

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

**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**

Túlio Cesar Floripes Gonçalves

Belo Horizonte

2015

**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**

TÚLIO CESAR FLORIPES GONÇALVES

TÚLIO CESAR FLORIPES GONÇALVES

**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**

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: Prof. Dr. César Rossas Mota Filho

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015

G635a	<p>Gonçalves, Túlio César Floripes. Avaliação da prática de retorno de lodo secundário sobre o desempenho de Reatores UASB em escala plena [manuscrito]: estudo de caso da ETE Laboreaux – Itabira/MG / Túlio César Floripes Gonçalves . - 2015. 73 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: César Rossas Mota Filho. Coorientador: Carlos Augusto de Lemos Chernicharo.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f.67-69.</p> <p>1. Engenharia Sanitária - Teses. 2. Saneamento - Teses. 3. Biorreatores - Teses. 4. Lodo de esgoto - Teses. 5. Digestão anaeróbia - Teses. I. Mota Filho, César Rossas. II. Chernicharo, Carlos Augusto de Lemos. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 628(043)</p>
-------	--



FOLHA DE APROVAÇÃO

“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”

TÚLIO CESAR FLORIPES GONÇALVES

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


Prof. CÉSAR ROSSAS MOTA FILHO - Orientador


Prof. CARLOS AUGUSTO DE LEMOS CHERNICHARO - Coorientador


Prof. CLÁUDIO LEITE DE SOUZA


Prof. ROQUE PASSOS PIVELI

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profª. Juliana Calábria de Araújo
Coordenadora

Prof. César Rossas Mota Filho
Orientador

Belo Horizonte, 22 de maio de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela proteção, sabedoria e a saúde necessários para a caminhada e lutas diárias.

A minha avó Alíria e minha tia Iraci pelo apoio e os valores ensinados que foram essenciais para minha formação pessoal.

Ao professor César pela orientação e ensinamentos que foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

Ao professor Carlos pela co-orientação, ensinamento passados em sala e em campo, e pelas oportunidades de desenvolvimento científicos no decorrer do mestrado.

Aos amigos e companheiros de luta do DESA que ao longo dessa caminhada cativei e que estiveram comigo nos bons e não tão bons momentos vividos nessa etapa.

Aos funcionários da ETE Laboreaux pelo auxílio e dedicação durante o decorrer da pesquisa.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o estudo do efeito do retorno do lodo secundário para adensamento e digestão em 4 reatores UASB da estação de tratamento de esgoto (ETE) *Laboreaux* de Itabira Minas Gerais. Para tanto, avaliou-se o efeito do retorno de lodo, em função da remoção de DQO, SST e SSed, através da operação dos reatores em 4 fases, sendo a fase inicial com TDH médio de 18 h e as demais com TDH médio de 9 h. Durante o tempo de estudo, 636 dias, os reatores receberam lodo de retorno em ciclos horários de 30 min, 24 h por dia. Os resultados encontrados para a fase em que o reator operou com TDH de 18 h apontaram para elevadas eficiências de remoção de DQO de 73%, SST de 84% e SSed de 88%. No entanto, tal operação se torna inviável por aplicar um tempo de detenção muito alto quando comparado ao tempo de 9 h, usualmente utilizado em projetos de reatores UASB. A mudança do TDH de 18 para 9 h, no intuito de adequar o sistema de tratamento aos valores de projeto, ocasionou de imediato perda na qualidade do efluente do reatores UASB com eficiências médias de remoção de DQO, SST e SSed de 38, 39 e 50%, respectivamente. Acredita-se que a maior vazão afluente durante a operação com menor TDH revolveu o material orgânico que estava sedimentado, levando assim a uma perda elevada de sólidos no efluente. Outro fator importante que levou à piora da qualidade do efluente foi o passivo de lodo que se encontrava nos reatores, levando a uma alta concentração de sólidos (2%) no ponto mais alto (próximo aos defletores e câmara de sedimentação) o que contribuiu para uma grande perda de material particulado no efluente do reator. Dentre as fase de operação com TDH de 9 h, destaca-se a última fase, com a retirada do passivo de lodo à altura de 2 m e manutenção de concentração de lodo de 0,5%. Esta fase demonstrou-se ideal para o funcionamento dos UASB, apresentando eficiências de remoção de DQO, SST e SSed de 75, 85 e 95 %. A análise de atendimento à legislação pelos reatores UASB mostrou que para a fase em que os reatores operavam com TDH elevado (18 h), 50 % dos valores analisados de DQO e 40% dos valores de SST apresentaram-se inferiores ao exigido pelo órgão ambiental mineiro. Já para a última fase da pesquisa (TDH 9 h) 30 % dos valores de DQO e 70 % dos valores de SST se mantiveram abaixo do exigido pelo órgão ambiental. O retorno de lodo mostrou ser uma técnica vantajosa e aplicável às estações anaeróbias(UASB+FBP), sendo os problemas operacionais até então apontados ocasionados pelo gerenciamento ineficiente de lodo nos UASB.

ABSTRACT

This research studied the effect of returning secondary sludge to UASB reactors for thickening and digestion in the full-scale sewage treatment plant (STP) Laboreaux in Itabira Minas Gerais. The effect of sludge return was evaluated based on COD, TSS and SSed removals through the operation of the reactors in 4 stages. The initial stage had an HRT of 18 hours and the others had a mean HRT of 9 hours. During the research period, 636 days, the reactors received return sludge 24 hours per day, in 30 min cycles. The results show that during the phase when the reactor was operated at an HRT of 18 hours, removal efficiencies were high (73% for COD, 84% for TSS and 88% for SSed). However, it is not feasible to operate the reactors using such high detention time compared to 9 h, the design retention time commonly used in UASB reactors. Changing the HRT from 18 h to 9 hr resulted in the immediate decrease in the quality of the effluent from UASB reactors, with average removal efficiencies for COD, TSS and SSed of 38, 39 and 50%, respectively. It is believed that the higher influent flowrate used during operation with a lower HRT resuspended organic material from the bottom of the reactors). Another important factor leading to the worsening of the quality of the effluent sludge was the total mass of sludge present in the reactors, leading to a high concentration of solids (2%) at the highest point (close to the sedimentation chamber and baffles) which contributes to a great loss of particulate material in the reactor effluent. Among the operational phases with HRT of 9 h, the final phase, in which sludge was removed at height of 2 m and kept at 0.5% of the total volume, showed the best results, with removal efficiencies for COD, SSed and TSS of 75, 85 and 95%, respectively. The compliance analysis for UASB reactors showed that, for the stage where the reactors were operating with high HRT (18 h), 50% of the analyzed values of COD and 40% of SST values were below the values required by the environmental agency. As for the last phase of the research (HRT 9 h), 30% of the COD values and 70% of SST values remained below the required values by the environmental agency. Returning sludge proved to be an advantageous and applicable technique for anaerobic treatment plants (UASB+FBP). The observed operational problems were mainly caused by the inefficient management of sludge in the UASB.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	VII
1 INTRODUÇÃO.....	8
2 OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3 REVISÃO DA LITERATURA	12
3.1 REATORES ANAERÓBIOS.....	12
3.2 REATORES ANAERÓBIOS E PÓS-TRATAMENTO.....	16
3.3 PRODUÇÃO DE LODO EM REATORES ANAERÓBIOS	18
3.4 RETORNO DE LODO PARA REATORES ANAERÓBIOS.....	19
3.4.1 <i>Trabalhos realizados em escala piloto</i>	20
3.4.2 <i>Trabalhos realizados em escala plena</i>	24
3.5 TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DE LODO	27
4 MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 ÁREA DE ESTUDO	28
4.1.1 <i>Fluxograma de Tratamento</i>	30
4.1.2 <i>Seleção de Reatores</i>	32
4.1.3 <i>Monitoramento da Fase Líquida</i>	33
4.1.4 <i>Monitoramento da Fase Sólida</i>	34
4.1.5 <i>Retorno de Lodo</i>	36
4.2 TESTE COM GARRAFA DE VON DORN.....	36
4.3 FASES DE ESTUDO.....	38
4.4 ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE LODO DILUÍDO COM AGITAÇÃO (IVLDA).....	39
4.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 CONDIÇÕES OPERACIONAIS DURANTE AS FASES DA PESQUISA	41
5.2 EFEITO DO RETORNO DE LODO DOS DS SOBRE O DESEMPENHO DOS REATORES UASB.....	44
5.2.1 <i>Fase 0</i>	44
5.2.2 <i>Fase 1</i>	48
5.2.3 <i>Fase 2</i>	48
5.2.4 <i>Fase 3</i>	49
5.2.5 <i>Fase 4. A</i>	49
5.2.6 <i>Fase 4. B</i>	50
5.2.7 <i>Análise Global da Estação</i>	50
5.3 DINÂMICA DO LODO NOS REATORES UASB.....	51
5.3.1 <i>Perfis de sólidos nos reatores da pesquisa</i>	51
5.3.2 <i>Verificação da presença de sólidos no interior do compartimento de decantação</i>	53
5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE REATORES UASB OPERANDO COM TDH DE 9 H	54
5.5 ATENDIMENTO DOS PARÂMETROS DQO E SST AOS LIMITES ESTABELECIDOS	57
5.5.1 <i>Atendimento do parâmetros DQO aos limites estabelecidos</i>	57
5.5.2 <i>Atendimento do parâmetros SST aos limites estabelecidos</i>	61
5.6 CARACTERIZAÇÃO DA SEDIMENTABILIDADE DO LODO SECUNDÁRIO DE RETORNO	63
6 CONCLUSÃO	65
7 RECOMENDAÇÕES	67
7.1 PARA A COMUNIDADE CIENTÍFICA:	67
7.2 PARA A ETE:	67
REFERÊNCIAS	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 -	Esquema de um reator UASB	13
Figura 3.2 -	Processo de digestão de moléculas complexas.....	14
Figura 3.3 -	Comparação entre a) esgoto mais lodo de retorno e b) esgoto bruto.....	26
Figura 4.1 -	Esquema geral da ETE <i>Laboreaux</i>	29
Figura 4.2 -	Etapalização prevista para implantação das diversas unidades da ETE.....	30
Figura 4.3 -	Fluxograma detalhado de operação inerente ao tratamento das fases líquidas e sólidas.....	32
Figura 4.4 -	a) Representação esquemática do bloco de reatores e b) corte lateral.....	34
Figura 4.5 -	a) Representação dos pontos de coleta b) corte lateral.....	36
Figura 4.6 -	Fluxograma operacional de retorno de lodo.....	38
Figura 4.7 -	Pontos de coleta com garrafa de van Dorn.....	39
Figura 4.8 -	Esquema do aparato de IVLDA e Interface líquido/lodo.....	41
Figura 5.1 -	Hidrograma de vazão versus tempo de detenção hidráulica.....	42
Figura 5.2 -	Vazão média diária e TDH médio diário.....	43
Figura 5.3 -	a) Série Histórica, b) Boxplot e c) boxplot análise global para DQO.....	46
Figura 5.4 -	a) Série Histórica, b) Boxplot e c) boxplot análise global para SST.....	47
Figura 5.5 -	a) Série Histórica, b) Boxplot e c) boxplot análise global para SSed.....	48
Figura 5.6 -	Perfis de sólidos para as fases da pesquisa.....	54
Figura 5.7 -	Percentual de atendimento do parâmetro DQO.....	61
Figura 5.8 -	Percentual de atendimento do parâmetro SST.....	63
Figura 5.9 -	Valores do teste de IVLDA e dados de coleta.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumo sobre dos trabalhos sobre retorno de lodo.....	23
Tabela 3.2 – Faixa de Índice Volumétrico de Lodo.....	27
Tabela 4.1 – Características dimensionais da ETE <i>Laboreaux</i>	30
Tabela 4.2 – Condições operacionais durante as fases estudadas.....	33
Tabela 4.3 – Frequência de monitoramento da ETE <i>Laboreaux</i>	37
Tabela 4.4 – Fases operacionais.....	40
Tabela 5.1 – Médias dos principais parâmetros operacionais... ..	44
Tabela 5.2 – Valores para o teste de Kruskal-Wallis.....	56
Tabela 5.3 – Teste de Comparação Múltiplas.....	56
Tabela 5.4 – Correlação de Spearman.....	57
Tabela 5.5 – Concentração de SST para o teste de IVLDA.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AGV – Ácidos Graxos Voláteis

CDV – Caixa distribuidora de vazão

CO₂ – Dióxido de Carbono

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DN – Deliberação Normativa

DQO – Demanda Química de Oxigênio

DS – Decantador Secundário

EF – Efluente Final

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FBP – Filtro Biológico Percolador

H₂S – Sulfeto de Hidrogênio

NH₃ – Amônia

pH – Potencial Hidrogeniônico

SSed – Sólidos Sedimentáveis

SST – Sólidos Suspensos Totais

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

1 INTRODUÇÃO

No cenário atual de tratamento de efluentes domésticos no Brasil, é de amplo conhecimento a boa aplicabilidade de reatores anaeróbios. Dados do IBGE (2008) mostraram que na última pesquisa de saneamento básico, esse tipo de tratamento representava um percentual de utilização de 12% nos municípios que tratavam esgoto doméstico. Entre os tratamentos anaeróbios aplicáveis, destaca-se a tecnologia UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) por se tratar de um sistema robusto e simples de operar, entretanto, que demanda um gerenciamento adequado com vista a durabilidade e adequação do sistema, uma vez que é conhecido sérios problemas operacionais devido ao mal gerenciamento de sistemas. Dentre as várias vantagens de aplicação desta tecnologia, apontadas por Chernicharo (2009), vale ressaltar a menor produção de lodo, produção de biogás com valor energético, baixa demanda de área e energia e aplicabilidade em grandes e pequenas escalas.

Contudo, o processo anaeróbio de tratamento, por si só, nem sempre é capaz de garantir a qualidade de um efluente final que atenda aos limites exigidos pelos padrões de lançamento, sejam eles nacionais (CONAMA 430/11), ou estaduais (DN COPAM 10/86). Assim, frequentemente faz-se necessária a utilização de unidades de pós-tratamento, que atuam como polimento do efluente dos reatores UASB. Dentre as opções de tecnologias de polimento mais usadas, destacam-se as lagoas de polimento, aplicação no solo, filtro biológico percolador (FBP), biofiltro aerado submerso, lodos ativados, flotação por ar dissolvido e *constructed wetlands*.

A combinação do sistema UASB/FBP muitas vezes mostra-se satisfatória do ponto de vista de atendimento aos padrões de lançamentos de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Sólidos estabelecidos pelas legislações ambientais brasileiras, notadamente as Resoluções CONAMA 430/11 e COPAM/CERH-MG DN 44.667/2007. Contudo, sistemas que utilizam pós-tratamentos aeróbios, incluindo FBP, produzem biomassa, usualmente denominada de lodo secundário. Por se tratar de uma biomassa não totalmente estabilizada, o material deve ser retido para posterior tratamento. Em sistemas convencionais de tratamento de esgoto, os sólidos são retidos em decantadores secundários e posteriormente tratados por meio de adensadores, digestores e unidades de desidratação (centrífugas, filtro prensa ou leitos de secagem), onerando assim a construção e operação da estação de tratamento de esgoto.

Como alternativa simplificada ao fluxograma relativamente complexo citado anteriormente, foi proposto (Van Haandel e Letinga 1994) um novo fluxograma onde o lodo retido nos decantadores é retornado para os reatores UASB para digestão. Tal configuração simplifica o fluxograma de tratamento anaeróbio, uma vez que não se faz necessária a construção de unidades específicas de adensamento e digestão. No entanto, é possível que a carga adicional de lodo secundário em reatores UASB, somada a um gerenciamento ineficiente do sistema, tenha um efeito negativo na digestão anaeróbia e resulte em queda na eficiência de tratamento, resultando em concentrações inaceitáveis de sólidos e matéria orgânica (DQO ou DBO) no efluente de reatores UASB.

A combinação do processo anaeróbio de tratamento de águas residuárias e da digestão de lodo, em um único reator, através do retorno do lodo de descarte do filtro biológico percolador (FBP) para o reator UASB, pode tornar o processo de tratamento de grande viabilidade econômica, aumentando sua aplicabilidade no país. O uso desse sistema de tratamento tem como grandes vantagens a minimização da produção de lodo, a produção de um lodo mais concentrado e estabilizado e a redução dos custos e dos impactos ambientais gerados pela ETE, uma vez que são reduzidos os custos com construção de unidades adicionais de adensamento e tratamento de lodo, contribuindo assim para redução do consumo de energia e de produtos químicos necessários à desidratação do lodo, gerando menor passivo ambiental.

Entretanto, existem pouquíssimos relatos na literatura especializada sobre o efeito do tratamento combinado de esgoto e lodo aeróbio na performance de reatores UASB operando em escala plena. Os processos de estabilização do lodo e do tratamento de águas residuárias apresentam objetivos diferentes, que devem continuar a ser atendidos no sistema de tratamento combinado. Enquanto, o primeiro tem como objetivos a obtenção de um lodo com menor concentração de patógenos e a redução do volume de lodo e dos sólidos orgânicos, o segundo tem como objetivo principal a produção de um efluente final de elevada qualidade (PONTES, 2003).

Os estudos sobre o tema até então realizados são ainda escassos, e os poucos trabalhos já publicados foram realizados em escala laboratorial ou de bancada. Nestas escalas menores, os resultados demonstram uma boa perspectiva do funcionamento do sistema no que se refere à estabilização da matéria orgânica. Entretanto, os dados de testes laboratoriais nem sempre imprimem condições e resultados similares aos encontrados em sistemas que operam em

escala plena, necessitando assim de estudos que contribuam com o melhor conhecimento destes sistemas.

Buscando colaborar com os conhecimentos até então difundidos sobre o retorno de lodo, realizou-se a presente pesquisa em escala plena por 650 dias, onde foram avaliados quatro reatores UASB, em um primeiro momento operando com TDH médio de 18 h. Em um segundo momento, foram operados com TDH médio de 9 h. Como parâmetros físicos e químicos de interesse para a pesquisa, foram selecionados Sólidos Suspensos Totais (SST), Sólidos Sedimentáveis (SSed) e DQO. Durante o desenvolvimento da pesquisa buscou-se estudar estratégias de retorno de lodo que melhor se adequassem ao sistema, de modo a não impactar a qualidade do efluente final. Cabe ressaltar que o presente estudo é um dos poucos realizados em escala plena, trazendo assim em seus resultados observações importantes inerentes ao processo em escala real que contribuem positiva ou negativamente para o retorno de lodo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto da prática de retorno de lodo secundário gerado em FBP sobre o desempenho de reatores UASB em escala plena tratando simultaneamente esgoto sanitário e lodo de retorno em escala plena.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o impacto do retorno de lodo secundário de filtro biológico percolador sobre o desempenho de reatores UASB em escala plena operados sob diferentes tempos de detenção hidráulica (18 e 9 horas);
- Avaliar o impacto do retorno de lodo secundário de filtro biológico percolador sobre a dinâmica do lodo em reatores UASB em escala plena; e
- Avaliar a meta de atendimento do efluente tratado nos reatores UASB aos padrões ambientais e valores de referência apontados pela literatura especializada.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Reatores Anaeróbios

A necessidade de preservação dos recursos hídricos vivenciada pelo país, face a poluição dos corpos d'água, constatada nas últimas décadas, por lançamento de efluentes domésticos e industriais, resultou em constantes avanços no tratamento de esgoto em nosso país, principalmente no campo de estudos das tecnologias anaeróbias. Dentre essas tecnologias, cabe ressaltar a utilização de sistemas individuais como os tanques sépticos, de grande aplicabilidade em zonas rurais e em locais urbanos de baixa densidade ocupacional, e os sistemas coletivos, tal como o tratamento anaeróbio por reatores de manta de lodo como a tecnologia UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). No que se refere aos reatores UASB, cabe ressaltar a sua crescente aplicabilidade, por se tratar de uma tecnologia que se adaptou muito bem às condições brasileiras, ambientais e econômicas, uma vez que a composição do sistema de tratamento confere relativa simplicidade operacional e baixo custo de implantação.

Outro fator importante que tem levado à aplicabilidade do sistema no país refere-se ao crescente avanço científico sobre a tecnologia UASB, o que vem contribuindo para ampliação do conhecimento intrínseco ao funcionamento do reator e qualificação de profissionais na área de tratamento de esgoto. Dentre os marcos científicos apontados na literatura, grande contribuição ao conhecimento da tecnologia de tratamento é encontrada em Lettinga *et al.* (1993), Seghezzi *et al.* (1998), Foresti (2002) e Chernicharo (2007). Os trabalhos produzidos pelos autores, além de apresentar um panorama da expansão de utilização da tecnologia, aborda questões relevantes à favorável aplicabilidade do processo, como as baixas demandas de área e energia, simplicidade operacional, produção de biogás com valor energético e baixa produção de lodo. De acordo com Kato *et al.* (1999), o reator UASB representa um grande avanço na aplicação da tecnologia anaeróbia para o tratamento direto de águas residuárias, sejam de natureza simples ou complexa, de baixa ou de alta concentração, solúveis ou com material particulado.

Sobre o funcionamento do sistema, a Figura 3.1 apresenta as subdivisões internas consideradas no processo (compartimento de digestão, compartimento de decantação e separação trifásica), bem como um arranjo construtivo dos reatores UASB.

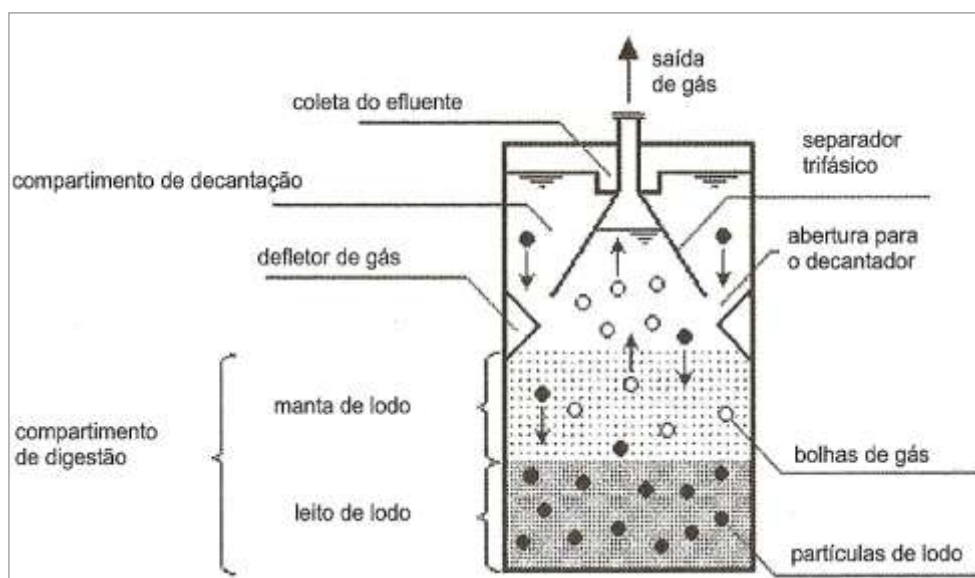


Figura 3.1 - Esquema de um reator UASB
 Fonte: CHERNICHARO, 2007

Nos reatores UASB, o esgoto bruto a ser tratado entra no sistema através das caixas divisoras de vazão, que possibilitam a distribuição equânime do líquido no fundo do reator e o estabelecimento de um fluxo ascendente, onde primariamente entra em contato com a manta de lodo presente no sistema, formada por biomassa ativa, levando à remoção de parte considerável da matéria orgânica presente no esgoto. Esta, ao ser metabolizada pela biomassa, resulta na formação de biogás, composto principalmente de gás metano e gás carbônico.

Basicamente, nos diferentes reatores anaeróbios, a imobilização ocorre (i) na forma de lodo, na qual os microorganismos aderem-se e agregam uns aos outros, formando desde flocos dispersos até grânulos densos e se mantêm em geral em suspensão no reator, devido a condições hidráulicas, ou (ii) na forma de lodo aderido a um meio de suporte inerte (areia, plástico, pedra etc.), formando películas na sua superfície (Kato *et al.* 1999).

Na parte superior dos reatores, encontra-se o chamado compartimento de decantação, onde os sólidos que eventualmente são carregados pelo fluxo ascendentes, sedimentam, permitindo assim que o efluente depurado e decantado saia pelas canaletas. Ainda na parte superior do reator, encontra-se o separador trifásico, estrutura que garante a separação de gases, sólidos e líquido.

A estabilização da matéria orgânica no interior do reator, por se tratar de um processo bioquímico complexo e sequencial, depende de atividade bacteriana específica que ocasione a degradação de moléculas complexas como proteínas, lipídios e carboidratos, comumente presentes no esgoto. De modo geral, o processo de estabilização compreende 4 fases:

hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A Figura 3.2 apresenta as etapas de conversão e alguns subprodutos da degradação da matéria orgânica.

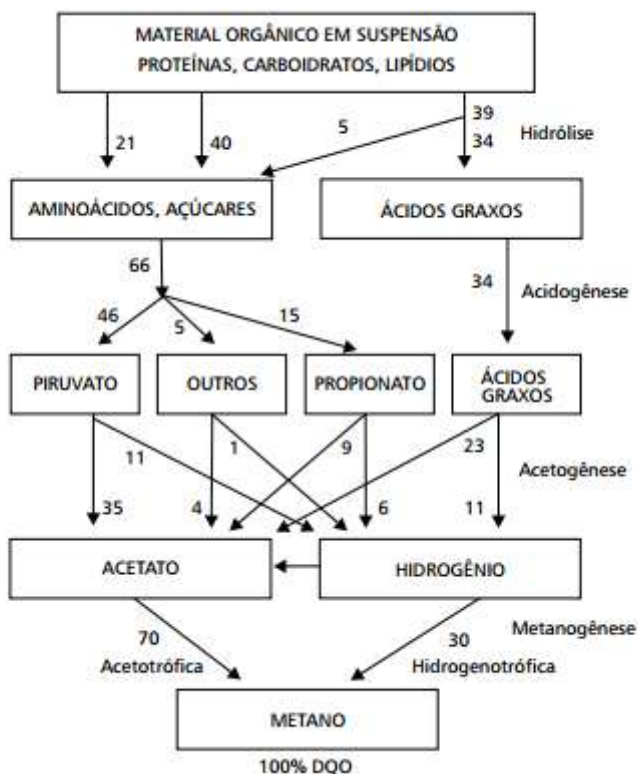


Figura 3.2 – Processo de digestão de moléculas complexas (números referem-se as porcentagens de DQO)

Fonte: FORESTI et al., 1999

De acordo com Foresti et al. (1999), as etapas de digestão envolvem:

- **Hidrólise:** Neste processo, o material orgânico particulado é convertido em compostos dissolvidos de menor peso molecular. O processo requer a interferência das chamadas exoenzimas que são excretadas pelas bactérias fermentativas. As proteínas são degradadas por meio de (poli)peptídeos para formar aminoácidos. Os carboidratos se transformam em açúcares solúveis (mono e dissacarídeos) e os lipídios são convertidos em ácidos graxos de longa cadeia de carbono e glicerina.
- **Acidogênese:** Os compostos dissolvidos gerados no processo de hidrólise ou liquefação são absorvidos nas células das bactérias fermentativas e, após a acidogênese, excretadas como substâncias orgânicas simples, como ácidos graxos voláteis de cadeia curta (AGV), álcoois, ácido lático e compostos minerais como CO₂, H₂, NH₃, H₂S etc. A fermentação acidogênica é realizada por um grupo diversificado de bactérias, das quais a maioria é anaeróbia obrigatória. No entanto, cabe ressaltar que algumas espécies são facultativas, o

que é importante para os sistema anaeróbio devido à utilização do oxigênio dissolvido na oxidação da matéria orgânica, evitando assim toxicidade às bactérias anaeróbias estritas, como as metanogênicas.

- Acetogênese: A acetogênese é a conversão dos produtos da acidogênese em compostos que formam os substratos para produção de metano: acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Como pode ser visto na Figura 3.2, aproximadamente 70% da DQO digerida é convertida em ácido acético, enquanto o restante da DQO é convertido em hidrogênio. Podendo ainda, dependendo do estado de oxidação da matéria orgânica a ser digerida, a formação do ácido acético ser acompanhada pelo surgimento de dióxido de carbono ou hidrogênio.
- Metanogênese: O metano é produzido pelos organismos acetotróficos, a partir da redução de ácido acético, ou pelos organismos hidrogenotróficos, a partir da redução do dióxido de carbono. Os organismos que produzem metano a partir de hidrogênio crescem mais rapidamente que aqueles que usam ácido acético, de modo que os metanogênicos acetotróficos geralmente limitam a velocidade de transformação de material orgânico complexo. Além dos processos fermentativos que levam à produção de biogás, podem ocorrer outros processos no reator anaeróbio. Apesar da ausência do oxigênio dissolvido, pode haver presença de oxidantes alternativos, que permitem o desenvolvimento de bactérias que usam o catabolismo oxidativo, como o nitrato e sulfato.

Sobre o papel dos reatores UASB frente ao processo de tratamento de esgoto, Zerbini (2000) destaca a multifuncionalidade dos reatores em comparação às estações de tratamento aeróbio convencional, onde o fluxograma de tratamento segue em reatores isolados que se complementam, a exemplo do fluxograma usual de lodos ativados que é composto por decantador primário, reator biológico de aeração, decantador secundário, adensador e digestor de lodo. Enquanto um único reator UASB atua como decantador primário, reator biológico e digestor, resultando em lodo bastante estabilizado quando comparado àquele produzido pelo sistema aeróbio convencional.

Sobre as vantagens e desvantagens do processo de tratamento anaeróbio, cabe citar (FORESTI *et al.* 1999):

- Baixo consumo de energia.
- Menor produção de lodo de excesso e, portanto, economia considerável no manejo e destino final desse tipo de resíduo dos sistemas de tratamento.

- Possibilidade de recuperação e utilização de gás metano como combustível.
- Possibilidade de funcionar bem, mesmo após longos períodos de interrupção (importante para efluentes sazonais).

Os principais aspectos negativos estão relacionados com:

- Sensibilidade do processo a mudanças das condições ambientais (pH, temperatura, sobrecargas orgânicas e hidráulicas).
- Possível emissão de odores ofensivos.
- Controle de espuma.
- Dificuldade na remoção de nutrientes (N e F).

Outro fator importante e que contribui para a redução da quantidade de lodo gerado pelo sistema é o maior tempo de residência celular em relação ao tempo de detenção hidráulica, permitindo assim maior retenção de biomassa nos reatores. Devido a isto, Chernicharo (2007), ressalta que o descarte do lodo excedente deve ser feito periodicamente, caso contrário, seu acúmulo no interior do reator poderá provocar a perda excessiva de sólidos para o compartimento de decantação e, posteriormente, juntamente com o efluente líquido. Levando assim, à deterioração da qualidade do efluente líquido devido à presença de material orgânico particulado. O que ressalta a necessidade de execução de protocolo de descarte de lodo que leve em consideração o perfil de sólidos dentro do reator e a estimativa de produção diária de lodo, com base em análises e no crescimento biológico.

Sobre o desempenho do sistema, cabe ressaltar que a experiência tem mostrado que os reatores UASB como unidades únicas de tratamento não produzem um efluente que se adeque às exigências normativas (CONAMA 430/2011), necessitando assim do uso de uma unidade de pós-tratamento, objetivando a remoção do adicional de matéria orgânica ($DBO \leq 120$ mg/L), e eventualmente, nutrientes ($NTK \leq 20$ mg/L) e organismos patogênicos.

3.2 Reatores anaeróbios e pós-tratamento

Como os reatores anaeróbios, quando usados isoladamente, podem não atender à aos requisitos para a remoção de poluentes dos esgotos, há necessidade de um arranjo com outras unidades de pós-tratamento. Aos reatores anaeróbios cabe primordialmente a remoção da

matéria orgânica particulada ou dissolvida ao nível de 60 a 80 %. Entretanto, muitas vezes um único tipo de reator não atende aos padrões de qualidade para o efluente, no tocante à remoção da matéria orgânica. Adicionalmente, outros constituintes como os nutrientes (nitrogênio e fósforo, principalmente) e organismos patogênicos, via de regra, não são removidos de maneira significativa, necessitando assim de combinação de reatores biológicos com diferentes configurações (KATO *et al.*, 1999).

De acordo com o autor supracitado, independente disso, os sistemas combinados que incorporam os reatores anaeróbios como uma das unidades são alternativas que se apresentam atrativas, pelos seus diversos aspectos favoráveis, como a simplicidade de projeto e operação, uso de equipamentos não sofisticados, menor produção de lodo de excesso para disposição, baixo consumo de energia e outros custos, menor área necessária e etc.

Dentre os sistemas de pós-tratamento adotados, têm-se notado grande aplicabilidade na configuração anaeróbio-aeróbio. De acordo com Alem Sobrinho e Jordão (2001), a combinação de sistemas UASB com pós-tratamento aeróbio com encaminhamento do lodo secundário para digestão no próprio reator UASB, pode apresentar as seguintes vantagens em relação a uma ETE por tratamento aeróbio:

- Os decantadores primários, adensadores de lodo e digestores anaeróbios podem ser substituídos, com todos os seus equipamentos, por reatores UASB, que dispensam equipamentos;
- Devido à redução da carga orgânica de DQO nos reatores UASB superiores às observadas em decantadores primários, o volume dos reatores aeróbios de pós-tratamento poderá ser reduzido a cerca da metade do volume dos tanques ou reatores das ETES convencionais;
- Quando da combinação UASB-Lodos Ativados, os gastos com consumo de energia para aeração poderão ser reduzidos para 45 a 55% do usualmente praticado por uma ETE convencional aeróbia sem nitrificação;
- Na implantação de ETE com tecnologia UASB seguido por tratamento biológico aeróbio, os custos de implantação serão no máximo 80 % daqueles previstos para uma ETE convencional.

De acordo com Chernicharo (2007), tendo em vista as limitações intrínsecas associadas aos sistemas anaeróbios, e levando-se em consideração a necessidade de se desenvolver tecnologias mais apropriadas à realidade dos países em desenvolvimento, torna-se importante

a inclusão de uma etapa de pós-tratamento dos efluentes gerados nos reatores anaeróbios. Tal etapa objetiva o polimento, não só da qualidade microbiológica dos efluentes, à luz dos riscos de saúde pública e das demais limitações impostas à utilização dos esgotos tratados na agricultura, mas também à redução dos danos ambientais provocados pelas descargas remanescentes de matéria orgânica e nutrientes nos corpos receptores.

Segundo Chernicharo (2007), as principais alternativas utilizadas no Brasil para o pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios são:

- Lagoa de Polimento;
- Aplicação no Solo;
- Filtro Biológico Percolador (FBP);
- Biofiltro Aerado Submerso;
- Lodos Ativados;
- Filtro Anaeróbio; e
- *Wetlands*

3.3 Produção de lodo em reatores anaeróbios

Uma das rotas de conversão da matéria orgânica em um sistema anaeróbio é a do crescimento bacteriano. Devido às baixas taxas de crescimento dos micro-organismos anaeróbios, há uma baixa produção de sólidos biológicos em sistemas de tratamento anaeróbio, que vem a constituir-se no lodo que deve ser descartado periodicamente. Essa baixa produção de lodo (da ordem de 0,10 a 0,20 kgSST/kgDQOapl) firma-se como uma das principais vantagens dos processos anaeróbios em relação aos aeróbios (CHERNICHARO et al., 1999).

Nos reatores anaeróbios, a acumulação considerável de sólidos biológicos se dá após alguns meses de operação contínua. A taxa de acumulação de sólidos depende essencialmente do tipo de efluente, sendo maior quando o esgoto afluente apresenta elevada concentração de sólidos suspensos, especialmente sólidos não biodegradáveis (CHERNICHARO, 2007).

Segundo Chernicharo (2007), a estimativa de produção de lodo em reatores UASB pode ser feita através das seguintes equações:

$$P_{lodo} = Y \times CO_{DQO} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

P_{lodo} = produção de lodo no sistema (kgSST/d)

Y = coeficiente de produção de sólidos nos sistema (kgSST/kgDQO apl)

CO_{DQO} = carga de DQO aplicada ao sistema (kgDQO/d)

No que se refere a produção volumétrica de lodo, essa pode ser estimada por meio da equação:

$$V_{\text{lodo}} = \frac{P_{\text{lodo}}}{\gamma \times C_{\text{lodo}}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

γ = massa específica do lodo (kg/m³)

C_{lodo} = concentração do lodo (%).

A seguir são apresentadas algumas características importantes sobre a produção de lodo em reator UASB (CHERNICHARO *et al.*, 1999):

- elevado grau de estabilização, devido ao elevado tempo de residência celular no sistema de tratamento, o que possibilita o seu encaminhamento a unidades de desidratação (secagem), sem qualquer etapa prévia de tratamento;
- elevada concentração, usualmente da ordem de 3 a 5%, possibilitando o descarte de menores volumes de lodo;
- facilidade de desidratação;
- possibilidade de utilização do lodo seco como fertilizante na agricultura, desde que tomados os devidos cuidados devido à presença de patógenos.

3.4 Retorno de lodo para reatores anaeróbios

O lodo é o subproduto encontrado em maior quantidade em um sistema de tratamento de esgotos sanitários. Segundo Metcalf e Eddy (1991), geralmente a concentração de sólidos desse subproduto é 0,25 a 12%, dependendo do tratamento (aeróbio ou anaeróbio) utilizado,

entretanto valores inferiores (0,25 a 5%) têm sido observado. Devido à elevada concentração de matéria orgânica apresentada por esse subproduto, faz-se necessário o tratamento, para qual o principal processo utilizado é a digestão anaeróbia. Tem-se como finalidades do tratamento de lodos: i) remover ou reduzir a níveis previamente estabelecidos os microrganismos patogênicos; ii) estabilizar o material orgânico; iii) reduzir o volume do lodo; iv) facilitar o processo de remoção de umidade; e v) permitir o reuso do material, seja como fonte de húmus ou como condicionador de solos para fins agrícolas. Partindo desse princípio, pode-se afirmar que o retorno de lodo não estabilizado para tratamento em reatores UASB seria uma opção viável e aplicável às ETEs.

Segundo Jenícek et al. (1999), além de minimizar a produção de lodo e de produzir um lodo mais concentrado e estabilizado, é esperado que a combinação do tratamento de água residuária e lodo de retorno atenda aos requisitos de remoção de material orgânico típico do tratamento de águas residuárias (em torno de 60 a 80%), e da digestão do lodo no que se refere a remoção de sólidos voláteis (40 a 50%).

O tratamento conjunto de águas residuárias e lodo de retorno em sistema UASB foi inicialmente discutido e proposto por Van Haandel e Letinga (1994), sendo que nos anos seguintes foram realizados diversos trabalhos sobre essa temática, todavia, a grande maioria em escala piloto e de demonstração, conforme discutido nos parágrafos seguintes (SOUSA, 1996; ORTEGA *et al.*, 1996; BOF *et al.*, 1999; FREIRE, VON SPERLING e CHERNICHARO, 1999; VERONEZ, 2001; WANKE *et al.*, 2002; GONÇALVES *et al.*, 2002; PONTES, 2003 e PONTES e CHERNICHARO, 2009). As únicas contribuições apresentadas até o momento em estações em escala plena foram desenvolvidas por Magalhães (2012) e Chernicharo *et al.* (2014).

3.4.1 Trabalhos realizados em escala piloto

Os primeiros trabalhos experimentais sobre tratamento conjunto de águas residuárias e lodo em reatores UASB foram realizados por Souza (1996) e Ortega et al. (1996). No trabalho de Souza (1996), realizado em uma planta piloto configurada por um reator UASB seguido de dois reatores sequencias de batelada aeróbios alimentandos com efluente sintético, foram observadas elevadas eficiências de remoção de DQO (86 %) e SST (85 %).

Ortega et al. (1996) relatou valores de remoção de DQO de 78% para reator anaeróbio tratando lodo do sistema de lodos ativados, apontando ainda em seu trabalho aumento da

atividade metanogênica específica, de 0,27 para 0,40 gDQO-CH₄/gSV.d, e alteração, de 16 para 18 m/h, da velocidade de sedimentação do lodo granular. Ainda de acordo com os autores, não foram observados efeitos negativos no desempenho do reator UASB.

Freire, von Sperling e Chernicharo (1999) estudaram o retorno de lodo do sistema de lodos ativados para reator UASB em uma planta piloto que recebia efluente bombeado do interceptor principal da cidade de Belo Horizonte por 231 dias, onde foi relatada eficiência de remoção de DQO de 84 % e concentração efluente de 114 mg/l e eficiência de remoção de SST de 85 %, com valor médio efluente de 30 mg/l. Nota-se que os valores encontrados pelos autores foram superiores aos apresentados por Ortega et al. (1996) e próximos aos valores apresentados por Sousa (1996).

Em estudo realizado por Coura e Van Haandel (1999) em sistema em escala piloto constituído de duas unidades, uma anaeróbia (UASB) e uma aeróbia (lodos ativados), alimentado com esgoto proveniente do interceptor da cidade de Campina Grande, os autores encontraram eficiências de remoção de DQO de 60 % e SST de 73 %. Segundo o estudo realizado, o sistema combinado de tratamento de águas residuárias é equivalente ao sistema convencional de lodo ativado no que concerne à qualidade do efluente e à produção de lodo, mas a fração digerida no sistema anaeróbio/aeróbio (combinado) é muito maior.

Caseiro, Piveli e Sobrinho (2006) em monitoramento realizado em uma instalação piloto no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) da Universidade de São Paulo (USP), composta por dois reatores UASB e um sistema de lodo ativado, ambos alimentados com esgoto proveniente da elevatória de esgotos instaladas em frente ao conjunto residencial da USP, relataram eficiências de remoção de DQO e SST de 67 e 42 %, e concentrações efluentes médias de 198 e 72 mg/l para DQO e SST. Segundo os autores, o retorno de lodo não alterou a eficiência do sistema e não interferiu na estabilidade do lodo, o que garantiu o bom desempenho na digestão do lodo.

Em trabalho mais recente com retorno de lodo do sistema de lodo ativado, Silva Filho e van Haandel (2014), em estudo realizado na área experimental da Universidade Federal de Campina Grande com quatro reatores UASB (sendo um com retorno de lodo) e uma lagoa aerada de mistura completa (lodo ativado), sendo ambas as unidades em escala piloto, obtiveram eficiência média de remoção de DQO de 60% e concentração efluente de 170 mg/l, sendo que segundo os autores, o retorno de lodo não ocasionou impacto negativo na

performance do UASB, mostrando o sistema ser factível para o tratamento conjunto de águas residuárias e lodo de retorno.

No tocante aos trabalhos realizados com recirculação de lodo de biofiltro aerado submerso, em estudo realizado por Gonçalves et al (1999), foram relatadas eficiências de remoção de DQO e SST de 91 % e 94 % e concentrações efluentes de 101 mg/l e 34 mg/l, para o sistema de tratamento. Foi citada pelos autores uma modificação no teor de ST do fundo do reator, apresentando concentrações superiores a 4,5 %. Ainda, segundo Gonçalves et al (1999) o sistema operando com retorno de lodo, quando comparado ao sistema convencional, apresentou aumento na produção de metano de 54 % e redução na produção de lodo do biofiltro de 50 %, não sendo observadas pelos autores alterações no desempenho do sistema.

Bof et al. (1999), em estudo realizado em ETE escala piloto composta por um reator UASB e um biofiltro aerado submerso (com meio granular flutuante e totalmente submerso), relatou eficiências de remoção de SST e DQO de 76 e 79%. O trabalho realizado pelos autores ilustra concentrações efluentes do UASB de ST de 41 mg/l e DQO de 136 mg/l. Os autores ressaltam que os valores apresentados foram próximos aos encontrados por Gonçalves et al (1999). De acordo com Bof et al. (1999), a recirculação de lodo não produziu nenhum efeito negativo sobre o desempenho do reator, sendo observada redução de 25 % da massa de lodo retornada para o reator, o que confirma o exercício da função de digestor pelo reator UASB.

Wanke et al. (2002), em pesquisa realizada com o mesmo sistema anteriormente citado, encontrou eficiências de remoção de DQO e SST de 88 e 94 % e concentrações efluentes de 66 e 15 mg/l, respectivamente, sendo a eficiência superior a encontrada por Bof et al. (1999). Em trabalho realizado por Gonçalves et al. (2002), as concentrações de DQO e SST encontradas no efluente do reator UASB foram de 186 e 77 mg/l, com eficiência de remoção no sistema de 64 % e 63 %, respectivamente. De acordo com Aisse et al (2001), há a necessidade de recirculação contínua do lodo do decantador secundário, garantindo assim que não ocorra deterioração do efluente dos reatores UASB devido à introdução de uma carga orgânica elevada e de forma pontual. Em pesquisa realizada pelos autores, as eficiências encontradas foram de 57 % e 50% para DQO e SST, com concentração efluente de 162 e 78 mg/l, respectivamente.

No que se refere aos trabalhos realizados com os sistemas UASB/FBP, Pontes (2003) e Pontes e Chernicharo (2009) inferiram que a combinação do processo de tratamento anaeróbio de águas residuárias com a digestão da biomassa de retorno pode conferir grande

viabilidade econômica ao sistema de tratamento. Tal viabilidade é demonstrada pelos autores em estudos realizados com dois reatores tratando lodo de excesso de filtros biológicos, sendo um em escala piloto e um em escala de demonstração, obtendo eficiência de remoção de DQO da ordem de 70% e 75%, sendo essa faixa de eficiência típica para reatores UASB operando em escala plena sem recirculação de lodo.

A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos trabalhos mencionados e das eficiências e concentrações efluentes médias encontradas pelos autores.

Tabela 3.1 – Resumo dos trabalhos sobre retorno de lodo para adensamento e digestão em reatores UASB tratando esgoto doméstico

Fonte	Origem do lodo Secundário	Resultados Efluente UASB		Eficiência de Remoção	
		DQO (mg/L)	SST (mg/L)	DQO (%)	SST (%)
SOUSA (1996)	Reatores Sequencial de Batelada	58,1	38	86	85
ORTEGA et al (1996)	Lodo Ativado	-	-	78	-
BOF et al (1999)	Biofiltro Aerado Submerso	136	41	79	76
FREIRE, von SPERLING e CHERNICHARO (1999)	Lodo Ativado	114	30	84	85
COURA e VAN HAANDEL (1999)	Lodo Ativado	315	90	60	73
GONÇALVES et al (1999)	Lodo Ativado	101	34	91	94
VERONEZ (2001)	Biofiltro	95	52	-	-
AISSE et al (2001)	Biofiltro Aerado Submerso	162	78	57	50
WANKE et al (2002)	Biofiltro Aerado Submerso	66	15	88	94
GONÇALVES et al (2002)	Biofiltro Aerado Submerso	186	77	64	63
PONTES (2003)	Filtro Biológico Percolador	104	66	75	-
COSENTINO et al (2005)	Lodo Ativado	167	-	76	-
CASEIRO, PIVELI e SOBRINHO (2006)	Lodo Ativado	239	72	67	42
PONTES e CHERNICHARO (2009)	Filtro Biológico Percolador	164	42	65	81
SILVA FILHO e VAN HAANDEL (2014)	Lodo Ativado	170	275	60	-

Fonte - Adaptado de Caseiro, Piveli e Sobrinho (2006).

Nota-se através da leitura dos textos acima, que é consenso entre os autores o potencial da aplicação da técnica de retorno de lodo, devido a não observação de impactos negativos aos sistemas. Alguns autores apresentam, inclusive, pontos positivos, como por exemplo o aumento da produção de metano e a redução da produção de lodo, bom desempenho na digestão do lodo aeróbio (podendo comparar o sistema ao fluxograma tradicional de lodos ativados) e aumento na atividade metanogênica específica. Entretanto, ressalta-se que todos esses trabalhos foram realizados em escala piloto ou escala de demonstração, sob condições mais controladas, o que nem sempre é o caso em estações em escala plena. Além disso, apenas dois trabalhos referenciados na Tabela 3.1 referem-se a sistemas UASB/Filtros Biológicos Percoladores.

3.4.2 Trabalhos realizados em escala plena

As experiências vivenciadas pelas Estações de Tratamento de Esgoto que praticam o retorno de lodo nem sempre mostram resultados animadores, resultando em efluente final dos reatores com altas concentrações de sólidos suspensos totais, sólidos sedimentáveis e DQO. Apesar dos promissores resultados das pesquisas, o retorno de biomassa tem sido apontado como causa de perdas de sólidos no efluente de reatores UASB operando em escala plena no Brasil (KASSAB *et al.* 2010). Isto possivelmente se deve à presença de partículas com menores dimensões em pontos mais elevados do reator UASB, resultando na necessidade de descartes mais frequentes de biomassa nos reatores (PONTES, 2003). Aponta-se ainda como causa da perda de sólidos a má sedimentabilidade do lodo de retorno, o que somado ao gerenciamento ineficiente da fase sólida nas ETEs, podem comprometer a eficiência do sistema de tratamento, uma vez que grandes acúmulos de lodo dentro do reator ocasionam grande perda de sólidos no efluente tratado pelos UASB, o que causa instabilidade do lodo de retorno devido às altas concentrações encontradas em lodos de decantadores secundários (DS) resultando em um lodo secundário com características próximas as observadas comumente em lodo de UASB, conforme foi observado em campo.

Apesar dos relatos de insucesso com a prática de retorno secundário para adensamento e digestão em reatores UASB em escala plena, foram identificados na literatura dois trabalhos que contrapõem esses relatos. O primeiro, realizado por Magalhães (2012), em estação de tratamento em escala plena na cidade de Itabira, com oito reatores - de 605 m³ de volume cada - operando com TDH de 18 h e retorno de lodo contínuo, conclui que os resultados encontrados na avaliação do retorno de lodo secundário dos decantadores para os reatores UASB mostraram-se satisfatórios, uma vez que as eficiências médias de remoção de DQO e SST no período com retorno de lodo foram de 72% e 80%, respectivamente, valores muito próximos aos do período sem retorno de lodo, que foram de 95% para DQO e 95% para SST, demonstrando que o retorno de lodo não teve impacto negativo na eficiência de tratamento em reatores UASB.

Com relação à avaliação do impacto da vazão de recirculação sobre sistema de tratamento, Magalhães (2012) afirma que o volume recirculado de 2,65 m³/h, somando-se os dois decantadores, correspondeu a 1,07% da vazão média afluente à ETE *Laboreaux*, de 257,34 m³/h (71,48 L/s), e que os impactos da vazão de recirculação de lodo aeróbio na vazão afluente foram iguais a 2,66 % e 0,66%, considerando as vazões mínima e máxima, respectivamente, afluente à ETE. A partir destes dados concluiu-se que o impacto da vazão de

recirculação de lodo na vazão afluyente é muito pequeno para acarretar prejuízos a qualidade do efluente dos reatores UASB e, conseqüentemente, a eficiência global do sistema. O mesmo concluiu-se para a avaliação da carga orgânica contida no lodo aeróbio de retorno, equivalente a 212,6 kgDQO/d, que correspondeu a apenas 5,6% da carga orgânica afluyente a ETE *Laboreaux*, de 3.785,8 kgDQO/d.

Quanto ao efeito do retorno de lodo aeróbio sobre a estabilidade do lodo no reator UASB, os resultados demonstraram que a relação STV/ST foram próximos nos períodos com e sem retorno de lodo, indicando que a recirculação não provocou um aumento na concentração de sólidos voláteis no reator. Os resultados mostraram também que o lodo apresentou-se com relação STV/ST na faixa de 50 a 60% (exceto os resultados das alturas de amostragem superiores), levando a concluir que não houve impacto significativo na estabilidade do lodo no reator UASB quando ocorreu recirculação de lodo aeróbio (MAGALHÃES, 2012).

Em trabalho mais recente realizado na ETE Onça, Belo Horizonte, Chernicharo *et al.* (2014) avaliaram, comparativamente, durante 12 meses, 4 dos 24 reatores (volume unitário de cada reator igual a 2.285 m³ e TDH médio de operação igual a 7 horas) – onde apenas 2 dos 4 reatores recebiam lodo de retorno. Notaram que houve excessivo aumento de perda de sólidos nos reatores anaeróbios. Todavia, os autores atribuíram o aumento da perda de sólidos nos reatores a um somatório de fatores, notadamente o retorno de lodo secundário com concentração bastante elevada (3 a 4% de sólidos) e a incapacidade do sistema de desidratação em processar todo o lodo produzido nos UASB (apenas uma das duas centrífugas necessárias esteve em funcionamento durante a maior parte da pesquisa).

Sobre o efeito do retorno de lodo dos decantadores secundários (DS) sobre a performance dos reatores UASB, Chernicharo *et al.* (2014) relatam que comparativamente os dois reatores que receberam lodo de retorno dos DS (RCR) apresentaram concentrações bem mais elevadas de SST, SS_{sed} e DQO_{total}, que os dois reatores que não receberam lodo de retorno (RSR), notadamente nos períodos 2 e 3 da pesquisa, em que havia excesso de lodo no interior dos reatores. Todavia, nos períodos 4 e 5, quando foi possível aumentar a frequência de descarte de lodo dos reatores que operavam com retorno de lodo, pode-se observar uma significativa melhora na qualidade do efluente desses reatores, particularmente para o parâmetro DQO, cujas concentrações medianas foram 165 e 174 mgDQO.L⁻¹ para os reatores sem retorno de lodo, e 200 e 162 mgDQO.L⁻¹ para os reatores com retorno de lodo. Ressalta-se que o lodo de retorno dos decantadores secundários apresentou, também durante os períodos 4 e 5 da

pesquisa, elevadas concentrações de sólidos (3 a 4%), conforme destacado no parágrafo anterior. Isso fazia com que as concentrações de DQO e SST fossem bem mais elevadas no afluente aos dois reatores operados com retorno de lodo devido ao acréscimo de carga orgânica.

Por outro lado, a elevação das concentrações de SST, SSed e DQO_{total} nos efluentes dos reatores com retorno de lodo aparentemente não afetaram as concentrações de DQO_{filtrada}, que se mantiveram muito próximas nos 4 reatores UASB da pesquisa, em todos os períodos operacionais, o que é uma indicação de que o retorno do lodo não afetou a atividade microbológica nos reatores (CHERNICHARO *et al.*, 2014).

De acordo com Chernicharo *et al.* (2014), os reatores que durante a pesquisa receberam lodo de retorno apresentaram altas concentrações de DQO, ST e SSed no efluente principalmente em períodos onde foi observado acúmulo de lodo no ponto mais elevado do compartimento de digestão (concentração de lodo de aproximadamente 1,5 %), o que possivelmente era um indicativo que o lodo adentrava ao compartimento de decantação dos reatores UASB e era perdido com o efluente. Os autores destacam, ainda, que foi observada significativa melhora quando da adoção de descartes mais frequentes, inferindo-se assim que a prática de retorno de lodo precisa estar bem afinada com um bom gerenciamento de lodo dos reatores. A influência do retorno do lodo sobre o afluente a ser tratado nos reatores é demonstrada de forma ilustrativa na Figura 3.3, onde é possível notar a diferença entre: a) reator que trata esgoto e lodo de retorno (neste caso um lodo anaeróbico, de cor escura); e b) reator tratando esgoto bruto apenas. Ressalta-se que o afluente mostrado na Fig. 3-a ilustra o impacto do retorno em um sistema que opera com gerenciamento de lodo ineficiente, conferindo assim ao lodo secundário característica de lodo anaeróbico com alta concentração de sólidos (~ 3%).



Figura 3.3 - Visualização das características do esgoto em dispositivo de distribuição de vazão de reator UASB: a) esgoto bruto mais lodo de retorno de decantador secundário; e b) apenas esgoto bruto

3.5 Testes de Caracterização de Lodo

Em estudos que utilizam a tecnologia UASB é primordial a realização de testes que busquem caracterizar o lodo quanto às suas condições físicas (sedimentabilidade, tipo de sólido, resistência à filtração, índice volumétrico de lodo – IVL, etc) e biológicas (Atividade Metanogênica Específica, estabilidade do lodo e caracterização microbiológica), uma vez que tais estudos subsidiam o conhecimento e contribuem na solução de problemas.

Segundo von Sperling (2000), define-se como índice volumétrico de lodo o volume ocupado por 1 g de lodo após sedimentação de 30 minutos, sendo esse índice comumente utilizado em estações de tratamento de esgoto para avaliação do controle operacional da estação. Ainda sobre o teste, o autor supracitado explica que existem algumas variantes para sua realização, como os testes realizados sem agitação durante o período de sedimentação (IVL), teste com diluição da amostra e sem agitação (IVLD), com agitação (IVLA) e com agitação e expressão dos resultados em concentração padrão de 3,5 g/L (IVLA_{3,5}). Como pode ser observado na Tabela 3.2, à medida que os valores de IVL aumentam, pior é sua classificação em termos de sedimentabilidade.

Tabela 3. 2 – Faixas de Índices Volumétricos de Lodo

Sedimentabilidade	Faixa de Índice Volumétrico de Lodo (ml/g)		
	IVL	IVLD	IVLA
Ótima	0 a 50	0 a 45	0 a 50
Boa	50 a 100	45 a 95	50 a 80
Média	100 a 200	95 a 165	80 a 140
Ruim	200 a 300	165 a 215	140 a 200
Péssima	>300	> 215	>200

Fonte - von Sperling (2000)

Assim, são de grande importância estudos que buscam aprimorar o manejo de lodo em ETEs em escala plena e propor adequadas condições operacionais ao retorno de lodo através da realização de testes de sedimentabilidade, estabilidade e monitoramento do perfil de sólidos dos reatores e da eficiência de estabilização da matéria orgânica dos reatores anaeróbios.

O retorno de lodo para tratamento (adensamento e digestão) em reatores UASB ainda é um tema pouco estudado pela comunidade científica, fato que dificulta a discussão de dados e o conhecimento das experiências vivenciadas por outras Estações de Tratamento de Esgoto. Os relatos de insucesso de prática de retorno de lodo tem feito com que diversas ETEs construídas com linha de retorno de lodo para os UASB sejam operadas sem o retorno, com o lodo secundário sendo enviado diretamente para a etapa de desidratação. Outras estações chegam a retirar um reator UASB da linha de tratamento da fase líquida, passando a utilizá-lo como digestor de lodo, totalmente em desacordo com a finalidade de uso do UASB.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

O presente estudo foi realizado na ETE Laboreaux, localizada em Itabira/MG. Atualmente a estação trabalha com atendimento à população de projeto de 70.000 hab, com vazão média afluente de 110 l/s. O esquema geral da estação para a condição de final de plano pode ser visualizado na Figura 4.1. A estação de tratamento de esgoto (ETE) *Laboreaux* localiza-se à margem direita do ribeirão do Peixe e atende a uma área que abrange as sub-bacias do ribeirão do Peixe e do córrego Água Santa, sendo que nesta última está inserido o Distrito Industrial de Itabira (ROSA e BEJAR, 2011).

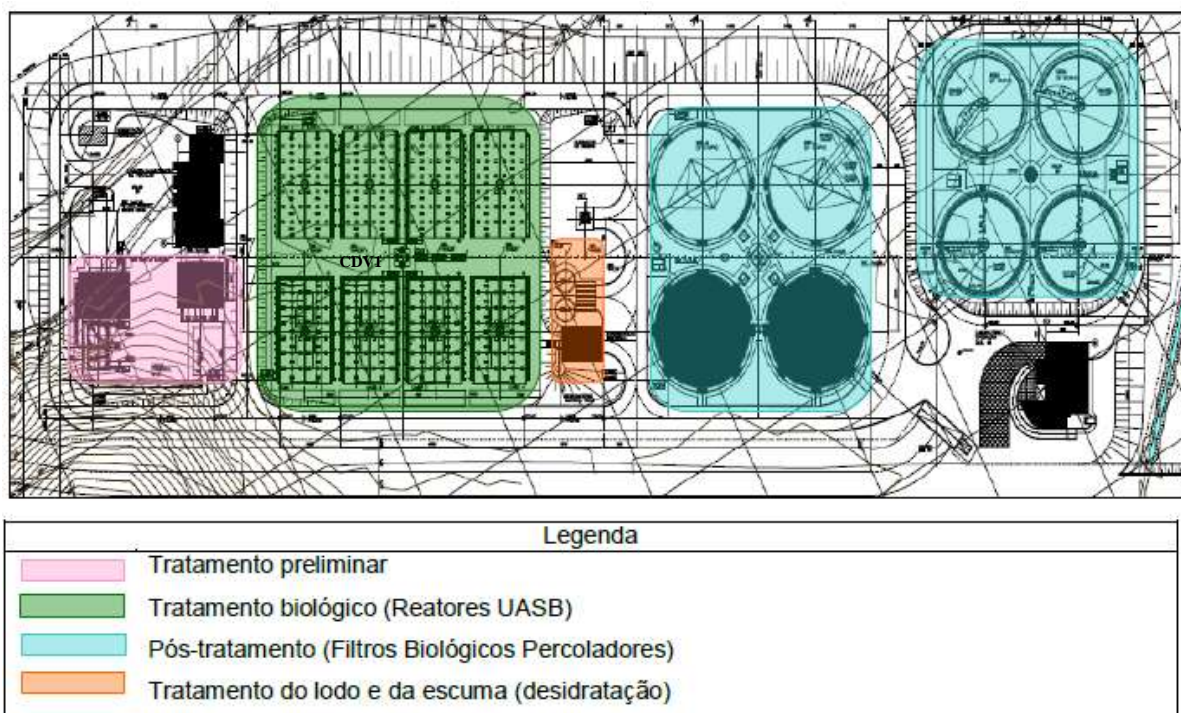


Figura 4.1 – Esquema geral da ETE Laboreaux indicando as diversas unidades e os níveis de tratamento

A implantação das unidades da ETE foi prevista para ocorrer em duas etapas, conforme pode ser visto na Figura 4.2. Na primeira etapa foram implantadas as seguintes unidades: (i) tratamento preliminar; (ii) 04 reatores UASB; (iii) 02 filtros biológicos percoladores; (iv) 02 decantadores secundários; (v) sistema de desidratação do lodo. Na segunda etapa serão implantados mais 04 reatores UASB, 02 filtros biológicos percoladores e 02 decantadores secundários.

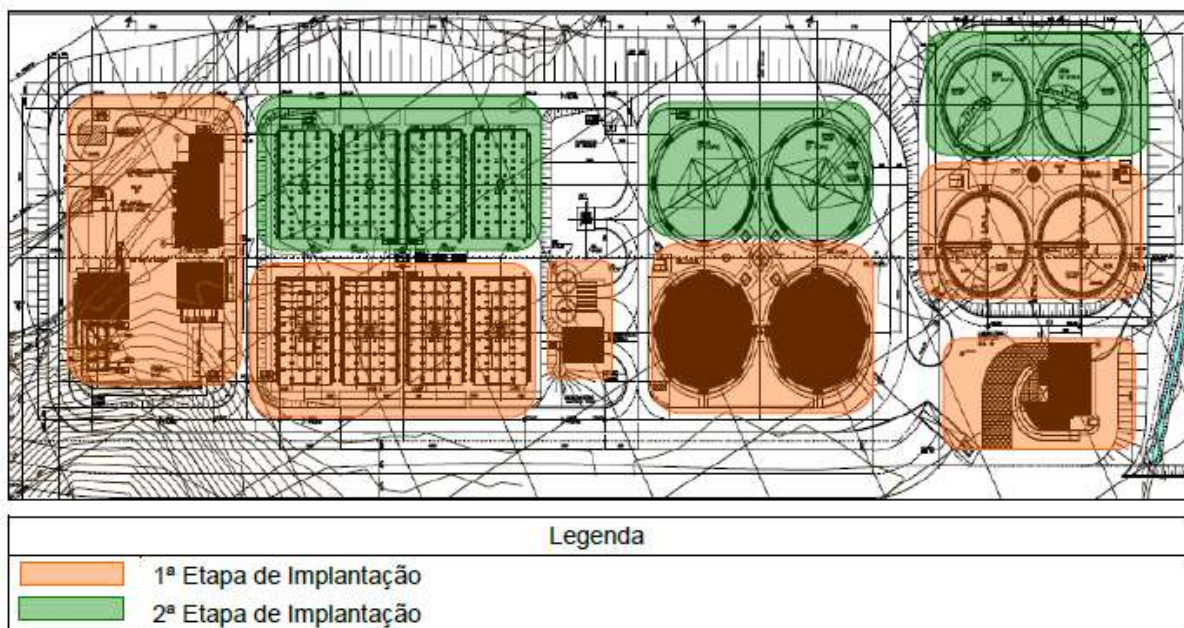


Figura 4.2 – Etapalização prevista para implantação das diversas unidades da ETE

Na Tabela 4.1 são apresentadas as principais características das unidades que compõem a primeira etapa de implantação, objeto do presente estudo.

Tabela 4.1 – Características principais da ETE Laboreaux

Características	Reatores UASB	Filtros biológicos percoladores (FBP)	Decantadores secundários (DS)
População (hab.)		70.000	
Vazão (L.s ⁻¹)		170	
Número de unidades	8	2	2
Tipo	Retangular	Circular	Circular
Dimensões (m)	21,7 x 6,2	D = 22,5	D = 20,0
Área (m ²)	134,5	397,6	314,0
Profundidade útil (m)	4,5	2,5	3,0
Volume útil (m ³)	605,25	-	942

4.1.1 Fluxograma de Tratamento

O fluxograma de tratamento da ETE *Laboreaux*, mostrado na Figura 4.3, é composto por unidades de tratamento preliminares – composto por gradeamento grosso de limpeza manual, gradeamento fino de limpeza mecanizado, primeira elevatória de esgoto bruto, desarenadores mecanizados quadrados (tipo detritor), segunda elevatório de esgoto bruto-, unidades de tratamento biológico anaeróbio (reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo - reatores UASB) e aeróbio (filtros biológicos percoladores e decantadores secundários). Após passar pelo tratamento preliminar o efluente segue para a estação elevatória EEE-2, que recalca o esgoto para a caixa divisora de vazão CDV1. Nesta caixa o esgoto é distribuído igualmente para 8 reatores UASB. O efluente líquido dos reatores é reunido na caixa divisora de vazão CDV2 que promove a divisão equitativa para 2 filtros biológicos percoladores. O efluente dos filtros biológicos é encaminhado para uma caixa divisora de vazão CDV3 que divide igualmente a vazão para 2 decantadores finais, dotados de ponte raspadora mecanizada. A parte líquida é vertida e encaminhada para o corpo receptor, Ribeirão do Peixe.

O lodo aeróbio removido dos decantadores finais é encaminhado para uma elevatória de lodo, que promove o retorno deste para a EEE-2 e, portanto, para os reatores UASB, onde sofre adensamento e estabilização anaeróbia. O lodo excedente gerado pelos reatores UASB, juntamente com o lodo aeróbio estabilizado neles, é encaminhado para a central de desidratação mecânica, composta de tanque de alimentação e filtro prensa. Após a desidratação o lodo é transportado para o aterro sanitário.

A Figura 4.3 apresenta um fluxograma detalhado de operação inerente as fases líquida e sólida da ETE *Laboreaux*.

EEB2	Elevatória de Esgoto Bruto	FP	Filtro Prensa
CDV	Caixa Distribuidora de Vazão	FPB	Filtro Biológico Percolador
UASB	Reator Anaeróbico	DS	Decantador Secundário
TP	Tanque Pulmão de Lodo	ERL	Elevatória de Retorno de Lodo

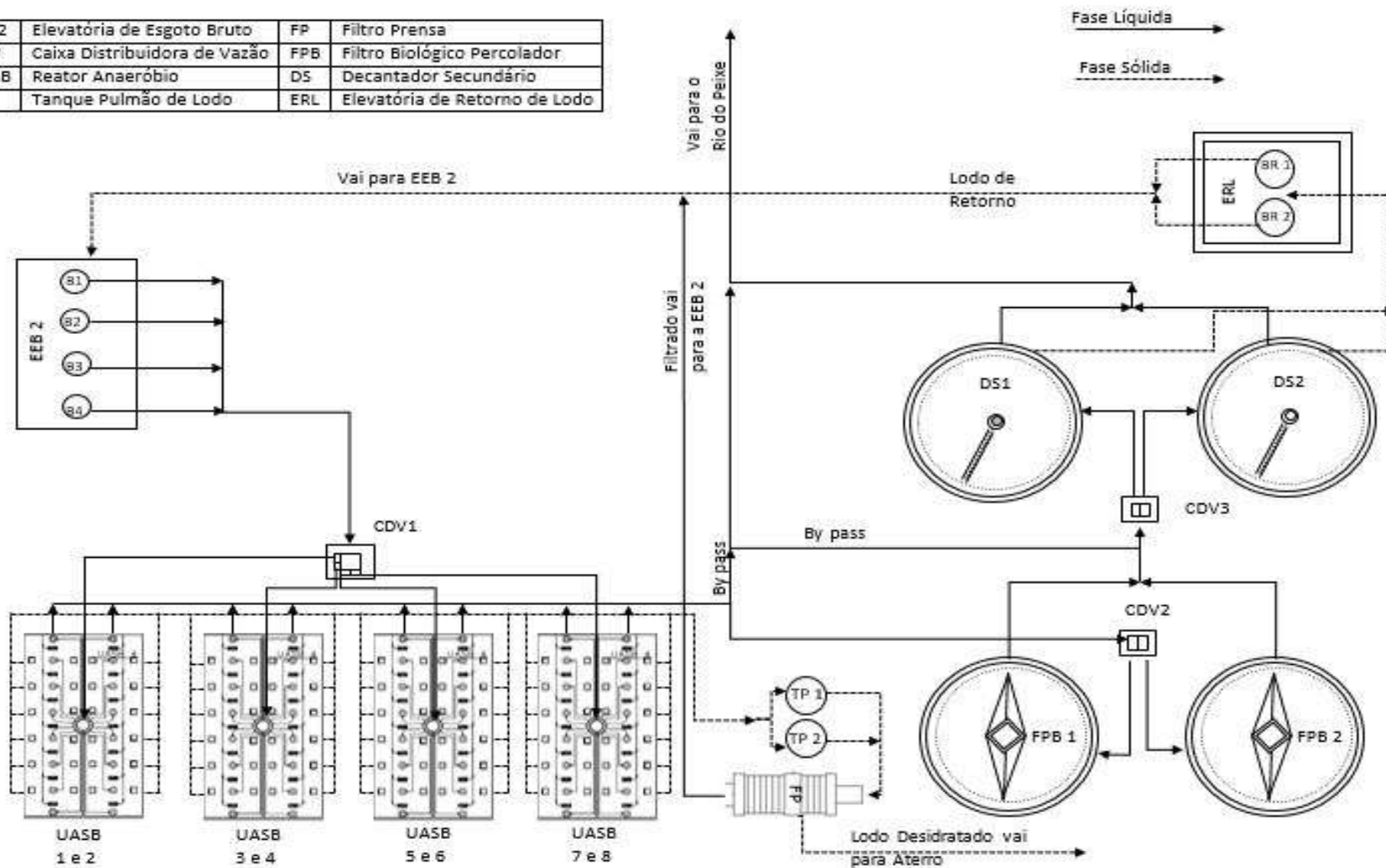


Figura 4.3 – Fluxograma detalhado de operação inerente ao tratamento das fases líquida e sólida (tratamento biológico e gerenciamento do lodo)

4.1.2 Seleção de Reatores

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram selecionados quatro reatores, sendo que cada bloco equivale a 2 reatores, denominados de R1, R2, R3 e R4. Como pode ser observado na Tabela 4.1, cada reator foi dimensionado com 21,7 m de comprimento e 6,2 m de largura, com altura total de 5 m (sendo a base do reator enterrada com profundidade de 0,50 m). Cada reator foi construído com oito separados trifásicos (coifas), sendo sete inteiras e duas metades, com 2,4 m de abertura na parte interior e 0,5 m de abertura na parte superior, espaçadas entre si a 0,70 m (com exceção das meia coifas com espaçamento de 0,35 m), sendo as paredes dos separadores trifásicos inclinadas a 54 °.

Em cada bloco de reator foram construídas uma caixa geral de distribuidora de vazão afluyente de 1,60 m de diâmetro, 12 caixas de subdivisão de vazão (sendo seis por reator) de 0,80 m de diâmetro com oito tubos de distribuição por caixa, e quatro caixas subdivisoras de vazão (duas por reator) de 0,60 m de diâmetro com quatro tubos de distribuição por caixa. Cada tubo de distribuição foi projetado para uma área de influência de 2,0 m², sendo o total de 56 tubos de distribuição por reator, resultando em uma área total de distribuição de vazão afluyente por reator de 112 m². A Figura 4.4 a) ilustra a configuração de um bloco de reator com suas unidades externas internas acima citadas, e a b) apresenta o corte frontal do bloco de reatores com suas medidas.

A partir da Fase 1, fez-se necessária a adequação do TDH aos quatro reatores selecionados (Tabela 4.2) para que a operação fosse realizada com TDH médio de 9 h (sendo esse o TDH médio de projeto). Para tanto, realizou-se a adequação das vazões através da alteração de altura das comportas (vertedor retangular $H = \sqrt[1,5]{\frac{Q}{1,838.L}}$) de alimentação da vazão na CDV-1, onde as comportas de alimentação dos reatores 5 a 8 foram içadas até a altura de 5,5 cm e as comportas de alimentação dos reatores 1 a 4 mantida a nível da soleira. Para a Fase 0 a vazão afluyente aos 8 reatores foi equitativa.

Tabela 4.2 – Condições operacionais durante as fases estudadas

Fase operacional	Vazão média total afluyente à ETE (L/s)	Vazão média afluyente aos reatores 1 a 4 (L/s)	Vazão média afluyente aos reatores 5 a 8 (L/s)	TDH médio nos reatores 1 a 4 (h)	TDH médio nos reatores 5 a 8 (h)
0	80	10	10	17	17
1 a 4	100	20	5	9	34

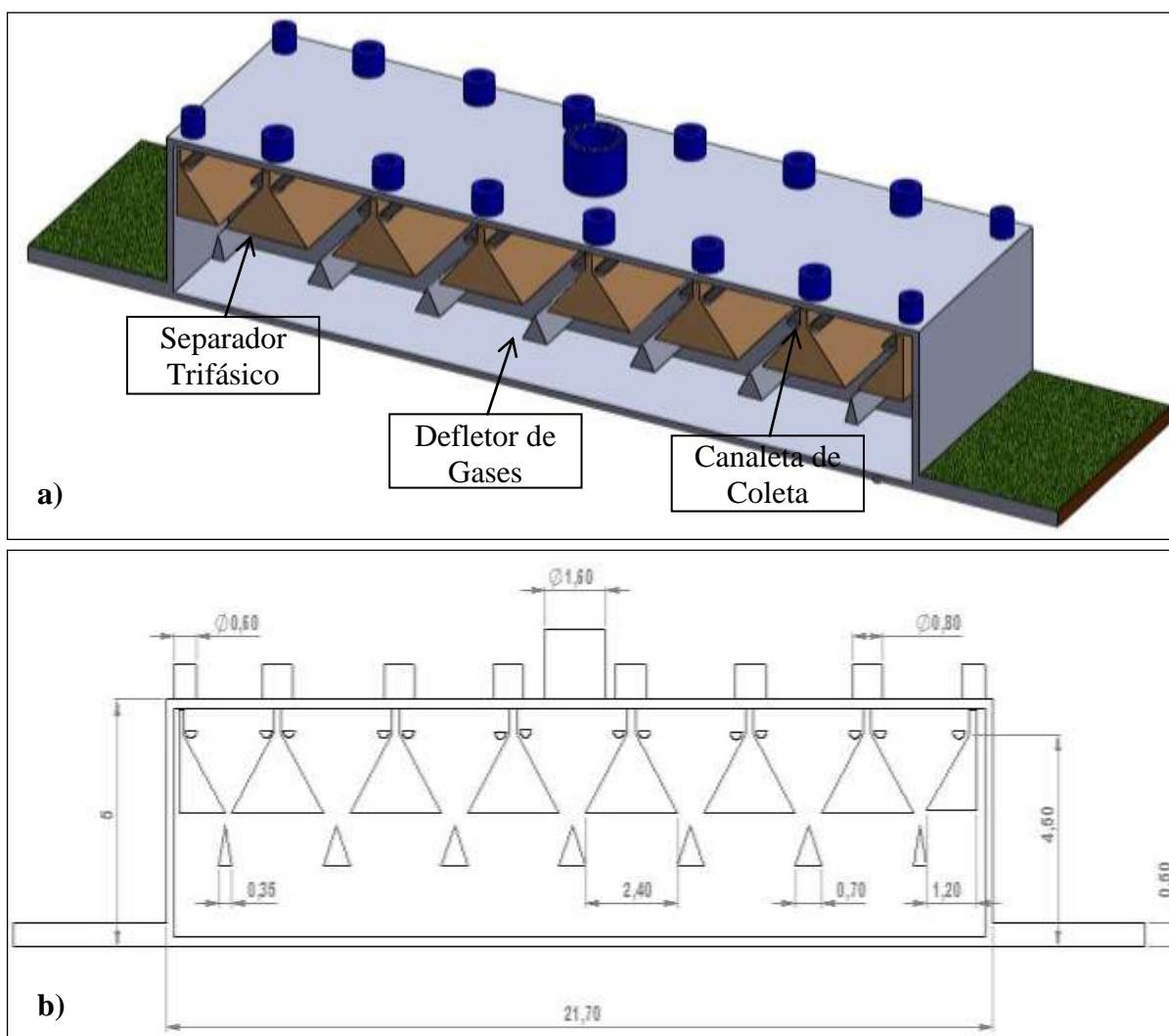


Figura 4.4 – a) representação esquemática do bloco de reatores UASB, b) corte frontal de um reator UASB (medidas em m)

4.1.3 Monitoramento da Fase Líquida

O monitoramento da estação foi realizado por meio de análises físico-químicas, considerando como parâmetros básicos de interesse a Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos em Suspensão Totais (SST) e Sólidos Sedimentáveis (SSed). Como análises complementares, monitorou-se a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), pH e temperatura. Todos os parâmetros foram analisados no laboratório da própria ETE, seguindo as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

Os pontos de monitoramento adotados foram a caixa distribuidora de vazão de esgoto mais lodo de retorno (CDV1), efluente de cada reator (coletado no ponto de monitoramento localizado na lateral dos reatores) e efluente final (coletado na saída de cada DS seguido de composição de ambas as amostras). A identificação de localização dos pontos encontra-se na Figura 4.3. Monitorou-se ainda para controle interno da estação a caixa distribuidora de vazão dos filtros biológicos percoladores (CDV2) e caixa distribuidora de vazão dos decantadores

(CDV3). Sendo utilizada amostragem composta para todos os parâmetros. Na Figura 4.5 são identificados os pontos de amostragem da fase sólida (lodo) e fase líquida (efluente tratado) nos reatores UASB da ETE Laboreaux.

4.1.4 Monitoramento da Fase Sólida

A evolução da concentração da biomassa no interior do reator foi realizada através de coleta de um litro de lodo em cada ponto de coleta (alturas de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m e 2,0 m), sendo no total quatro pontos de coleta por reator (Figura 4.5). As análises da fase sólida foram realizadas segundo os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005), determinando para cada ponto a concentração de Sólidos Suspensos Totais, Sólidos Fixos e Sólidos Voláteis. O gerenciamento da biomassa anaeróbia de excesso foi realizado por meio de descarte à altura de 1,70 m, possibilitando assim a manutenção de uma biomassa mais concentrada nas alturas inferiores do compartimento de digestão e menor concentração no último ponto de coleta (2,0 m). Uma vez descartada a biomassa de excesso, o volume descartado era então encaminhado para desaguamento em filtro prensa. A Tabela 4.3, apresenta informações a respeito dos pontos de coleta (pesquisa e monitoramento interno) e frequência de monitoramento.

Tabela 4.3 – Parâmetros, pontos e frequência de monitoramento das fases líquida e sólida na ETE Laboreaux

Fase Líquida	Unidade	Afluente UASB (CDV-1)	Efluente cada UASB	Efluente geral UASBs (CDV-2)	Efluente geral FBP (CDV3)	Efluente final ETE
DBO	mg/L	2 x *	semanal	2 x *	2 x *	2 x *
DQO	mg/L	2 x *	semanal	2 x *	2 x *	2 x *
SSed	mL/L	2 x *	semanal	2 x *	2 x *	2 x *
SST	mg/L	2 x *	semanal	2 x *	2 x *	2 x *
Temperatura	°C	2 x *	semanal	2 x *	2 x *	2 x *
pH	-	semanal	semanal	semanal	semanal	semanal

Fase Sólida	Unidade	Afluente UASB (CDV-1)	Pontos de Amostragem de Lodo
Sólidos totais	mg/L	2 x *	2 x *
Sólidos totais voláteis	mg/L	-	2 x *

* Por semana

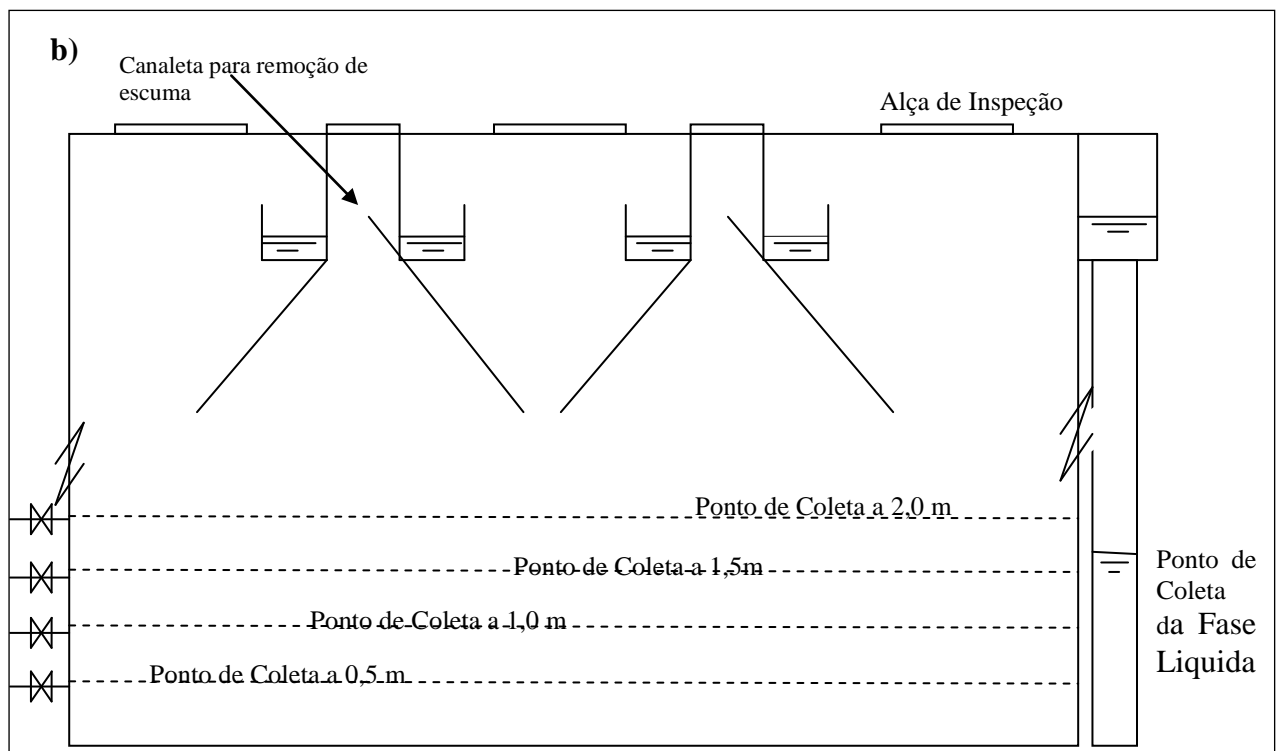
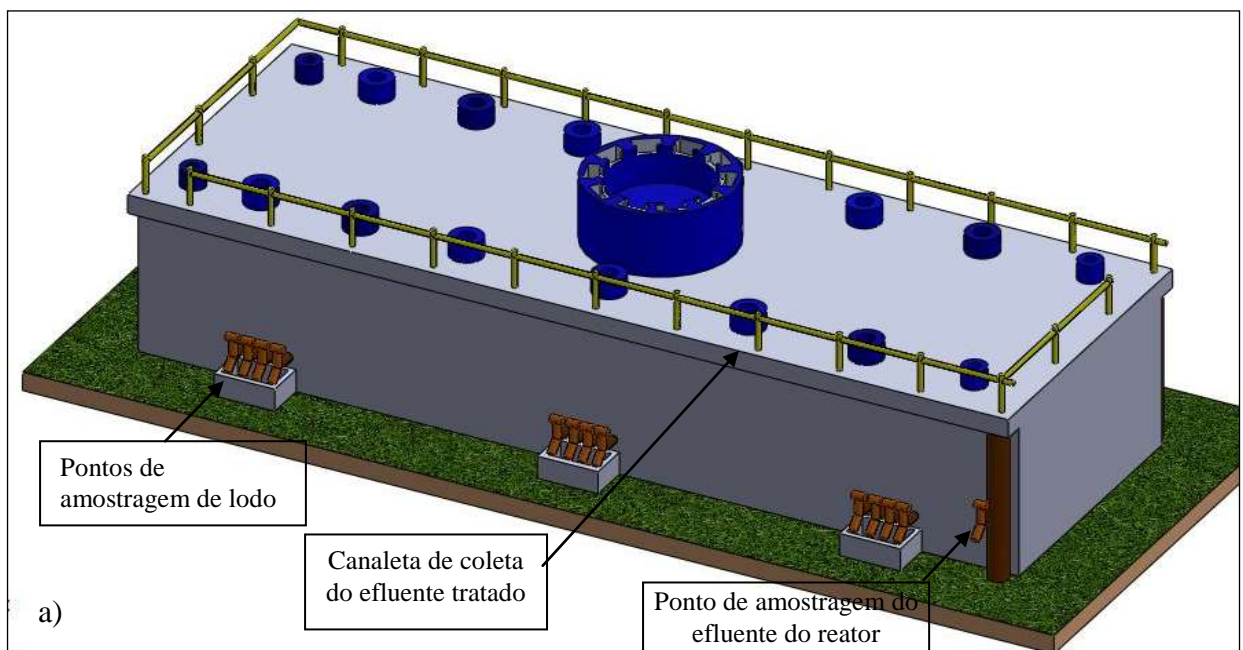


Figura 4.5 – Identificação dos pontos de amostragem de lodo e de efluente tratado nos reatores UASB da ETE Laboreaux: a) representação externa ao reator; b) representação interna ao reator

4.1.5 Retorno de Lodo

O retorno de lodo aos reatores UASB foi realizado através da estação elevatória de retorno de lodo (ERL – ver fluxograma Fig. 4.3), equipada com duas bombas centrífugas de 5 CV de potência. O sistema de automação da ETE possibilitava a operação das bombas em regime semi-contínuo, em ciclos horários (30 minutos por decantador – 26 de bombeamento e quatro minutos de descanso), durante 24 horas. Durante a pesquisa, em cada ciclo de operação da ERL, por decantador, era bombeado um volume de lodo secundário equivalente a 1,26 m³, por batelada (volume compreendido entre os níveis 0,70 e 1,20 m do poço de sucção), totalizando 2,52 m³/h (0,70 L/s). O retorno de lodo era acionado quando o nível de lodo no poço de sucção chegava a 1,20 m, sendo desligado quando o nível atingia 0,70 m. Neste momento, a válvula de descarte do sistema de decantação (DS1 ou DS2) era acionada para enchimento do poço de lodo e reinício da recirculação de lodo para a elevatória de esgoto bruto 2 (EEB 2 - ver Fig. 4.3). A Figura 4.6, a seguir, mostra o fluxograma esquemático do sistema de bombeamento de lodo na ETE Laboreaux.

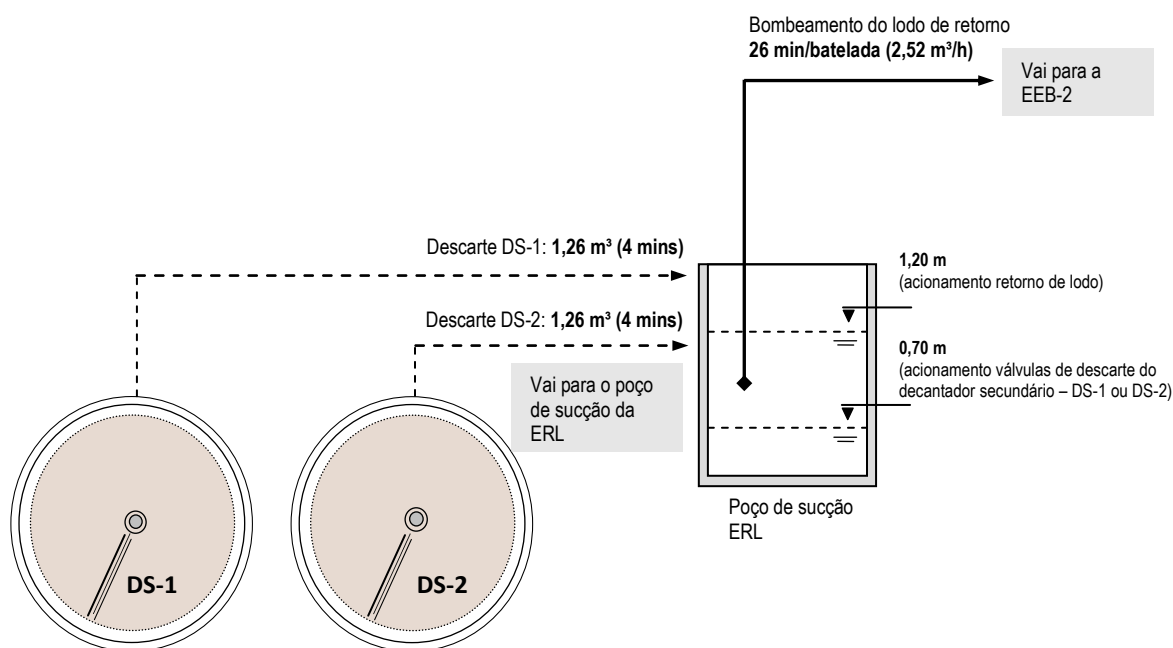


Figura 4.6 - Fluxograma operacional do retorno de lodo secundário.

4.2 Teste com Garrafa de van Dorn

Com intuito de verificar a relação entre perda de sólidos nos efluentes e a concentração de lodo nas alturas superiores (> 2,0 m) do compartimento de digestão, visto a alta concentração

de sólidos observadas na fase 2, durante a 3ª fase da pesquisa realizou-se também amostragens do conteúdo dos decantadores dos reatores 1 e 4, ao longo de suas profundidades. Com esse procedimento, queria-se inferir até que ponto o excesso de lodo no compartimento de digestão havia adentrado ao compartimento do decantador, facilitando a sua perda juntamente com o efluente do reator.

Através da abertura da tampa de inspeção do compartimento de decantação, tomou-se como ponto de início da coleta de amostras o nível do efluente na canaleta de recolhimento de efluente depurado. A partir desse nível mais elevado (NA operacional do reator), foram tomadas outras 3 amostras de líquido/lodo ao longo da profundidade do decantador, respectivamente a 0,30, 1,30 e 1,50 m (altura onde a parede da coifa foi tocada) de profundidade. Esse último ponto de amostragem coincidiu com a região da abertura entre digestão e seperador. A Figura 4.7 ilustra o procedimento de coleta.

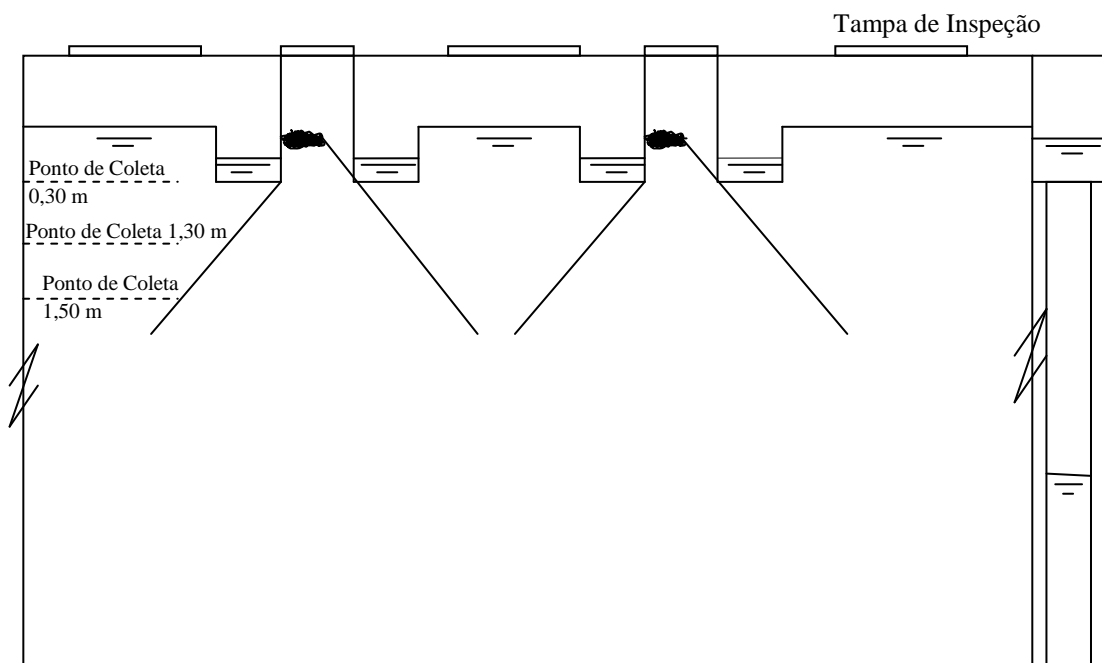


Figura 4.7 – Pontos da coleta de líquido e lodo com garrada de van Dorn, ao longo da profundidade do decantador dos reatores UASB.

4.3 Fases de Estudo

Dado o comportamento instável dos sistemas biológicos em escala plena e necessidade de adequação do sistema ao objetivo do estudo, as modificações realizadas ao longo da pesquisa são apresentadas na Tabela 4.4, donde se apresenta a duração das fases em dias e uma descrição das principais atividades realizadas na fase.

Tabela 4.4 – Caracterização das fases operacionais da pesquisa

Fase Operacional	Duração (dias)	Descrição	Sistemática de descarte de lodo
0	174	Fase de monitoramento e estudo do comportamento dos reatores operando em sub-carga, com TDH médio de 17 h. Essa era a condição usual de operação da ETE, tendo em vista que as vazões afluentes à mesma ainda estavam bem abaixo da vazão de projeto.	Descarte de 10 m ³ de lodo por reator, por dia. Seguindo rotina de rodizio, conforme o manual de projeto da ETE.
1	146	A partir da Fase 1 (até a Fase 4), ajustou-se a vazão de alimentação em 4 dos 8 reatores da ETE, objetivando que os mesmos pudessem operar com TDH próximo ao de projeto (9 horas), de modo a conferir maior representatividade aos resultados da pesquisa. Dessa forma, os reatores UASB 1, 2, 3, e 4 passaram a receber, igualmente, quase toda a vazão afluente à ETE, com a vazão residual sendo encaminhada para os demais reatores (5, 6, 7 e 8).	Descarte de 10 m ³ de lodo por reator, por dia. Seguindo rotina de rodizio, conforme o manual de projeto da ETE.
2	45	Implementação de rotina de interrupção da alimentação dos reatores UASB 1 e 2 por uma hora, de modo a se conseguir maior adensamento do lodo antes da operação de descarte, o que poderia resultar em maiores descartes de lodo para um mesmo volume processado pelo filtro prensa. O descarte de lodo dos reatores 3 e 4 foi mantido como antes, sem a interrupção de alimentação desses reatores.	Descarte de 10 m ³ de lodo por reator, por dia. Com paralização dos reatores 1 e 2 por uma hora, para posterior descarte. E descarte normal dos reatores 3 e 4. Os demais reatores seguiram o procedimento operacional padrão.
3	87	Visando reduzir a quantidade de lodo descartado e reduzir a perda de sólidos nos reatores, foi então implementada nova rotina para descarte de lodo dos reatores, com descartes maiores nos reatores 1 e 2, e menores nos reatores 3 e 4. Para esta fase, reviu-se o coeficiente de produção de lodo nos reatores, considerando o acréscimo de carga orgânica oriunda do lodo de retorno.	Descarte de 20 m ³ de lodo dos reatores 1 e 2, e de 10 m ³ dos reatores 3 e 4 por dia. Os demais reatores seguiram o procedimento operacional padrão.
4 A	56	Retirada de passivo de lodo até que a concentração à altura de 2,0 m fosse reduzida a valores próximos a 0,5%, de modo a garantir que não haveria lodo no interior do compartimento de decantação dos UASB. Foi também removido o passivo de lodo dos DS através da recirculação contínua de lodo por 15 dias. Durante essa etapa da pesquisa fez-se necessário o aumento das bateladas do filtro prensa de 6 para 8 por dia, fazendo assim com que a capacidade de desidratação por dia da ETE de 60 m ³ fosse utilizada.	Descarte de 30 m ³ de lodo por reator, por dia (um reator por semana, de 2 ^a a 6 ^a feira) e descarte de 10 m ³ por dia dos demais reatores. Sendo o descarte realizado apenas nos reatores da pesquisa. Ex.: 1 ^a Semana: descarte de 30 m ³ R1 e descarte de 10 m ³ R2,R3 e R4. 2 ^a Semana: descarte de 30 m ³ R2 e descarte de 10 m ³ R1,R3 e R4.
4 B	117	Monitoramento e manutenção do perfil de lodo nos reatores UASB através de descarte de 8 m ³ de lodo por reator, por dia, considerando a concentração do lodo a 1% na altura de descarte (2,0 m).	Descarte de 8 m ³ de lodo dos reatores 1 a 4 por dia. E retorno do descarte de 10 m ³ por dia dos demais reatores, visando a retirada do passivo de lodo e problemas futuros de perda de sólidos.

4.4 Índice Volumétrico de Lodo Diluído com Agitação (IVLDA)

Os testes de Índice Volumétrico de Lodo foram realizados através da adaptação da metodologia descrita por Jordão et al. (1999). Para a realização dos testes, utilizou-se uma coluna de acrílico de 2 L dotada de paletas giratórias que trabalhavam a 2 rpm com vista a redução do efeito de parede, e, dada às elevadas concentrações do lodo de retorno detectadas em todas as amostras tomadas na elevatória de retorno no início dos testes, foi necessário utilizar o teste de Índice Volumétrico de Lodo Diluído (IVLD), com fator de diluição da amostra de lodo de oito vezes, com o efluente do decantador secundário, de modo a possibilitar a visualização da interface líquido/lodo no interior da coluna de sedimentação (Figura 4.8). Sendo o teste chamado de Índice Volumétrico de Lodo Diluído com Agitação.

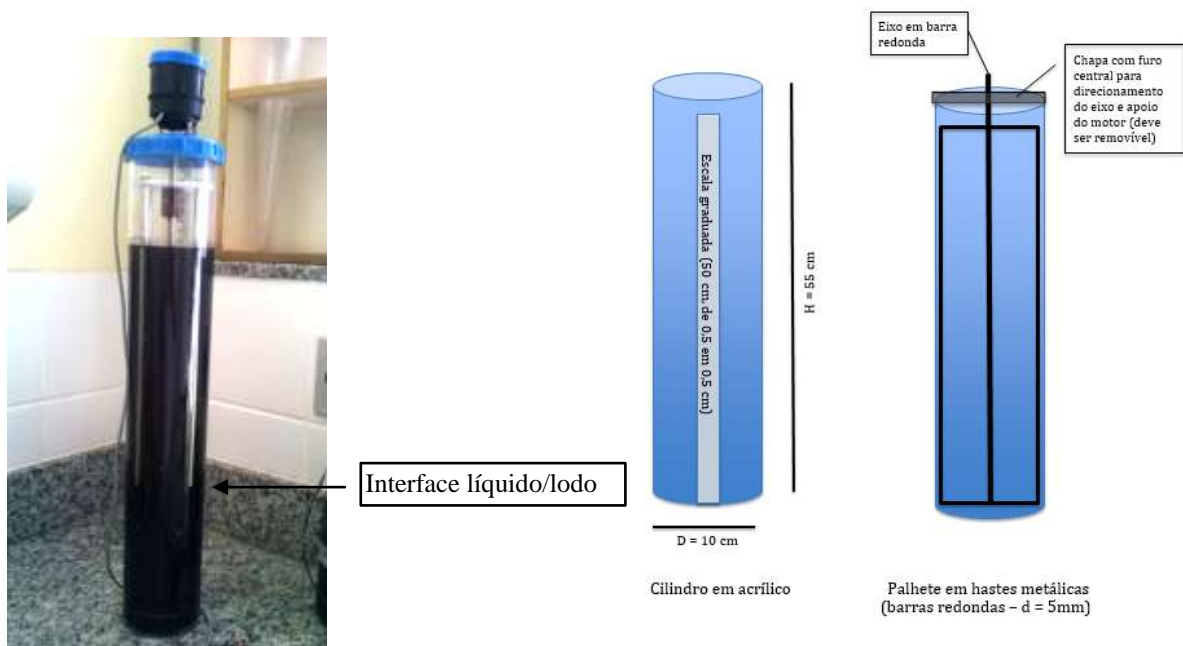


Figura 4. 8 – Esquema do aparato de IVLDA e Interface líquido/lodo

4.5 Análises estatísticas

Dada as características de distribuição não normal dos dados tabulados, realizou-se análise estatística, através do *software Statistica 8.0*, de Kruskal-Wallis para verificar se no conjunto de dados estudados apresentavam diferenças entre si ao nível de significância de 5%.

Uma vez constatada a diferença entre as fases, testes de comparações múltiplas foram realizados com intuito de definir quais fases diferiram entre si, uma vez que o teste de Kruskal-Wallis apenas apresenta se houve diferença ou não. Sequenciando os trabalhos

estatísticos, foram realizados testes de correlação de Spearman entre as variáveis estudadas na Fases 1 a 4.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Condições Operacionais Durante as Fases da Pesquisa

A Figura 5.1 apresenta a vazões médias ao longo dos 645 dias de monitoramento dos quatro reatores da ETE *Laboreaux* e os correspondentes tempos de detenção hidráulica nos reatores UASB. Na Figura 5.2 são mostradas as vazões e os TDH (valores médios) dos reatores UASB ao longo das 24 horas do dia, para as fases 0 a 4.

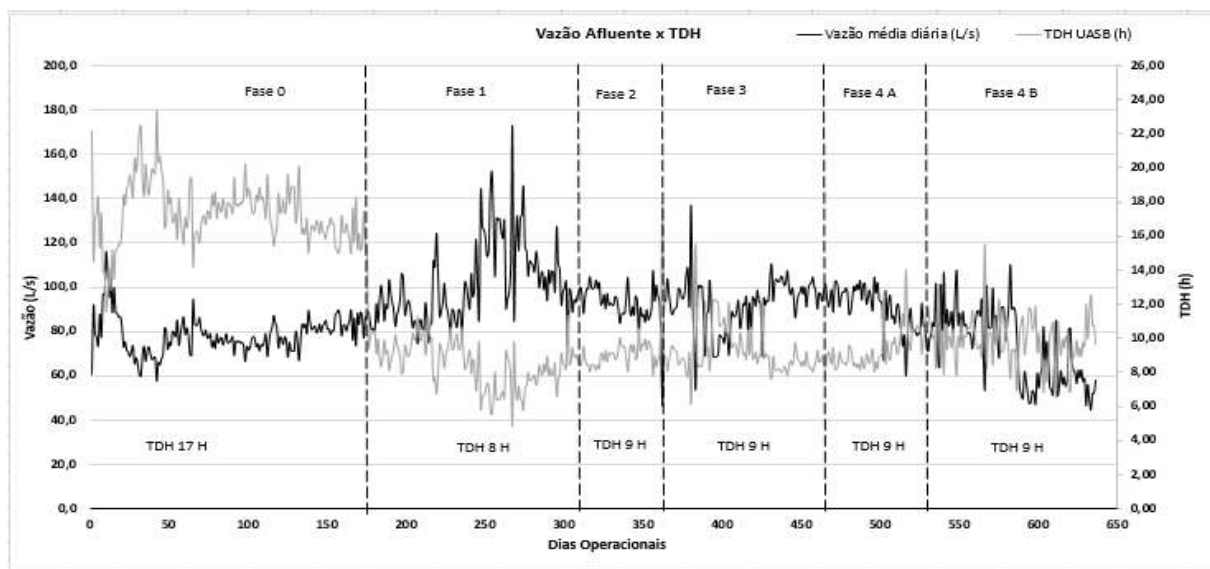


Figura 5.1 – Hidrograma de Vazão *versus* Tempo de Detenção Hidráulica (TDH)

A análise das Figuras 5.1 e 5.2 permite os seguintes comentários:

- A adequação do TDH médio da ETE *Laboreaux* de 18 h para 9 h foi essencial para o ideal monitoramento da estação, uma vez que o TDH ajustado aproxima-se do que é usualmente definido em projeto de reatores UASB, o que contribui também para que outras estações possam reproduzir o estudo desenvolvido.
- As vazões médias afluentes (Figura 5.1) aos quatro reatores da ETE *Laboreaux* na Fase 0 se mantiveram a maior parte do tempo entre 60 e 90 L/s, apresentando aproximadamente 50 % de vazão inferior ao valor de projeto (170 L/s). Nas Fases 1 a 4, os valores de vazão se mantiveram entre 80 e 105 L/s, com um pico de 172 L/s verificado no dia 26/12/2013, superior a vazão de projeto.
- Os TDHs médios dos quatro reatores (Figura 5.1) se mantiveram na Fase 0 entre 12 e 19 horas, apresentando valores inferiores à média de 18 horas observada na Fase em questão. Após adequação do TDH nos reatores, Fases 1 a 4, nota-se que o TDH se manteve entre 8 e 10 horas, apresentando valores variando entre 6 e 8 horas entre os dias 255 e 297 em função do aumento da vazão afluente devido ao período de chuva.

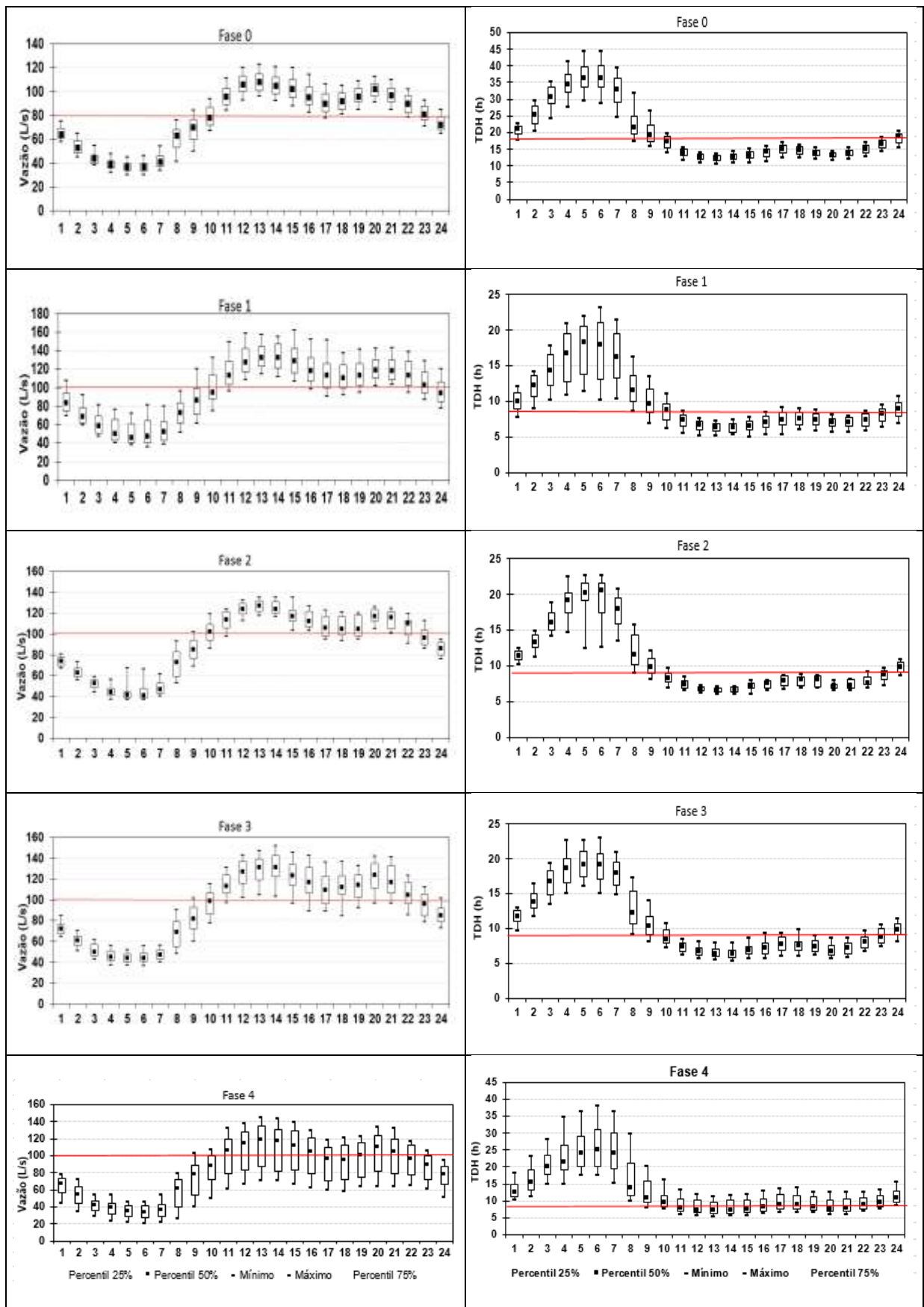


Figura 5.2 - Vazões médias diárias e TDH médios diário

- Em relação a Figura 5.2, os perfis de variação das vazões afluentes à ETE Laboreaux mostram que os reatores UASB durante as Fases 0 a 3 operaram mais da metade do dia (10:00 as 23:00 horas – 13 horas) com TDH abaixo do médio. A Fase 4 apresentou melhor ajuste de TDH, como o observado o TDH médio diário no período de 10:00 as 23:00 horas se manteve próximo aquele de projeto (9 horas).
- A variação do TDH apresentado nas Fases 0 a 3 pode estar relacionada na Fase 1 com o período de resiliência dos reatores UASB devido ao aumento da vazão afluente. Já para as Fases 2 e 3, provavelmente as alterações da comporta distribuidora de vazão ocasionou desqualificação das vazões distribuídas aos reatores.

A Tabela 5.1 apresenta a média dos principais parâmetros operacionais dos reatores UASB e dos decantadores secundários para as cinco fases da pesquisa. A análise da tabela permite os seguintes comentários:

- Os parâmetros médios mostrados na Tabela 5.1 indicam que não existe sobrecarga hidráulica nas unidades de tratamento estudadas, uma vez que as vazões mensuradas foram inferiores a de projeto.
- O TDH mais elevado na fase 0 implicou em menores valores de velocidade superficial, o que pode ter propiciado alta sedimentação de sólidos nos reatores.
- Em relação às cargas orgânicas, nota-se que na Fase 0 os valores de carga orgânica afluente foram aproximadamente 50 % inferiores aos valores notados nas demais fases.

Tabela 5.1 – Médias dos principais parâmetros operacionais das unidades de tratamento

Fase	Vazão afluente	Carga orgânica afluente	Parâmetros dos reatores UASB			Parâmetros dos DS	
	Q L.s ⁻¹	COafluente kgDQO.d ⁻¹	TDH H	Velocidade superficial m.h ⁻¹	COV kgDQO.m ⁻³ .d ⁻¹	TAS m ³ .m ⁻² .d ⁻¹	TDH H
0	78,5	2.334	17,3	0,05	0,4	10,8	13,3
1	101,2	5.058	8,9	0,11	1,8	22,3	6,5
2	91,3	6.492	9,3	0,11	1,8	20,1	7,2
3	92,6	5.249	9,2	0,11	1,6	20,4	7,1
4	98	5.623	9,4	0,11	2,2	21,6	6,7

5.2 Efeito do Retorno de Lodo dos DS sobre o Desempenho dos reatores UASB

O efeito da adequação do TDH e retorno de lodo sobre os reatores estudados pode ser avaliado de forma geral pelas Figuras 5.3 a 5.5, que apresentam os gráficos de série histórica e boxplot dos parâmetros DQO, SST e SSed, para os pontos de tomada de amostra CDV 1 (caixa de distribuição de esgoto, onde o esgoto bruto afluente é misturado ao lodo de retorno vindo dos decantadores secundários), EF (efluente final da estação); R1, R2, R3 e R4 (reatores UASB). A análise das Figuras 5.3 a 5.5 permite os seguintes comentários:

5.2.1 Fase 0

- O valor médio afluente aos reatores anaeróbios foi de 550 mg/l de DQO, resultando em uma carga orgânica média de 2334 kgDQO/d afluente a estação, ou seja 291,75 kgDQO/reator.d (considerando 8 reatores). Para esse período da pesquisa, nota-se que a concentração de DQO efluente dos reatores variou de 147 a 168 mg/l, apresentando uma eficiência média de remoção da ordem de 73 %. Notam-se também concentrações efluentes baixas para os parâmetros SST e SSed, resultando em elevadas eficiências de remoção, de 84 e 88 %, respectivamente.
- Os valores de eficiências de remoção observados (Figuras 5.3 a 5.5) se aproximam dos valores comumente observados em estação que operam sem retorno de lodo, o que permite deduzir que os reatores não sofreram impactos negativos nesse período, operando de forma estável. Sobre os dados apresentados, cabe ressaltar que apesar dos elevados percentuais de remoção observados na fase 0 (TDH de 18 h) existe uma grande inviabilização de dimensionamento de reatores com o tempo de detenção hidráulico adotado, uma vez que demandaria áreas maiores e maior quantidade de reatores.

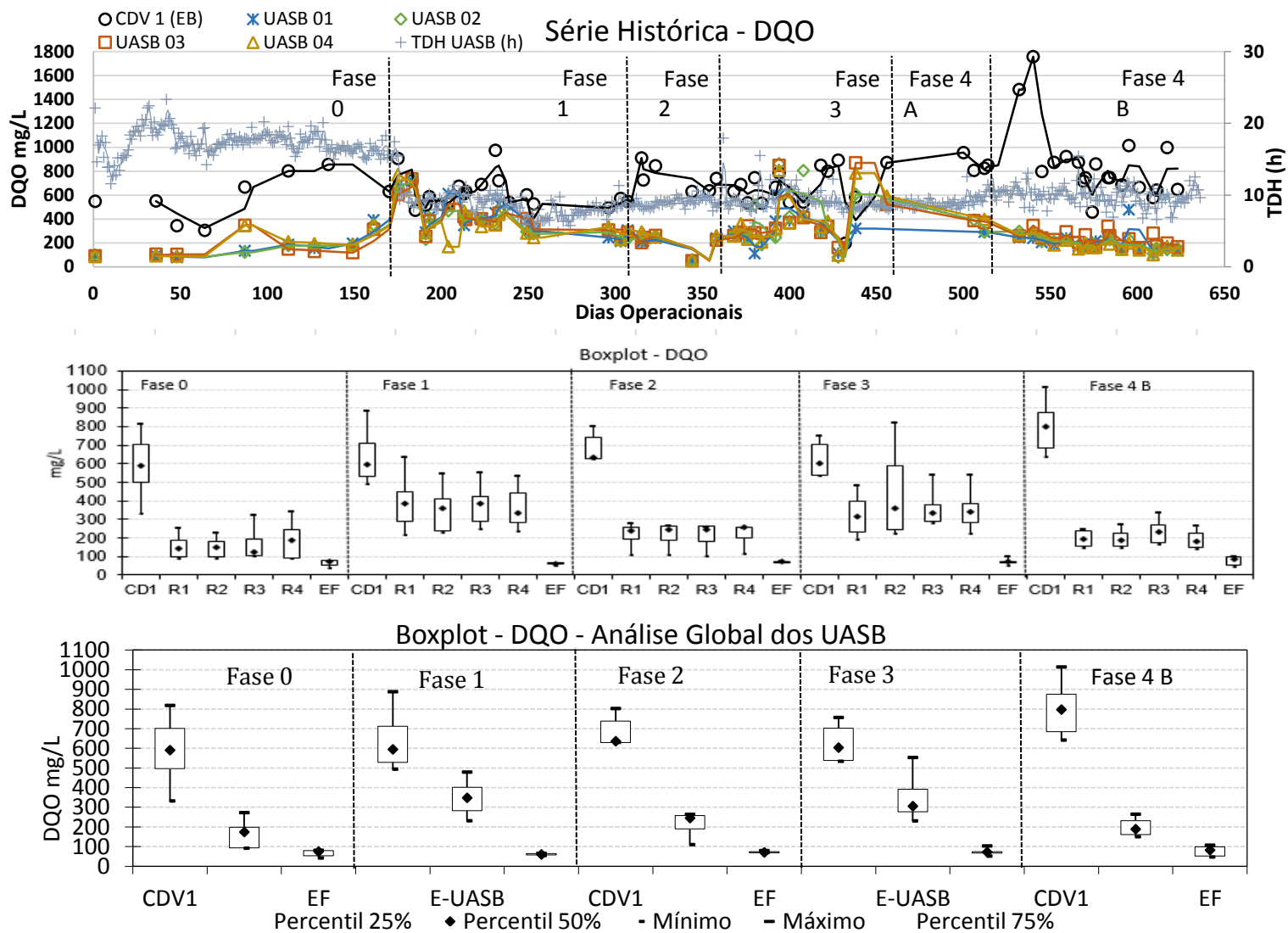


Figura 5.3 - a) Série Histórica, b) Boxplot e c) Boxplot análise Global para DQO

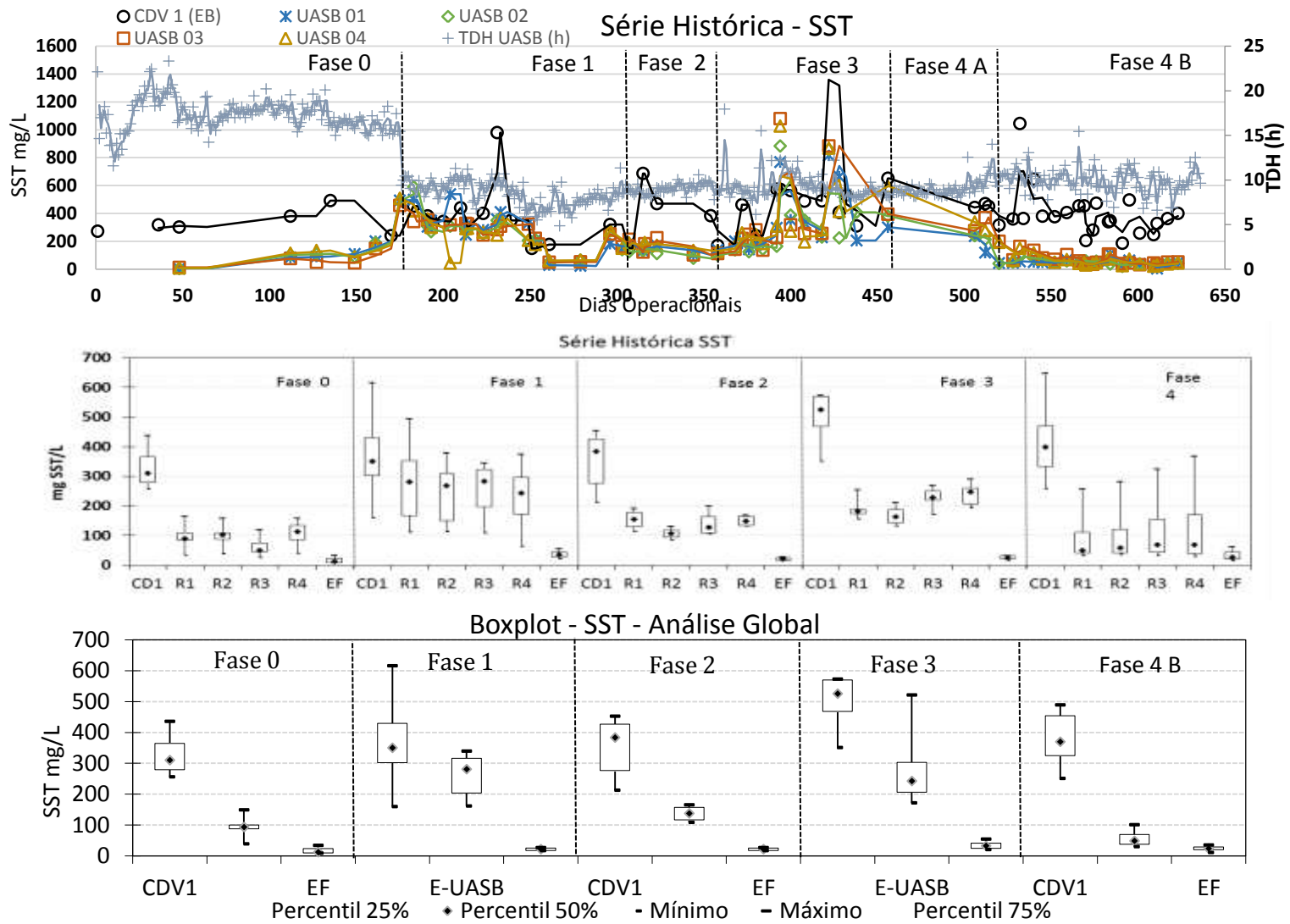


Figura 5.4 - a) Série Histórica, b) Boxplot e c) Boxplot análise Global para SST

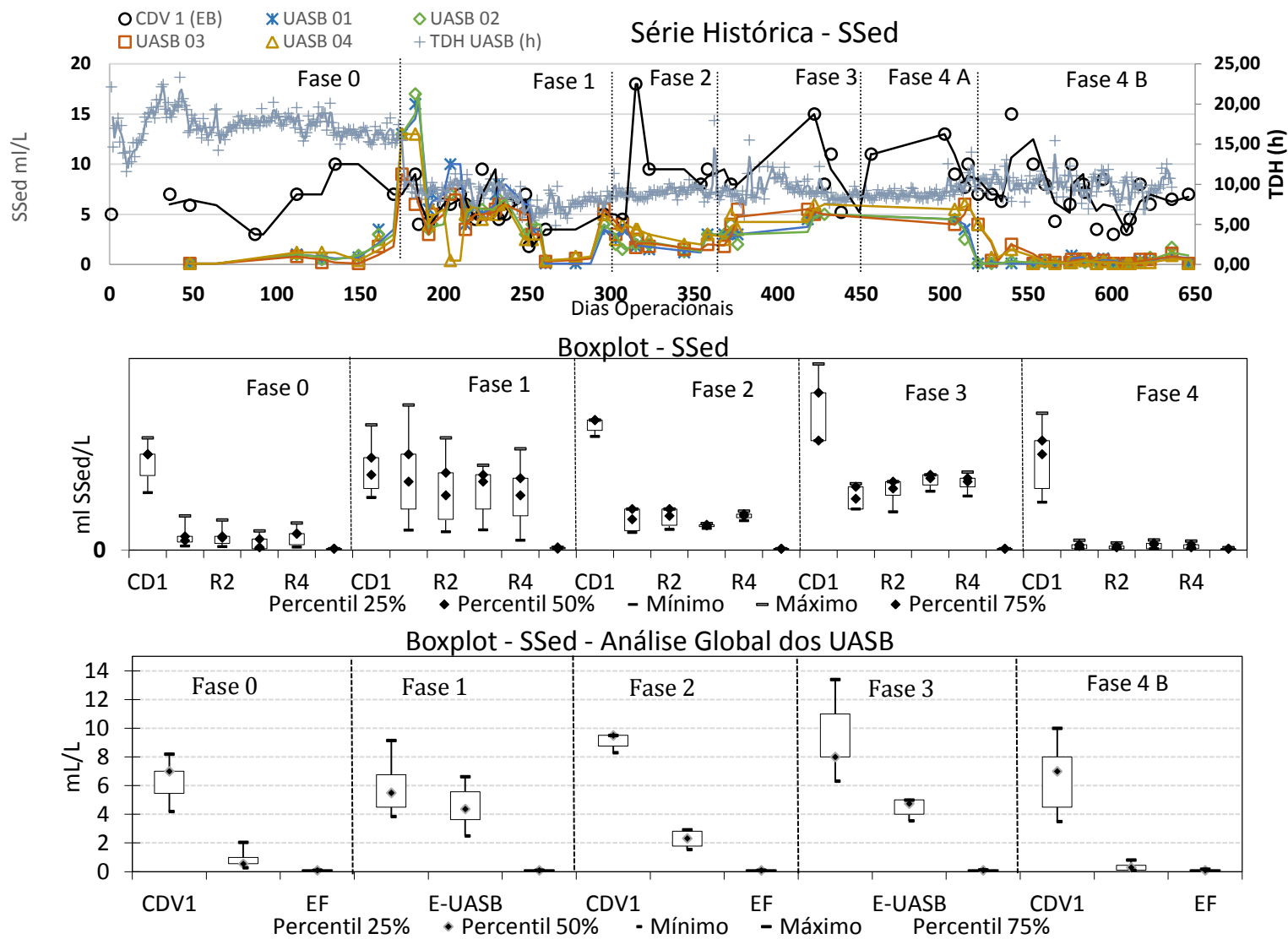


Figura 5.5 - a) Série Histórica, b) Boxplot e c) Boxplot análise Global para SSed

5.2.2 Fase 1

- O aumento do TDH nos reatores implicou em instantânea perda de eficiência, com concentrações efluentes próximas às afluentes. Acredita-se que o declínio instantâneo de eficiência foi impulsionado pelo aumento da vazão afluente, que ocasionou o revolvimento de sólidos que se encontravam sedimentados, expulsando-os do reator. Tal assertiva foi observada em campo, onde após uma hora de adequação de TDH, os valores efluentes de SSed foram da ordem de 60 ml/L, nos quatro reatores. Estas observações também são mencionadas na literatura por Silva e van Haandel (2014), que observaram, em trabalho realizado com reatores UASB em escala demonstração, a deterioração da qualidade do efluente anaeróbio decorrente do retorno de lodo aeróbio, notadamente sobre a concentração de sólidos sedimentáveis, que aumenta muito quando a carga de lodo aeróbio aumenta.
- O acréscimo da vazão em aproximadamente 100 % em cada um dos 4 reatores resultou na elevação da carga orgânica afluente média para 1265 kgDQO/reator.d (aumento de 71 % em relação a fase 0), ocasionando conseqüentemente o aumento da produção de lodo.
- A observação da Figura 5.3 c) aponta para desempenho insatisfatório dos reatores, produzindo efluente com concentrações inaceitáveis, apresentando baixa eficiência de remoção de DQO, na ordem de 41%, e concentração efluente média de 355 mg/l.
- A perda de sólidos no efluente final dos reatores foi elevada, com concentração efluente de SST variando de 204 a 224 mg/L, representando apenas 38% de remoção de sólidos (Figura 5.3 b).
- A concentração efluente média de sólidos sedimentáveis foi de 3 ml/L e eficiência de remoção de 50 %. Nota-se na Figura 5.5 a) que os valores efluentes estiveram sempre próximos aos valores de afluentes aos UASB demonstrando a baixa eficiência de remoção do sistema.
- De modo geral, tais valores são preocupantes do ponto de vista operacional, uma vez que perdas elevadas de biomassa no reator UASB podem não ser estabilizadas nos filtros biológicos percoladores, sendo o material particulado encaminhado em boa parte para os decantadores, onde dada a elevada carga de sólidos estes podem não sedimentar e serem lançados com o efluente final.

5.2.3 Fase 2

- Durante essa fase de estudo, a carga orgânica média afluente aos reatores foi de 1623 kgDQO/d, 30 % superior ao praticado na fase anterior. Entretanto, com base nas eficiências

apresentadas, nota-se que os valores de eficiência de estabilização de matéria orgânica fora satisfatório, com remoção de DQO média de 65% (245 mg/L) visto a concentração de entrada de 690 mg/L.

- Nota-se também aumento na eficiência de remoção de SST, quando comparada à fase 1, apresentando valores médios de 62%; e baixa perda de sólidos sedimentáveis, com 77% de remoção (Figura 5.4 e 5.5).
- Os valores encontrados, próximos aos valores usuais de eficiência de reatores sem retorno de lodo, foram obtidos, possivelmente, pelo fato da paralisação do reator, antes do descarte, permitir o descarte de lodo que se encontrava acima do separador trifásico e do registro superior de descarte (altura de 1,75 m).
- No entanto, a paralisação dos reatores demonstrou-se inviável, dado o processo manual de suspensão e posterior abaixamento das comportas da caixa distribuidora de vazão, podendo tal procedimento interferir na correta equalização da vazão afluyente aos reatores, como pode ser observado nas Figuras 5.1 e 5.2 a variação diária em torno do TDH médio.

5.2.4 Fase 3

- Nessa fase da pesquisa, cabe destacar que houve redução da carga orgânica afluyente nos reatores UASB de aproximadamente 20%, o que equivale à afluência de 1920 kgDQO/reator.d, demonstrando assim que a redução na perda de sólidos alcançadas na fase anterior contribuiu para o decréscimo no passivo de lodo dos decantadores secundários.
- Entretanto, devido a problemas operacionais como redução e férias de funcionários da ETE, quebra de placas do filtro prensa, falta de cloreto férrico e sobrecarga dos leitos de secagem, além das paralisações devido aos jogos da Copa do Mundo de 2014, nota-se (Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 c) que houve queda de eficiência dos reatores UASB, quando comparada Fase 2, com remoção média de 40% para DQO, 50% para SST e eficiência máxima de 45% para sólidos sedimentáveis.

5.2.5 Fase 4. A

- Devido aos problemas operacionais anteriormente citados, fez-se necessário a interrupção das análises para adequação dos reatores UASB às necessidades da pesquisa. Para tanto, no período que envolveu o mês de agosto e a primeira semana de setembro foi retirado todo o passivo de lodo dos UASB que se encontrava a altura de 2,0m por meio do aumento do número de prensagens do filtro prensa e aumento do volume de lodo descartado. Durante esse período o passivo de lodo acumulado no decantador secundário também foi retirado através da recirculação contínua (24 horas) por 15 dias.

5.2.6 Fase 4. B

- Nessa fase da pesquisa, a carga orgânica afluyente aos reatores foi de 1405 kgDQO/reator.d, o que mostra que a retirada do passivo de lodo do decantador contribui para redução da carga orgânica afluyente, devido à alta concentração do lodo de retorno, de aproximadamente 3%.
- Conforme os resultados apresentados nas Figura 5.3 a 5.5, é notório a melhora dos efluentes dos reatores UASB no que diz respeito à concentração dos parâmetros DQO, SST e SSed devido a retirada do passivo de lodo dos reatores e decantador.
- Nota-se que nesta fase a eficiência média de remoção de DQO foi de 75 %, valor superior ao apresentado na Fase 2. De acordo com a Figura 4.3 c), nessa fase houve também menor variação nos dados de concentração efluente dos reatores, corroborando com notória melhora do desempenho do UASB.
- A análise da Figura 4.4 c) demonstra que a eficiência média de remoção de SST foi 85 %, a maior observada para as fases de estudo com TDH de 9 horas. O valor apresentado de eficiência de SST sugere que a causa de perda de eficiência nos reatores está nas altas concentrações de sólidos encontrados no ponto de coleta de 2,0 m, o que ocasiona perda excessiva no efluente dos UASB e conseqüente piora da caracterização geral (DQO, SST e SSed) do efluente.
- Nota-se na Figura 5.5 c) que a Fase 4 B apresentou melhor eficiência de remoção de SSed (~95%) quando comparado com as demais fases, resultando em valor de eficiência de remoção superior aquele observado na Fase 0 com TDH de 18 horas.
- Em termos gerais, cabe ressaltar que a Fase 4 apresentou eficiências de remoção compatíveis com os valores usualmente encontrados em estações de tratamento de esgoto que operam sem retorno de lodo, permitindo assim inferir que o retorno de lodo não ocasionou impactos negativos aos reatores UASB.

5.2.7 Análise Global da Estação

- Ressalta-se que apesar da baixa eficiência encontrada em algumas fases da pesquisa, a estação apresentou desempenho global médio de remoção de DQO para as fases 0, 1, 2, 3 e 4 de 87, 88, 88, 88 e 89 %, respectivamente.
- No que se refere à concentração de sólidos totais suspensos no efluente final, a estação apresentou eficiência global durante as fases de estudo de 95, 90, 94, 94 e 94 %.
- Em relação ao lançamento de sólidos sedimentáveis os valores encontrados foram sempre abaixo de 0,1 mL/L.

- Os valores apresentados permitem inferir que o retorno de lodo não é prejudicial ao desempenho global da ETE, que quando bem operada pode apresentar eficiência de remoção relevante, e produzir efluente com qualidade superior ao estabelecido pelos padrões de lançamento.

5.3 Dinâmica do Lodo nos Reatores UASB

5.3.1 Perfis de sólidos nos reatores da pesquisa

A Figura 5.6 apresenta a evolução global dos perfis de sólidos totais (ST) nos reatores UASB utilizados na pesquisa, durante as cinco fases operacionais (fase 0 à fase 4). Cada gráfico representa, para cada ponto de amostragem de lodo (0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 m), as médias das concentrações obtidas para os 4 reatores, nas diferentes fases. A análise da Figura 5.6 permite os seguintes comentários:

- A dinâmica de sólidos dos reatores ao longo das 4 primeiras fases (fases 0 a 3) apresentaram concentrações semelhantes, com o lodo se apresentando bastante concentrado na parte mais inferior do reator (ponto de amostragem 0,50 m) e um pouco menos concentrado nas demais alturas de amostragem (1,0, 1,5 e 2,0 m). No ponto amostral 0,50 m as concentrações de ST estiveram sempre entre 4,0 e 4,5%, que são típicas de reatores UASB tratando esgoto doméstico. Nos pontos amostrais superiores (1,0 a 2,0 m), o lodo apresentou concentrações de ST um pouco mais baixas que junto ao fundo do reator, conforme esperado, variando entre 2,0 e 3,0%. Todavia, esperava-se que as concentrações fossem mais baixas, da ordem 0,5%, nos pontos de amostragem mais elevados do compartimento de digestão, de modo a caracterizar a transição do leito de lodo (concentrações acima de 1,5%) para a manta de lodo (concentrações abaixo de 1,0%).
- Apenas na fase operacional 4 foi possível observar um perfil de sólidos diferente das demais fases, o que certamente foi devido à melhor estratégia de descarte de lodo praticada durante esta fase (ver Tabela 4.3). Com o incremento dos descartes de lodo praticados durante a fase 4A, foi possível remover o excesso de lodo que havia nos reatores da pesquisa, o que resultou na redução significativa das concentrações de sólidos nos pontos mais elevados do compartimento de digestão, cerca de 1,7% no ponto amostral 1,50 m e abaixo de 0,5% no ponto amostral 2,0 m. Cabe ressaltar que a evolução das concentrações de ST no ponto de amostragem a 2,0 m estão intimamente relacionadas com as eficiências médias de remoção de DQO e SST anteriormente citadas. A manutenção de baixas concentrações de lodo na parte superior do compartimento de digestão é essencial para que se possa evitar o acúmulo

de lodo no interior do compartimento de decantação, condição essa que se mostra muito importante para também reduzir a perda de sólidos e a deterioração da qualidade do efluente do reator.

- Analisando conjuntamente os perfis de sólidos mostrados na Figura 5.6 com as concentrações efluentes de DQO, SST e SSed mostradas nas Figuras 5.3 a 5.5, é possível observar que as fases 0 e 4 foram as únicas em que se obteve baixas concentrações desses parâmetros no efluente dos reatores da pesquisa. Infere-se que as baixas concentrações de DQO, SST e SSed estiveram relacionadas a menores perdas de sólidos com o efluente durante estas duas fases, as quais, por sua vez, foram decorrentes de: i) maior TDH (18 h) e menor velocidade ascensional ($v = 0,25$ m/h) durante a fase 0; e ii) menor concentração de lodo na parte mais elevada do compartimento de digestão ($< 0,5\%$ no ponto de amostragem 2,0 m).
- De modo geral, a manutenção de biomassa com concentração de 4 a 4,5 % na altura de 0,5 m, mesmo com a ausência de descarte de lodo a essa altura, pode ser importante para o retorno de lodo por amortecer as variações de carga orgânica e conferir maior resistência a choques hidráulicos por parte da biomassa. Possibilitando, ainda, a manutenção da biomassa com maior atividade biológica.

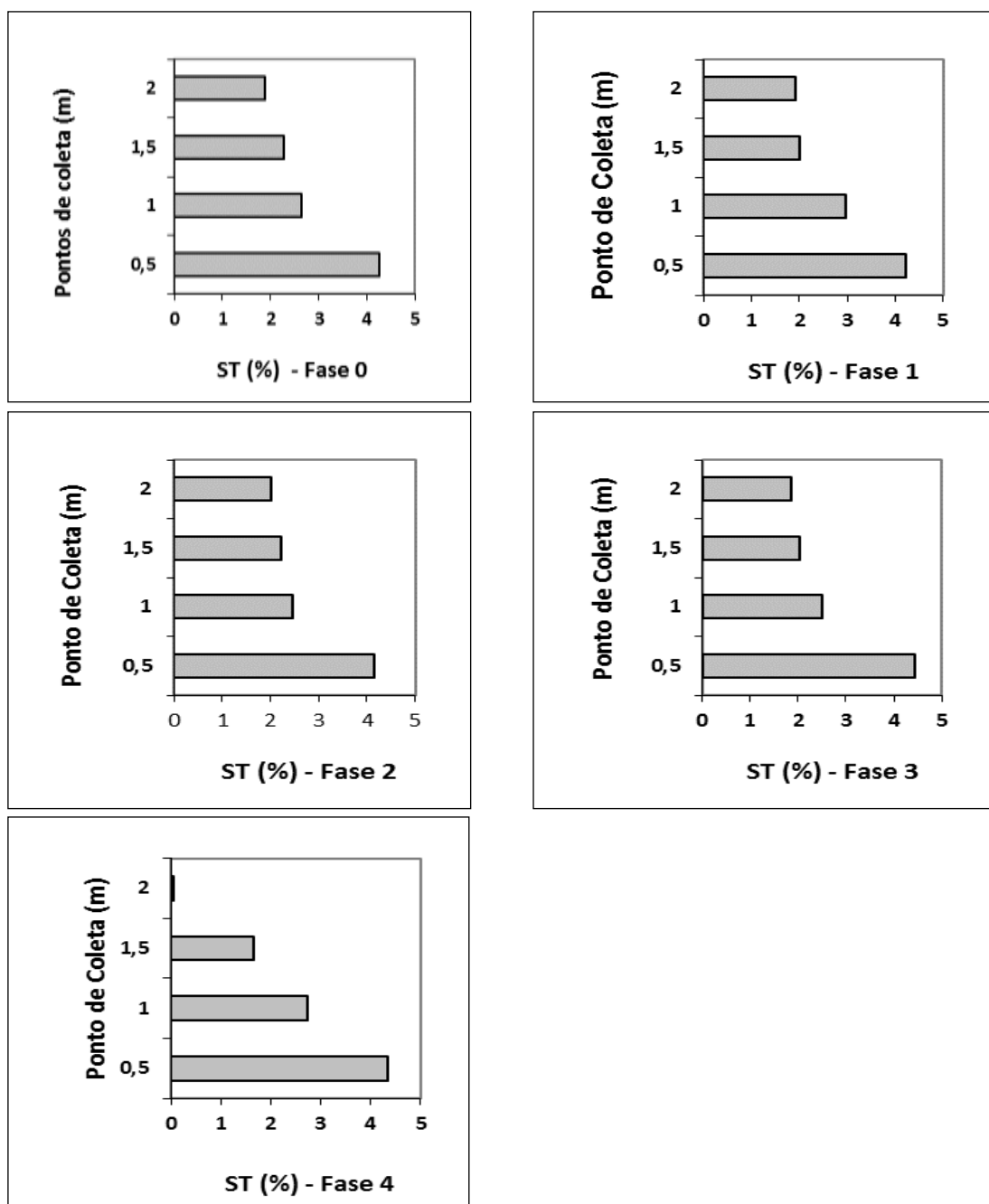


Figura 5.6 – Dinâmica de sólidos nos reatores UASB para as 5 fases da pesquisa

5.3.2 Verificação da presença de sólidos no interior do compartimento de decantação

A fim de trazer mais subsídios para a pesquisa, decidiu-se investigar, durante a fase 2, se a elevada concentração de sólidos no ponto de amostragem mais elevado do compartimento de digestão (2,0 m) não poderia estar, eventualmente, favorecendo a passagem de sólidos (lodo) para o compartimento de decantação. Para essa investigação complementar foi utilizada uma garrafa de van Dorn, conforme descrito na metodologia. As amostragens do conteúdo dos decantadores, em diferentes profundidades (0,30, 1,30 e 1,50 m), possibilitaram os seguintes comentários:

- Conforme mostrado na Figura 5.7, foi possível identificar a presença de lodo nos decantadores dos reatores 1 e 4, mas apenas na parte mais profunda (1,50 m) do reator 1. Já no reator 4, a presença de lodo foi detectada em todas as profundidades amostradas, inclusive a 0,30 m de profundidade, bem próximo à canaleta de coleta do efluente. Essa menor presença de lodo no decantador do reator 1 foi resultado dos melhores procedimentos de descarte adotados durante a fase 2 para este reator, conforme descrito na Tabela 4.3. Nesta mesma fase, o descarte de lodo no reator 4 foi realizado da maneira usual que vinha sendo feito nas fases anteriores, que não favoreciam a remoção mais efetiva do lodo disperso contido no reator.
- A manutenção do perfil de sólidos da Fase 4 B, conforme o definido para retorno de lodo, foi essencial para a melhora dos efluentes tratados pelos UASB, resultando em um efluente mais clarificado devido à baixa perda de sólidos nos reatores.



Figura 5.7 – Estratificação de sólidos ao longo da profundidade dos decantadores dos reatores R1 e R4 amostrados com a garrafa de van Dorn

5.4 Análise estatística de reatores UASB operando com TDH de 9 H

Comumente os reatores UASB são projetados para operar com TDH médio da ordem de 8 a 9 horas. Devido a isso, realizou-se o teste de Kruskal – Wallis (KW) seguido do teste de comparações múltiplas (nível de significância de 5 %) através do *software Statistica 8.0* para as 4 fases em que os reatores UASB da pesquisa operaram com o tempo de detenção de 9 h. Não foram realizados testes estatísticos para a fase 0 devido ser incomum a utilização do TDH de 18 h). A Tabela 5.2 apresenta os valores obtidos para o teste de KW, podendo-se observar que para todos os parâmetros analisados as diferenças encontradas foram significativas para o nível de significância de 5%.

Tabela 5.2 – Valores para o teste de Kruskal – Wallis

Parâmetro	DQO	SST	SSed
Resultado	0,00000604	0,000004473	0,00000052

$\rho < 0,05$

Na Tabela 5. 3 apresenta-se o resumo do teste de comparações múltiplas para os três parâmetros e as quatro fases estudadas, sendo destacado em vermelho as comparações significativas para o nível de 5%.

Tabela 5.3 – Teste de Comparações Múltiplas

Fases	DQO	SST	SSed
1 vs 2	Não	Não	Não
1 vs 3	Não	Não	Não
1 vs 4	Sim	Sim	Sim
2 vs 3	Não	Não	Não
2 vs 4	Não	Não	Não
3 vs 4	Sim	Sim	Sim

A análise da Tabela 5.3 permite os seguintes comentários:

- Notam-se diferenças significativas entre as fase 1 e 4 para todos os parâmetros. As diferenças entre as fases podem ser explicadas em função da grande perda de sólidos sedimentáveis ocorrida na fase 1, o que afetou diretamente as concentrações afluentes de DQO e SST.
- Para a Fase 1 vs 4, a retirada do passivo de lodo próximo ao defletor de gases (> 2,0 m), na Fase 4, contribui para estabilidade dos reatores permitindo que a operação voltasse a ser realizada com eficiências de remoção dentro da faixa de literatura, ou seja com valores de remoção superior ao observado na Fase 1.
- Nota-se que a comparação da Fase 3 vs 4 apresentou diferença significativa para todos os parâmetros, as diferenças entre as fases podem ser explicadas pela adequação do perfil de lodo na Fase 4, uma vez que como observado na Figuras 5.3 a 5.5, os problemas operacionais observados na Fase 3 contribuíram para o acúmulo de lodo nos reatores e déficit na eficiência de remoção.
- Para as demais fases não houve diferenças significativas uma vez que observou-se fases pequenas (aproximadamente 2 mês) com poucos dados, tornando-se assim, estatisticamente não significantes.

Buscando verificar a relação entre as concentrações observadas ao longo da pesquisa, apresentam-se na Tabela 5.4 os valores obtidos para as correlações de Spearman com nível de significância de 5 %, sendo destacado em vermelho os resultados significativos.

Tabela 5. 4 – Correlação de Spearman

	DQO	SST	SSed
Fase 1			
DQO	1	0,55	0,86
SST	-	1	0,88
Fase 2			
DQO	1	0,80	0,63
SST	-	1	0,32
Fase 3			
DQO	1	0,97	0,23
SST	-	1	0,11
Fase 4			
DQO	1	0,52	0,21
SST	-	1	0,33

$\rho < 0,05$

De acordo com a análise da Tabela 5.4, ressalta-se que :

- É notório a forte correlação na Fase 1 entre os parâmetros DQO e SSed e SST e SSed, confirmando assim, a hipótese que na Fase 1 a perda de eficiência foi ocasionada pela elevada perda de sólidos observada no reatores, principalmente sólidos sedimentáveis.
- Na Fase 2 devido à quantidade relativamente baixa de dados não observaram-se diferenças estatisticamente significantes.
- A Fase 3 apresentou forte correlação entre as variáveis DQO e SST, demonstrando que o gerenciamento ineficiente dos reatores UASB ocasionou perda significativa de sólidos no efluente dos reatores anaeróbios, resultando assim em queda na eficiência de tratamento. No que se refere aos SSed, a baixa correlação apresentada se deu devido aos poucos dados obtidos, uma vez que, com à redução do número de funcionários o volume de análises também reduziram.
- A redução da perdas de sólidos efluentes na Fase 4 mostrou-se estatisticamente correlacionada com o aumento da remoção de DQO como pode ser observado nas Figuras 5.3 a 5.5. A significativa correlação observada nessa fase aponta para a necessidade de manutenção de concentrações baixas de sólidos (<0,5%) próximo ao defletor de gases (ou

acima do último ponto de coleta). Além de reforçar a necessidade do controle da massa de lodo interna aos reatores.

De modo geral as análises estatísticas permitem inferir que a perda de eficiência dos reatores anaeróbios se deu em função da alta concentração de sólidos em pontos mais elevados dos reatores UASB, contribuindo assim para a piora da qualidade do efluente tratado. Ressalta-se que, quando bem gerenciado, o sistema torna-se aplicável ao tratamento de águas residuárias e de lodo descartado, como pode ser observado pelos resultados obtidos na Fase 4, mostrados nas Figuras 5.3 a 5.5.

5.5 Atendimento dos parâmetros DQO e SST aos limites estabelecidos

Com intuito de avaliar o desempenho dos reatores UASB durante as fases operacionais da pesquisa, buscando subsídios que sustentem a hipótese de que bem operados os reatores podem operar normalmente realizando o tratamento conjunto, realizou-se uma análise estatística percentual dos resultados obtidos em cada fase, para posterior comparação com os padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água a nível estadual através da Deliberação Normativa Conjunta 01/08 da COPAM/CERH que estabelece limite máximo de DQO de 180 mg/L e SST de 100 mg/L. Ainda visando o conhecimento do desempenho dos reatores pesquisados realizou-se uma comparação com os valores médios efluentes de reatores UASB encontrados em uma avaliação realizada por Oliveira e von Sperling (2005) em 116 ETEs nacionais, onde os autores apresentam valores de referência para os parâmetros DQO e SST iguais a 251 mgDQO/L e 85 mgSST/L, respectivamente.

5.5.1 Atendimento do parâmetros DQO aos limites estabelecidos

A Figura 5.7 ilustra os percentuais de atendimento das amostras por fase de pesquisa, para o parâmetro DQO, onde a linha vermelha indica o limite estabelecido pelo COPAM e a linha violeta o limite de referência esperado para reatores UASB estabelecido com base em estudo de Oliveira e von Sperling (2005).

Na fase 0 da pesquisa, observa-se que cerca de 50% dos resultados de DQO ficaram abaixo do limite da COPAM e 80 % abaixo do valor de referência para reatores UASB. Os elevados percentuais de atendimento são indicativos do ótimo funcionamento dos reatores UASB, e podem ser explicados, conforme o comentado no item 5.1.1, pelo elevado TDH operacional dos reatores nesta fase, o que resultou em baixa velocidade ascensional, 0,25 m/h (média),

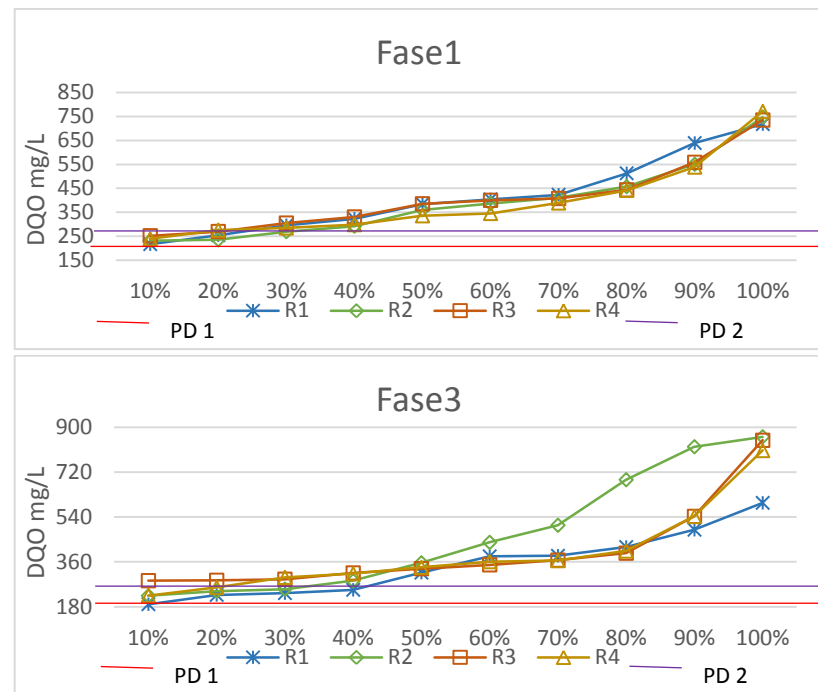
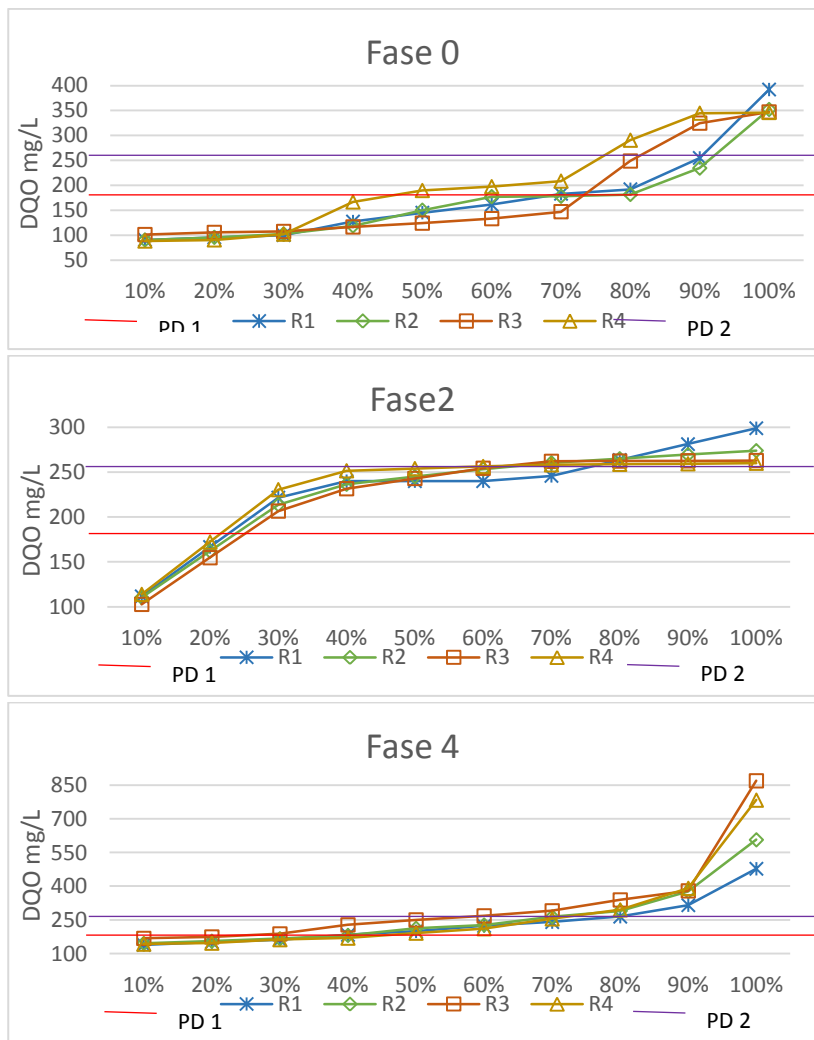
ocasionando assim maior tempo para sedimentação e digestão dos sólidos presentes nos reatores.

Já para a fase 1 nota-se que 100 % dos resultados obtidos encontram-se acima do limite COPAM e 20 % abaixo do valor de referência esperado para reatores UASB. O não atendimento do parâmetro DQO ao limite COPAM na fase 1 relaciona-se ao fato do choque hidráulico causado pelo aumento da vazão ter desestabilizado a biomassa do reator o que implicou em perda excessiva de SST no efluente do UASB, provavelmente devido ao carreamento de sólidos que se encontravam sedimentados no fundo do reator. Tal assertiva foi observada em campo, onde uma hora após o aumento da vazão nos reatores a concentração de sólidos sedimentáveis chegou a 60 ml/l, caindo para 40 ml/l duas horas após, e após 3 horas 15 ml/l, permanecendo com essa expulsão de sólidos do reator por uma semana. Após esse período, os valores médios para a fase variaram de 5,5 a 7 ml/l. Cabe ressaltar que a partir da fase 1 a velocidade ascensional média calculada para os reatores, 0,50 m/h, foi 100 % superior ao valor verificado na fase 0.

No que se refere a Fase 2, a análise estatística demonstrou que 20% dos resultados obtidos nessa fase encontraram-se abaixo do limite do COPAM. Acredita-se que, nessa fase, o protocolo de descarte de lodo adotado foi essencial para reduzir a perda de sólidos no efluente, o que contribuiu para aumento de 20 % na capacidade do reator em produzir efluentes com condições compatíveis ao objetivo da tecnologia. Destaca-se também que na referida fase é possível notar um atendimento de 70% ao valor de referência revelando um bom desempenho do sistema na estabilização de matéria orgânica. No tocante ao alto atendimento ao padrão estabelecido, os resultados apontam para não geração de impacto negativo no sistema operando com retorno de lodo e tratamento de esgoto sanitário, demonstrando, assim, que se bem operado o retorno de lodo não interfere na estabilidade do reator.

A fase 3, conforme observado na Figura 5.7, assemelha-se à fase 1 da pesquisa, onde nota-se 100 % de resultados obtidos acima do limite COPAM e 20 % abaixo do valor de referência, revelando que os problemas operacionais encontrados no desenvolver dessa etapa impactaram fortemente o efluente dos reatores. Os valores confirmam a necessidade de descartes contínuos do lodo de excesso nos reatores anaeróbios até que se consiga adequar a biomassa aos valores mínimos e máximos previamente calculados, evitando assim alta perda de sólidos no efluente dos UASB e conseqüente aumento da concentração do lodo nos decantadores secundários devido a não estabilização da matéria orgânica nos filtros biológicos.

Sobre a fase 4, nota-se que 30 % dos resultados ficaram abaixo do limite do COPAM e 70 % abaixo do valor de referência. Sendo indicativo de que o bom gerenciamento da biomassa do reator é capaz de permitir o uso da tecnologia para tratamento de esgoto e digestão de lodo de excesso, sem degradação do efluente produzido e com resultados compatíveis a efluentes de estações de tratamento sem retorno. A manutenção de um perfil de lodo adequado, conforme o adotado para essa fase (Figura 5.6), mostrou-se essencial para o bom desempenho do sistema. Os resultados mostram que não houve impactos negativos no sistema.



— Limite DN COPAM (180 mg/L)
 — Limite de Referência (250 mg/L)

Figura 5.7 - Percentual de atendimento de DQO ao padrões de lançamento

5.5.2 Atendimento do parâmetros SST aos limites estabelecidos

O atendimento aos padrões de lançamento no que concerne à concentração de SST pode ser observado na Figura 5.8. Nota-se que na fase 0 40% dos valores encontrados estavam abaixo do padrão de lançamento do COPAM que é de 100 mg/L, sendo esses representativos dos reatores 1, 2 e 4, já que para o R3 80% das amostras atenderam ao limite COPAM. No que se refere ao valor de referência de 85 mgSST/L, nota-se que, com exceção do R3, que obteve 80% dos valores abaixo desse valor, os demais reatores apresentaram apenas 30% de atendimento. Assim como observado na fase 1 para o parâmetro DQO, nota-se que o choque hidráulico ocasionou grande perda de sólidos suspensos, resultando em um efluente altamente concentrado com SST, onde 100 % das amostras apresentaram valores acima do padrão de lançamento estabelecido pelo COPAM e apenas 10% das amostras do R3 mantiveram-se abaixo do limite estabelecido.

Apesar da menor concentração efluente apresentada na fase 2, quando comparado a fase 1, conforme Figura 5.4, nota-se através da Figura 5.8 que os efluentes dos reatores 1, 3 e 4 tiveram 100 % dos valores acima do limite COPAM e do valor de referência estabelecido. Apenas o reator 2 apresentou 30% de valores abaixo do limite de lançamento do COPAM.

No que se refere aos valores apresentados na fase 3, observa-se que 100 % dos valores apresentaram-se acima do limite COPAM e do valor de referência estabelecido. Nota-se que o efluente produzido nesta fase da pesquisa apresentou comportamento de violação aos padrões analisados similar ao observado na fase 1, concomitante ao acima exposto, cabe ressaltar que a alta concentração de sólidos apresentada em ambas as fases possui relação direta com o comportamento observado da concentração da DQO no mesmo período de estudo. Uma análise conjunta do acima exposto e da Figura 5.3 nos permite mais uma vez afirmar a importância de manter a concentração de lodo abaixo de 0,5% no ponto de amostragem de lodo mais elevado, buscando garantir assim que os sólidos de menor densidade e instáveis não sejam arrastados para fora do reator junto com o efluente e impactem a qualidade do lodo secundário produzido nos decantadores secundários e interfiram na qualidade do efluente tratado.

No que se refere à 4ª fase da pesquisa, cabe ressaltar que a manutenção do perfil de lodo em condições favoráveis ao retorno de lodo, como pode ser visto na Figura 5.6, contribuiu para a produção de um efluente de qualidade desejável pelos UASB, onde 70 % dos valores amostrados apresentaram-se abaixo do limite COPAM e do valor de referência estabelecido.

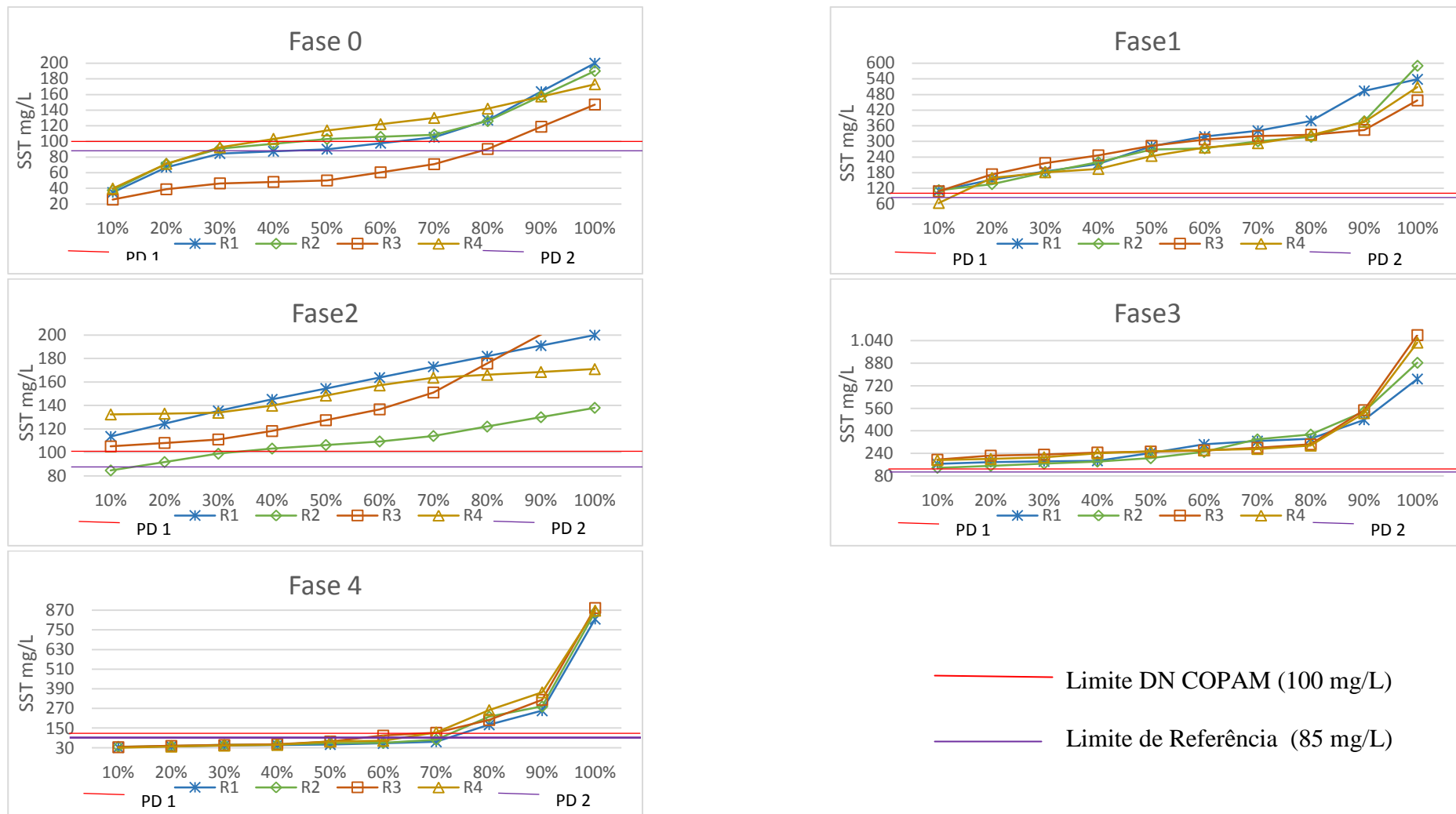


Figura 5.8 – Percentual de atendimento de SST aos padrões de lançamento.

5.6 Caracterização da sedimentabilidade do lodo secundário de retorno

Com intuito de contribuir com as discussões acerca dos eventuais problemas causados pelo lodo de retorno dos DS para os reatores UASB, dada a hipótese de que a excessiva perda de sólidos no efluente dos reatores estaria associada a eventual má sedimentabilidade do lodo aeróbio de retorno, foram realizados 14 testes de Índice Volumétrico de Lodo Diluído com Agitação (IVLDA), conforme caracterizado na Tabela 5.5, a seguir. Os resultados dos testes são apresentados na Figura 5.9, que também mostra uma linha representando o limite máximo de valores de IVLD para lodos com ótima sedimentabilidade, segundo von Sperling (2000).

Tabela 5.5 – Caracterização dos testes de IVLDA realizados

Fase	Data	Horas	Concentração %
3	18/04/2014	08:15	4,38
		13:30	3,03
3	22/07/2014	10:30	1,47
		13:30	4,33
3	26/07/2014	14:00	2,45
		15:00	2,87
4A	05/08/2014	10:15	2,62
		13:15	2,16
4A	09/08/2014	07:40	0,19
		08:15	1,18
4A	11/08/2014	09:40	0,96
		11:00	0,71
4A	13/08/2014	15:30	0,45
		16:00	1,53

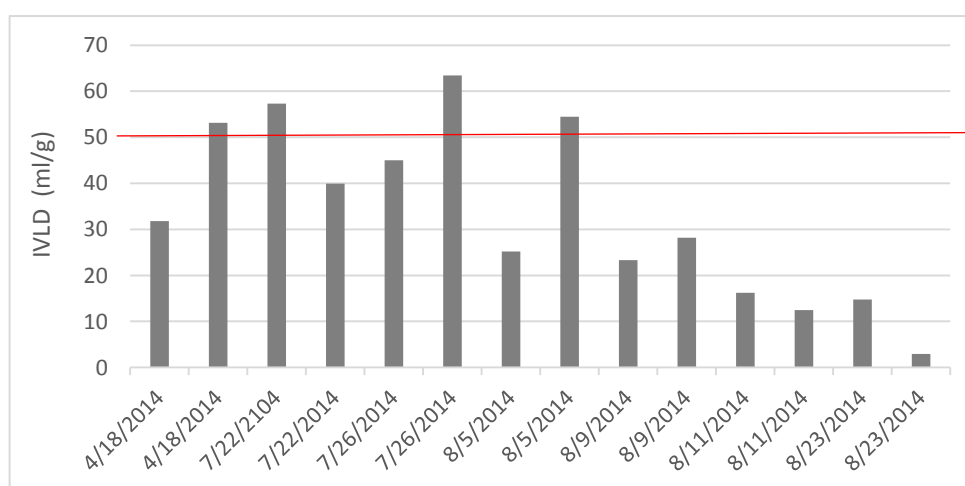


Figura 5.9 – Resultados dos testes de IVLDA realizados durante a pesquisa com o lodo secundário de retorno

Sobre o teste de IVLDA, ressalta-se que foram realizadas duas amostragem em cada dia em horários distintos com o intuito de avaliar a variação do índice ao longo do funcionamento diário da ETE. Nota-se através da Figura 5.9 que valores superiores a 50 ml/g foram obtidos no segundo teste realizado no dia 18/04/2014 (53 ml/g), no primeiro realizado no dia 22/07/2014 (57 ml/g), no segundo do dia 26/07/2014 (63 ml/g) e 05/08/2014 (54 ml/g). Entretanto, devido aos valores próximos a 50 ml/g encontrados nos testes de 18/04/2014 e 05/08/2014, acredita-se que os mesmos podem ter resultado de erro de leitura do lodo sedimentado.

Nota-se que nos testes realizados no período de 18/04/2014 a 05/08/2014, o lodo do decantador encontrava-se com concentração superior à esperada para lodo de decantadores secundários (em torno de 1%). Apesar da variabilidade de concentração do lodo ao longo do dia, como pode ser visto na Tabela 5.5, nota-se que 50% dos valores obtidos apresentaram-se dentro do limite tido como ótimo, sendo a mediana para o período citado de 49 ml/g o que classifica o lodo do DS como sendo de ótima ou boa sedimentabilidade.

As análises realizadas de 09/08 a 13/08/2014, período em que o lodo de retorno encontrava-se com concentrações próximas a esperada para lodo de DS, refutam a hipótese de que o lodo secundário apresenta más condições sedimentabilidade, uma vez que os valores de IVLDA variaram de 3 a 28 ml/g (mediana de 15 ml/g), índices que caracterizam o lodo secundário como de ótima sedimentabilidade. Os valores encontrados nessa fase são representativos de reatores UASB operando em condições de perfil de lodo favoráveis ao retorno de lodo, ou seja, com baixa perda de sólidos e sem impacto no lodo gerado nos filtros biológicos percoladores, retidos nos DS.

Uma análise geral (17 testes) dos valores obtidos para o IVLDA aponta uma mediana de 30 ml/g, o que permite inferir que a hipótese de má sedimentabilidade conferida ao lodo de retorno não se confirma.

6 CONCLUSÃO

- Dentre as fases operacionais em que o TDH médio foi mantido em 9 horas, a última fase mostrou-se ideal para o funcionamento da estação de tratamento, com eficiências de remoção (DQO - 71%, SST - 81% e SSed - 97%) próximas aos valores comumente citados na literatura para reatores UASB operando sem retorno de lodo. Os valores de eficiência apresentados para essa fase foram alcançados devido a retirada do passivo de lodo dos reatores e a manutenção da concentração de lodo próxima de ~1% na parte superior do compartimento de digestão (2,0 m).
- A operação dos reatores com TDH de 9 horas mostrou-se dependente da manutenção e controle da massa de lodo no interior dos reatores anaeróbios. Os resultados encontrados no decorrer da pesquisa demonstraram que o retorno de lodo para adensamento e digestão em reatores UASB não é o causador de perda de sólidos e degradação da qualidade do efluente de reatores UASB. Os problemas até então notados, no que diz respeito aos elevados valores de SST comumente encontrados nos efluentes dos reatores e perda de eficiência de remoção de matéria orgânica, estão ligados diretamente ao gerenciamento ineficiente do lodo de excesso nos reatores UASB. Ademais, outros problemas operacionais vivenciados numa ETE, como: i) baixa capacidade de desidratação devido ao dimensionamento ineficiente dos sistemas; ii) dificuldades encontradas para o descarte diário de lodo dos reatores; iii) falta de produtos químicos complementares à desidratação; iv) dimensionamento ineficiente dos tanques de lodo; dentre outros; podem agravar ainda mais a situação de perda de sólidos e queda de eficiência dos reatores.
- A hipótese da má sedimentabilidade do lodo de retorno foi refutada a partir dos resultados dos testes de IVLD realizados durante a pesquisa, que indicaram que o lodo dos decantadores secundários apresentava sedimentabilidade considerada como ótima ou boa.
- Baseado nos resultados obtidos pela pesquisa, conclui-se que a perda excessiva de sólidos juntamente com o efluente dos reatores pode ser evitada com o estabelecimento de um adequado gerenciamento para o retorno de lodo secundário e para os descartes de lodo excedente dos reatores UASB, de modo a garantir que a concentração de lodo na parte superior do compartimento de digestão (antes do defletor de gases) não ultrapasse 1,0%. Preferencialmente, a concentração de sólidos nesse ponto não deve ultrapassar a 0,5%.

- A análise de atendimento a legislação pelo efluente dos reatores UASB, mostrou que para a fase em que os reatores operaram com TDH elevado (18 h) 50% dos valores de DQO e 40% dos valores de SST apresentaram-se inferiores ao exigido pelo órgão ambiental mineiro. Já para a última fase da pesquisa (TDH 9 h), em que os reatores operaram sem excesso de lodo na parte superior do compartimento de digestão, 30% dos valores de DQO e 70% dos valores de SST se mantiveram abaixo do exigido pelo órgão ambiental. A diferença nos valores de DQO apresentada é atribuída ao aumento da DQO afluente na última fase, quando comparada a fase de maior TDH.

De forma geral, conclui-se que a técnica de retorno de lodo é vantajosa para o sistema em escala plena, dada a redução na quantidade de lodo a ser desidratada e ao possível incremento na vazão de biogás. No estudo de caso em questão, os aspectos negativos até então apontados estiveram relacionados a problemas de gerenciamento e não às características do lodo aeróbio de retorno.

7 RECOMENDAÇÕES

7.1 Para a comunidade científica:

- Os dados obtidos para retorno de lodo de forma contínua demonstraram-se favoráveis ao objetivo do estudo. Entretanto, recomenda-se novo estudo com retorno apenas no período noturno (23:00 às 05:00 h). Acredita-se que devido as baixas vazões observadas para a faixa horária citada, haverá melhor estabilização da matéria orgânica, por ser também um período de baixa carga orgânica afluente.
- Durante a revisão de literatura, poucos foram os trabalhos que trataram da estabilidade dos reatores, quando em funcionamento conjunto para tratamento de esgoto e adensamento de lodo. Nesse sentido, recomenda-se novos estudos sobre estabilidades de reatores, buscando realizar o balanço de massa de DQO no UASB e caracterização da biomassa anaeróbia.
- Devido a ausência de equipamentos, não foi possível realizar a medição de biogás por reator. Devido a isso, recomenda-se que em novos estudos, seja avaliado o impacto do retorno de lodo sobre a produção de biogás nos reatores. A recomendação feita, parte do princípio que é provável que ocorra aumento da produção devido ao acréscimo de matéria orgânica no sistema.

7.2 Para a ETE:

- Durante a pesquisa, notou-se dificuldade por parte da equipe de operação para realizar os descartes de lodo necessários. Além do mais, o descarte de lodo de forma manual, as vezes pode não ser fiel ao descarte necessário. Fica assim recomendada a estação a automação do sistema de descarte de lodo.
- A baixa capacidade do sistema de desidratação da ETE foi fator impeditivo para o andamento da pesquisa e gerenciamento do lodo excedente dos reatores anaeróbios. Nesse sentido, recomenda-se a ampliação do sistema de desidratação de lodo, permitindo assim maiores quantidade de prensadas ao dia.
- As condições do atual tanque de lodo da ETE é desfavorável à boa mistura entre coagulante e lodo, o que leva ao consumo excessivo de químicos para essa finalidade. Ficando assim recomendado, alteração no atual sistema de mistura dos tanques e testes com novos coagulantes.

REFERÊNCIAS

- AISSE, M. M.; LOBATO, M. B.; BONA, A.; GARBOSSA, L. H. P.; ALÉM SOBRINHO, P. Avaliação do sistema reator UASB e filtro biológico aerado submerso para o tratamento de esgoto sanitário. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 23., 2001, Campo Grande. Anais... João Pessoa: ABES, 2001.
- 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.
- APHA; AWWA; WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20. ed.. Washington: APHA, 1998.
- BOF, V. S.; CASTRO, M. S.M.; GONÇALVES, R. F. ETE UASB + Biofiltro aerado submerso: desempenho operacional com retorno do lodo aeróbio para o UASB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 20., 1999, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- CHERNICHARO, C.A.L.; VAN HAANDEL, A. C.; AISSE, M. M.; CAVALCANTI, P. F. F. CAPÍTULO 7. In.: Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo: Configurações de Reatores Anaeróbios. Rio de Janeiro: ABES, 1999. Projeto PROSAB.
- CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 246 p.
- 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.
- CASEIRO, A. H., PIVELLI, R. P., SOBRINHO, P. A. Reator UASB Tratando Esgoto Sanitário e Digerindo Lodo Aeróbio Excedente. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 30., 2006, Punta del Este. Anais... Punta del Este: AIDIS, 2006.
- COSENTINO, P. R. S.; SILVA FILHO, J. A.; VAN HAANDEL, A. C.; CAVALCANTI, P. F. F. Estabilização de lodo de sistemas aeróbios em reatores do tipo UASB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 23., 2005, Campo Grande. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2005.
- COURA, M. A.; VAN HAANDEL, A.C. Viabilidade técnica e econômica do digestor anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) no sistema anaeróbio/aeróbio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 20., 1999, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- FILHO, JOSE ANCHIETA SILVA; van HAANDEL, ADRIANUS CORNELIUS. Estabilização de Lodo de Pós-Tratamento Aeróbio na Unidade de Pré-tratamento Anaeróbio. *DAE*, n. 194, p. 86 – 102, 2014.
- FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; HAANDEL, A. V.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. Fundamentos do tratamento Anaeróbio. In: CAMPOS, J.R. (coord.). *Tratamento de Esgotos*

Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 29-51. Projeto PROSAB.

FREIRE, V. H.; VON SPERLING, M; CHERNICHARO, C. A. L. Avaliação do desempenho de um sistema combinado UASB – Lodo ativado no tratamento de efluentes sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 20.,1999, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: ABES, 1999.

GONÇALVES, R.F.; VERONEZ, F. A.; KISSLING, C. M. S.; CASSINI, S. T. Using a UASB reactor for thickening and digestion of discharged sludge from submerged aerated biofilters. *Water Science and Technology*, v. 45, n.10, p. 299-304, 2002

IBGE. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008*. Rio de Janeiro, 2010. 219 p.

JENÍCEK, P. J., DOHÁNYOS, M., ZÁBRANSKÁ, J. Combined anaerobic treatment of wastewater and sludges. *Water Science and Technology*, v. 40, n.1, p. 85-91, 1999.

JORDÃO, E.P.; SANTOS, V.M.M.; CONCEIÇÃO, J.R.; ALEM SOBRINHO, P. Determinação do Índice Volumétrico de Lodo Numa Concentração Padrão. In: *19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, 1999.

KASSAB, G.; HALALSHEH, M.; KLAPWIJK, A.; FAYYAD, M.; VAN LIER, J.B. Sequential anaerobic-aerobic treatment for domestic wastewater - A review. *Bioresource Technology*, v.101, n.10, p.3299-3310, 2010.

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.

LETTINGA, G.; MAN, A.; LAST, A.; WIEGANT, W.; KNIPPENBERG, K.; FRIJNS, J.; BUREN, J. Anaerobic treatment of domestic sewage and wastewater. *Water Science & Technology*, v. 27, n. 9, p. 67-73. 1993.

LOBATO, L. C. da S.; CARDOSO, L. C.; DIVINO, M. G. D.; SILVA, H.; CHERNICHARO, C. A. L. *Influência da rotina operacional de descarte do lodo excedente de reatores UASB na qualidade do efluente de uma estação de tratamento de esgoto*. In: 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. II-112. 2011. Porto Alegre

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, E., EDDY, M. *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 3rd edição. New York: McGraw-Hill Inc., 1991, 1334 p.

OLIVEIRA, SILVIA MARIA ALVES CORRÊA; von SPERLING, MARCOS. Avaliação de 116 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias . Parte 1 – análise de desempenho. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, n.4, p. 347 – 357.

ORTEGA, C. L., ROBLES, A N., BOHÓRQUEZ, S. S. *Efecto de lodos ativados de purga sobre el funcionamiento de un reactor UASB piloto y las características del lecho de lodo granular*. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE INGIENIERIA SANITARIA E AMBIENTAL, 25, 1996, Mexico. Anais... Mexico: AIDIS, 1996.

PONTES, P. P. *Reatores UASB aplicados ao tratamento combinado de esgotos sanitários e lodo excedente de filtro biológico percolador*. 2003. 214 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

PONTES, P. P.; CHERNICHARO, C. A. L. Efeito do retorno de lodo aeróbio sobre as características da biomassa presente em reatores UASB tratando esgoto sanitário. *ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, v. 14, n.2, p. 223-234, 2009.

ROSA, A. P; BEJAR, D. *Manual de Operação da Estação de Tratamento de Esgotos – ETE Laboreaux/Itabira-MG*. 2011, 130p

SEGHEZZO, L.; ZEEMAN, G.; VAN LIER, J.B.; HAMELERS, H.V.M.; LETTINGA, G. A. Review: the anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. *Bioresource Technology*, v. 65, p. 190-215, 1998.

SOUSA, J. T. Pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio de fluxo ascendente em reator aeróbio seqüencial em batelada e coluna de lodo anaeróbio para desnitrificação, 1996. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

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

VERONEZ, F. A.; GONÇALVES, R. F. Produção de biogás em um reator tratando esgoto sanitário e lodo de descarte de biofiltros aerados submersos. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6., 2002, Espírito Santo. Anais...Espírito Santo: SIBESA, 2002.

VON SPERLING, M. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Vol. 4 - Lodos Ativados*. 2a edição, Belo Horizonte: Segrac, DESA, UFMG, 2000, 416p.

ZERBINI, A. M. *Identificação e análise de viabilidade de ovos de helmintos em um sistema de tratamento de esgotos domésticos constituído de reatores anaeróbios e rampas de escoamento superficial*. 157f. Dissertação - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2000.

WANKE, R. et al. *Utilização de Estações de Tratamento de Esgotos modulares compactas associando reatores anaeróbios e aeróbios na região sudeste do Brasil*. In: TALLER Y SIMPOSIO LATINOAMERICANO SOBRE DIGESTIÓN ANAEROBIA, 7., 2002, Mérida, Yucatán, México. Anais...Mérida: IWA, 2002. p. 229-232.