o desempenho de reatores UASB, operando com o recebimento de lodo excedente aeróbio, Gonçalves (2015) realizou pesquisa em estação em escala plena (população equivalente de 70.000 habitantes) na qual foram

definidos tempos de detenção hidráulica médios de 18 e 9 horas. Os resultados, considerando os reatores operando com TDH de 18 horas, apresentaram valores de eficiência de remoção de DQO de 73%, SST de 84% e SSed de 88%. Entretanto, com os reatores UASB operando com TDH de 9 horas e com existência de passivo de lodo nos reatores UASB, foi identificada uma piora no efluente. As eficiências médias observadas foram de DQO, SST e SSed de 38, 39 e 50%, respectivamente. Após redução do passivo de lodo foi possível observar uma melhora no desempenho das unidades e as eficiências de remoção destes parâmetros evoluíram para 75, 85 e 95 %, respectivamente. O autor chama a atenção para o passivo de lodo existente nos reatores UASB, onde o ponto de amostragem mais alto dos seus compartimentos de digestão (2,0 m) apresentavam uma concentração de sólidos totais da ordem de 2,0 %.

Silva (2018) avaliou o desempenho de reatores UASB (capacidade instalada de 580 L/s) tratando simultaneamente esgoto sanitário e lodo ativado excedente. O autor verificou que houve tendência de impacto no desempenho dos reatores anaeróbios durante a fase de testes em que o lodo aeróbio excedente foi encaminhado para adensamento e digestão juntamente com o esgoto sanitário. Foi observado uma piora no efluente dos reatores UASB em termos de DQO, no entanto, não foi observado impacto no processo de digestão e não houve piora do efluente final da estação. O autor atribuiu a queda de desempenho dos reatores UASB a problemas na remoção do lodo excedente nestas unidades durante o período de recebimento do lodo excedente aeróbio. Foi possível observar um aumento dos sólidos no efluente dos reatores UASB à medida que o lodo aeróbio era encaminhado para adensamento e digestão. Atribuiu ainda a manutenção da eficiência global da estação ao fato de os sólidos serem retidos nos decantadores lamelares existentes na zona de sedimentação do reator de fluxo alternado. Tal constatação corrobora com o citado por Von Sperling (2016) sobre dificuldades relatadas por operadores de estações de tratamento que tem condições similares de operação e apresentam dificuldades com a prática de envio de lodo aeróbio para adensamento e tratamento de lodo nos reatores anaeróbios.

Almeida et al (2018) destaca que as dificuldades com a prática proposta e avaliada na presente pesquisa estão relacionadas ao passivo de lodo aeróbio e anaeróbio existentes nas ETEs em operação. Destaca ainda as elevadas concentrações de lodo aeróbio encontradas nos decantadores secundários das unidades de pós-tratamento, o que é evidenciado pela presença de bolhas de biogás na superfície das unidades.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado em uma ETE localizada na cidade de Mateus Leme, na região metropolitana de Belo Horizonte e cuja concessão dos serviços de esgotamento sanitário é da Companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA.

4.1 Descritivo das unidades de Estudo: ETE Mateus Leme

A FIG. 4.1 mostra a planta geral da ETE Mateus Leme, com indicação das linhas de fluxo das fases líquida e sólida, bem como dos pontos de amostragem da fase líquida. Uma vista geral da ETE é apresentada na FIG. 4.2. A TAB. 4.1 apresenta as principais dimensões das unidades de tratamento da estação e a seguir é realizada uma descrição das unidades operacionais existentes na estação.

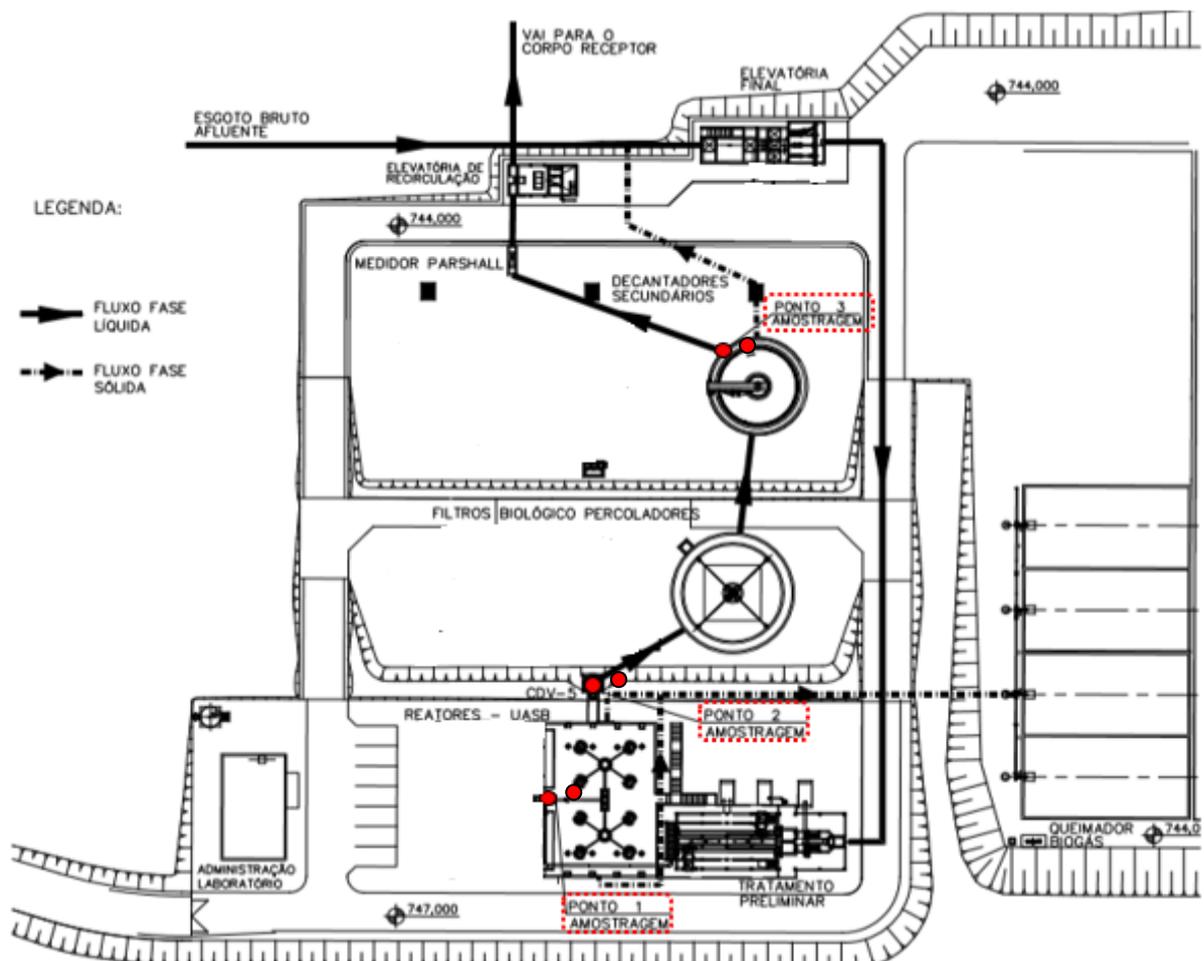


Figura 4.1: Planta geral da ETE Mateus Leme, com indicação das linhas de fluxo das fases líquida e sólida, e indicação dos pontos de monitoramento da fase líquida

Fonte: acervo do autor (2020)



Figura 4.2: Vista panorâmica da ETE Mateus Leme

Fonte: acervo do autor (2020)

Tabela 4.1: Principais dimensões das unidades que integram a ETE Mateus Leme

Características	Reatores UASB	Filtro Biológico Percolador	Decantador Secundário	Leitos de Secagem
População de projeto (hab.)			10.560	
Capacidade instalada da ETE (L/s)			22	
Capacidade instalada por etapa (L/s)	36,4(1)		22	-
Unidades	02	01	01	04
Geometria	Retangular	Circular	Circular	Retangular
Dimensões (m)	12,0 x 8,50	D = 12,0	D = 10,0	10,0 x 20,0
Prof. útil (m)	4,50	2,50	3,5	0,35
Volume útil (m ³)	459 (cada)	282,7	274,9	264,0

(1): Na ETE existem 02 reatores UASB implantados com capacidade total para tratar 36,4 L/s. Porém foi implantado somente 01 FBP e 01 DS, que limita a capacidade de tratamento da estação em 22 L/s.

- **Estação elevatória de esgoto bruto (EEB)**, responsável pelo recalque de todo o esgoto que chega na estação, acrescido do lodo excedente aeróbio produzido no FBP e do lodo de tanque séptico que é recebido na ETE, para a entrada do processo de tratamento. A unidade é composta de grade grossa manual, com espaçamento de 100 mm, necessária à retenção de sólidos grosseiros que chegam na estação juntamente com o esgoto bruto e o lodo de tanque séptico. O bombeamento da estação elevatória é realizado através de 02 conjuntos motobombas submersíveis que operam em paralelo e possuem capacidade para recalcar

uma vazão de 55,0 L/s e altura manométrica de 14,3 m, sendo 1 equipamento reserva adicional.

O acionamento das bombas é realizado através de inversores de frequência que permitem configurar o funcionamento dos equipamentos de acordo com a variação da vazão afluyente à estação. O controle do nível de esgoto no poço da estação elevatória é realizado através de sensor ultrassônico que está interligado aos painéis de controle das bombas. O controle é realizado via programação computacional em equipamento Controlador Lógico Programável – CLP que é interligado aos inversores de frequência. A estação elevatória foi configurada para operar com nível mínimo de 1,20 m, máximo de 3,30 m e nível de referência de 1,80m. A programação é realizada de forma que as bombas operem em dois modos, a saber:

- **Modo Nível Constante:** modo selecionado automaticamente quando a diferença de nível do poço de sucção e o nível de referência é igual ou inferior a 10 centímetros. Neste modo a programação do CLP modula a frequência de funcionamento dos conjuntos motobomba de acordo com a variação na vazão afluyente ao poço de sucção da elevatória. Assim, a vazão afluyente ao tratamento preliminar é igual as vazões contribuintes ao poço de sucção da estação elevatória;
- **Vazão Constante:** modo selecionado automaticamente quando a diferença de nível do poço de sucção e o nível de referência é superior a 10 centímetros (maior que 1,90 m). Neste modo a programação do CLP modula a frequência de funcionamento de um dos conjuntos motobomba de forma que o equipamento funcione em sua capacidade nominal, enquanto que o outro conjunto motobomba modula sua frequência de forma que o equipamento aumente sua frequência até chegar à sua capacidade nominal, o que faz com que a capacidade de bombeamento da estação elevatória chegue até 55 L/s.

A planta baixa com detalhes da chegada na elevatória e do poço de sucção é apresentada na FIG. 4.3, uma vista geral da unidade na FIG. 4.4 e a linha de recalque responsável pelo bombeamento do esgoto bruto + lodo excedente aeróbio + lodo tanque séptico na FIG. 4.5;

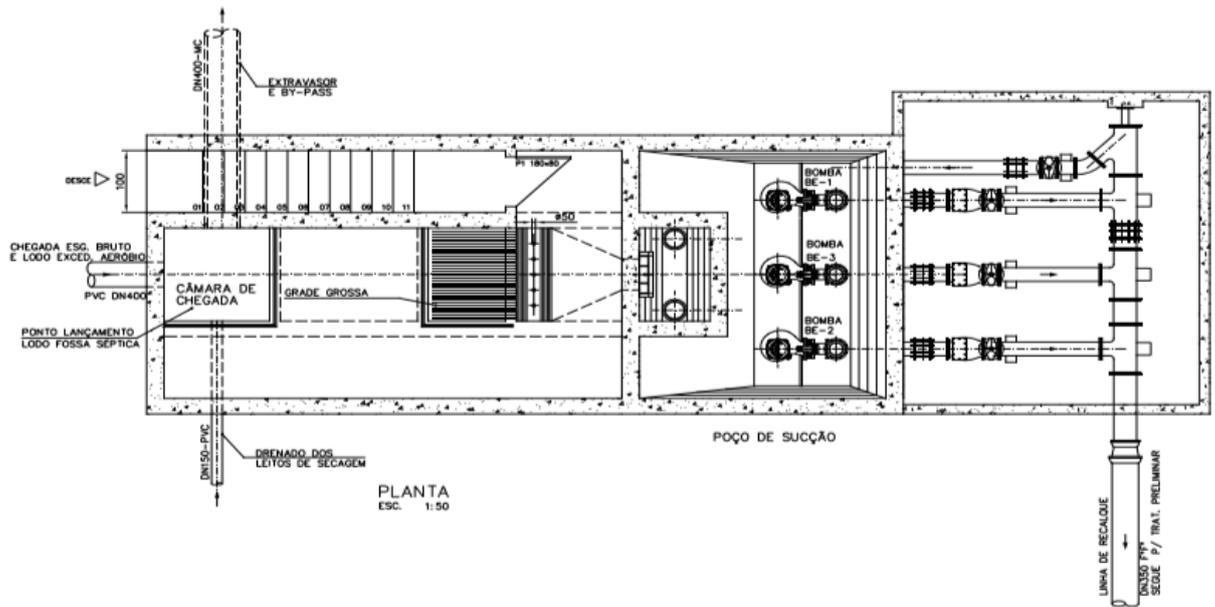


Figura 4.3: Planta baixa da Elevatória de Esgoto Bruto (EEB)

Fonte: acervo do autor (2020)



Figura 4.4: Vista geral da Elevatória de Esgoto Bruto (EEB)

Fonte: acervo do autor (2020)

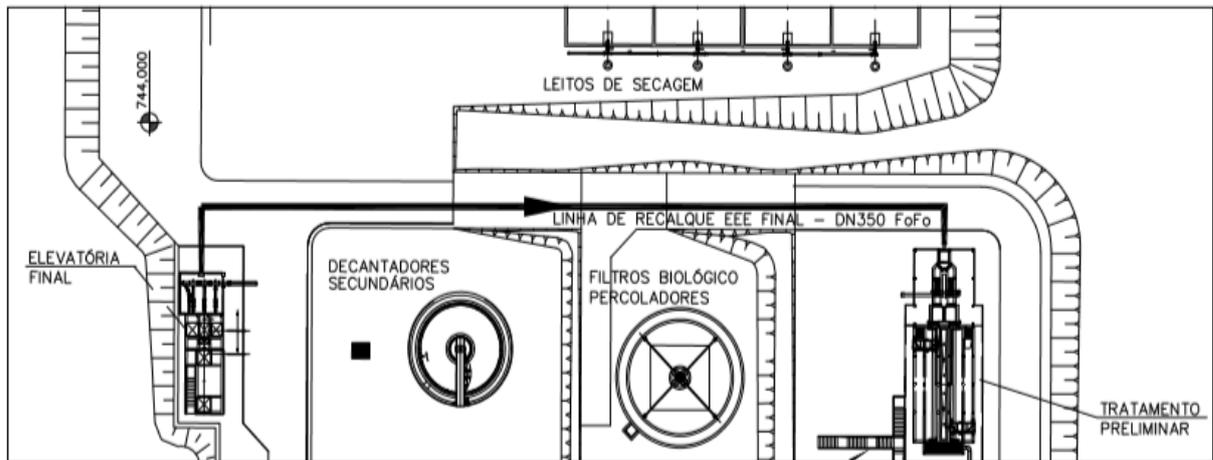


Figura 4.5: Planta da linha de recalque responsável pelo bombeamento do esgoto bruto, lodo excedente aeróbio e lodo de tanque séptico.

Fonte: acervo do autor (2020)

- Sistema de tratamento preliminar (TP)**, composto de 02 peneiras tipo esteira mecanizada com espaçamento de 6 mm e sistema de lavagem automática acoplado. A remoção de areia e óleos e graxas é realizada em tanques desarenadores compostos de pontes raspadoras e sistema de injeção de ar (difusores de ar tipo bolha grossa e sopradores tipo *Roots*). A areia sedimentada é removida através de sistema de sucção acoplado as pontes raspadoras e a gordura é removida na superfície do tanque desarenador através do processo de flotação que agrega as bolhas de ar injetadas às partículas de óleos e graxas presentes no esgoto afluente. A areia removida é encaminhada para um aterro sanitário e a gordura para os leitos de secagem existentes na ETE. O esgoto efluente do preliminar é encaminhado, por gravidade, para a caixa distribuidora de vazão 1 (CDV-1), que distribui o esgoto para os reatores UASB. Uma vista geral do sistema preliminar e dos tanques desarenadores é apresentada na FIG 4.6;



Figura 4.6: Vista geral do Sistema Preliminar e da parte superior da caixa de areia aerada

Fonte: acervo do autor (2020)

- **Reatores UASB**, compostos de 02 unidades com geometria retangular, cada um com volume útil igual a 459 m^3 . Estes reatores são responsáveis pelo primeiro estágio do tratamento biológico na ETE. O esgoto efluente do tratamento preliminar passa pela CDV-1, em seguida pelas CDV-2 e 3 e chega até a parte interna dos reatores através de 04 caixas distribuidoras de vazão instaladas na parte superior de cada unidade, as CDV-4. As principais características e dimensões dos reatores são apresentadas na TAB 4.1. A FIG. 4.7 apresenta uma vista em planta do projeto dos reatores, uma vista geral dos reatores e da parte de superior das unidades na FIG. 4.8. Na FIG. 4.9 é possível observar o desenho em corte do reator UASB no qual é possível observar as principais dimensões e dispositivos internos da unidade: compartimento de decantação; compartimento de digestão; tubos de distribuição de esgoto afluente; separador trifásico; tubo de amostragem de lodo, altura de 1,75m;

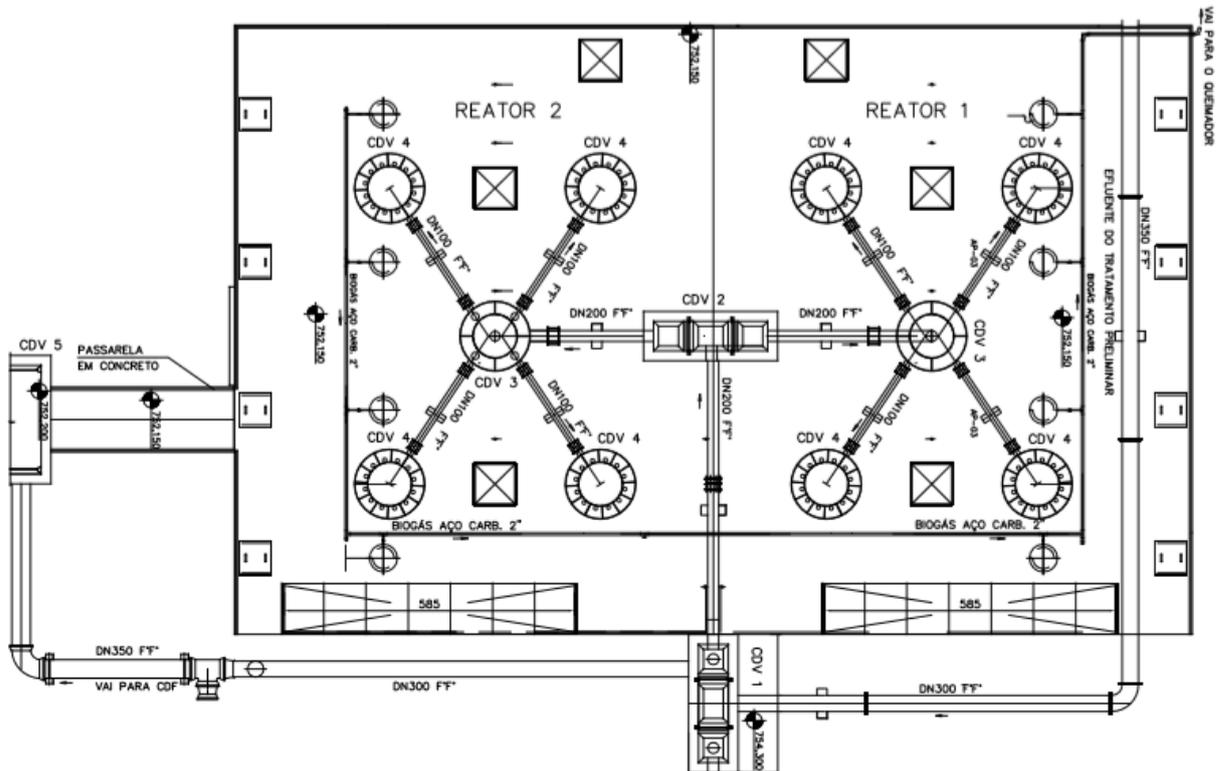


Figura 4.7: Planta de cobertura dos reatores UASB com indicação das caixas distribuidoras de vazão responsáveis pelo encaminhamento do afluente para a parte interna das unidades.

Fonte: acervo do autor (2020)



Figura 4.8: Vista geral e superior dos reatores UASB

Fonte: acervo do autor (2020)

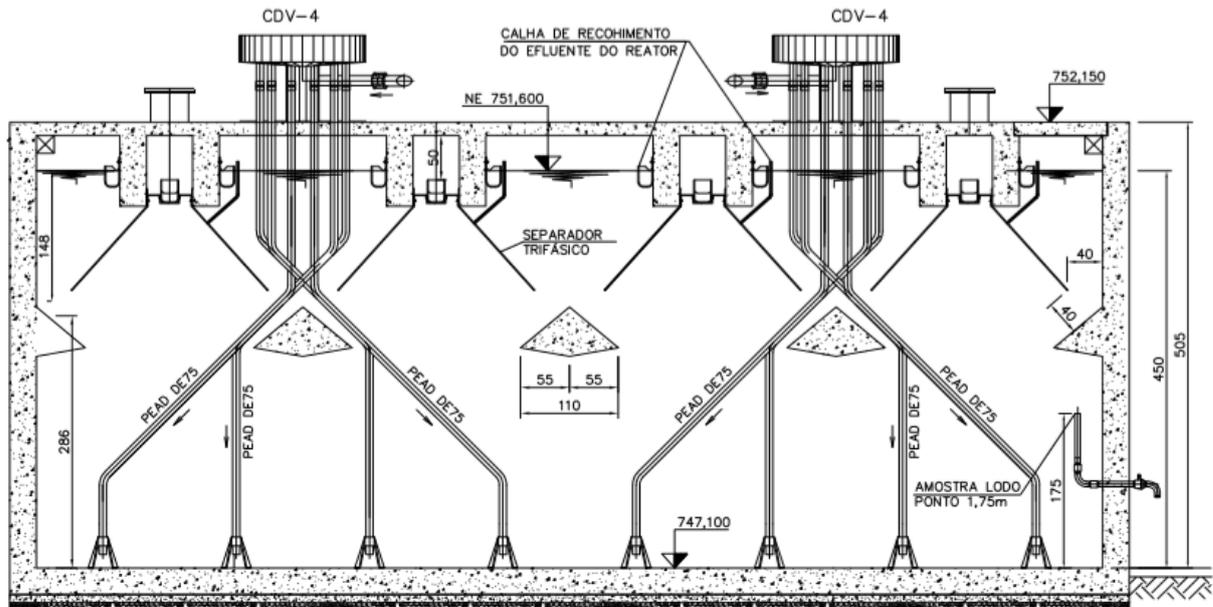


Figura 4.9: Representação interna dos reatores UASB.

(Níveis em metro, dimensões em centímetro, diâmetros em milímetro).

Fonte: acervo do autor (2020)

- Sistema de pós-tratamento composto de FBP + Decantador Secundário (DS)**, para tratamento do efluente anaeróbico que é efetuado por um conjunto sequencial. O efluente dos reatores UASB é distribuído no topo do FBP por meio de braços rotatórios de acionamento hidráulico e fabricados em aço carbono. A distribuição do afluente é realizada por furos existentes ao longo do braço distribuidor e que são dimensionados para que a distribuição seja feita de forma homogênea ao longo da superfície do meio suporte. O afluente passa então pelo meio suporte, composto de brita nº 4 com composição de rocha gnaisse, e é recolhido em canaletas localizadas no fundo da unidade, de onde é direcionado para uma unidade de decantação secundária. O efluente tratado é encaminhado para o corpo receptor, mas pode também ser enviado parcialmente para a estação elevatória de recirculação, que possibilita o envio deste para os filtros biológicos percoladores, auxiliando eventualmente na manutenção da sua umidade. O lodo removido no fundo do DS é direcionado para a elevatória de esgoto bruto, de onde é bombeado para adensamento e digestão nos reatores UASB, juntamente com o esgoto bruto e o lodo de tanque séptico que é descartado na ETE. A descarga de lodo do DS é realizada através da abertura de válvula tipo esfera excêntrica com diâmetro nominal de 150 mm, instalada em tubulação fabricada em ferro fundido e com o mesmo diâmetro. A FIG. 4.10 mostra uma vista geral das unidades de pós-tratamento (FBP+DS), a FIG. 4.11 apresenta o corte do DS e da caixa de descarga de lodo e a FIG. 4.12 uma vista do DS, da caixa de manobra de descarga de lodo, da EEB e

o detalhe da válvula tipo esfera excêntrica onde é realizada a manobra para a descarga do lodo excedente aeróbio;



Figura 4.10: Vista geral das unidades de pós-tratamento (FBP+DS)

Fonte: acervo do autor (2020)

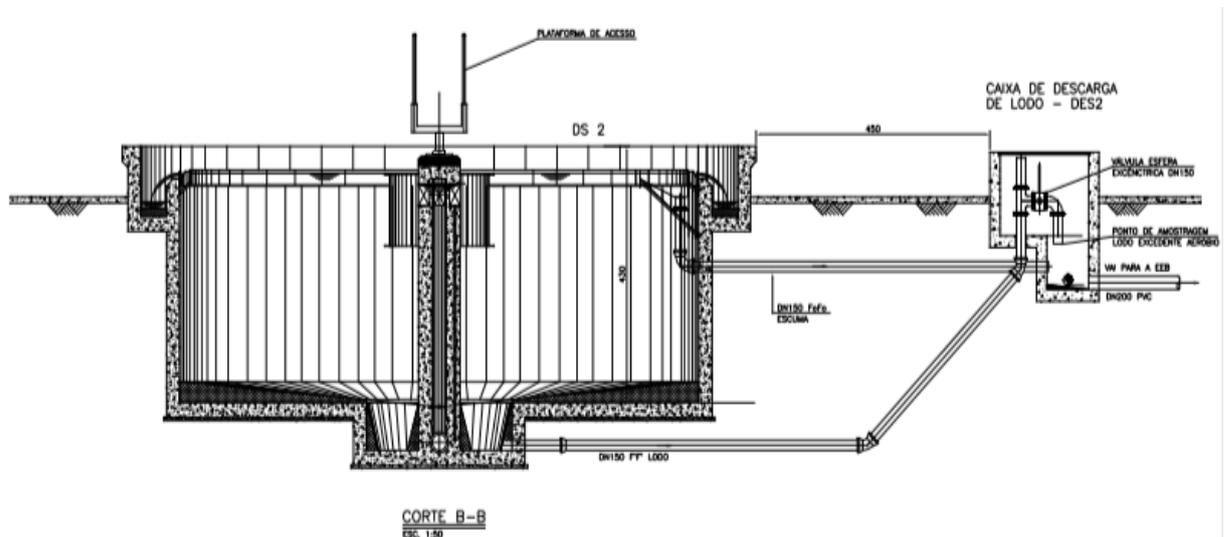


Figura 4.11: Corte do DS e da Caixa de manobra da descarga de lodo excedente aeróbio e espuma sobrenadante

(Dimensões em centímetro, diâmetros em milímetro).

Fonte: acervo do autor (2020)



Figura 4.12: Vista geral do DS, EEB e detalhe da válvula de descarga do lodo excedente aeróbio.

Fonte: acervo do autor (2020)

- **Sistema de Queima de Biogás**, implantado com 03 torres chaminé de queima e capacidade instalada para realizar a queima de 70 Nm³/h de biogás. O sistema foi instalado com taque de lastro, registro para a realizar a purga de material condensado, válvula corta-chama, manômetro e sistema de acionamento elétrico da chama auxiliar do processo de queima. A FIG. 4.13 apresenta uma vista geral do sistema de queima de biogás;



Figura 4.13: Vista geral do Sistema de queima de biogás

Fonte: acervo do autor (2020)

- **Leitos de secagem**, 04 unidades implantadas para receber a espuma e o lodo excedente anaeróbio removidos nos reatores UASB, além da gordura removida na caixa de areia aerada instalada no sistema preliminar. Foram implantadas 04 unidades, compatíveis com

a capacidade instalada na estação. Na FIG. 4.14 é apresentada uma vista geral do sistema de secagem de lodo;



Figura 4.14: Vista geral dos leitos de secagem

Fonte: acervo do autor (2020)

4.2 Fases do estudo

Foram estabelecidas quatro fases com estratégias operacionais diferentes para envio do lodo excedente aeróbio para o reator UASB, conforme TAB. 4.2. O TDH médio observado nos reatores UASB em cada fase variou de acordo com a vazão afluyente à ETE, mas também em função do número de reatores em operação. Nas fases DC1 (Descarte Contínuo, Q_{lodo} 1,5 L/s, TDH_{UASB} 6,1 h), DC3 (Descarte Contínuo, Q_{lodo} 1,0 L/s, TDH_{UASB} 7,3 h) e DN (Descarte Noturno, Q_{lodo} 6,6 L/s, TDH_{UASB} 7,8 h) a estação foi operada com apenas um reator UASB. Durante a fase DC2 (Descarte Contínuo, Q_{lodo} 1,0 L/s, TDH_{UASB} 12,7 h) houve um aumento significativo nas vazões afluentes em decorrência do aumento da contribuição (indevida) de água de chuva na rede coletora. Nesta fase o sistema foi operado com dois reatores UASB.

Durante a realização dos estudos, a ETE Mateus Leme passou a receber descartes de caminhão limpa fossa com lodo coletado em tanques sépticos residenciais. A quantidade de lodo recebida na estação variou de acordo com a demanda para limpeza de fossas na cidade de Mateus Leme. O recebimento deste lodo era realizado diretamente na estação elevatória de esgoto bruto, através de descarte manual com mangote flexível e o lançamento foi realizado a montante da grade grosseira manual.

O descarte do lodo excedente foi realizado através de válvula com abertura manual instalada na descarga de fundo do decantador secundário, conforme descrito anteriormente. A vazão de descarte deste lodo foi variada nas quatro fases testadas. Na fase DC1 o lodo foi descartado com vazão contínua de 1,5 L/s (7% da vazão afluyente), nas fases DC2 e DC3 o lodo também foi descartado com vazão contínua, porém houve redução para 1,0 L/s (5% e 6% respectivamente do valor da vazão afluyente no período). A redução na vazão de descarga de lodo foi realizada com o objetivo de reduzir a sobrecarga hidráulica nos reatores, discutidas oportunamente nesta dissertação. Na fase DN o descarte foi realizado somente no período noturno, com frequência diária, com a válvula de descarte do decantador aberta totalmente, o que resultou em uma vazão de lodo da ordem de 6,6 L/s. Nesta fase a abertura da válvula foi sempre realizada no período de 0h as 01h da manhã.

As variações observadas no comportamento dos reatores são discutidas oportunamente em item específico. A primeira letra da categorização realizada na coluna 1 da TAB. 4.2 a seguir representa a ocorrência do descarte do lodo excedente aeróbio e a segunda a forma como foi realizado o procedimento, de forma contínua ou somente no período noturno.

Tabela 4.2: Fases e estratégias operacionais de descarte de lodo excedente aeróbio

Fase	Tipo de descarte	Caracterização	Período	Duração (d)	Recebimento de lodo de tanque séptico (m ³ /d)
DC1	Contínuo	<ul style="list-style-type: none"> • Horário: 24 h/d • vazão lodo: 1,5 L/s • TDH_{med} UASB: 6,1 h 	Out/2018 - Dez/2018	91	12
DC2	Contínuo	<ul style="list-style-type: none"> • Horário: 24 h/d • vazão lodo: 1,0 L/s • TDH_{med} UASB: 12,7 h 	Abr/2019 - Ago/2019	152	71
DC3	Contínuo	<ul style="list-style-type: none"> • Horário: 24 h/d • vazão lodo: 1,0 L/s • TDH_{med} UASB: 7,8 h 	Set/2019 - Out/2019	44	73
DN	Noturno	<ul style="list-style-type: none"> • Horário: 0 h a 01 h • vazão de lodo 6,6 L/s • TDH_{med} UASB: 7,8 h 	Out/2019 - Nov/2019	29	56

4.3 Parâmetros de monitoramento e metodologia utilizada – Fase Líquida

O monitoramento da estação de tratamento é realizado pela COPASA, que disponibilizou os resultados das análises de Demanda Química de Oxigênio Total (DQO) e Sólidos em Suspensão Totais (SST) para a pesquisa. Todas as análises foram processadas no laboratório da própria

Companhia, localizado na ETE Arrudas, na cidade de Belo Horizonte. Destaca-se que as análises foram processadas conforme recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

Os pontos de monitoramento são indicados na FIG. 4.1 juntamente com o fluxograma da fase líquida e sólida da estação. As amostras compostas, com alíquotas coletadas de hora em hora durante 24 horas, foram realizadas nos seguintes locais:

- P1: CDV-1 (afluente aos reatores), esgoto afluente é amostrado como uma mistura de esgoto doméstico, com o lodo aeróbio excedente e lodo de tanque séptico enviado para os reatores UASB;
- P2: CDV-5 (caixa que reúne o efluente coletado nos reatores UASB) durante as fases DC1, DC3 e DN, e na canaleta de coleta de efluente tratado de cada reator durante a fase DC2;
- P3: Efluente final coletado na saída do decantador secundário.

4.4 Parâmetros de monitoramento e metodologia utilizada – Fase Sólida

O comportamento da massa de lodo dentro dos reatores UASB foi avaliado através da verificação das concentrações de lodo nos quatro pontos de amostragem existentes ao longo da altura do reator: 0,25, 0,75, 1,25 e 1,75 m. Para tal, foram realizadas análises de Sólidos Totais. Todas as análises da fase sólida também foram realizadas e disponibilizadas pela COPASA, conforme procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). A FIG. 4.15 apresenta uma vista externa do reator UASB 2 com a indicação dos pontos onde é realizada a coleta de amostra de lodo anaeróbio. O detalhamento dos tubos na parte interna do reator e os registros utilizados na coleta das amostras de lodo ao longo da altura da unidade é apresentada na FIG. 4.16.

O monitoramento das concentrações (e massas) de lodo excedente anaeróbio efetivamente descartado foi realizado através de coletas de amostras de lodo tomadas na tubulação de descarte de lodo no próprio leito de secagem. Foi realizada uma coleta no início e outra no final do procedimento, para cada descarte de lodo excedente efetuado, sendo 500 mL cada amostra. Assim, a concentração de ST no do lodo efetivamente descartado foi determinada considerando a média dos valores obtidos nas análises realizadas, para cada registro de descarte efetivamente acionado. Em cada reator UASB há dois registros que permitem a retirada de lodo anaeróbio a uma altura de 0,20 m e duas unidades que permitem a retirada a uma altura de 1,40 m.

A avaliação da concentração de ST no lodo excedente aeróbio, retido no DS e enviado para adensamento e digestão nos reatores UASB, foi realizada através mesma metodologia para a determinação do teor de sólidos na parte interna dos reatores UASB (APHA, 2005). O ponto de amostragem do lodo é apresentado na FIG. 4.10, no item 4.1 desta seção.



Figura 4.15: Vista do reator UASB com indicação dos pontos de coleta de amostras de lodo anaeróbio.

Fonte: acervo do autor (2020)

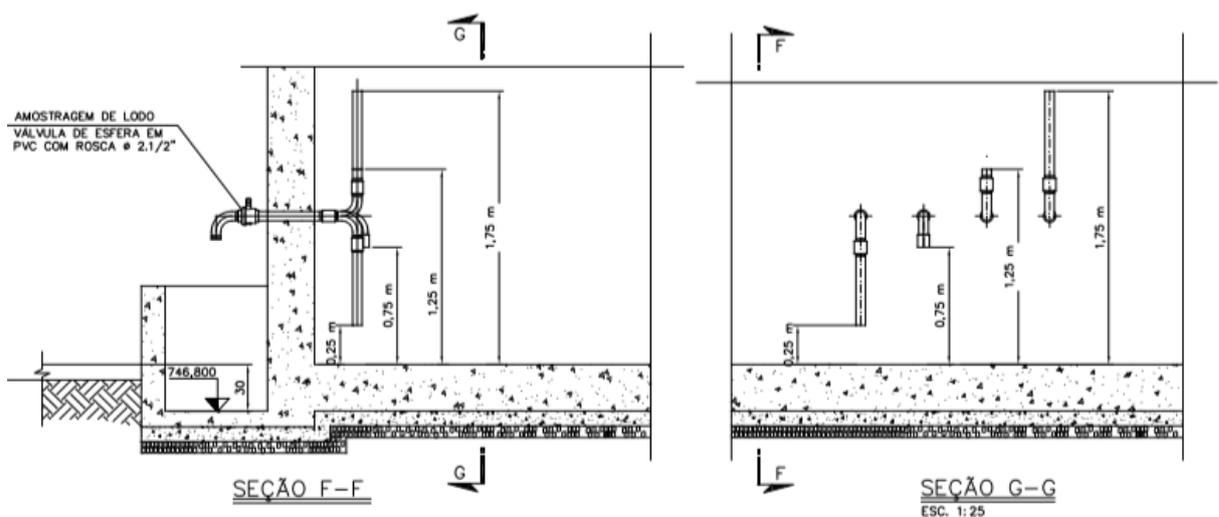


Figura 4.16: Corte do reator UASB com detalhamento dos tubos de coleta de amostras de lodo anaeróbio instalados na parte interna da unidade.

Fonte: acervo do autor (2020)

4.5 Estatística analítica e tratamento dos dados

Os dados disponibilizados pela COPASA foram analisados por meio de estudos estatísticos e desta forma foi possível avaliar o desempenho dos reatores UASB e da estação objeto deste estudo. Para os parâmetros de interesse, considerando os pontos definidos para a amostragem, foram calculadas as estatísticas básicas relativas ao número de dados, média, mediana, valores máximos e mínimos, quartis inferior e superior e coeficiente de variação. As análises também foram subsidiadas por gráficos de série temporal e box-plot.

Ademais, foram realizadas análises estatísticas com o objetivo de avaliar se houve diferença estatística significativa entre os parâmetros de interesse (DQO, SST e parâmetros hidráulicos), considerando o desempenho dos reatores UASB, da unidade de pós-tratamento e da estação de tratamento como um todo. A normalidade dos dados foi verificada utilizando o teste Shapiro Wilk (SHAPIRO & WILK, 1965; OLIVEIRA, 2006). Foram utilizados testes paramétricos e não paramétricos, pois os dados oriundos de tratamentos de esgotos nem sempre estão distribuídos em um modelo normal (OLIVEIRA, 2006).

A verificação da existência de diferenças significativas entre os dados com distribuição normal foi realizada através do teste paramétrico de análise de variância (ANOVA) para um fator, considerando amostras de tamanhos diferentes (SNEDECOR & COCHRAN, 1989; HELSEL & HIRSCH, 2002; MONTGOMERY, 2003; OLIVEIRA, 2006). Quando identificada diferença entre os dados foi utilizado o teste paramétrico de Tukey (teste “post hoc”), com o objetivo de comparar todos os pares possíveis de médias obtidas durante as fases propostas para o estudo. Segundo Helsel & Hirsch (2002) e conforme discutido por Oliveira (2006), este teste é considerado como um dos mais potentes para avaliar diferenças entre grupos de médias.

Para os dados que não apresentaram um modelo de distribuição normal foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ANOVA e teste de medianas (KRUSKAL-WALLIS, 1952; SIEGEL & CASTELLAN, 1988; OLIVEIRA, 2006) para a verificação da existência de diferença significativa entre os grupos de dados. Quando identificada a diferença, foi aplicado o teste não paramétrico de comparações múltiplas de classes para todos os dados com o objetivo de verificar se houve diferença entre os valores observados entre as 4 fases propostas para o estudo (SIEGEL & CASTELLAN, 1988; OLIVEIRA, 2006). Todos os testes foram aplicados com o auxílio do “*software*” Statistica 10.

Os resultados de concentrações de DQO e SST no efluente final da ETE, assim como as eficiências de remoção dos constituintes citados, foram comparados com os dados de desempenho esperado, publicados pela literatura especializada e com os valores indicados na legislação pertinente relacionada aos padrões de lançamento no estado de Minas Gerais (DN101/2008 COPAM/CERH).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Impacto das diferentes estratégias de gerenciamento de lodo sobre os parâmetros hidráulicos operacionais dos reatores UASB e da unidade de pós-tratamento

5.1.1 Verificações hidráulicas dos reatores UASB

A FIG. 5.1 a seguir apresenta as vazões médias afluentes e os respectivos tempos de detenção hidráulica observados nos reatores da ETE Mateus Leme durante as fases do estudo.

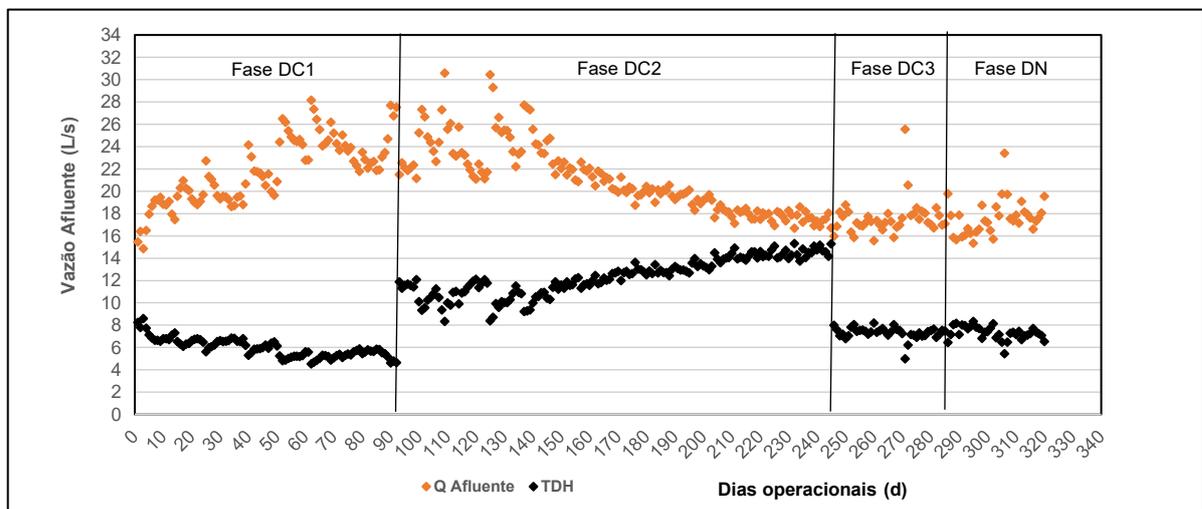


Figura 5.1: Vazões afluentes e tempos de detenção hidráulica observados nos reatores UASB da ETE Mateus Leme durante as fases da pesquisa

DC1: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$; DC2: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 12,7 \text{ h}$; DC3: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$; DN: Descarte Noturno de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

Considerando que os reatores UASB da ETE Mateus Leme são alimentados por uma elevatória de esgoto bruto de chegada que trabalha com duas bombas em paralelo, conforme esquema de funcionamento descrito no item 4.1, optou-se por avaliar a eventual ocorrência de sobrecargas hidráulicas nos reatores anaeróbios, a fim de auxiliar na interpretação dos resultados de desempenho das unidades que compõem a ETE.

a) Impacto sobre TDHs, velocidades ascensionais e velocidades nas aberturas de passagem para os decantadores dos reatores UASB

Os gráficos *box-plot* apresentados nas FIG. 5.2, 5.3 e 5.4 retratam os dados de tempo de detenção hidráulica, velocidades ascensionais nos reatores e velocidades nas aberturas de passagem para o compartimento de decantação dos reatores UASB, observadas durante as 4 fases do estudo. Os dados foram computados com base nas informações de registro de vazão afluente à ETE e que foram apurados com frequência horária. Na TAB. 5.1 é apresentada a estatística descritiva dos dados e os resultados do teste de normalidade aplicado na série de dados avaliados, teste Shapiro Wilk, com nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$).

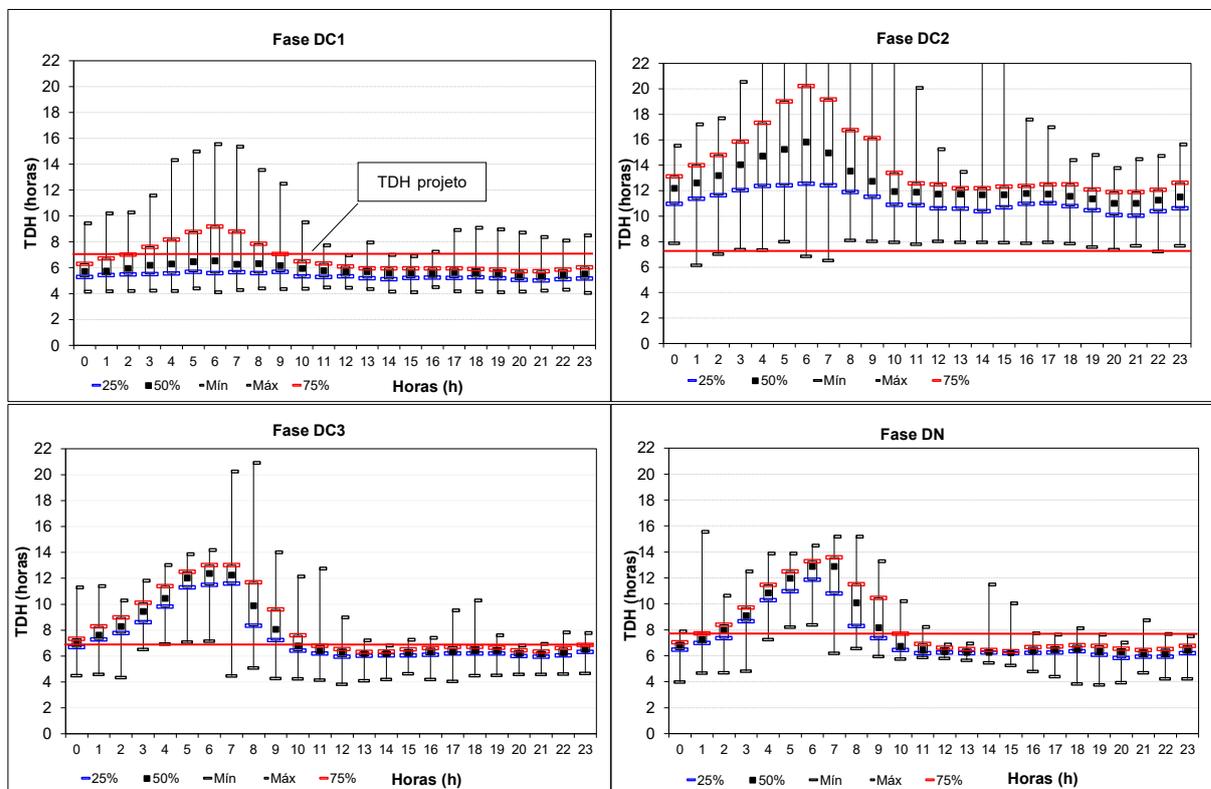


Figura 5.2: Box-plot dos TDH observados durante as fases do estudo considerando o período de 24 horas.

DC1: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$; DC2: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 12,7 \text{ h}$; DC3: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$; DN: Descarte Noturno de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

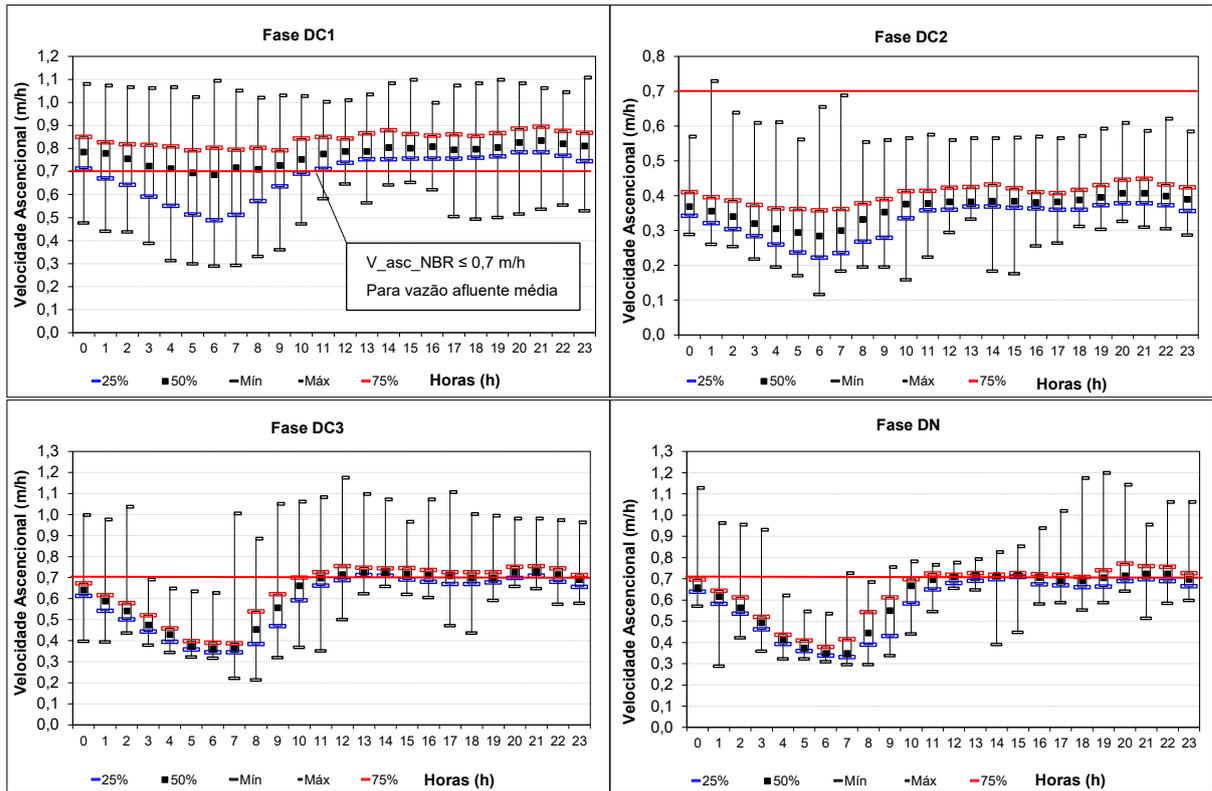


Figura 5.3: Box-plot das velocidades ascensionais observadas durante as fases do estudo considerando o período de 24 horas. Fonte: elaborado pelo autor (2020)

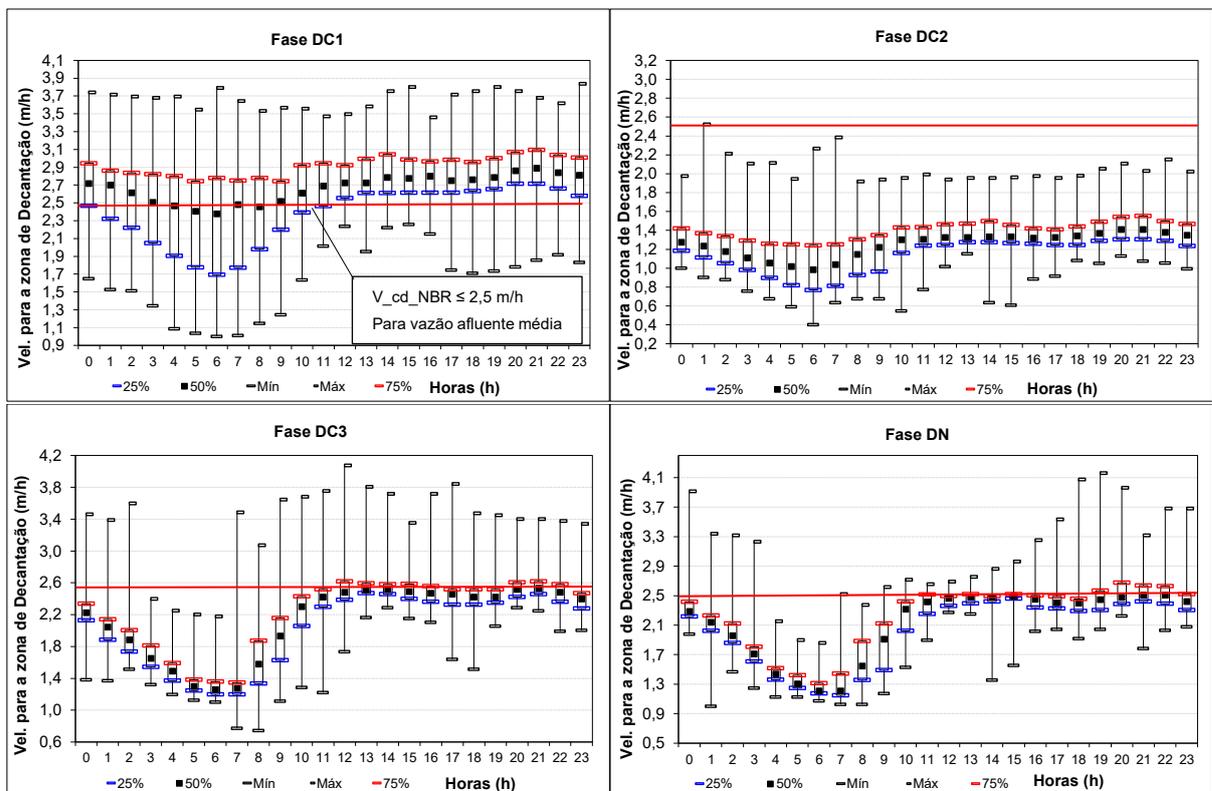


Figura 5.4: Box-plot das velocidades nas estruturas de passagem para os compartimentos de decantação observadas durante as fases do estudo considerando o período de 24 horas.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

Tabela 5-1: Estatística descritiva resumida dos parâmetros hidráulicos nas 04 fases de estudo avaliadas

Estatística	Fases				
	DC1	DC2	DC3	DN	
Número de observações (adimensional)	2.186	3.636	1.076	720	
TDH Reatores	Média (h)	6,1	12,7	7,8	7,8
	Mediana (h)	5,8	12,0	6,7	6,7
	Mínimo (h)	4,1	6,2	3,8	3,8
	Máximo (h)	15,6	38,6	20,9	15,6
	1º Quartil (h)	5,3	11,0	6,3	6,3
	3º Quartil (h)	6,3	13,4	8,9	8,6
	Teste Shapiro- Wilk (<i>p</i>)	0,00	0,00	0,00	0,00
Velocidade Ascensional	Média (m/h)	0,77	0,37	0,62	0,62
	Mediana (m/h)	0,78	0,37	0,67	0,67
	Mínimo (m/h)	0,29	0,12	0,22	0,29
	Máximo (m/h)	1,11	0,73	1,18	1,20
	1º Quartil (m/h)	0,71	0,34	0,51	0,52
	3º Quartil (m/h)	0,85	0,41	0,72	0,72
	Teste Shapiro- Wilk (<i>p</i>)	0,00	0,00	0,00	0,00
Velocidade para a zona de decantação	Média (m/h)	2,7	1,3	2,2	2,2
	Mediana (m/h)	2,7	1,3	2,3	2,3
	Mínimo (m/h)	1,0	0,4	0,8	1,0
	Máximo (m/h)	3,8	2,5	4,1	4,2
	1º Quartil (m/h)	2,5	1,2	1,8	1,8
	3º Quartil (m/h)	3,0	1,4	2,5	2,5
	Teste Shapiro- Wilk (<i>p</i>)	0,00	0,00	0,00	0,00

Com base nos resultados apresentados nos gráficos das Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 e Tabela 5.1 pode-se extrair os seguintes comentários principais:

- Aparentemente, os reatores operaram com sobrecarga hidráulica durante as fases DC1, DC3 e DN, conforme pode ser observado pelos TDHs medianos mostrados na Figura 5.2. Estes ficaram, via de regra, mais próximos de 6 horas do que do TDH médio de projeto (7,0 horas), particularmente no período compreendido entre 11 e 23 horas nas fases DC3 e DN e em todo o período de monitoramento na fase DC1;
- Na fase DC1 o TDH variou de 4,1 a 15,6 horas, com 50% dos dados compreendidos entre 5,3 (1º quartil) e 6,3 horas (3º quartil). Na fase DC3 a variação do TDH foi de 3,8 a 20,9 horas, com 50% dos valores observados variando de 6,3 (1º quartil) a 8,9 horas (3º quartil). Já na fase DN o TDH observado variou de 3,8 a 15,6 horas, com 50% dos dados compreendidos no intervalo de 6,3 (1º quartil) a 8,6 horas (3º quartil);
- O TDH na fase DC2 variou de 6,2 a 38,6 horas, com 50% dos dados compreendidos entre 11,0 (1º quartil) e 13,4 horas (3º quartil). Esta fase apresentou condições hidráulicas mais

favoráveis, uma vez que os TDHs observados estiveram acima da faixa recomendada para a vazão média de projeto;

- Da mesma forma, as velocidades ascensionais também se mostraram mais elevadas nas fases operacionais DC1, DC3 e DN, notadamente no período entre 11 e 23 horas, quando se mantiveram acima do valor recomendado para a operação com vazões médias (NBR 12.209/2011 – 0,7 m/h). Destaque para as velocidades observadas durante as fases DC1, nas quais as velocidades ascensionais medianas foram da ordem de 0,8 m/h, por longo período de tempo;
- Na fase DC1 as velocidades ascensionais variaram de 0,29 a 1,11 m/h, com 50% dos dados variando de 0,71 (1º quartil) a 0,85 m/h (3º quartil). Na fase DC3 a variação deste parâmetro foi de 0,22 a 1,18 m/h, com 50% dos dados no intervalo de 0,51 (1º quartil) a 0,72 m/h (3º quartil), enquanto que na fase DN os dados variaram no intervalo de 0,29 a 1,20 m/h com 50% dos registros compreendidos no intervalo de 0,52 (1º quartil) a 0,72 (3º quartil) m/h;
- Na fase DC2 as velocidades ascensionais variaram no intervalo de 0,12 a 0,73 m/h, sendo que 50% dos dados estiveram compreendidos no intervalo de 0,34 m/h (1º quartil) a 0,41 m/h (3º quartil);
- As velocidades através das aberturas para o compartimento de decantação apresentaram variação de 1,0 a 3,8 m/h na fase DC1, com 50% dos dados compreendidos no intervalo de 2,5 a 3,0 m/h (1º e 3º quartil), sendo que no período de 11 às 23h a mediana apurada (2,7 m/h) foi superior ao valor limite recomendado para vazão média (NBR 12.209/2011 – 2,5 m/h). Nas fases DC2, DC3 e DN, 75% dos dados foram iguais ou inferiores ao valor médio recomendado em norma, o que indica uma melhor condição operacional para este parâmetro durante estas fases.

b) Impacto sobre as taxas de aplicação superficial (TAScd) e TDHs no compartimento de decantação dos reatores (TDHcd)

Os gráficos *box-plot* apresentados nas FIG. 5.5 e 5.6 retratam as TAScd e TDHcd dos reatores, observadas durante as quatro fases do estudo. Os dados foram computados com base nas informações de registro de vazão afluente à ETE e que foram apurados com frequência horária. Na TAB. 5.2 é apresentada a estatística descritiva dos dados e os resultados do teste de normalidade aplicado na série de dados avaliados, teste Shapiro Wilk, com nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$).

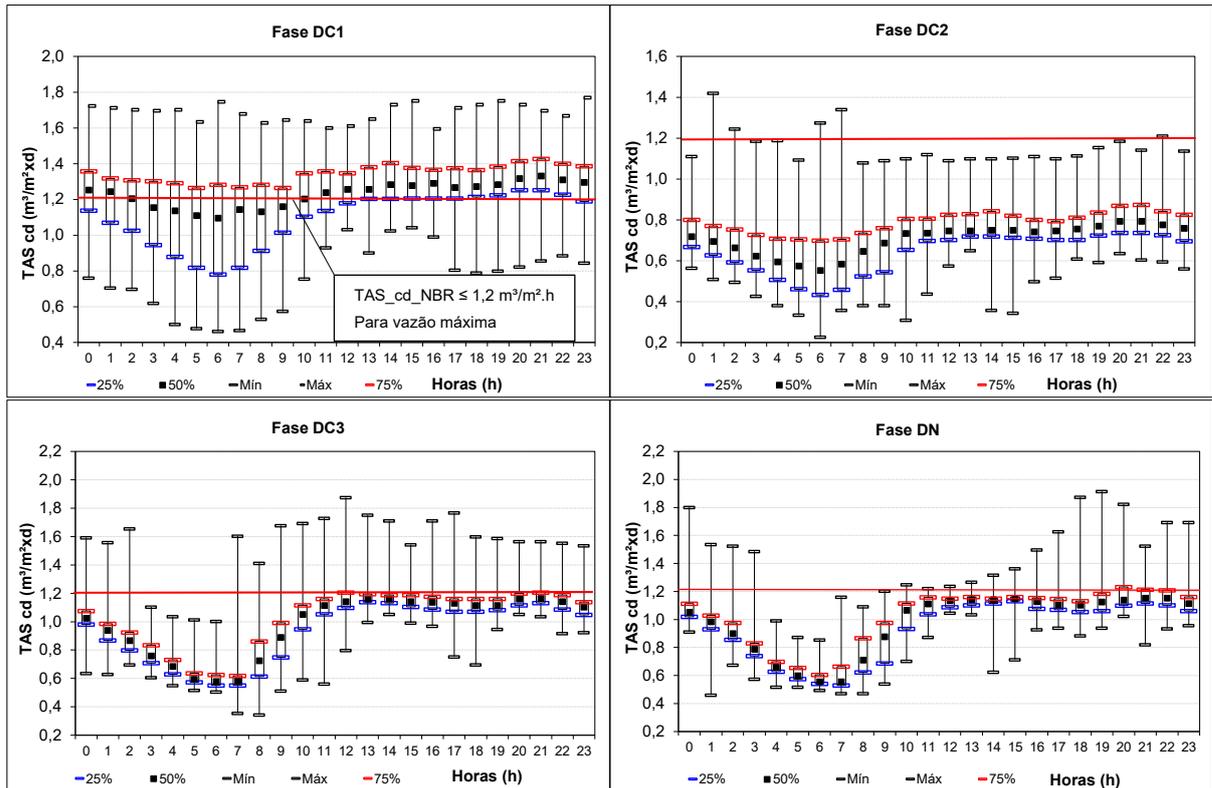


Figura 5.5: Box-plot das Taxas de Aplicação Superficial no compartimento de decantação dos reatores UASB considerando o período de 24 horas.

DC1: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$; DC2: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 12,7 \text{ h}$; DC3: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$; DN: Descarte Noturno de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

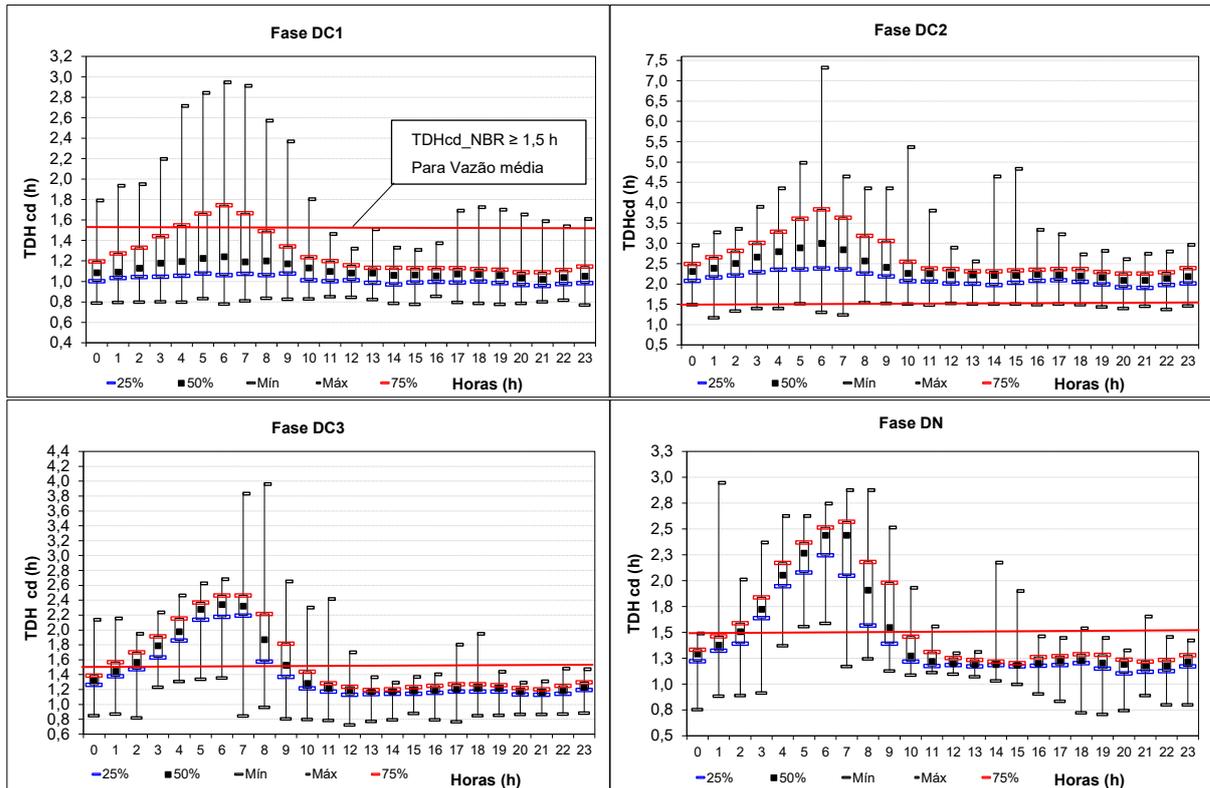


Figura 5.6: Box-plot dos tempos de detenção hidráulica na zona de decantação dos reatores UASB observadas durante as fases do estudo considerando o período de 24 horas.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

Tabela 5-2: Estatística descritiva resumida dos parâmetros hidráulicos nas 04 fases de estudo avaliadas

Estatística		Fases			
		DC1	DC2	DC3	DN
Numero de observações (adimensional)		2.186	3.636	1.076	720
Taxa de aplicação no compartimento de decantação	Média ($m^3/m^2 \cdot d$)	1,2	0,7	1,0	1,0
	Mediana ($m^3/m^2 \cdot d$)	1,2	0,7	1,1	1,1
	Mínimo ($m^3/m^2 \cdot d$)	0,5	0,2	0,3	0,5
	Máximo ($m^3/m^2 \cdot d$)	1,8	1,4	1,9	1,9
	1º Quartil ($m^3/m^2 \cdot d$)	1,1	0,2	0,8	0,8
	3º Quartil ($m^3/m^2 \cdot d$)	1,4	0,8	1,1	1,1
Teste Shapiro- Wilk (p)		0,00	0,00	0,00	0,00
TDH no compartimento de decantação	Média (h)	1,2	2,4	1,5	1,5
	Mediana (h)	1,1	2,3	1,3	1,3
	Mínimo (h)	0,8	1,2	0,7	0,7
	Máximo (h)	2,9	7,3	4,0	2,9
	1º Quartil (h)	1,0	2,1	1,2	1,2
	3º Quartil (h)	1,2	2,5	1,7	1,6
Teste Shapiro- Wilk (p)		0,00	0,00	0,00	0,00

Conforme pode ser observado na Figura 5.5 a Taxa de aplicação superficial no compartimento de decantação dos reatores apresentou valores medianos superiores ao recomendado para a

vazão máxima de projeto (NBR 12.209/2011 – 1,2 m³/m².h) na fase DC1. Nesta fase os valores deste parâmetro tiveram variação de 0,5 a 1,8 m³/m².h, sendo que 50% dos dados apurados estão no intervalo de 1,1 a 1,4 m³/m².h (1º e 3º quartil). Nas demais fases este parâmetro apresentou valores medianos inferiores ao recomendado em norma.

Aparentemente, os compartimentos de decantação dos reatores também operaram com sobrecarga hidráulica durante as fases DC1, DC3 e DN, conforme pode ser observado pelos TDHcds medianos mostrados na Figura 5.6. Estes ficaram, via de regra, mais próximos de 1,3 horas do que do TDHcd recomendado na NBR 12.209/2011 para a vazão média (1,5 horas), particularmente no período compreendido entre 11 e 23 horas nas fases DC1, DC3 e DN. Na fase DC2 este parâmetro apresentou valor mediano de 2,3 horas sendo que 50% dos dados estiveram compreendidos entre 2,1 h (1º quartil) e 2,5 h (3º quartil);

5.1.2 Verificações hidráulicas das unidades de pós-tratamento

A TAB 5.3 a seguir apresenta a estatística descritiva e os resultados do teste de normalidade aplicado na série de dados avaliados, teste Shapiro Wilk, com nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$), dos parâmetros hidráulicos observados no sistema de pós-tratamento da ETE Mateus Leme, composto pelo FBP e DS. São apresentados os dados referentes a Taxa de Aplicação Hidráulica no FBP e a Taxa de Escoamento Superficial no DS. É possível observar que os valores de mediana da TAH no FBP em todas as fases testadas estiveram dentro da faixa recomendada por Chernicharo (2007) e os valores máximos registrados estiveram abaixo do limite recomendado em norma (NBR 12.209/2011), na qual a TAH deve ser menor que 50 m³/m².d, o que indica que esta unidade não operou em sobrecarga hidráulica durante os períodos de testes.

A fase DC1 apresentou valor de mediana de TES no DS igual a 24,3 m³/m².d, superior ao limite recomendado em norma (NBR 12.209/2011 – 24 m³/m².d). Nas demais fases testadas os valores medianos de TES estiveram abaixo deste valor. Na fase DC1 a TES variou de 9,0 a 34,5 m³/m².d, com 50% dos valores contidos no intervalo de 22,2 a 26,5 m³/m².d (1º e 3º Quartil). Ressalta-se que a elevatória de recirculação de efluente tratado para o sistema de pós-tratamento não foi operada durante a realização do estudo.

Tabela 5-3: Estatística descritiva referente as Taxas de Aplicação Hidráulica do FBP e Taxa de Escoamento Superficial do DS da ETE Mateus Leme

Estatística	FBP: TAH (m ³ /m ² .d)				DS: TES (m ³ /m ² .d)			
	DC1	DC2	DC3	DN	DC1	DC2	DC3	DN
Número de dados								
N	2186	3638	1076	720	2186	3636	1076	720
Média	16,6	16,1	13,4	13,5	24,0	23,2	19,3	19,4
Mediana	16,9	16,2	14,5	14,5	24,3	23,3	20,9	20,9
Mínimo	6,3	5,0	4,7	6,3	9,0	7,3	6,7	9,0
Máximo	24,0	31,6	25,4	26,0	34,5	45,4	36,6	37,4
Desvio padrão	2,9	3,2	3,3	3,3	4,2	4,5	4,7	4,8
1º Quartil	15,4	14,6	11,0	11,3	22,2	21,0	15,8	16,3
3º Quartil	18,4	17,7	15,6	15,5	26,5	25,5	22,4	22,3
Coef. variação	17,6	19,6	24,2	24,7	17,6	19,6	24,2	24,7
Teste S. Wilk (<i>p</i>)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

5.1.3 Síntese das verificações hidráulicas dos reatores UASB e da unidade de pós-tratamento

A fim de avaliar a normalidade dos dados dos parâmetros hidráulicos avaliados, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk, ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$). Como não foi observada uma distribuição normal dos dados (p -valor < 0.05), foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas para identificar quais fases apresentaram parâmetros hidráulicos diferentes significativamente entre si. Os resultados dos testes e de comparações múltiplas são apresentados na TAB. 5.4 a seguir. Conforme pode ser observado, somente as fases DC3 e DN não apresentaram diferença significativa entre si, com nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$).

Tabela 5-4: Testes de comparações múltiplas dos parâmetros hidráulicos

Parâmetros	Comparações entre as fases testadas					
	DC1 < DC2 (p =0,000)	DC1 < DC3 (p =0,000)	DC1 < DN (p =0,000)	DC2 > DC3 (p =0,000)	DC2 > DN (p =0,000)	DC3 = DN (p =1,000)
TDH no UASB	DC1 > DC2 (p =0,000)	DC1 > DC3 (p =0,000)	DC1 > DN (p =0,000)	DC2 < DC3 (p =0,000)	DC2 < DN (p =0,000)	DC3 = DN (p =1,000)
V. Asc no UASB	DC1 > DC2 (p =0,000)	DC1 > DC3 (p =0,000)	DC1 > DN (p =0,000)	DC2 < DC3 (p =0,000)	DC2 < DN (p =0,000)	DC3 = DN (p =1,000)
V. p/ cd no UASB	DC1 > DC2 (p =0,000)	DC1 > DC3 (p =0,000)	DC1 > DN (p =0,000)	DC2 < DC3 (p =0,000)	DC2 < DN (p =0,000)	DC3 = DN (p =1,000)
Taxa Apl. no Cd UASB	DC1 > DC2 (p =0,000)	DC1 > DC3 (p =0,000)	DC1 > DN (p =0,000)	DC2 < DC3 (p =0,000)	DC2 < DN (p =0,000)	DC3 = DN (p =1,000)
TDH cd no UASB	DC1 < DC2 (p =0,000)	DC1 < DC3 (p =0,000)	DC1 < DN (p =0,000)	DC2 > DC3 (p =0,000)	DC2 > DN (p =0,000)	DC3 = DN (p =1,000)
TAH no FBP	DC1 > DC2 (p =0,000)	DC1 > DC3 (p =0,000)	DC1 > DN (p =0,000)	DC2 > DC3 (p =0,000)	DC2 > DN (p =0,000)	DC3 = DN (p =1,000)
TES no DS	DC1 > DC2 (p =0,000)	DC1 > DC3 (p =0,000)	DC1 > DN (p =0,000)	DC2 > DC3 (p =0,000)	DC2 > DN (p =0,000)	DC3 = DN (p =1,000)

DC1: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ – $TDH_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$; DC2: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $TDH_{\text{UASB}} = 12,7 \text{ h}$; DC3: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $TDH_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$; DN: Descarte Noturno de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ – $TDH_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$.

Com base na Tabela 5.4 e figuras e tabelas apresentadas nos itens 5.1.1 e 5.1.2 pode-se extrair os seguintes comentários principais:

- O regime de recebimento de lodo de tanque séptico, somado às vazões afluentes de esgoto bruto e de lodo excedente aeróbio, implicaram em uma aparente sobrecarga hidráulica nos reatores UASB durante as fases DC1, DC3 e DN, nas quais apenas um reator UASB estava em operação (TDH_{UASB} entre 6,1 e 7,8 h). Os valores observados para os parâmetros hidráulicos TDH, Vasc e TDHcd indicam que nestas três fases as unidades operaram com valores acima ou abaixo dos limites recomendados em norma (NBR 12.209/2011), principalmente no período entre as 11h e 23h;
- Os reatores UASB operaram em condições hidráulicas similares (sem diferença estatística significativa) durante as fases DC3 e DN. Aparentemente, a alteração no regime de descarte de lodo excedente aeróbio, variando de contínuo na fase DC3 para somente no período noturno na fase DN, não interferiu nos parâmetros hidráulicos analisados;
- A pior condição hidráulica nos reatores UASB foi observada na fase DC1. Nesta fase, a vazão de esgoto bruto afluente foi mais elevada que nas demais, em função da maior incidência de chuvas na bacia de contribuição da estação e da provável ocorrência de contribuições indevidas de redes drenagem pluvial conectadas ao sistema de coleta de esgoto. Ressalta-se que nesta fase, conforme demonstrado na Tabela 4.2, o aporte de lodo de tanque séptico à ETE foi inferior ao observado nas demais fases;

- A sobrecarga hidráulica verificada nas fases DC1, DC3 e DN parece não ter interferido no regime de retenção do lodo anaeróbico existente nos reatores UASB, uma vez que as concentrações de SST no efluente do reator foi semelhante em todas as três fases (ver Figura 5.10). Todavia, é possível que a sobrecarga hidráulica tenha favorecido a expansão da manta de lodo no interior do compartimento de digestão, já que as velocidades ascensionais através do compartimento de digestão foram mais elevadas, mas o compartimento de decantação, mesmo estando sobrecarregado, pode ter sedimentado e atenuado a perda de sólidos com o efluente;
- O FBP e o DS operaram com valores médios de taxas hidráulicas de acordo com as faixas recomendadas na literatura técnica especializada (CHERNICHARO, 2007) e norma brasileira (NBR 12.209/2011).

5.2 Impacto do regime de alimentação e de envio de lodo secundário sobre o desempenho dos reatores UASB

5.2.1 Caracterização do esgoto bruto afluente aos reatores

A TAB. 5.5 a seguir apresenta a estatística descritiva das concentrações afluentes de DQO e SST afluente aos reatores UASB da ETE Mateus Leme. Ressalta-se que o esgoto afluente aos reatores é composto do esgoto bruto afluente à ETE, do lodo excedente aeróbico que é encaminhado dos decantadores secundários para a elevatória de esgoto bruto da estação e do lodo de tanque séptico que é despejado na elevatória de esgoto através de caminhões limpa-fossa.

A fim de avaliar a normalidade dos dados de concentrações afluentes foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk, ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$). Na TAB. 5.5 a seguir é possível verificar que somente os valores de SST na fase DN não podem ser classificados como tendo origem em uma amostra com distribuição normal ($p < 0,05$). Assim, para os valores de concentração de DQO foi aplicado o teste ANOVA fator único e em seguida o teste de comparações de Tukey, com nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$). Para a variável SST afluente foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas para identificar quais fases apresentaram concentrações diferentes significativamente entre si. Os resultados dos testes e de comparações múltiplas são apresentados na TAB. 5.6.

Tabela 5-5: Estatística descritiva referente às concentrações de DQO e SST afluentes aos reatores UASB da ETE Mateus Leme

Estatística	DQO (mg/L)				SST (mg/L)			
	DC1	DC2	DC3	DN	DC1	DC2	DC3	DN
Número de dados								
N	13	8	10	10	13	8	10	10
Média	466	534	714	615	280	239	333	296
Mediana	455	586	729	621	237	257	303	282
Mínimo	209	256	549	402	96	124	251	206
Máximo	729	711	858	774	505	344	480	503
Desvio padrão	163	61	106	115	134	88	73	84
1º Quartil	339	359	624	511	159	140	281	240
3º Quartil	625	671	814	717	406	313	401	328
Coef. variação	0,350	0,321	0,148	0,187	0,481	0,370	0,220	0,283
Teste S. Wilk (<i>p</i>)	0,879	0,210	0,688	0,814	0,350	0,190	0,212	0,032

DC1: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{lodo} = 1,5$ L/s – $TDH_{UASB} = 6,1$ h ; DC2: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{lodo} = 1,0$ L/s – $TDH_{UASB} = 12,7$ h; DC3: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{lodo} = 1,0$ L/s – $TDH_{UASB} = 7,8$ h; DN: Descarte Noturno de lodo – $Q_{lodo} = 6,6$ L/s – $TDH_{UASB} = 7,8$ h.

Tabela 5-6: Testes de comparações múltiplas dos valores de concentrações afluentes de DQO e SST aos reatores UASB

Parâmetros	Comparações entre as fases testadas					
	DC1 = DC2 (<i>p</i> = 1,00)	DC1 < DC3 (<i>p</i> = 0,003)	DC1 = DN (<i>p</i> = 0,323)	DC2 = DC3 (<i>p</i> = 0,165)	DC2 = DN (<i>p</i> = 1,00)	DC3 = DN (<i>p</i> = 0,872)
DQO Afluente						
SST Afluente						

Conforme pode ser observado na TAB.5.6, é possível verificar que houve diferença na concentração de DQO com nível de significância de 5% somente entre as fases DC1 e DC3. Com relação ao parâmetro SST afluente não foi identificada diferença com nível de significância de 5% entre as fases testadas. As concentrações mais elevadas de DQO na fase DC3 podem ser explicadas em parte pela maior quantidade de lodo de tanque séptico recebido na estação, conforme pode ser verificado na TAB. 4.2.

Na FIG. 5.7 são apresentados os gráficos *box-plots* das concentrações de DQO e SST afluentes aos reatores UASB. Pelo gráfico e pela TAB 5.5 é possível verificar que os valores de mediana para os dois parâmetros durante as fases de estudo estiveram dentro das faixas típicas de concentrações para esgoto sanitário bruto, segundo Von Sperling (2014): DQO 450 a 800 mg/L; SST 200 a 450 mg/L. Ressalta-se que a variação nas concentrações durante as fases avaliadas pode ter ocorrido em decorrência da variação da quantidade de descartes de lodo de tanque

séptico na ETE e ao fator de diluição ocasionado pela entrada indevida de água de chuva na rede de coleta e interceptação de esgoto.

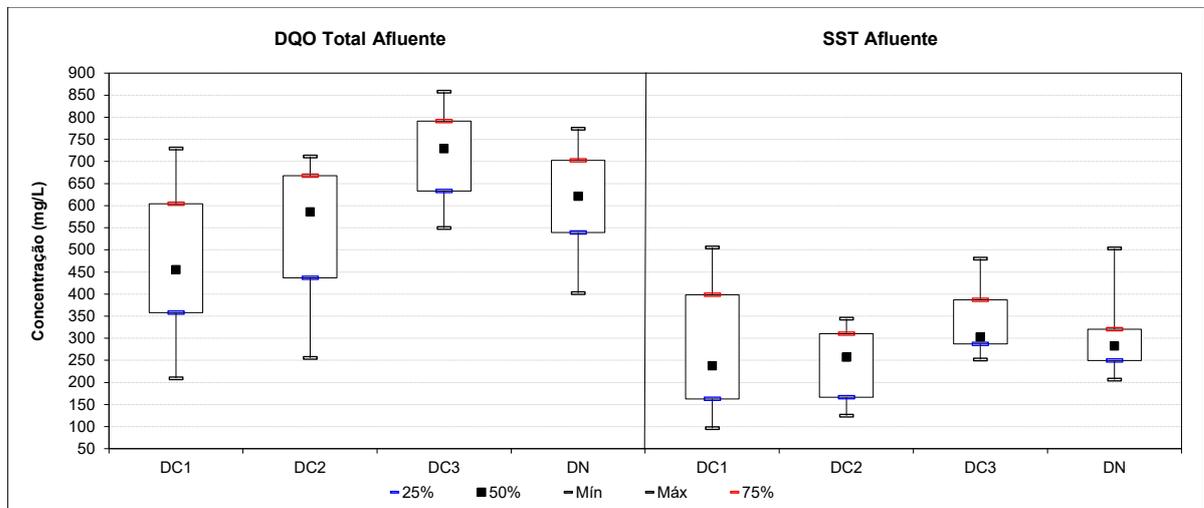


Figura 5.7: Box-plot das concentrações de DQO e SST afluentes aos reatores UASB durante as fases estudadas.

DC1: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$; DC2: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 12,7 \text{ h}$; DC3: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$; DN: Descarte Noturno de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$. Fonte: elaborado pelo autor (2020)

5.2.2 Verificação da qualidade do efluente dos reatores

Nas FIG. 5.8 e 5.9 são apresentados gráficos com as séries temporais das concentrações de DQO e SST (mg/L) afluente e efluente dos reatores UASB. Observa-se que houve variação nas concentrações de DQO e SST afluentes aos reatores e que na fase DC3 e DN houve o registro de maiores concentrações de DQO, possivelmente em decorrência da maior quantidade de lodo de tanque séptico descartado na elevatória final e também a provável redução de contribuição indevida de água de chuva na rede de coleta e interceptação.

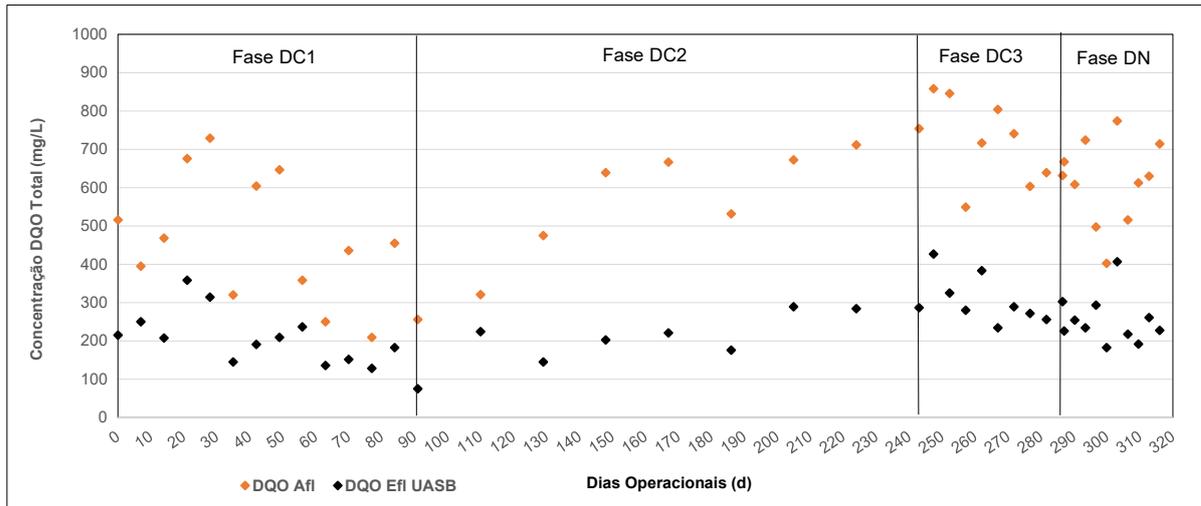


Figura 5.8: Série temporal das concentrações de DQO (mg/L) afluentes e efluentes dos reatores UASB da ETE Mateus Leme.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

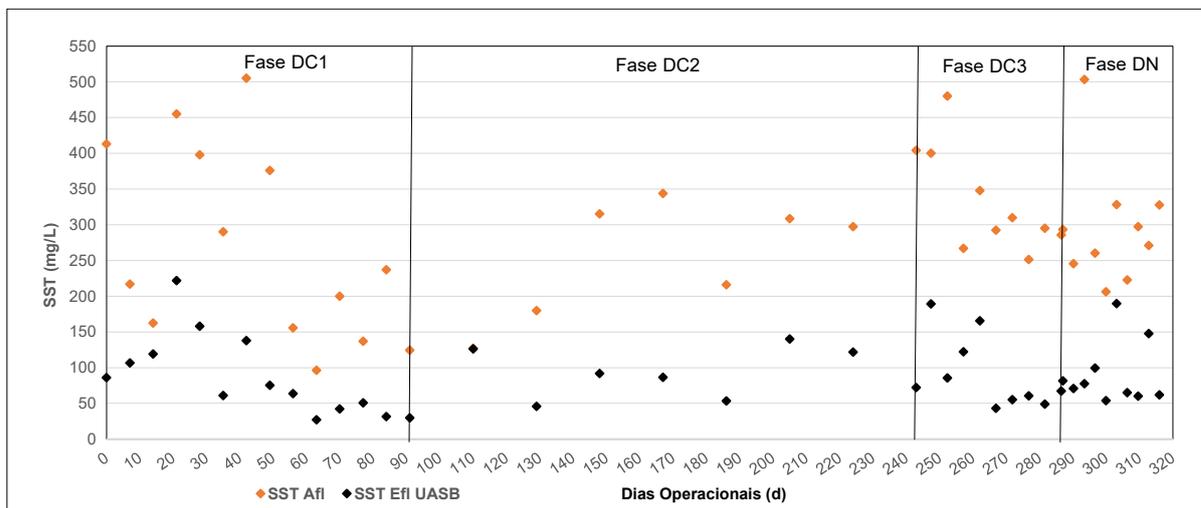


Figura 5.9: Série temporal das concentrações de SST (mg/L) afluentes e efluentes dos reatores UASB da ETE Mateus Leme

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

Na TAB 5.7 é apresentada a estatística descritiva, na FIG. 5.10 gráfico box-plot referente aos dados de concentrações de DQO e SST efluentes dos reatores UASB durante as fases de estudos realizadas e na TAB 5.8 os resultados dos testes de comparações múltiplas referente aos dados de concentrações dos parâmetros aqui avaliados.

Tabela 5-7: Estatística descritiva referente às concentrações de DQO e SST efluentes dos reatores UASB da ETE Mateus Leme

Estatística	DQO (mg/L)				SST (mg/L)			
	DC1	DC2	DC3	DN	DC1	DC2	DC3	DN
Número de dados								
N	13	8	10	10	13	8	10	10
Média	209,6	202,3	305,6	249,3	90,8	86,8	90,9	90,7
Mediana	207,6	212,0	288,0	230,6	75,0	89,0	69,5	74,1
Mínimo	128,2	75,5	234,4	182,2	27,0	29,6	43,2	189,3
Máximo	358,0	289,3	426,7	406,7	221,6	140,0	189,3	189,6
Desvio padrão	68,3	71,0	58,8	64,1	56,5	40,8	51,1	44,2
1º Quartil	151,7	160,4	271,9	217,4	50,7	49,6	55,0	61,7
3º Quartil	236,5	254,4	325,1	260,7	119,2	123,8	122,0	99,3
Coef. variação	32,6	35,1	19,2	25,7	62,2	47,0	56,2	48,8
Teste S. Wilk (<i>p</i>)	0,238	0,717	0,185	0,034	0,215	0,556	0,038	0,009

DC1: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$; DC2: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 12,7 \text{ h}$; DC3: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$; DN: Descarte Noturno de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$.

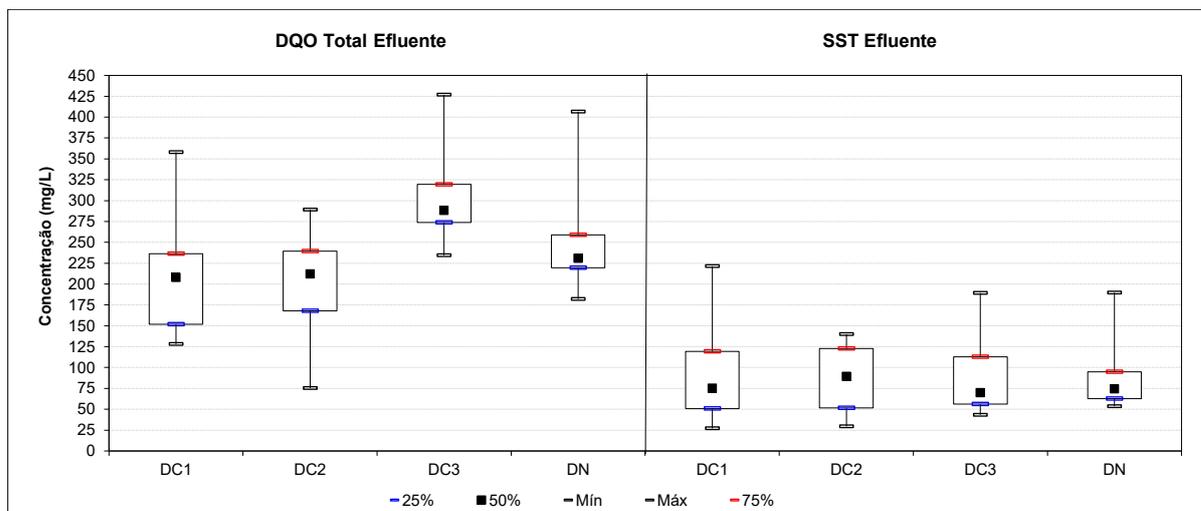


Figura 5.10: Box-plot das concentrações de DQO e SST efluentes dos reatores UASB durante as fases estudadas.

DC1: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$; DC2: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 12,7 \text{ h}$; DC3: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$; DN: Descarte Noturno de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

Tabela 5-8: Testes de comparações múltiplas dos valores de concentrações efluentes de DQO e SST dos reatores UASB

Parâmetros	Comparações entre as fases testadas					
	DC1 = DC2 (p =1,000)	DC1 < DC3 (p =0,0048)	DC1 = DN (p =1,000)	DC2 < DC3 (p =0,0175)	DC2 = DN (p =1,00)	DC3 = DN (p =0,3717)
DQO Efluente	DC1 = DC2 (p =1,000)	DC1 = DC3 (p =1,000)	DC1 = DN (p =1,000)	DC2 = DC3 (p =1,000)	DC2 = DN (p =1,000)	DC3 = DN (p =1,000)

A análise conjunta dos gráficos apresentados nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 e Tabelas 5.7 e 5.8 permite extrair os seguintes comentários principais:

- Nas fases operacionais DC1, DC2 e DC3, em que se praticou o descarte contínuo, com diferentes vazões de envio de lodo excedente aeróbio (1,0 e 1,5 L/s) e diferentes TDHs médios nos reatores UASB (6,1, 12,7 e 7,8h), foi observada a elevação das concentrações medianas de DQO efluentes, variando entre 208 e 231 mg/L, com as concentrações mais elevadas sendo observadas na Fase DC3 ($Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ e $TDH_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$), apesar de não apresentar diferença significativa ($\alpha = 0.05$) entre estas fases. Essa piora da qualidade do efluente anaeróbio não era esperada, uma vez que as condições operacionais foram, de certa forma, mais favoráveis que na Fase DC1 ($Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ e $TDH_{\text{UASB}} = 6.1 \text{ h}$). Todavia, há que se destacar que as concentrações afluentes de DQO foram bem mais elevadas durante a fase DC3 (mediana de 729 mg/L), em comparação com a fase DC1 (mediana de 455 mg/L). A elevação nas concentrações afluentes de DQO durante a fase DC3 pode ter ocorrido em decorrência do aumento do aporte de lodo de tanque séptico na ETE, conforme destacado anteriormente. Comparativamente, as médias diárias de lodo de tanque séptico recebido na ETE foram de 73 m³ na fase DC3 e de 12 m³ na fase DC1;
- Apesar do reator UASB ter operado em pior condição hidráulica na fase DC1, não foi identificada diferença significativa ($\alpha = 0.05$) entre as medianas de concentração efluente de DQO nas fases DC1, DC2 e DN;
- As concentrações medianas efluentes de DQO observadas nestas fases foram de 208, 212 e 231 mg/L, respectivamente. Além disso, estes valores estiveram dentro das faixas típicas de concentrações efluentes de DQO em reatores UASB (VON SPERLING, 2014): 180 a 270 mg/L;
- As concentrações medianas efluentes de DQO também não apresentaram diferença significativa ($\alpha = 0.05$) entre as fases DC3 e DN. Os valores medianos observados foram respectivamente 288 e 231 mg/L. Conforme destacado anteriormente, nestas fases o reator UASB operou em condições hidráulicas similares, em que os valores medianos dos

parâmetros hidráulicos não apresentaram diferença significativa ($\alpha = 0.05$). O valor mediano mais elevado de concentração de DQO Efluente na fase DC3 não era esperado, uma vez que as condições operacionais foram, de certa forma, similares (TDH UASB = 7,8 h). Todavia, há que se destacar que as concentrações afluentes de DQO foram mais elevadas durante a fase DC3 (da ordem de 714 mg/L), em comparação com a fase DN (da ordem de 615 mg/L), apesar de não apresentarem diferença significativa. A elevação nas concentrações afluentes nessa fase ocorreu principalmente em decorrência do aumento de descartes de lodo de tanque séptico na ETE em que a média diária foi 73 m³, enquanto que na fase DN a média diária de descartes foi de 56 m³;

- A fase DC3 apresentou o maior valor mediano de concentração de DQO efluente dos reatores, 288 mg/L, sendo que 50% dos dados apurados estiveram no intervalo de 271,9 a 325,1 mg/L (1º e 3º quartil). Estes dados são superiores aos valores das faixas típicas de concentrações efluentes de DQO em reatores UASB (VON SPERLING, 2014);
- As concentrações medianas efluentes de SST dos reatores não apresentaram diferença significativa ($\alpha = 0.05$) entre as quatro fases testadas, apesar das diferentes condições hidráulicas observadas nos reatores e aos diferentes regimes de envio do lodo excedente aeróbio. Nestas fases os valores medianos de concentração deste parâmetro foram respectivamente na ordem de 75, 89, 70 e 74 mg/L. Observa-se ainda que os valores medianos registrados nessas fases estiveram dentro das faixas típicas de concentrações efluentes de SST em reatores UASB (VON SPERLING, 2014): 60 a 100 mg/L;

5.2.3 Verificação das eficiências dos reatores UASB

Na FIG. 5.11 e TAB 5.9 são apresentados gráfico box-plot e estatística descritiva dos dados de eficiências de remoção dos parâmetros DQO e SST dos reatores UASB durante as fases propostas no estudo. Como não foi observada uma distribuição normal dos dados (p-valor <0.05), em toda a série de dados, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas para identificar quais fases apresentaram diferenças significativas entre as eficiências observadas. Os resultados são apresentados na TAB. 5.10.

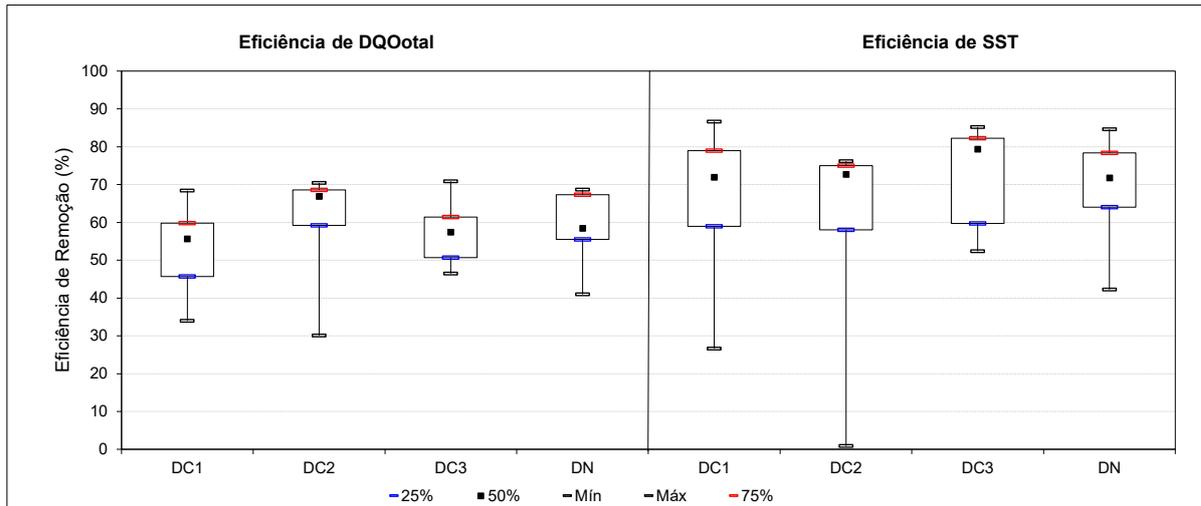


Figura 5.11: Box-plot das eficiências de remoção de DQO e SST dos reatores UASB durante as fases estudadas.

DC1: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$; DC2: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 12,7 \text{ h}$; DC3: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$; DN: Descarte Noturno de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

Tabela 5-9: Estatística descritiva referente à eficiência de remoção de DQO e SST dos reatores UASB da ETE Mateus Leme

Estatística	DQO (mg/L)				SST (mg/L)			
	DC1	DC2	DC3	DN	DC1	DC2	DC3	DN
Número de dados	13	8	10	10	13	8	10	10
N	13	8	10	10	13	8	10	10
Média	53,0	61,1	56,8	58,9	66,1	60,8	72,7	68,3
Mediana	55,6	66,9	57,5	58,4	71,9	72,7	79,3	71,7
Mínimo	34,0	30,1	46,5	41,0	26,6	0,90	52,4	42,2
Máximo	68,4	70,5	70,8	68,7	86,7	76,2	85,2	84,6
Desvio padrão	11,6	13,4	7,5	9,3	16,6	25,6	13,8	14,4
1º Quartil	45,7	58,5	50,3	54,7	59,0	56,9	54,3	61,8
3º Quartil	59,8	68,9	61,5	67,7	79,0	75,1	82,3	79,8
Coef. Variação	21,9	21,9	13,3	15,9	25,1	42,0	19,0	21,1
Teste S. Wilk (p)	0,378	0,003	0,616	0,210	0,149	0,000	0,004	0,102

Tabela 5-10: Testes de comparações múltiplas dos valores de eficiência de remoção de DQO e SST dos reatores UASB

Parâmetros	Comparações entre as fases testadas					
	DC1 = DC2 (p =0,213)	DC1 = DC3 (p =1,000)	DC1 = DN (p =1,000)	DC2 = DC3 (p =1,000)	DC2 = DN (p =1,000)	DC3 = DN (p =1,000)
DQO Efluente						
SST Efluente	DC1 = DC2 (p =1,000)	DC1 = DC3 (p =1,000)	DC1 = DN (p =1,000)	DC2 = DC3 (p =0,673)	DC2 = DN (p =1,000)	DC3 = DN (p =1,000)

A análise conjunta dos gráficos apresentados nas Figuras 5.11 e Tabelas 5.9 e 5.10 permite extrair os seguintes comentários principais:

- As eficiências medianas de remoção de DQO e SST dos reatores não apresentaram diferença significativa ($\alpha = 0.05$) entre as fases testadas. Os valores medianos de remoção de DQO variaram de 55,6% na fase DC1 a 66,9% na fase DC2. Em termos de SST a mediana variou de 71,7% na fase DN a 79,3% na fase DC3;
- Em valores absolutos de eficiências medianas de remoção de DQO, é possível observar que os reatores UASB apresentaram maior valor de eficiência na fase DC2 ($Q_{\text{lodo}} = 1,0$ L/s e $TDH_{\text{UASB}} = 12,7$ h), ~ 67%, o que era esperado considerando que a unidade de tratamento operou em condições hidráulicas mais favoráveis, com TDH maior que os valores mínimos recomendados em norma para vazão média de operação (NBR 12.209/2011 – 7 horas). Nesta fase os valores de eficiência tiveram variação de 30,1 a 70,5%, sendo que 50% dos dados apurados estiveram no intervalo de 58,5 a 68,9% (1° e 3° quartil);
- Observa-se que a variação nos protocolos de descarte de lodo excedente aeróbio e as diversas condições hidráulicas a que os reatores estiveram submetidos, durante as fases testadas, aparentemente não interferiram no desempenho mediano das unidades em termos de remoção de DQO e SST;
- Observa-se ainda que os valores medianos registrados de eficiência de remoção de DQO e SST, em todas as fases testadas, estiveram dentro das faixas típicas de eficiência de remoção destes parâmetros em reatores UASB (VON SPERLING, 2014): 55 a 70% - DQO Total; 65 a 80% - SST.

5.2.4 Verificação dos perfis de lodo dos reatores

Nesta seção são apresentados os perfis de lodo no compartimento de digestão dos reatores UASB durante as fases testadas. A FIG. 5.12 apresenta as concentrações médias de ST obtidas para as amostras tomadas em cada uma das quatro alturas de monitoramento existentes nas unidades de tratamento. Na FIG 5.13 pode-se verificar nos gráficos box-plot as variações observadas nas concentrações do teor de ST, considerando os pontos de monitoramento: 0,25, 0,75, 1,25 e 1,75 m. A TAB. 5.11 retrata os dados relacionados aos volumes de lodo excedente efetivamente descartado durante as fases estudadas, o volume médio diário descartado, o volume unitário de lodo e a massa unitária de ST descartada por quilograma de carga de DQO aplicada aos reatores UASB.

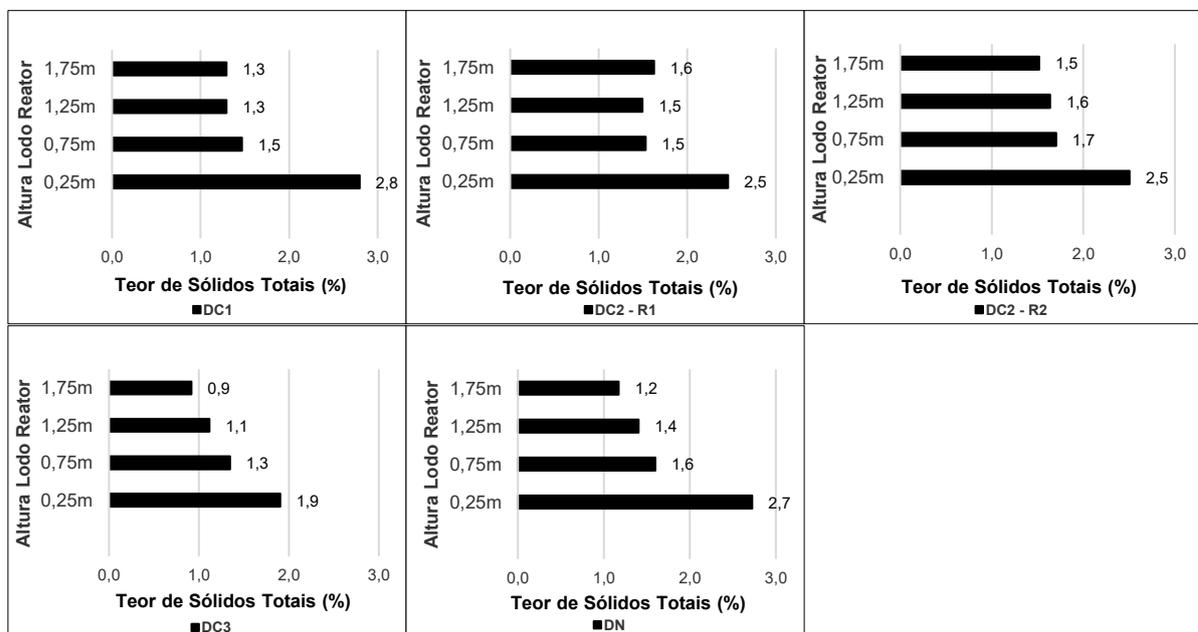


Figura 5.12: Concentração de Sólidos Totais ao longo da altura do compartimento de digestão dos reatores UASB durante as fases testadas.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

DC1: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$; DC2: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 12,7 \text{ h}$; DC3: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$; DN: Descarte Noturno de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$.

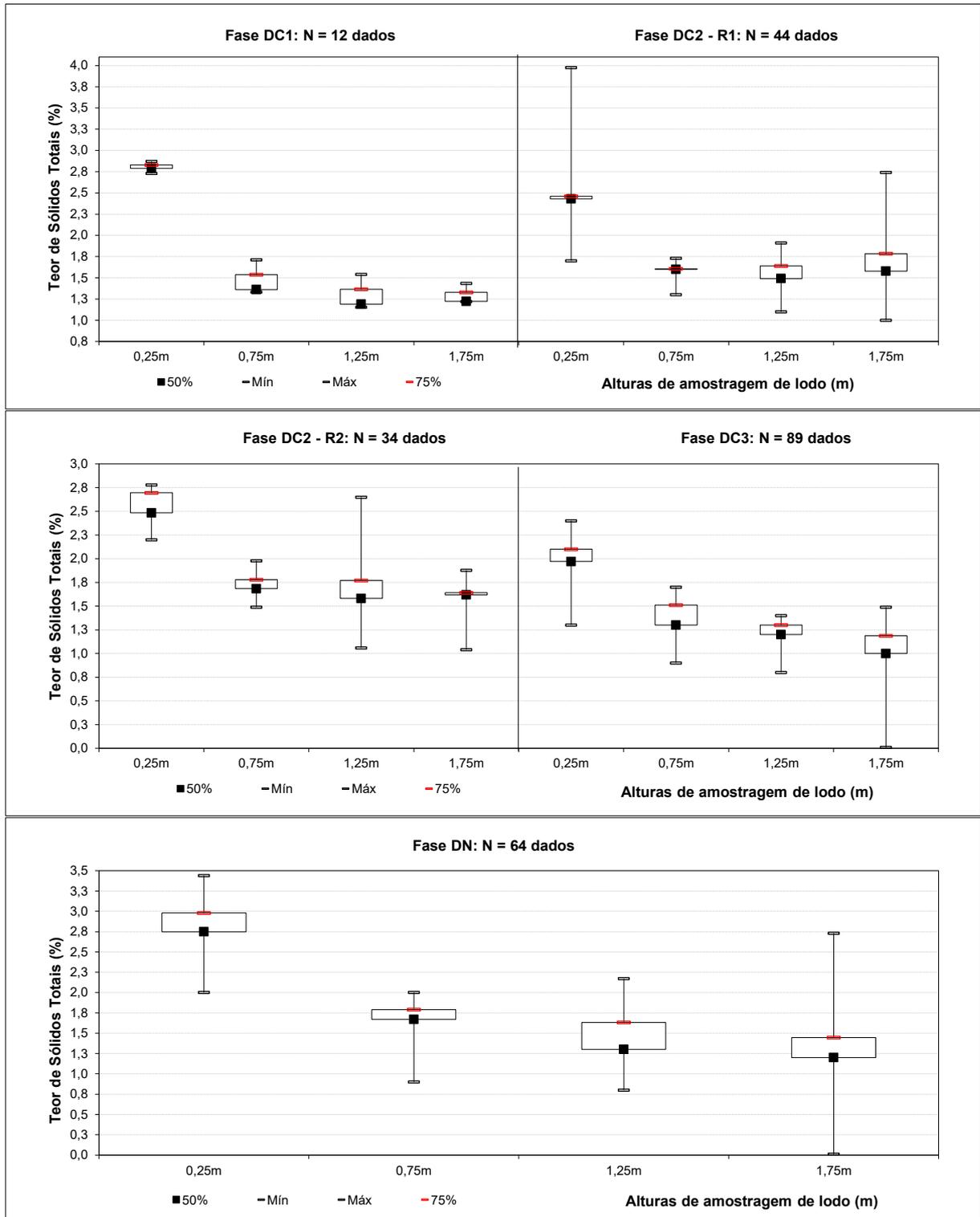


Figura 5.13: Box-plot do teor de ST nos quatro pontos de amostragem ao longo da altura dos reatores UASB e de acordo com cada fase realizada.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

Tabela 5-11: Volume de lodo excedente anaeróbio e massa de ST descartados durante as fases estudadas

Quantidade descartada	Fase			
	DC1	DC2	DC3	DN
Volume total (m ³)	814	1.260	870	480
Volume médio (m ³ /d)	8,9	8,3	19,8	16,6
Volume unitário (m ³ /kgDQO _{aplicada})	0,011	0,009	0,019	0,017
Massa de ST removida (kg ST/kgDQO _{aplicada})	0,15	0,15	0,20	0,19

A análise das FIG. 5.12 e 5.13, além da TAB. 5.11 **Tabela 5-11** permite realizar as seguintes considerações:

- As concentrações médias de sólidos totais no ponto de amostragem de 0,25m variaram durante as fases testadas no intervalo de 1,9 a 2,8%, sendo que a menor concentração foi observada na fase DC3. No ponto de amostragem de 1,75m, as concentrações variaram de 0,9 a 1,6% de teor de sólidos, com menor concentração também observada nesta fase;
- Nas fases DC3 e DN foi modificada a estratégia de descarte de lodo anaeróbio excedente para os leitos de secagem. A alteração teve o objetivo de reduzir as concentrações de lodo acima do ponto de 1,75m do compartimento de digestão e consistiu em realizar o descarte de lodo somente por um dos registros de descarte de lodo excedente, localizado na altura de 1,40m. Nas demais fases o descarte foi realizado pelos dois registros disponíveis, 0,20 e 1,40m. O objetivo foi alcançado, no entanto, as concentrações de lodo nos pontos mais baixos do reator ficaram com valores inferiores aos observados nas demais fases do estudo;
- Observa-se que as concentrações de ST no ponto mais elevado de amostragem (1,75 m) estiveram acima dos valores verificados e recomendados por Gonçalves (2015) e Lobato et al. (2018). Esses autores indicam que a concentração máxima limite de 0,5% de ST para o lodo localizado na parte mais elevada do compartimento de digestão visa minimizar a perda de sólidos para o compartimento de decantação e para o efluente do reator UASB;
- O volume médio diário de descartes de lodo excedente anaeróbio apresentado na Tabela 5.11 retrata a mudança de estratégia com relação ao aumento na quantidade de lodo descartado durante as fases DC3 e DN. Observa-se que as concentrações de ST no final do compartimento de digestão do reator foram inferiores ao verificado nas demais fases, notadamente na fase DC3;
- Durante as fases do estudo foi observada uma dificuldade em manter as concentrações de ST no ponto mais elevado dos reatores UASB com valores inferiores a 1%. Aparentemente

esta dificuldade está relacionada às elevadas taxas hidráulicas observadas durante as fases DC1, DC3 e DN e que possivelmente ocasionaram uma expansão da manta de lodo na parte interna do reator UASB. Nestas fases os TDHs medianos foram respectivamente 5,8, 6,7 e 6,7 horas, inferiores ao valor mínimo recomendado em norma (NBR 12.209/2011). Ademais, as velocidades ascensionais através das aberturas para o compartimento de decantação foram 2,7, 2,3 e 2,3 m/h;

- A maior concentração mediana de SST no efluente dos reatores UASB foi observada na fase em que o lodo apresentou maior concentração de ST no ponto mais elevado de amostragem, fase DC2;
- Durante a fase DC1 houve uma dificuldade muito grande para realizar o descarte de lodo excedente anaeróbio em decorrência da indisponibilidade de leitos de secagem, ocasionada pela ocorrência de chuvas frequente na região da ETE Mateus Leme. Os leitos de secagem existentes não são cobertos e a desidratação em períodos de chuva ocorreu de forma lenta, o que sobrecarregou os reatores UASB. Nesta fase a quantidade média de descarte de lodo anaeróbio excedente foi de 8,9 m³/d;

5.2.5 Síntese das verificações de desempenho dos reatores UASB

Com base nas informações discutidas nos itens 5.2.1 a 5.2.4 pode-se realizar os seguintes comentários principais:

- O menor valor absoluto da mediana da concentração de DQO efluente nos reatores UASB foi observada na fase DC1 (descarte contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$). No entanto, não foi identificada diferença significativa ($\alpha = 0.05$) entre as fases DC1, DC2 e DN;
- As concentrações medianas efluentes de DQO observadas em todas as fases estiveram dentro das faixas típicas de concentrações efluentes de DQO em reatores UASB (VON SPERLING, 2014): 180 a 270 mg/L;
- Nas fases DC3 (descarte contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$) e DN (descarte noturno de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$), em que as condições hidráulicas dos reatores foram similares, os valores medianos das concentrações de DQO no efluente do reator foram 288 e 231 mg/L, respectivamente. Esta diferença não era esperada, todavia, há que se destacar que as concentrações afluentes de DQO foram mais

elevadas durante a fase DC3 (da ordem de 714 mg/L), em comparação com a fase DN (da ordem de 615 mg/L), apesar de não apresentarem diferença significativa;

- Apesar das diferentes condições hidráulicas observadas nos reatores e aos diferentes regimes de envio do lodo excedente aeróbio, não foi identificada diferença significativa nas concentrações de SST efluentes dos reatores UASB. Além disso, os valores medianos observados estiveram dentro das faixas típicas de concentrações efluentes de SST em reatores UASB (VON SPERLING, 2014): 60 a 100 mg/L;
- Não foi identificada diferença significativa entre as eficiências medianas de remoção de DQO e SST em todas as fases testadas;
- Os valores medianos registrados de eficiência de remoção de DQO e SST, em todas as fases testadas, estiveram dentro das faixas típicas de eficiência de remoção destes parâmetros em reatores UASB (VON SPERLING, 2014): 55 a 70% - DQO Total; 65 a 80% - SST;

5.3 Impacto do regime de alimentação e do envio de lodo secundário sobre o desempenho da unidade de pós-tratamento (FBP+DS)

A TAB. 5.12 a seguir apresenta a estatística descritiva das concentrações efluentes de DQO e SST na saída do DS da estação. Os gráficos *box-plot* destas concentrações são apresentados na FIG. 5.14. Foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk, ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$), para verificar a normalidade dos dados no qual foi constatado que os valores de concentrações efluentes de SST no DS, em todas as fases estudadas, apresentaram distribuição normal. Assim, foi aplicado o teste ANOVA fator único e em seguida o teste de comparações de Tukey, com nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$).

Para a variável DQO efluente do DS foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas, quando identificada diferença significativa no teste não paramétrico, para identificar quais fases apresentaram concentrações diferentes significativamente entre si. Os resultados dos testes aplicados são apresentados na TAB. 5.13 a seguir.

Tabela 5-12: Estatística descritiva referente às concentrações de DQO e SST efluentes do Decantador Secundário da ETE Mateus Leme

Estatística	DQO (mg/L)				SST (mg/L)			
	DC1	DC2	DC3	DN	DC1	DC2	DC3	DN
Número de dados								
N	13	8	10	10	13	8	10	10
Média	76,2	63,2	87,9	80,9	23,1	20,1	28,5	23,0
Mediana	76,8	62,9	79,9	83,8	25,0	19,7	27,8	23,2
Mínimo	33,0	42,8	72,5	64,6	12,2	12,2	17,8	15,7
Máximo	144,0	86,8	137,2	89,4	36,9	29,4	37,9	29,6
Desvio padrão	31,0	14,9	20,5	8,30	7,3	6,5	6,2	4,3
1º Quartil	54,8	50,7	76,3	73,8	16,5	14,2	24,4	20,8
3º Quartil	86,6	74,2	91,0	86,8	27,7	26,0	32,3	26,0
Coef. variação	40,7	23,6	23,3	10,3	31,6	32,1	21,9	18,5
Teste S. Wilk (<i>p</i>)	0,728	0,900	0,003	0,087	0,440	0,450	0,931	0,902

DC1: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$; DC2: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 12,7 \text{ h}$; DC3: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$; DN: Descarte Noturno de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$

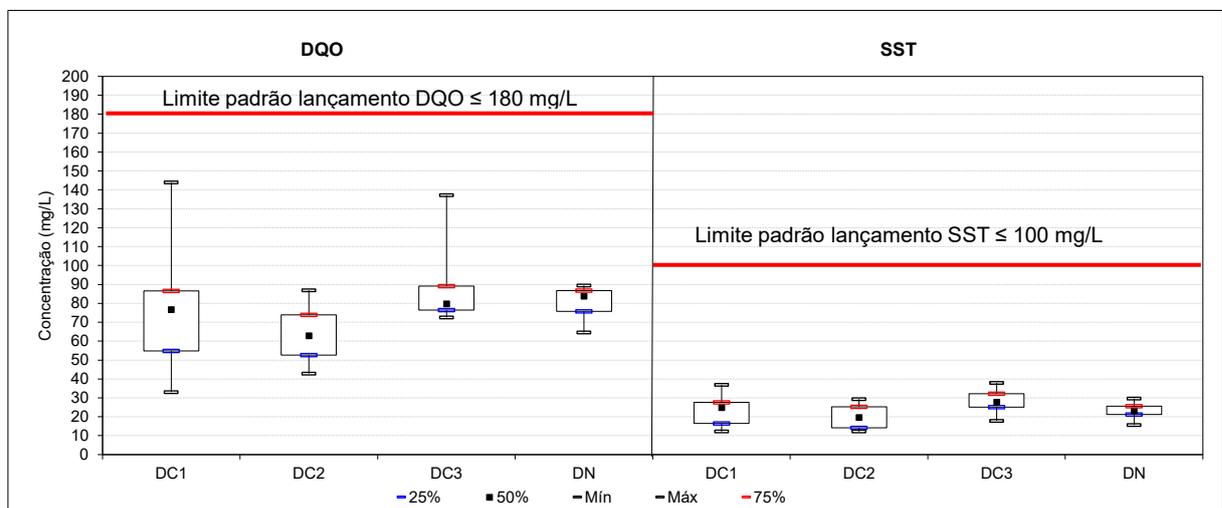


Figura 5.14: Box-plot das concentrações de DQO e SST efluentes do Decantador Secundário durante as fases estudadas.

DC1: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,5 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 6,1 \text{ h}$; DC2: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 12,7 \text{ h}$; DC3: Descarte Contínuo de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 1,0 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$; DN: Descarte Noturno de lodo – $Q_{\text{lodo}} = 6,6 \text{ L/s}$ – $\text{TDH}_{\text{UASB}} = 7,8 \text{ h}$.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

Tabela 5-13: Testes de comparações múltiplas dos valores de concentrações efluentes de DQO e SST nos Decantadores Secundários

Parâmetros	Comparações entre as fases testadas					
	DC1 = DC2	DC1 = DC3	DC1 = DN	DC2 = DC3	DC2 = DN	DC3 = DN
DQO Total	(p =0,959)	(p =1,000)	(p =1,000)	(p =0,111)	(p =0,122)	(p =1,000)
SST	(p =0,711)	(p =0,200)	(p =1,000)	DC2 < DC3 (p =0,039)	(p =0,774)	(p =0,223)

Os gráficos *box-plot* apresentados na FIG. 5.14 a seguir retratam os valores de teor de sólidos (TS) observados na linha de descarte de lodo excedente aeróbio durante as fases do estudo.

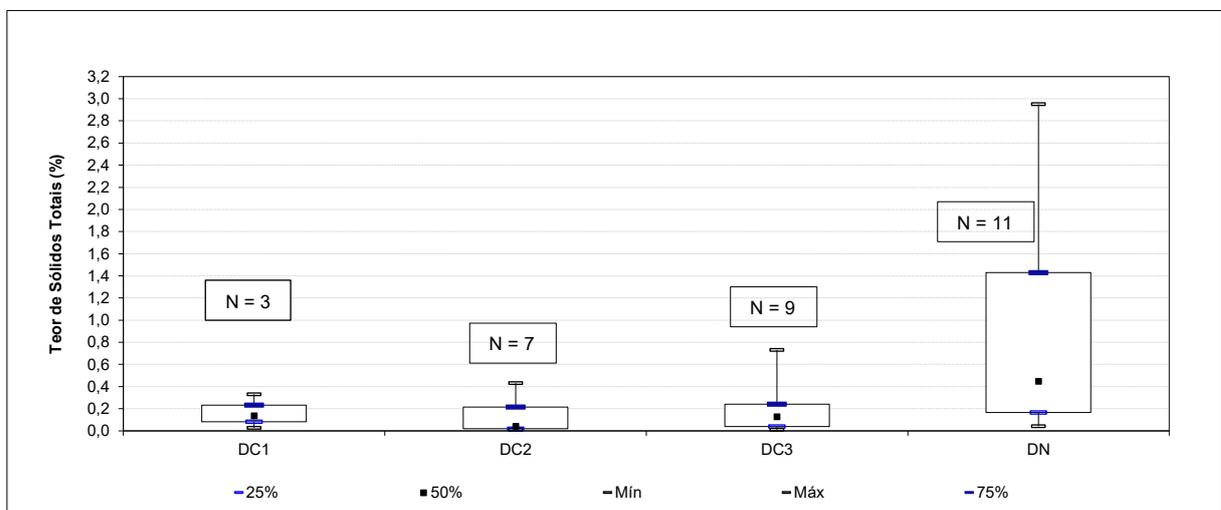


Figura 5.15: Box-plot do teor de ST na linha de descarte de lodo excedente aeróbio do DS.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

A análise conjunta das tabelas e gráficos apresentados nesta seção permite extrair os seguintes comentários principais:

- As concentrações de DQO não apresentaram diferença significativa ($\alpha = 0.05$) entre as fases testadas, apesar de a TES ter sido equivalente somente entre as fases DN e DC3. Os valores medianos deste parâmetro foram da ordem de 63 mg/L na fase DC2, 77 mg/L na fase DC1, 80 mg/L na fase DC3 e 84 mg/L na fase DN;
- Aparentemente os protocolos de descartes de lodo excedente testados, descarte contínuo e intermitente (noturno), não implicaram em concentrações diferentes significativamente ($\alpha = 0.05$) para o parâmetro DQO;
- Observa-se ainda que os valores medianos registrados nas fases DC1, DC3 e DN para o parâmetro DQO estiveram dentro das faixas típicas de concentrações efluentes em ETEs

cujos sistema de tratamento é composto pela tecnologia de Reatores UASB seguido de FBP e DS (VON SPERLING, 2014): 70 a 180 mg/L. Ressalta que, na fase DC2 o valor da mediana deste parâmetro foi inferior ao relatado na literatura especializada, 62,9 mg/L;

- O maior valor absoluto referente a mediana de DQO foi observado na fase DN, 83,8 mg/L. Tal fato pode estar relacionado ao protocolo de envio do lodo aeróbio proposto para esta fase. Neste período de testes o lodo foi retirado do DS somente no período noturno e o acúmulo de lodo durante o período em que o descarte não era realizado pode ter ocasionado o arraste de sólidos para o efluente final da ETE. Na FIG. 5.14 é possível observar que o valor da mediana de teor de ST no DS foi superior ao valor observado nas demais fases, além de ter apresentado valores bem superiores para o 3º quartil e máximo;
- As concentrações de SST no efluente do DS somente apresentaram diferença significativa ($\alpha = 0.05$) entre as fases DC2 e DC3 (ambas as fases com descarte contínuo e $Q_{\text{lodo}} = 1,0$ L/s), 19,7 e 27,8 mg/L respectivamente. Esta ocorrência pode estar relacionada a maior quantidade de lodo no DS, o que pode ser observado na FIG. 5.14. Na fase DC2 a mediana registrada foi de 0,04 % de TS e valor máximo de 0,43 % de TS, enquanto que na fase DC3 a mediana observada foi de 0,13 % e o valor máximo foi de 0,73% de TS;
- Os valores medianos registrados em todas as fases para o parâmetro SST estiveram dentro das faixas típicas de concentrações efluentes em ETEs cujo sistema de tratamento é composto pela tecnologia de Reatores UASB seguido de FBP e DS (VON SPERLING, 2014): 20 a 40 mg/L;
- Observa-se ainda que 100 % dos valores registrados referentes às concentrações de DQO e SST no efluente final da ETE atenderam ao padrão de lançamento previsto na legislação ambiental (MINAS GERAIS, 2008), 180 e 100 mg/L respectivamente.

5.4 Impacto do regime de alimentação e de envio de lodo secundário sobre o desempenho global da ETE

5.4.1 Verificação da eficiência global da ETE

A TAB. 5.14 a seguir apresenta a estatística descritiva das eficiências de remoção de DQO e SST considerando a estação de tratamento operando com todas as unidades de tratamento. Os

gráficos *box-plot* com a representação das eficiências destes parâmetros são apresentados na FIG. 5.16.

Tabela 5-14: Estatística descritiva referente às eficiências de remoção de DQO e SST considerando todas as unidades de tratamento da ETE Mateus Leme

Estatística	Eficiência de DQO (%)				Eficiência de SST (%)			
	DC1	DC2	DC3	DN	DC1	DC2	DC3	DN
Número de dados	13	8	10	10	13	8	10	10
Média	82,5	87,6	87,5	86,5	90,1	90,9	91,4	91,9
Mediana	82,6	88,3	88,0	86,9	91,7	91,6	91,3	91,4
Mínimo	67,7	83,2	82,8	82,4	77,3	84,4	89,0	89,9
Máximo	92,4	90,4	91,6	89,0	95,6	94,4	94,0	95,1
Desvio padrão	7,1	2,3	3,0	2,1	5,2	3,3	1,5	1,8
1º Quartil	78,1	86,6	84,9	85,7	88,3	89,4	90,7	90,7
3º Quartil	88,0	88,8	89,8	88,4	93,9	93,3	92,1	92,3
Coef. Variação	8,6	2,6	3,4	2,5	5,8	3,6	1,6	1,9
Teste S. Wilk (<i>p</i>)	0,780	0,197	0,518	0,429	0,440	0,450	0,931	0,902

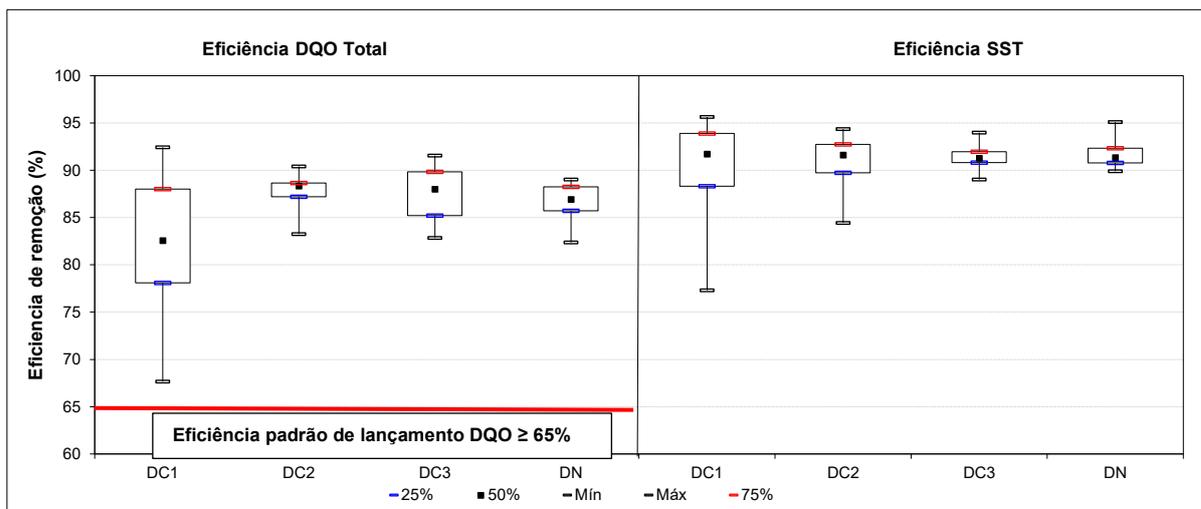


Figura 5.16: Box-plot das eficiências de remoção de DQO e SST da ETE Mateus, considerando todas as unidades de tratamento disponíveis

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

A fim de verificar a normalidade dos dados de eficiência de remoção de DQO e SST foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk, ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$). Foi constatado que os valores observados em todas as fases apresentaram distribuição normal. Assim, foi aplicado o teste ANOVA fator único e em seguida o teste de comparações de Tukey, com nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$). Na TAB. 5.15 são apresentados os resultados.

Tabela 5-15: Testes de comparações múltiplas dos valores de eficiência de remoção de DQO e SST considerando todas as unidades da ETE Mateus Leme em funcionamento

Parâmetros	Comparações entre as fases testadas					
DQO Total	DC1 = DC2 (p =0,959)	DC1 = DC3 (p =1,000)	DC1 = DN (p =1,000)	DC2 = DC3 (p =0,111)	DC2 = DN (p =0,122)	DC3 = DN (p =1,000)
SST	DC1 = DC2 (p =1,000)	DC1 = DC3 (p =1,000)	DC1 = DN (p =1,000)	DC2 = DC3 (p =1,000)	DC2 = DN (p =1,000)	DC3 = DN (p =1,000)

A análise conjunta dos gráficos e tabelas apresentados permite extrair os seguintes comentários principais:

- As eficiências medianas de remoção dos parâmetros DQO e SST da ETE Mateus Leme não apresentaram diferença significativa ($\alpha = 0.05$) entre as fases testadas. Os valores medianos de remoção de DQO variaram de cerca de 83% na fase DC1, a aproximadamente 88% nas fases DC2 e DC3, e 87% na fase DN. Em termos de remoção de SST, as eficiências medianas praticamente não variaram, ficando em torno de 91% em todas as fases;
- Observa-se que a variação nas concentrações afluentes dos parâmetros DQO e SST aos reatores UASB, nos protocolos de descarte de lodo excedente aeróbio e as diversas condições hidráulicas a que os reatores e as unidades de pós-tratamento estiveram submetidos, durante as fases testadas, aparentemente não interferiram no desempenho da ETE em termos de remoção de DQO e SST;
- Observa-se ainda que os valores medianos registrados de eficiência de remoção de DQO e SST, em todas as fases testadas, estiveram dentro das faixas típicas de eficiência de remoção destes parâmetros em ETEs cujo sistema de tratamento é composto por reatores UASB seguido de FBP e DS (VON SPERLING, 2014): 73 a 88% - DQO; 87 a 93% - SST. Com destaque o desempenho observado na fase DC2 em termos de DQO em que a mediana da eficiência de remoção foi de 88,3%;
- Com relação ao desempenho da ETE é possível observar que 100 % dos valores registrados referentes à eficiência de remoção de DQO atenderam ao padrão de lançamento previsto na legislação ambiental (MINAS GERAIS, 2008).

5.5 Impacto do regime de alimentação e de envio de lodo secundário sobre o desempenho dos leitos de secagem da ETE

A TAB. 5.16 a seguir apresenta os dados referentes ao gerenciamento do lodo excedente anaeróbico produzido nos reatores da ETE Mateus durante as fases do estudo. São apresentados os quantitativos de lodo excedente anaeróbico descartados e encaminhados para os leitos de secagem, a concentração média do teor de sólidos do lodo encaminhado para os leitos de secagem, a massa de lodo anaeróbico removida nos reatores por descarte de lodo excedente, as taxas de aplicação de sólidos observadas nos leitos de secagem, a lâmina de lodo observada nos leitos após a realização dos descartes, a massa total de lodo removida em cada fase testada, a carga de DQO afluente em cada fase do estudo e o coeficiente Y referente à quantidade de sólidos removida em cada fase pela quantidade de DQO aplicada.

Tabela 5-16: Dados de gerenciamento do lodo excedente anaeróbico e taxas observadas nos leitos de secagem

Fase	Volume lodo descartado (m ³)		Concentração lodo (%ST)		Massa lodo removida por descarte (kg ST)		Taxa de aplicação de sólidos (kg ST/m ²)	Lâmina por descarte (m)	Massa de Lodo total removida (kg ST)	Carga DQO Afluente (kg)	Y removido (kg ST/ kg DQO _{apl.})
	R1	R2	R1	R2	R1	R2					
DC1	120	-	1,8	-	2.203	-	11	0,60	11.703	75.712	0,15
	120	-	1,6	-	1.958	-	10	0,60			
	100	-	1,1	-	1.122	-	6	0,50			
	100	-	1,1	-	1.122	-	6	0,50			
	134	-	1,1	-	1.503	-	4	0,34			
	120	-	1,7	-	2.081	-	10	0,60			
	120	-	1,4	-	1.714	-	9	0,60			
DC2	60	60	1,8	1,8	1.102	1.102	11	0,60	20.074	134.520	0,15
	60	60	1,2	1,2	734	734	7	0,60			
	120	120	1,5	1,5	1.836	1.836	9	0,60			
	60	60	2,7	2,5	1.652	1.530	16	0,60			
	60	60	1,4	1,6	857	979	9	0,60			
	60	60	1,6	1,5	979	918	9	0,60			
	60	60	1,6	1,3	979	796	9	0,60			
	60	120	1,2	1,4	734	1.714	6	0,45			
DC3	120	-	1,2	-	1.469	-	7	0,60	9.404	46.508	0,20
	90	-	0,6	-	551	-	3	0,45			
	120	-	0,8	-	979	-	5	0,60			
	120	-	1,1	-	1.346	-	7	0,60			
	120	-	0,9	-	1.102	-	6	0,60			
	80	-	1,3	-	1.061	-	5	0,40			
	100	-	1,4	-	1.428	-	7	0,50			
	120	-	1,2	-	1.469	-	7	0,60			
DN	120	-	1,0	-	1.224	-	6	0,60	5.386	28.159	0,19
	120	-	1,0	-	1.224	-	6	0,60			
	120	-	1,3	-	1.591	-	8	0,60			
	120	-	1,1	-	1.346	-	7	0,60			

A análise da Tabela 5.16 permite extrair os seguintes comentários principais:

- Chamam a atenção as baixas concentrações de ST do lodo excedente descartado nos leitos de secagem, notadamente nas fases DC1 e DC2 nas quais o lodo foi removido dos reatores pelos pontos inferiores (0,20 m) e superiores (1,40 m) de descarte. Nestas duas fases, as concentrações medianas de ST foram iguais a 1,4 % na fase DC1 e 1,5 % na fase DC2. Em apenas dois descartes a concentração de lodo foi superior a 2,0%, tendo sido medidos valores de 2,7 e 2,5% durante a fase DC2, para os reatores R1 e R2, respectivamente. Tal fato pode estar relacionado à expansão da manta de lodo no compartimento de digestão em decorrência das condições hidráulicas discutidas anteriormente, fases DC1, DC3 e DN;
- Em decorrência das baixas concentrações de ST do lodo descartado dos reatores UASB, não houve sobrecarga de sólidos nos leitos de secagem existentes na ETE, pois a taxa de aplicação de sólidos recomendada em norma (NBR 12.209/2011 – 15 kg ST/m²) foi excedida em apenas um ciclo de deságue de lodo, coincidente com a concentração mais elevada do lodo reportada no comentário anterior;
- A lâmina de lodo sobre o meio drenante do leito de secagem excedeu o valor recomendado em norma (NBR 12.209/2011 – 0,35 m) na maioria dos descartes. Somente em um descarte a lâmina de lodo foi inferior ao valor limite recomendado. Tal fato indica que os leitos operaram com sobrecarga de lâmina de lodo sobre o meio drenante e que seria necessária uma quantidade maior de leitos para atender a demanda da estação, apesar das unidades de desidratação instaladas serem compatíveis com a capacidade atual de tratamento da estação, 22 L/s;
- A quantidade de massa de lodo excedente removida em todo o período do estudo variou de 0,15 kg ST / kg de DQO aplicada nas fases DC1 e DC2, a 0,19 na fase DN e 0,20 kg ST / kg de DQO aplicada na fase DC3;

6 CONCLUSÕES

6.1 Impacto das estratégias operacionais de envio de lodo sobre os parâmetros hidráulicos dos reatores UASB e da unidade de pós tratamento da ETE

- O regime de recebimento de lodo de tanque séptico, somado às vazões afluentes de esgoto bruto e de lodo excedente aeróbio, implicaram em uma aparente sobrecarga hidráulica nos reatores UASB durante as fases DC1, DC3 e DN, nas quais apenas um reator UASB estava em operação (TDH_{UASB} entre 6,1, 7,8 e 7,8 h). As verificações realizadas mostraram que nestas três fases os parâmetros hidráulicos TDH, Vasc e TDHcd estiveram com valores medianos acima ou abaixo dos limites recomendados em norma (NBR 12.209/2011), principalmente no período entre as 11h e 23h;
- A alteração no regime de descarte de lodo excedente aeróbio, variando de contínuo na fase DC3 para somente no período noturno na fase DN, aparentemente não implicou em regimes hidráulicos diferentes nestas duas fases;
- A maior vazão afluente na fase DC1, ocasionada principalmente em decorrência da entrada indevida de água de chuva na rede coletora de esgoto, imprimiu ao reator UASB a pior condição hidráulica durante as fases avaliadas.
- As diferentes estratégias de descarte de lodo excedente aeróbio não impactaram os parâmetros hidráulicos do FBP e do DS. As verificações efetuadas mostraram que estas unidades operaram com valores médios de taxas hidráulicas de acordo com as faixas recomendadas na literatura técnica especializada (CHERNICHARO, 2007; NBR 12.209/2011);

6.2 Impacto das estratégias operacionais de envio de lodo sobre o desempenho dos reatores UASB

- Aparentemente a variação nos protocolos de descarte de lodo aeróbio não implicou em desempenhos distintos dos reatores, durante as fases testadas, se analisada a eficiência de remoção de DQO e SST, pois não foi identificada diferença significativa entre as eficiências medianas destes parâmetros;
- Verificou-se que não foi identificada diferença significativa nas concentrações de DQO no efluente tratado dos reatores durante as fases DC1, DC2 e DN. Aparentemente, as variações

nos protocolos de descarte de lodo aeróbio excedente e as diversas condições hidráulicas a que os reatores foram submetidos nestas etapas não interferiu no desempenho das unidades com relação à qualidade do efluente tratado;

- Observou-se que os reatores UASB operaram em condições hidráulicas similares nas fases DC3 e DN e que o efluente dos reatores apresentou valores medianos de concentração de DQO de 288 e 231 mg/L, respectivamente. Apesar de não ter sido identificada diferença significativa entre as medianas, esta diferença não era esperada. Aparentemente a diferença observada entre os valores absolutos listados pode estar relacionada as maiores concentrações afluentes de DQO durante a fase DC3 (da ordem de 714 mg/L), em comparação com a fase DN (da ordem de 615 mg/L);
- Verificou-se ainda que, durante as fases testadas, não foi identificada diferença significativa entre os valores de concentração mediana de SST no efluente tratado dos reatores, apesar das diferentes condições hidráulicas observadas nos reatores e aos diferentes regimes de envio do lodo excedente aeróbio.

6.3 Impacto das estratégias operacionais de envio de lodo sobre o desempenho da unidade de pós tratamento (FBP+DS)

- Aparentemente os protocolos de descartes de lodo excedente testados, descarte contínuo e intermitente, não implicaram em concentrações diferentes significativamente ($\alpha = 0.05$) para o parâmetro DQO no efluente do DS;
- De maneira geral os protocolos de descarte de lodo excedente aeróbio e as diversas condições hidráulicas a que a ETE esteve submetida não interferiram no atendimento à legislação vigente no que se refere ao padrão de lançamento de efluente tratado, parâmetros DQO e SST. Os valores medianos de DQO no efluente do DS variaram de 63 mg/L, na fase 2 (em que o TDH médio nos reatores UASB foi igual a 12,7 h), a 88 mg/L, na fase DC3. Já os valores medianos de SST no efluente final da ETE variaram de 20 a 29 mg/L;

6.4 Impacto das estratégias operacionais de envio de lodo sobre o desempenho global da ETE Mateus Leme

- A variação nas concentrações afluentes dos parâmetros DQO e SST aos reatores UASB, os protocolos de descarte de lodo excedente aeróbio e as diversas condições hidráulicas a que os reatores e as unidades de pós-tratamento estiveram submetidos, durante as fases testadas,

aparentemente não interferiram no desempenho da ETE em termos de remoção de DQO e SST. Em 100% dos resultados a ETE atendeu ao padrão de lançamento previsto para as concentrações de DQO e SST. Ademais, não foram observadas diferenças significativas ($\alpha = 0.05$) nas eficiências medianas de remoção dos parâmetros DQO e SST na ETE, sendo que 100 % dos valores registrados de eficiência de remoção de DQO foram superiores ao limite mínimo previsto na legislação ambiental (MINAS GERAIS, 2008).

6.5 Impacto das estratégias operacionais de envio de lodo sobre o desempenho dos leitos de secagem da ETE Mateus Leme

- Verificou-se que a rotina de envio do lodo excedente aeróbio, a vazão afluyente de esgoto bruto, o recebimento de lodo de tanque séptico, as condições hidráulicas adversas a que os reatores estiveram submetidos e os protocolos de descarte de lodo excedente anaeróbio realizados, durante as fases testadas, implicou no descarte de lodo excedente anaeróbio em concentrações de ST que variaram de 1,0 a 1,5 %. Tal fato, imprimiu uma sobrecarga de lâmina de lodo descartado sobre o meio drenante dos leitos e indicou que o sistema de desidratação implantado na estação não foi suficiente para atender de forma adequada a demanda de geração de lodo excedente anaeróbio;
- Observou-se que no geral não foi identificada sobrecarga nas taxas de aplicação de ST nos leitos, no qual somente em 01 ciclo o valor aplicado foi superior ao recomendado na literatura especializada e em norma (ABNT, 2011);

7 RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados experimentais, dos protocolos de descarte de lodo excedente anaeróbio e aeróbio testados, das discussões realizadas ao longo desta dissertação e em virtude de algumas dificuldades operacionais, são recomendados a seguir itens para a continuidade e refinamento da pesquisa em escala plena e possíveis aprimoramentos na gestão operacional e em novos projetos de ETEs cujo fluxograma de tratamento prevê a implantação de reatores UASB seguidos de FBP:

- Aprimorar e/ou reavaliar os coeficientes previstos nos projetos de implantação de redes coletoras relacionados à previsão de infiltração nos diversos dispositivos das redes coletoras de esgoto: redes, poços de visita, ligações prediais. Durante a pesquisa foi observado um aumento significativo na vazão afluente à ETE logo após eventos de chuva na bacia de contribuição da estação;
- Aprimoramentos e pesquisas de métodos executivos de implantação de redes coletoras de esgoto que permitam a redução das contribuições indevidas nas redes coletoras;
- Projetar e implantar leitos de secagem com sistema de cobertura que permita uma maior flexibilidade e disponibilidade de leitos durante períodos com registro de chuva prolongada;
- Pesquisar o impacto do envio do lodo excedente aeróbio no desempenho de reatores UASB considerando o protocolo de descarte com abertura da válvula de descarga do DS em horários programados e acionamento intermitente. Para tal é necessário prever nos projetos a implantação de sistema de automação para acionamento das válvulas de descarte de lodo excedente na saída dos DS;
- Prever unidade de adensamento de lodo anaeróbio de forma que o sistema de desidratação da estação possa operar com concentrações de ST mais elevadas;
- Elaborar manual de operação da estação com o detalhamento das rotinas de descarte de lodo excedente anaeróbio e aeróbio, considerando uma linguagem mais acessível para a equipe de operadores e que retrate vários cenários ou situações em que a ETE estará funcionando;
- Prever no dimensionamento dos leitos de secagem da ETE a implantação de unidade exclusiva para o recebimento de espuma removida nos reatores UASB e sistema preliminar com remoção de óleos e graxas.

8 REFERÊNCIAS

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. 57 p.

ALEM SOBRINHO, P.; JORDÃO, E. P. *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios – uma análise crítica*. In: CHERNICHARO, C. A. L. (coord.). Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. Rio de Janeiro. FINEP/PROSAB, 2001. 16p.

ALMEIDA, P. G. S. *Efeito de diferentes tipos de meio suporte no desempenho de Filtros Biológicos Percoladores aplicados ao pós-tratamento de efluentes de Reatores UASB, com ênfase na Nitrificação*. 2007. 116 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

ALMEIDA, P. G. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUZA, C. L. Development of compact UASB/trickling filter systems for treating domestic wastewater in small communities in Brazil. *Water Science and Technology* 59, p. 1431-1439, 2009.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Atlas Brasil de Despoluição de Bacias Hidrográficas: Tratamento de Esgotos Urbanos. 2016

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas Residuárias, v.5), Belo Horizonte, 2016.

CHERNICHARO, C. A. L.; HAANDEL, A. C. V.; FORESTI, E.; CYBIS, L. F. CAPÍTULO 1. In.: *Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios*. Rio de Janeiro: ABES, p. 1-12. Projeto PROSAB, 2001.

CHERNICHARO, C. A. L.; LOBATO, L. C. S.; PAIVA JÚNIO, C. A.; BARBOSA, C. A.; ALMEIDA, P. G.S.; GONÇALVES, T. C. F.; VAZ, E.; SOUZA, J.R; SILVA, L. R.; JUDICE, M. A. M.; MORAES, O. J. Secondary sludge return for thickening and digestion in UASB reactors: case study of Onça STP - Brazil. In: SIMPOSIO LATINO AMERICANO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA XI.. 2014, LA HABANA, CUBA., 2014.

CHERNICHARO, C.A.L., RIBEIRO, T.B., GARCIA, G.B., LERMONTOV, A., PEREIRA, C.B., PLATZER, C.J., POSSETTI, G.R.C., LEITES, M.A.L., ROSSETO, R. Panorama do

tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. *Revista DAE*, v. 66, n. 213, p. 5-19, 2018

CHERNICHARO, C.A.L.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; PEGORINI, E. S.; POSSETTI, G. R. C.; MIKI, M. K.; SOUZA, S. N.;. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 1: Tópicos de Interesse. *Revista DAE – edição especial*, v. 66, n. 214, p. 05-16, 2018

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução n. 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. *Diário Oficial da União*, Brasília, 16 mai. 2011.

FILHO, J. A.; VAN HAANDEL, A. C.. Estabilização de Lodo de Pós-Tratamento Aeróbio na Unidade de Pré-tratamento Anaeróbio. *DAE*, n. 194, p. 86 – 102, 2014.

GONÇALVES, T. C. F. *Avaliação da prática de retorno de lodo secundário sobre o desempenho de reatores UASB em escala plena: estudo de caso da ETE Laboreaux – Itabira/MG*. 2015. 70 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GONÇALVES, R. F.; CHERNICHARO, C.A.L.; NETO, C.O.A., SOBRINHO, P.A.; KATO, M.T.; COSTA, R.H. R.; AISSE, M. M.; ZAIAT, M. *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por reatores com biofilme*. In: CHERNICHARO.C.A.L. (coordenador). *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios*. PROSAB/FINEP, 1ª ed. Rio de Janeiro: Segrac, 2001. 544 p.

HELSEL, D.R., HIRSCH, R.M. *Statistical methods in water resources*. Techniques of Water Resources Investigations Series, Book 4, chapter A3, US Geological Survey, 1992, 509 p.

KATO, M. T.; NETO, C.O.A.; CHERNICHARO, C.A.L.; FORESTI, E.; CYBIS, L.F. CAPÍTULO 3. In.: *Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo: Configurações de Reatores Anaeróbios*. Rio de Janeiro: ABES, 1999, p. 53-97. Projeto PROSAB.

LOBATO, L. C. S. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico*. 2011. 173 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUZA, C. L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. *Water Science and Technology* 66, p. 2745-2753, 2012.

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 – Parte 3: Tópicos de Interesse. *Revista DAE – edição especial*, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018

MAGALHÃES, K. M. *Avaliação do retorno do lodo aeróbio sobre a eficiência dos reatores UASB da estação de tratamento de esgoto de Itabira*. 2012. 49 f. Monografia (Especialização em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

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

MINAS GERAIS. Sistema Integrado de Informação Ambiental. Conselho Estadual de Política Ambiental. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 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. Diário do Executivo, Minas Gerais, 13 mai. 2008. Disponível em: < <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151> >. Acesso em: 20 de maio de 2018.

MONTGOMERY, D., RUNGER, G. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2a ed., 2003, 467 p.

OLIVEIRA, SILVIA MARIA ALVES CORRÊA. *Análise de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de esgotos*. 2006. 231 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

ROSA, A. P. *Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto*. 2013. 152 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SHAPIRO, S.S., WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, v. 52, p. 591-611, 1965.

SILVA, B. S.; *Desempenho de Reator UASB em Escala Plena no Tratamento de Esgoto Sanitário e Adensamento Simultâneo de Lodo Ativado em Excesso do Pós-Tratamento*. 2018. 134 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

SNEDECOR, G.W., COCHRAN, W.G. *Statistical Methods*. Ames: Iowa State University Press, 8th. ed., 1989. 503p.

VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. *Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para países de clima quente*. Campina Grande: EPGRAF, 1994.

VON SPERLING, M. *Princípios básicos do tratamento de esgoto*. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 211 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.2).

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4a edição ed. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. 472p.

VON SPERLING, M. *Lodos Ativados*. 4a edição rev. e ampl. ed. Universidade Federal, de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. 461p.