



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS REATORES ANAERÓBIOS DE FLUXO  
ASCENDENTE (UASB) TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO E LODO DE  
RETORNO DOS DECANTADORES SECUNDÁRIOS: ESTUDO DE CASO DA  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DE ITABIRA/MG - ETE  
*LABOREAUX***

**Sarah Estela Almeida Matoso**

**Belo Horizonte**

**2020**

**Sarah Estela Almeida Matoso**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS REATORES ANAERÓBIOS DE  
FLUXO ASCENDENTE (UASB) TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO E LODO  
DE RETORNO DOS DECANTADORES SECUNDÁRIOS: ESTUDO DE CASO  
DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DE ITABIRA/MG - *ETE*  
*LABOREAUX***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista

Orientador: Prof. M.Sc. Túlio Cesar Floripes Gonçalves

Co-orientadora: Prof. M.Sc. Paula Rafaela Silva Fonseca

Belo Horizonte

2020

**SARAH ESTELA ALMEIDA MATOSO**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS REATORES ANAERÓBIOS DE FLUXO  
ASCENDENTE (UASB) TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO E LODO DE  
RETORNO DOS DECANTADORES SECUNDÁRIOS: ESTUDO DE CASO DA  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DE ITABIRA/MG - ETE *LABOREAUX***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 02 de dezembro de 2020

Banca examinadora:

Túlio Cesar Floripes Gonçalves – Presidente da Banca Examinadora  
Prof. M.Sc. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Orientador

Paula Rafaela Silva Fonseca  
M.Sc. Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Coorientadora

Déborah de Freitas Melo  
Dra. Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Lucas Martins Machado  
M.Sc. Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos



Emitido em 04/12/2020

**DECLARAÇÃO Nº 2789/2020 - DCTA (11.55.03)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 04/12/2020 14:42 )*

TULIO CESAR FLORIPES GONCALVES

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DCTA (11.55.03)

Matrícula: 1275425

*(Assinado digitalmente em 04/12/2020 19:36 )*

DÉBORAH DE FREITAS MELO

ASSINANTE EXTERNO

CPF: 099.938.246-23

*(Assinado digitalmente em 04/12/2020 19:37 )*

LUCAS MARTINS MACHADO

ASSINANTE EXTERNO

CPF: 067.854.056-02

*(Assinado digitalmente em 04/12/2020 17:30 )*

PAULA RAFAELA SILVA FONSECA

ASSINANTE EXTERNO

CPF: 130.230.367-80

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número:  
**2789**, ano: **2020**, tipo: **DECLARAÇÃO**, data de emissão: **04/12/2020** e o código de verificação: **a0b313ff6f**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha mãe, a pessoa mais importante na minha vida e que me ajudou nos momentos mais difíceis dessa trajetória. Agradecimento especial à minha vó e tias, que sempre torceram por mim e foram as minhas maiores apoiadoras.

Agradecer ao meu pai, que sempre esteve ao meu lado, ao meu namorado Lucas meu maior incentivador e à todas as minhas amigas (Lari, Raissa, Maju, Alana, Bruna e Luisa) por sempre me motivarem.

Agradecer também às pessoas que conheci nesse caminho árduo do CEFET MG. Um grande agradecimento ao meu professor orientador Tulio, por ter sido tão compreensivo nesses tempos de pandemia, sendo sempre disponível e atencioso comigo. Um profissional incrível que me ensinou muito.

Agradecer ao professor Frederico, que fui aluna em várias matérias durante o curso e que também sempre foi muito atencioso e me apoiou em diversos momentos.

Agradecimento às minhas amigas de curso: Marina, Camila, Júnia, Adir, Brenda, Regeane, Isadora, Fran, Natalia e Mateus. Obrigada pelo companheirismo!

Agradecer à minha co-orientadora Paulinha, que no último ano foi uma incrível colega de trabalho, sempre me ensinando muito sobre efluentes e também sobre a vida.

Um grande agradecimento também aos meus orientadores de iniciação científica do DESA Lucas e Debóra que me fizeram gostar tanto de tratamento de efluentes e com isso, me ajudaram a trilhar minha carreira nessa área.

Obrigada a todos da CP Solutions que me deram a incrível oportunidade de trabalhar e a vivenciar o mercado de trabalho.

Gratidão a todos!

## RESUMO

Atualmente, os reatores UASB se tornaram a principal tendência de tratamento de esgotos no Brasil, ganhando grande destaque por suas diversas características favoráveis como o baixo custo, simplicidade operacional e baixa produção de sólidos. Além disso, a possibilidade de combinação com os sistemas aeróbios, incluindo o encaminhamento do lodo secundário para digestão no próprio reator UASB, pode gerar grandes vantagens como a minimização da produção de lodo e possibilidade de um lodo mais concentrado e estabilizado. Em sistemas UASB/Filtro Biológico Percolador, o retorno de lodo para os reatores UASB simplifica o fluxograma e diminui os custos relacionados à disposição e tratamento do lodo. Entretanto, o gerenciamento inadequado do retorno do lodo secundário pode afetar a eficiência do tratamento anaeróbio ocasionando, eventualmente, uma diminuição da eficiência de remoção de matéria orgânica.

A presente pesquisa avaliou dados secundários da ETE *Laboreaux*, obtidos no ano de 2019, avaliando assim o impacto do retorno do lodo aeróbio para o reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB). Foram comparados os dados de eficiência de remoção de DQO e SST, os quais apresentaram uma eficiência média de remoção de DQO de 51% e eficiência média de remoção de SST de 38%, com os valores apresentados em estudos de reatores UASB com retorno de lodo em escala piloto e reatores UASB com retorno de lodo em escala plena, que apresentavam taxas maiores de eficiência. Dessa forma, foi possível concluir que na ETE *Laboreaux* houve baixo desempenho do tratamento anaeróbio quando há retorno de lodo, podendo estar ligado diretamente ao gerenciamento ineficiente do lodo nos reatores. Também foi realizada a avaliação dos resultados obtidos para efluente final, comparando aos limites estabelecidos para os padrões de lançamento conforme Deliberação Normativa do COPAM/CERH-MG N° 01 de 05 de maio de 2008, demonstrando que os filtros biológicos percoladores podem promover uma remoção complementar de DQO e SST do efluente dos reatores UASB.

## ABSTRACT

Nowadays, UASB reactors have become the main trend in sewage treatment in Brazil, gaining great prominence for their several favorable characteristics such as low cost, operational simplicity and low production of solids. Furthermore, the possibility of combining with aerobic systems, including the routing of secondary sludge for digestion in the UASB reactor itself, can generate great advantages such as the minimization of sludge production and the production of a more concentrated and stabilized sludge. In UASB / Percolator Biological Filter systems, the sludge return to the UASB reactors simplifies the flowchart and reduces the costs related to sludge disposal and treatment. However, the inadequate management of the secondary sludge return can affect the efficiency of the anaerobic treatment, eventually causing a decrease in the efficiency of removal of organic matter.

This research introduces the study of the effect of the return of aerobic sludge to the anaerobic upflow reactor and sludge blanket (UASB) of the sewage treatment plant (ETE) Laboreaux de Itabira Minas Gerais. The average DQO removal efficiency and SST data in the year 2019 were evaluated, which showed an average DQO removal efficiency of 51% and SST removal efficiency of 38%, low values compared to studies of UASB reactors with pilot scale sludge return and UASB reactors with full scale sludge return. Thus, it was possible to conclude that the low performance of the anaerobic treatment when there is sludge return can be directly linked to the inefficient management of the aerobic sludge. However, the results obtained for final effluent, demonstrated that the percolating biological filters can promote a complementary removal of DQO and SST from the effluent of the UASB reactors.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>14</b>
2.1	<i>Objetivo Geral</i>	14
2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	14
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>15</b>
3.1	<i>Reatores Anaeróbios</i>	15
3.2	<i>Princípios da Digestão Anaeróbia</i>	17
3.3	<i>Condições Operacionais</i>	19
3.4	<i>Produção e Gerenciamento de Lodo em Reatores Anaeróbios</i>	21
3.5	<i>Sistemas Aeróbios Pós Tratamento de Reatores UASB</i>	22
3.6	<i>Retorno de Lodo Aeróbios para Reatores UASB</i>	23
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>27</b>
4.1	<i>Área de Estudo</i>	27
4.2	<i>Pontos de Monitoramento Avaliados</i>	28
4.3	<i>Desempenho dos Reatores UASB com Recirculação de Lodo Aeróbio</i>	30
4.4	<i>Resumo do Delineamento Metodológico Adotado</i>	31
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>33</b>
5.1	<i>Condições Operacionais do Sistema</i>	33
5.2	<i>Efeito do Retorno de Lodo dos Decantadores sobre o Desempenho dos Reatores UASB</i>	35
5.3	<i>Atendimento dos Parâmetros DQO e SST aos Limites Estabelecidos</i>	40
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>43</b>

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 1</b> – Esquema de um reator UASB .....	16
<b>Figura 2</b> – Rotas metabólicas e microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia.....	17
<b>Figura 3</b> – Layout das unidades de tratamento da ETE <i>Laboreaux</i> .....	28
<b>Figura 4</b> – Localização dos pontos de monitoramento.....	29
<b>Figura 5</b> – Quadro de Identificação da localização dos pontos de monitoramento.....	30
<b>Figura 6</b> – Valores de temperatura afluyente no ano de 2019.....	33
<b>Figura 7</b> – Valores de pH afluyente no ano de 2019 .....	33
<b>Figura 8</b> – Gráfico <i>Vazão versus</i> Tempo de Detenção Hidráulica (TDH).....	34
<b>Figura 9</b> – a) Eficiência de Remoção de DQO (mg/L) b) Eficiência de Remoção de Sólidos Sedimentáveis (mg/L) c) Eficiência de Remoção de SST (mg/L).....	36
<b>Figura 10</b> – a) Comparação entre a média da concentração de DQO (mg/L) em cada reator e valor de referência b) Comparação entre a média da concentração de SST (mg/L) em cada reator e valor de referência .....	39
<b>Figura 11</b> – a) Eficiência de Remoção de DQO da estação no ano de 2019 b) Eficiência de Remoção de SST da estação no ano de 2019 .....	40

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional aliado a ausência da universalização do sistema de saneamento básico adequado tem causado sérios danos ao meio ambiente (BRASIL, 2011). De acordo com o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (2012), o esgoto doméstico é uma preocupação em particular, já que aproximadamente entre 150 e 250 milhões de m<sup>3</sup> de águas residuais das áreas urbanas são descarregados por dia em cursos d'água abertos.

Para manter a qualidade de vida, é imprescindível conservar os recursos hídricos, garantindo assim que o esgoto seja tratado e destinado para os corpos hídricos apenas quando apresentar parâmetros dentro dos padrões de qualidade estabelecidos. Sendo assim, é importante que este receba tratamento eficiente em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) antes de ser lançado no ambiente. No Brasil, apenas 46% do esgoto gerado é tratado e somente 21 municípios nas 100 maiores cidades do país tratam mais de 80% dos esgotos (SNIS, 2018).

As Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) são unidades operacionais que por meio de processos físicos, químicos ou biológicos promovem o tratamento do esgoto, que consiste na correção de características indesejáveis, ao remover matéria orgânica, nutrientes e patógenos (TIRABOSCHI, 2004). Sendo assim, existem diversas alternativas de tratamento que se diferenciam de acordo com o grau de eficiência, custos de implantação e meio de operação (COLARES; SANDRI, 2013).

Entre as alternativas existentes dentro dos tratamentos anaeróbios aplicáveis, destaca-se a tecnologia dos Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo, denominados UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors*). Os reatores UASB são a principal tendência atual de tratamento de esgotos no Brasil e segundo Chernicharo *et al.* (2018), cerca de 40% das ETEs localizadas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil empregam reatores UASB em seu fluxograma de tratamento.

O atual destaque em relação aos reatores UASB deve-se a suas diversas vantagens como menor produção de lodo, produção de biogás com valor energético, baixa demanda de área e energia e aplicabilidade em grandes e pequenas escalas (CHERNICHARO, 2009). Porém, ainda existem grandes desafios que geram empecilhos para o máximo desempenho

operacional desses reatores, muitas vezes originados nas fases iniciais de projeto, mas que também estão presentes em problemas de construção e problemas operacionais (MIKI, 2010).

Em relação aos desafios e problemas enfrentados na tecnologia do UASB, o foco deste estudo consiste no subproduto do tratamento de esgoto sanitário, que precisa ser adequadamente gerenciado para garantia da eficiência do sistema: o lodo. Em grande parte das ETEs no Brasil esse gerenciamento é negligenciado, acarretando em diversos problemas para o sistema de tratamento (LEITÃO *et al.*, 2010).

Em sistemas que consistem em tratamentos aeróbios pós reator UASB, há grande produção de biomassa, usualmente denominada de lodo secundário. Van Haandel & Letinga (1994), propuseram que este lodo fosse retornado para os reatores UASB para digestão, simplificando o fluxograma e diminuindo custos relacionados à disposição e tratamento do lodo. Entretanto, o gerenciamento inadequado do retorno do lodo secundário pode afetar a eficiência do tratamento anaeróbio ocasionando, eventualmente, uma diminuição da eficiência de remoção de matéria orgânica e/ou da sedimentabilidade do lodo (CHERNICHARO, 2009).

Neste contexto, o objeto de estudo do presente trabalho foi a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) *Laboreaux* em Itabira, Minas Gerais, que possui em seu fluxograma as unidades de tratamento biológico anaeróbias (reatores UASB) e aeróbias (filtros biológicos percoladores e decantadores secundários), no qual o lodo aeróbio removido dos decantadores secundários é retornado aos reatores UASB. A principal motivação do estudo na ETE *Laboreaux* deve-se ao fato da possibilidade de avaliar um sistema de tratamento combinado de esgoto e retorno de lodo de descarte aeróbio para digestão em reatores UASB em escala plena de operação.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o desempenho dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB) tratando esgoto doméstico e lodo de retorno dos decantadores secundários da Estação de Tratamento de Esgoto Laboreaux em Itabira (MG).

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar o impacto do retorno de lodo secundário na eficiência de remoção de DQO e SST dos reatores UASB ETE *Laboreaux* e discutir os resultados em relação ao encontrado na literatura;
- Avaliar o impacto do retorno de lodo na qualidade do efluente final da estação, comparando aos limites estabelecidos para os padrões de lançamento conforme Deliberação Normativa do COPAM/CERH-MG N° 01 de 05 de maio de 2008.

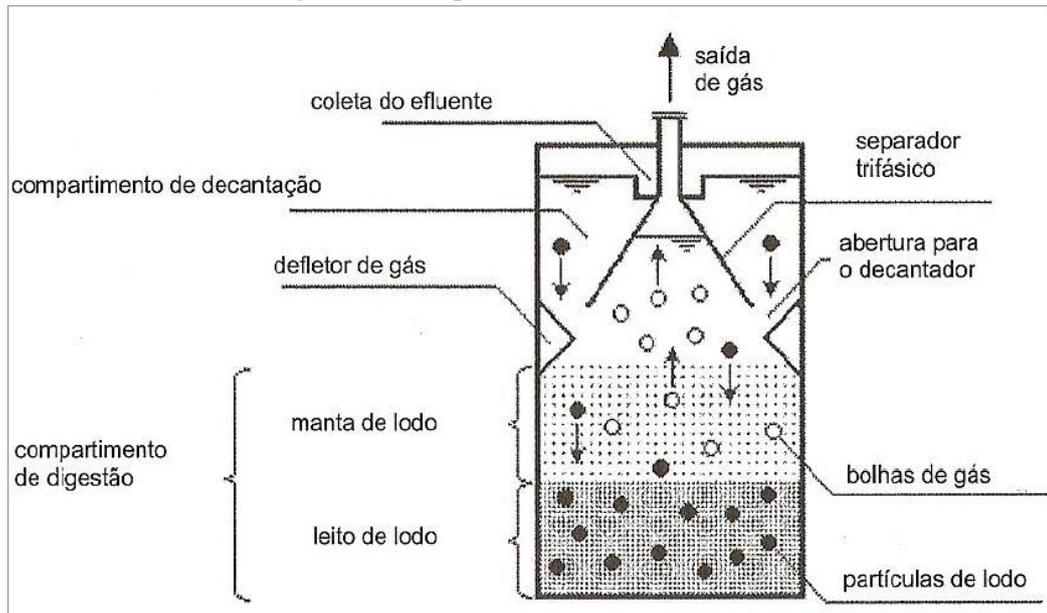
### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Reatores Anaeróbios

Atualmente é possível encontrar na literatura diversos sistemas de tratamento de esgoto sanitário, que se diferenciam pela eficiência, custos de implantação e operação, como as lagoas anaeróbias, reatores UASB, digestores de lodo, etc. (METCALF & EDDY, 2013). Para garantir o sistema adequado, é necessário analisar e planejar o projeto de tratamento que melhor atenda o objetivo final, além de adequar as tecnologias existentes de acordo com o tipo de esgoto gerado e a condição do local que o tratamento ocorrerá (COLARES & SANDRI, 2013).

Em busca de um sistema anaeróbio com menor requisito de área, baixos custos de projeto e baixo consumo de energia, os primeiros usos dos reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente, denominados UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) no Brasil começaram na década de 80, por meio de projetos de vários grupos de pesquisa nacionais e de engenheiros atuantes no setor, tornando-se consolidado e disseminado por autores como Campos (1999) e Chernicharo (2001), entre outros. Tais estudos obtiveram destaque no país, principalmente pela grande aplicabilidade do tratamento às condições climáticas encontradas no cenário nacional, que são favoráveis para a degradação anaeróbia da matéria orgânica.

Em relação aos resultados de operação, os reatores UASB mostraram-se sistemas vantajosos devido à altas taxas de tratamento, menor produção de lodo, possibilidade de recuperação de subprodutos úteis, tolerância a elevadas cargas orgânicas e baixo consumo de nutrientes (VON SPERLING, 2001). A estrutura dos reatores consiste em uma coluna de escoamento ascendente, composto pelos compartimentos de digestão, sedimentação e dispositivo separador de fases gás-sólido-líquido, como apresentando na Figura 1. O líquido entra na parte inferior do reator, e por meio de fluxo ascendente, vai de encontro ao leito de lodo, constituído por partículas de elevada capacidade de sedimentação, promovendo assim adsorção de grande parte da matéria orgânica pela biomassa (zona de digestão). À medida que ocorre o processo de estabilização da matéria orgânica pelos mecanismos anaeróbios, são formados gases, principalmente metano e gás carbônico que se unem a um lodo mais disperso e leve, localizado mais próximo ao topo, denominado manta de lodo (situado na zona de sedimentação) (VON SPERLING, 2005).

**Figura 1** – Esquema de um reator UASB

Fonte: CHERNICHARO, 2007

É necessária a presença do separador trifásico (gases, sólidos e líquidos) na parte superior da unidade, que assegura a coleta para reaproveitamento dos gases e a retenção de biomassa (CHERNICHARO, 2007). Em outros sistemas de tratamento de esgoto, como os filtros biológicos percoladores (PARKER, 1984), a retenção da biomassa necessita do uso de um meio suporte, tornando o tratamento mais caro, e não possuindo controle de emissão de gases, sendo esse um dos fatores diferenciais do sistema UASB (KATO *et al.*, 1999).

Portanto a estabilização da matéria orgânica ocorre por meio da passagem e mistura do esgoto no leito de lodo, promovida pelo fluxo ascensional e pelas bolhas de gases formadas. Os subprodutos gerados pela digestão anaeróbia consistem no lodo biológico, que contém agregados de microrganismos, nutrientes e patógenos; a camada de materiais flutuantes na superfície líquida, denominada espuma; o biogás contendo constituintes como metano, sulfeto de hidrogênio e gás carbônico; o efluente contendo compostos dissolvidos (por exemplo, metano e sulfeto) e particulados (CHERNICHARO, 2007).

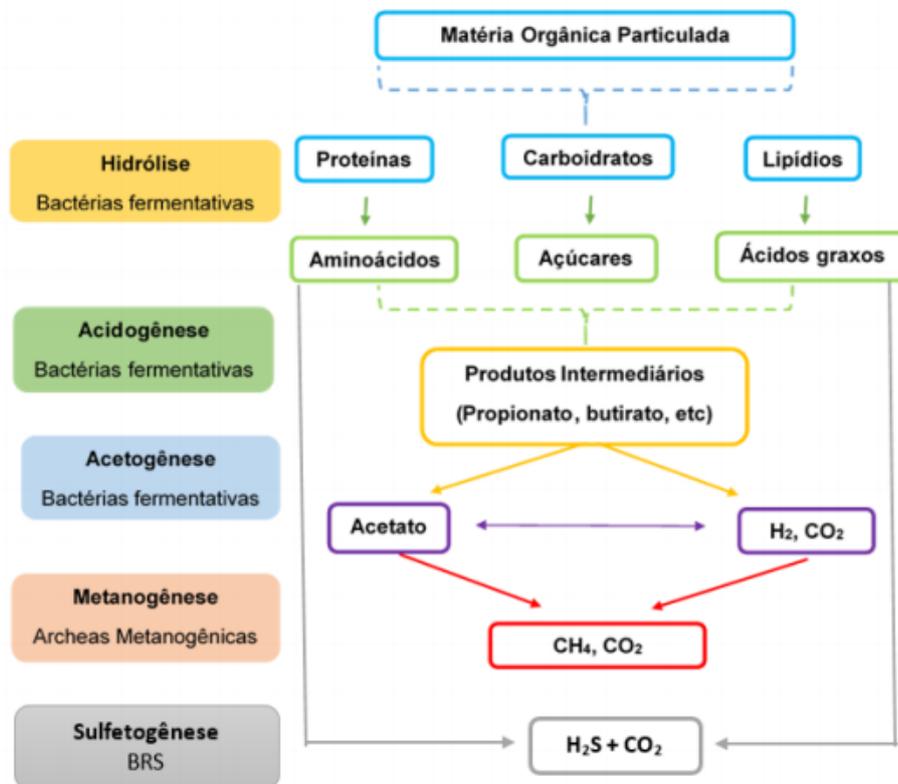
Sendo assim, entre os níveis de entrada e saída de líquido, acontecem processos físicos e bioquímicos, que consistem na conversão dos compostos orgânicos mais complexos aos subprodutos citados. Os compostos orgânicos complexos são degradados por diferentes

grupos de microrganismos por meio de diversas reações bioquímicas (fermentações, oxidações, reduções) (GERARDI, 2003).

### 3.2 Princípios da Digestão Anaeróbia

Chernicharo (1999) caracteriza a digestão anaeróbia como um sistema ecológico delicadamente balanceado, em que cada microrganismo tem uma função essencial. No equilíbrio deste sistema, estão envolvidas as etapas de conversão e subprodutos da degradação da matéria orgânica, apresentada na Figura 2.

**Figura 2** – Rotas metabólicas e microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007)

A digestão anaeróbia de compostos orgânicos complexos é composta por duas etapas. Na primeira etapa, as bactérias facultativas e anaeróbias, formadoras de ácidos, convertem compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídios em substâncias orgânicas mais simples, como ácidos voláteis (WEBER, 2006). Esse processo é denominado **hidrólise** e possui vários fatores que podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado, como a temperatura operacional, tempo de residência do substrato no reator,

composição do substrato (ex.: teores de lignina, carboidrato, proteína e gorduras), tamanho das partículas, pH do meio e concentração de produtos de hidrólise (ex.: ácidos graxos voláteis) (CHERNICHARO, 2008).

Os produtos consequentes da hidrólise são metabolizados dentro das células de bactérias denominadas fermentativas acidogênicas, por meio do processo de **acidogênese**, em que ocorre a produção dos seguintes ácidos orgânicos: ácido acético, ácido propiônico e ácido butírico. Além da formação destes compostos orgânicos ocorre, também, a produção de álcoois (etanol), cetonas (propanona), gases ( $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ ) e novas células bacterianas (METCALF & EDDY, 2013).

Também há presença de bactérias acetogênicas na digestão anaeróbia, que são responsáveis pelo processo de **acetogênese**, composto pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as *arqueas* metanogênicas. Dessa forma, as acetogênicas fazem parte de um grupo metabólico intermediário, que produz substrato para as metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato (CHERNICHARO, 2007).

É importante ressaltar que a fermentação acidogênica é realizada por bactérias majoritariamente anaeróbias obrigatórias, mas existem espécies facultativas, que são essenciais para o sistema anaeróbio devido à utilização do oxigênio dissolvido na oxidação da matéria orgânica, evitando assim toxicidade às bactérias anaeróbias estritas, como as metanogênicas (METCALF & EDDY, 2003).

As *arqueas* metanogênicas participam da segunda etapa da digestão anaeróbia denominada **metanogênese**, convertendo os ácidos orgânicos, o gás carbônico e o hidrogênio em produtos finais gasosos: metano e gás carbônico. Tais bactérias são responsáveis pela maior parte da degradação, logo, sua baixa taxa de crescimento, pode representar fator limitante no processo de digestão (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

Para estações que recebem refluentes contendo sulfato e sulfeto, ocorre também uma etapa competitiva à metanogênese, definida como sulfetogênese. Nesta etapa, os compostos podem ser usados por bactérias redutoras de sulfetos como aceptores de elétrons durante a oxidação de materiais orgânicos (LETTINGA, 1995). O metabolismo destas bactérias é importante no

processo anaeróbio, principalmente devido ao seu produto final, sulfeto de hidrogênio (VON SPERLING, 2007).

As bolhas de gases geradas no tratamento, compostas de metano e sulfeto de hidrogênio, devem ser devidamente direcionadas para o separador trifásico, podendo constituir assim em um biogás canalizado (NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J, 2006). A produção de biogás em estações de tratamento de efluente doméstico por reatores UASB é diretamente influenciada pela vazão de entrada na estação e pela remoção de matéria orgânica (NETO et al., 2007).

Na digestão anaeróbia, a massa de microrganismos atuantes nos processos descritos demandam condições favoráveis em relação a fatores ambientais e de alimento, bem como à própria geometria e características do reator. Estes fatores, aliados ao conceito de tempo de retenção de sólidos biológicos e do tempo de detenção hidráulico, são parâmetros fundamentais de controle do processo (JORDÃO e PESSÔA, 2009). Sendo assim, é essencial o adequado controle operacional da presença de matéria orgânica e do substrato, já que seu excesso pode provocar competitividade entre os microrganismos presentes, refletindo em redução da reprodução e conseqüentemente da eficiência do tratamento (BICALHO, 2007).

Desta forma, segundo Chernicharo (2007), é importante realizar o descarte do lodo excedente dos reatores UASB periodicamente, visando manter a eficiência do tratamento anaeróbio e a qualidade do efluente que seguirá para os próximos processos de tratamento. Para isso, é necessária a execução de um 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.

### **3.3 Condições Operacionais**

Um fator muito importante para a retenção de sólidos nos reatores UASB consiste na velocidade ascensional em, sendo necessário operar com baixas velocidades ascensionais, já que dessa forma é possível manter elevada quantidade de bactérias no reator e alcançar eficiência na remoção de sólidos (LETTINGA & HULSHOFF POL, 1991; VAN HANDELL & LETTINGA, 1994; CHERNICHARO, 1997). Além disso, a determinação do tempo de detenção hidráulica (TDH), definido pelo volume do reator pela vazão, é a primeira etapa no

dimensionamento do reator UASB para o tratamento de efluentes (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

O tempo de detenção hidráulica atua no desempenho do sistema por meio do tempo de contato entre o esgoto e o lodo, da velocidade ascensional do líquido, da carga orgânica aplicada e do tempo de permanência dos sólidos no reator (MAHMOUD *et al.*, 2003). A redução do TDH leva à diminuição do tempo de contato entre biomassa e substrato, enquanto às maiores velocidades ascensionais, causam um maior arraste de biomassa, e, com isso, a deterioração da qualidade do efluente, mas por outro lado proporciona uma melhor mistura do sistema, favorecendo a transferência de massa e o aumento do grau de hidrólise do substrato (CAMPOS e ANDERSON, 1992; PEÑA *et al.*, 2006).

Alguns estudos constataam diferenças significativas nas eficiências de remoção de DQO e SST, para cada condição hidrodinâmica, com o reator mais próximo da mistura completa para TDH de 6 e 8h. Em condições de sobrecarga (5h) e subcarga (10h) hidráulica, os autores constataam a ocorrência de zonas estagnadas e caminhos preferenciais no leito de lodo conjuntamente com a perda de eficiência, principalmente de SST (PENÃ *et al.*, 2006).

A temperatura também é um importante parâmetro operacional dos reatores, que irá afetar as reações de degradação do material orgânico (MCCARTY, 1964). Dessa forma, alterações na temperatura podem ocasionar um desequilíbrio na atividade biológica já que os microrganismos não possuem meio de controlar a temperatura interna e assim mesmo provocar variações em vários parâmetros como alcalinidade, produção de gás, etc. (PONTES, 2003). Uemura & Harada (2000) constataam significativa redução da taxa de hidrólise dos sólidos retidos no lodo de reator UASB quando ocorre diminuição da temperatura (de 25°C para 13 °C). Além disso, o controle do pH é necessário o monitoramento e estabilidade do processo. A alta taxa de metanogênese, por exemplo, ocorre quando o pH se encontra próximo a neutro, sendo importante não ocorrer variações bruscas de pH.

Além de monitorar o TDH, a temperatura e o pH, é fundamental o monitoramento das possíveis alterações nas características da biomassa. O índice volumétrico de lodo (IVL) é um parâmetro operacional da biomassa, definido como o volume ocupado por 1 g de lodo após uma sedimentação de 30 minutos e é utilizado em estações de tratamento para

levantamento de dados e controle operacional da estação (VON SPERLING et al., 1997). Segundo Cuervo-Lopez (1999) quanto maior o IVL, pior é a sedimentabilidade do lodo e limitação do IVL depende da concentração inicial de sólidos.

### **3.4 Produção e Gerenciamento de Lodo em Reatores Anaeróbios**

Como descrito anteriormente, o tratamento de esgoto em reatores UASB é composto pela digestão anaeróbia que irá desenvolver no seu interior uma população de microrganismos adaptados às condições do meio (pH, temperatura, substrato, carga hidráulica, etc). Sendo assim, por meio desse processo será formado o lodo, que é o protagonista no processo anaeróbio, em que sua qualidade e seu contato com a matéria orgânica são fatores responsáveis pelo sucesso do tratamento (ABBASI, 2012).

Segundo Leitão *et al.* (2005), a quantidade de lodo é um ponto de grande notoriedade, pois ao mesmo tempo em que é importante uma maior quantidade de lodo para se obter a maior eficiência do tratamento, também é importante que essa quantidade seja adequadamente operada dentro do reator, para garantir sua retenção, resultando em idades de lodo elevadas e conferindo alto grau de estabilização (LEITÃO *et al.*, 2010).

A adequada operação também consiste no cuidado da capacidade limite de retenção e armazenamento de lodo conforme o volume de projeto do compartimento de digestão e de decantação do reator. Esse limite não deve ser ultrapassado, necessitando assim de estratégias de descarte do lodo excedente (CHERNICHARO *et al.*, 2018).

Muitos reatores operantes no Brasil atuam com excesso de lodo, devido à inexistência de uma operação que vise um correto descarte, seja por fatores econômicos ou por falta de conhecimento dos operadores. Segundo Chernicharo *et al.* (2018), o excesso de lodo pode ocasionar em algumas das seguintes consequências:

- O lodo do compartimento de digestão segue para o compartimento de decantação, ocasionando na perda de sólidos e conseqüente queda na eficiência física de remoção de matéria orgânica do reator, em decorrência do aumento da parcela de DQO e DBO particuladas presentes no efluente;
- Aumento da formação de espuma no compartimento de decantação do reator;
- Acúmulo excessivo de areia decantada;

- Diminuição do volume útil do reator;
- Comprometimento da unidade de pós tratamento, notadamente daquelas que operam com algum meio de enchimento (p.ex.: biofiltros, filtros percoladores).

Chernicharo *et al.* (2018), então, afirma que a ausência ou ineficiência do gerenciamento do lodo pode comprometer a eficiência do sistema de tratamento como um todo. Sendo assim, o autor estuda a possibilidade do envio do lodo para tanques de adensamento, de modo a possibilitar a separação e retorno do excesso de água para a unidade de tratamento preliminar, ou para o próprio reator UASB.

### **3.5 Sistemas Aeróbios Pós Tratamento de Reatores UASB**

Existem diversas configurações e combinações de sistemas de tratamento sendo estudadas e aplicadas atualmente, visando resultar nos melhores resultados possíveis. Neste contexto, embora apresente vantagens, o processo anaeróbio ainda apresenta adversidades em garantir um efluente que se enquadre aos padrões usuais da legislação ambiental (CHERNICHARO *et al.*, 2001).

Sendo assim, o efluente do processo anaeróbio necessita de tratamento posterior para complementar e aprimorar a remoção de compostos orgânicos e patógenos. Alguns tipos de associações dos sistemas de tratamento de esgotos anaeróbio e aeróbio podem contribuir para a redução de custos operacionais, potencializar a eficiência do tratamento e minimizar os aspectos negativos, tornando possível uma maior remoção da matéria orgânica, remoção de nitrogênio e, algumas vezes, de fósforo. É necessário também, que os sistemas de pós-tratamento sejam concebidos, preferencialmente, em consonância com o conceito básico dos reatores anaeróbios.

Segundo estudos realizados por Von Sperling e Chernicharo (1998), a associação de reatores anaeróbios e aeróbios possuem como principais vantagens a melhoria na qualidade do efluente, menor consumo de energia, menor consumo de produtos químicos na desidratação do lodo, menor quantidade de lodo produzido e maior simplicidade operacional em relação aos processos convencionais de tratamento. Portanto, torna-se importante a inclusão de uma etapa de tratamento posterior aos reatores UASB, objetivando tanto a qualidade microbiológica do efluente, como também, a qualidade da matéria orgânica e de nutrientes, por meio da possibilidade de retorno do lodo (CHERNICHARO e ALMEIDA, 2009).

Diante das diversas possibilidades de combinações dos sistemas anaeróbios e aeróbios, o uso de filtros biológicos percoladores como opção de pós-tratamento, consiste em uma alternativa atraente, uma vez que os FBP possuem vantagens relevantes em relação a outros sistemas aeróbios, como a baixa demanda energética e a menor complexidade em termos de equipamentos (GONÇALVES et al, 2001).

Os filtros biológicos percoladores consistem em sistemas de tratamento de esgoto por processo biológico, constituído de um meio suporte de materiais como pedras, ripas ou material plástico. O contato aplicado do esgoto nesse meio suporte é contínuo e realizado por meio de distribuidores rotativos ou estacionários, movidos pela própria carga hidráulica dos esgotos ou por energia elétrica. Após a aplicação, o esgoto escoar rapidamente pelo meio suporte e essa percolação permitirá o crescimento bacteriano na superfície do material de enchimento, fazendo com que o esgoto entre em contato com os microrganismos existentes no biofilme formado, ocorrendo assim a decomposição da matéria orgânica presente (VON SPERLING, 1995).

Sendo assim, a associação de reatores UASB seguidos de filtros biológicos percoladores apresenta um fluxograma simplificado, compreendendo as unidades de tratamento biológico anaeróbio e aeróbio em sequência (reator UASB, filtro biológico percolador e decantador secundário), além da unidade de desidratação. Nesta configuração, o lodo aeróbio excedente retirado do decantador secundário é encaminhado de volta ao reator UASB para adensamento e digestão anaeróbia. (CHERNICHARO e ALMEIDA, 2009).

### **3.6 Retorno de Lodo Aeróbios para Reatores UASB**

Os lodos aeróbios necessitam de serem descartados dos sistemas e estabilizados antes da disposição final, gerando custos que compõem 50% dos custos operacionais nas estações (COSENTINO et al., 2005). Como a digestão anaeróbia possui diversas vantagens, os reatores UASB podem ser utilizados para estabilizar os lodos aeróbios, e Van Haandel e Letinga (1994) então propuseram o retorno de lodo de decantadores para digestão e adensamento em sistema UASB.

Neste contexto, o sucesso de qualquer sistema combinado de tratamento anaeróbio e aeróbio depende da manutenção de uma biomassa adaptada e com elevada atividade microbiana. Logo, o monitoramento das mudanças nas características do lodo é essencial para o processo

de retorno de lodo aeróbio para o reator UASB, como a estabilidade, distribuição granulométrica, índice volumétrico do lodo, entre outros (PONTES E CHERNICHARO, 2009). Segundo Franco *et al.* (2002), o retorno de lodo deverá provocar, ainda, alterações na velocidade ascensional no reator UASB, que podem influenciar a conversão de substratos e as características da biomassa no reator afetando a performance do reator e devendo assim ser avaliadas.

Nesse sentido, para garantir o adequado gerenciamento desses subprodutos sólidos, é fundamental o estabelecimento de rotinas operacionais para o manejo do lodo. Segundo Chernicharo (1997), para efetuar o retorno de lodo, é necessário a sistematização dos seguintes aspectos: sensibilização dos operadores; cálculo mais preciso da produção de lodo nos reatores; definição das quantidades de lodo a serem mantidas e definição da estratégia de descarte e das características do sistema de desaguamento.

Dessa forma, a combinação de sistemas UASB com sistemas aeróbios, incluindo o encaminhamento do lodo secundário para digestão no próprio reator UASB, apresentam vantagens como a minimização da produção de lodo (que deverá ser reduzida, apenas, ao reator UASB) e a produção de um lodo mais concentrado e estabilizado (PONTES, 2003), obtendo assim economia de adensadores de lodo e de seu descarte, garantia de menores descargas de matéria orgânica nos corpos receptores (ALEM SOBRINHO E JORDÃO, 2011).

Apesar do avanço nos conhecimentos relacionados sobre o tratamento combinado de esgoto doméstico e lodo de descarte aeróbio em reatores UASB, ainda é necessário um estudo mais aprofundado sobre a influência do retorno de lodo aeróbio nas características da biomassa no reator anaeróbio (PONTES e CHERNICHARO, 2009). Além disso, os estudos relacionados ao retorno do lodo de descarte para o reator UASB, em um sistema reator UASB/FBP, encontram-se em grande maioria em escala piloto e de demonstração (Chernicharo, 2017), mas segundo Jenícek *et al.* (1999), é esperado que a combinação do tratamento de esgoto e lodo de excesso atenda aos requisitos de remoção de material orgânico típico do tratamento de águas residuárias (em torno de 60 a 80%).

Ao iniciar trabalhos experimentais em escala piloto, Ortega et al. (1996) estudou o retorno de lodos ativados ao reator UASB, identificou uma biomassa com maior capacidade de sedimentação ao qual contribuiu para degradação da matéria orgânica fornecida, relatando valores de remoção de DQO de 78%. Nos estudos realizados por Pontes (2003) e Pontes e Chernicharo (2009), avaliando reatores UASB recebendo lodo excedente de filtro biológico percolador, em sistemas em escala piloto e demonstração, foram observadas eficiências médias de remoção de DQO no sistema operando com retorno de lodo de 70 a 75%.

Valores de eficiência ainda maiores foram encontrados por Freire, von Sperling e Chernicharo (1999), em um estudo avaliando o retorno de lodo do sistema de lodos ativados para reator UASB em uma planta piloto, em que obtiveram relatos de 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. Já em trabalho mais recente, Silva Filho e van Haandel (2014) realizaram estudo em escala piloto, com quatro unidades de reatores UASB (sendo uma com retorno de lodo) e uma lagoa aerada de mistura completa (lodo ativado), obtendo-se eficiência média de remoção de DQO de 60% e concentração efluente de 170 mg/l. Segundo os autores, mesmo sendo uma eficiência menor do que a apresentada em estudos anteriores, o retorno de lodo não ocasionou impacto negativo na performance do UASB.

Considerando os estudos dos autores citados acima, observa-se que há comum concordância do potencial da aplicação da técnica de retorno de lodo, pois não há constatações relacionadas aos efeitos negativos sobre o desempenho dos reatores UASB e dos sistemas de tratamento como um todo. No entanto, é importante ressaltar que os trabalhos citados consistem em estudos em escala piloto, que possuem condições de operação mais controladas, sendo necessário assim maiores aprofundamentos em estações em escala plena (Floripes, 2015).

Segundo Kassab et al. (2010), apesar dos resultados favoráveis em relação ao retorno de lodo apresentados nestes estudos, essa é uma técnica que pode causar perdas de sólidos no efluente de reatores UASB em escala plena, devido à ausência de descartes frequentes, má sedimentabilidade do lodo e, principalmente, ao gerenciamento ineficiente relacionado ao retorno e ao descarte (PONTES, 2003). Buscando resultados mais concretos em escala plena, Magalhães (2012) realizou estudo na estação de tratamento de esgoto (ETE) *Laboreaux*,

avaliando o retorno de lodo secundário dos decantadores para as oito unidades de reatores UASB, operando com TDH de 18h. A autora encontrou eficiências médias de remoção de DQO e SST no período com retorno de lodo de 72% e 80%, respectivamente e eficiências médias de remoção de DQO e SST no período sem retorno de lodo, 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. Sendo assim, foi possível concluir que o impacto da recirculação de lodo não acarretou prejuízos na qualidade do efluente dos reatores UASB e nem na eficiência global do sistema na estação.

Floripes (2015) também avaliou o impacto do efeito de lodo na ETE Laboreaux e, na fase operacional de TDH médio de 9h, encontrou eficiências de remoção de 71% de DQO, 81% SST e 97% SSed. Em seu estudo, o autor identificou que tais valores de eficiência só foram possíveis devido à retirada do passivo de lodo dos reatores e à manutenção da concentração de lodo, ou seja, a operação do retorno de lodo deve estar acompanhada do controle da massa de lodo no interior dos reatores anaeróbios. Além disso, o autor também identificou que a prática do retorno de lodo não provoca redução na qualidade do efluente, desde que haja um gerenciamento adequado do lodo de excesso nos reatores UASB.

Dessa forma, por se tratar de um tema que ainda apresenta poucos trabalhos, o presente estudo também terá como foco a estação de tratamento de esgoto (ETE) *Laboreaux* em Itabira, Minas Gerais, que possui em seu fluxograma o tratamento combinado anaeróbio/aeróbio e retorno do lodo aeróbio para reatores UASB.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Área de Estudo

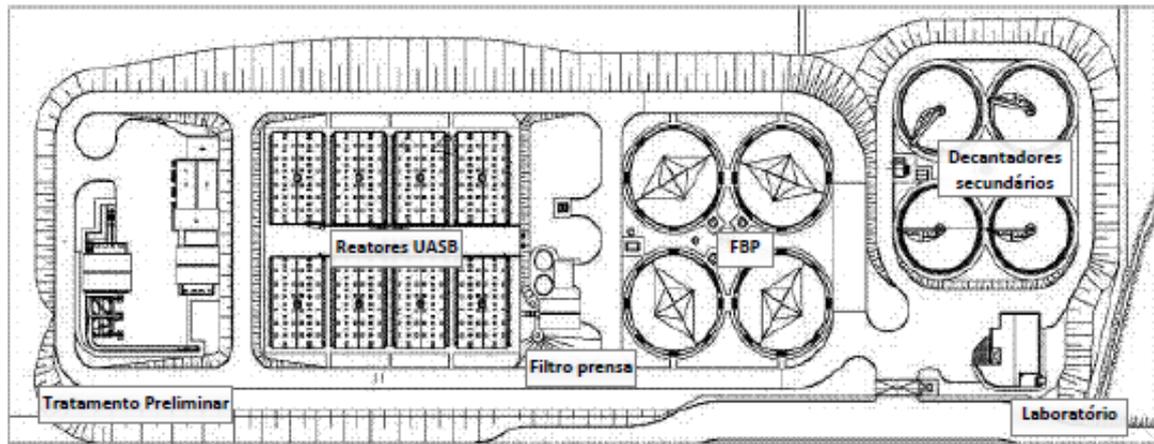
A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) *Laboreaux* está localizada no município de Itabira, no estado de Minas Gerais. Itabira é um município mineiro com população de aproximadamente 120.000 habitantes, ocupando uma área de 1.254,49 km<sup>2</sup>, sendo 42 km<sup>2</sup> de área urbana e 1.212,49 km<sup>2</sup> de área rural.

O Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) é a autarquia responsável pelo sistema de abastecimento de água e pelo esgotamento sanitário do município e seus distritos. O sistema de esgotamento sanitário compreende as sub-bacias do córrego Água Santa e a do rio do Peixe, ambas inseridas na bacia hidrográfica do rio Piracicaba (PMSB, 2015).

A ETE *Laboreaux* tem como objetivo principal a remoção de sólidos em suspensão e estabilização da matéria orgânica, por um sistema de tratamento em nível secundário, tratando o esgoto doméstico da malha urbana do município, com capacidade de atender em sua primeira fase de implantação 60.000 habitantes.

O *layout* da estação de tratamento da ETE *Laboreaux* está apresentado na Figura 3. Primeiramente o afluente passa pela unidade de tratamento preliminar, constituído por gradeamento de sólidos grosseiros, seguido por gradeamento de sólidos finos. O efluente é encaminhado para o desarenador por meio de uma elevatória de esgoto bruto e segue pelo tratamento por uma segunda elevatória de esgoto bruto. Ao chegar na primeira caixa divisora de vazão, CDV1, o esgoto é direcionado para as unidades de tratamento biológico anaeróbio, constituída por oito unidades de reatores UASB e posteriormente o efluente dos UASB é encaminhado para a caixa divisora de vazão, CDV2, que encaminha o esgoto para o tratamento aeróbio em duas unidades de filtros biológicos percoladores, onde, após o tratamento, o esgoto é encaminhado para a caixa distribuidora de vazão, CDV3, que divide igualmente a vazão para os dois decantadores da ETE.

No final do tratamento, o efluente encontra-se adequado para lançamento no corpo receptor Ribeirão do Peixe. Espera-se que o efluente atinja eficiência em remoção de carga orgânica e sólidos entre 87 a 92%.

**Figura 3** – Layout das unidades de tratamento da ETE *Laboreaux*

Fonte: LOBATO *et al.*, 2011

A **Tabela 1** apresenta as principais características das unidades que compõem o fluxograma da ETE *Laboreaux*.

**Tabela 1:** Características principais das unidades da ETE *Laboreaux*

Características	Reatores UASB	Filtros biológicos percoladores (FBP)	Decantadores secundários (DS)
<b>População (hab.)</b>		70.000	
<b>Vazão (L/s)</b>		170	
<b>Número de unidades</b>	8	2	2
<b>Tipo</b>	Retangular	Circular	Circular
<b>Dimensões (m)</b>	L = 21,7 e H = 6,2	D = 22,5	D = 20,0
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	134,5	397,6	314,0
<b>Profundidade</b>	4,5	2,5	3,0
<b>Volume útil (m<sup>3</sup>)</b>	605,25	-	942,00

Fonte: Floripes (2015)

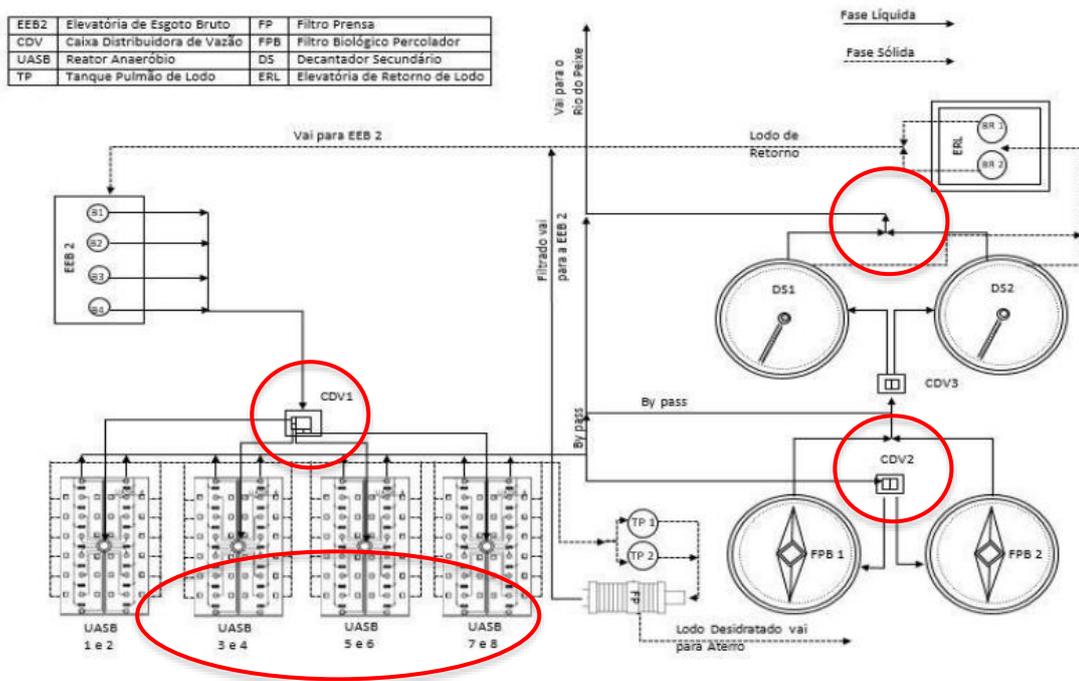
#### 4.2 Pontos de Monitoramento Avaliados

Em função do cumprimento de parte da condicionante da licença de operação da ETE, é realizado monitoramento da estação por meio de análises físico-químicas e biológicas. Visando avaliar a eficiência de tratamento do efluente, após os reatores UASB com o retorno

de lodo, foi realizada análise dos dados referentes ao monitoramento da ETE *Laboreaux* durante todo ano de 2019.

Os pontos de monitoramento adotados consistem na caixa distribuidora de vazão de esgoto mais lodo de retorno (CDV1), no efluente de cada reator coletado no ponto de monitoramento localizado na lateral dos reatores (REATORES UASB), na caixa de passagem dos efluentes após os reatores (CDV2) e na saída dos decantadores (EFLUENTE FINAL). Os reatores 1 e 2 não foram considerados pois não estavam operando durante o ano de 2019. A identificação da localização dos pontos encontra-se na Figura 4, cujo detalhamento está apresentando na Figura 5.

**Figura 4** – Localização dos pontos de monitoramento



Fonte: Floripes (2015)

**Figura 5** – Quadro de Identificação da localização dos pontos de monitoramento

Ponto de coleta	Descrição do ponto de coleta
CDV 1	Afluente ao UASB: esgoto após tratamento preliminar + lodo de retorno
REATORES UASB (R3, R4, R5, R6, R7 e R8)	Efluente de cada reator UASB
CDV2	Efluente geral (mistura) dos efluentes de cada reator UASB
EFLUENTE FINAL	Efluente final da ETE (após decantadores)

Para análise de desempenho, foram realizadas análises dos seguintes parâmetros físico-químicos: Demanda Química de Oxigênio (mg O<sub>2</sub>/L) - DQO, Sólidos Sedimentáveis (mL/L) - SSed, Sólidos Suspensos Totais (mg/L) - SST, pH e Temperatura (°C), segundo o *Standard Methods for Examination of Water and WasterWater* (APHA, 1999), com frequência de monitoramento de duas vezes por semana.

Sendo assim, por meio da elaboração de gráficos de série histórica, serão apresentados os dados obtidos para avaliar o impacto do retorno do lodo aeróbio em relação ao desempenho dos reatores UASB e em relação à qualidade do efluente final.

#### 4.3 Desempenho dos Reatores UASB com Recirculação de Lodo Aeróbio

O lodo aeróbio dos decantadores secundários foi encaminhado para a elevatória de retorno de lodo (ERL), por recalque, para o poço de sucção da estação elevatória (EE-02) e, portanto, retornando aos reatores UASB para adensamento e estabilização anaeróbia. O lodo excedente gerado da digestão anaeróbia foi encaminhado para a central de desidratação mecânica, composta de tanque de alimentação e filtro prensa. Após a desidratação o lodo foi transportado para o aterro sanitário.

No ano de 2019, os reatores R1 e R2 não estavam operando, apenas os reatores R3, R4, R5, R6, R7 e R8. O retorno de lodo ocorreu de modo manual durante o dia com duração variável (de acordo com a concentração do dia e de acordo com a experiência do operador). Essa duração pode ser considerada de 1 a 4 horas por decantador, em alguns casos poder ter ocorrido por mais tempo.

Os dados utilizados no presente estudo consistem em dados secundários, coletados com objetivo de monitoramento pela equipe de operadores da ETE *Laboreaux*. Para apoio da análise dos dados secundários foram verificadas pesquisas que tiveram como objeto de estudo os reatores UASB e os impactos do retorno do lodo, como Aisse, *et al.* (2000), Oliveira e Von Sperling (2005), Pontes (2003), Pontes e Chernicharo (2009), Magalhães (2012) e Floripes (2015).

Por meio da elaboração de gráficos de série história, serão apresentados os dados obtidos para avaliar o impacto do retorno do lodo aeróbio em relação ao desempenho dos reatores UASB e em relação à qualidade do efluente final da estação. Como o efluente tratado da ETE *Laboreaux* é lançado no ribeirão do Peixe, enquadrado como Classe 2, conforme Deliberação Normativa do COPAM/CERH-MG N° 01 de 05 de maio de 2008, (MINAS GERAIS, 2008), os parâmetros que caracterizam o efluente devem atender aos limites estabelecidos para os padrões de lançamento para esta classificação.

Sendo assim, foi realizado diagnóstico para entender o efeito do retorno do lodo nos sistemas anaeróbios e avaliar se o processo foi satisfatório na ETE *Laboreaux*.

#### **4.4 Resumo do Delineamento Metodológico Adotado**

Para melhor compreensão do delineamento metodológico adotado para atingir o objetivo geral, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seguir apresenta as informações dos materiais e métodos utilizados em cada objetivo específico do presente estudo.

**Quadro 1 - Delineamento Metodológico Adotado**

<b>Objetivo específico relacionado</b>	<b>Materiais</b>	<b>Métodos</b>
Avaliar o impacto do retorno de lodo secundário no desempenho de reatores UASB ETE Laboreaux;	Base de dados dos pontos CDV1, Reatores UASB e CDV2 da ETE Laboreaux para o ano de 2019.  Literatura especializada: Aisse, <i>et al.</i> (2000) e Oliveira e Von Sperling (2005).	Gráficos de série histórica dos parâmetros DQO, SST e SSed,
Avaliar a eficiência de remoção de DQO dos reatores UASB com retorno de lodo da ETE Laboreaux em relação aos estudados encontrados em literatura especializada.	Base de dados dos pontos CDV1 e CDV2 da ETE Laboreaux para o ano de 2019.  Literatura especializada: Pontes (2003), Pontes e Chernicharo (2009), Magalhaes (2012) e Floripes (2015)	
Avaliar o impacto do retorno de lodo na qualidade do efluente final da estação, a partir da meta de atendimento aos padrões ambientais.	Base de dados dos pontos CDV1 e Efluente Final da ETE Laboreaux para o ano de 2019.  Deliberação Normativa do COPAM/CERH-MG N° 01 de 05 de maio de 2008	

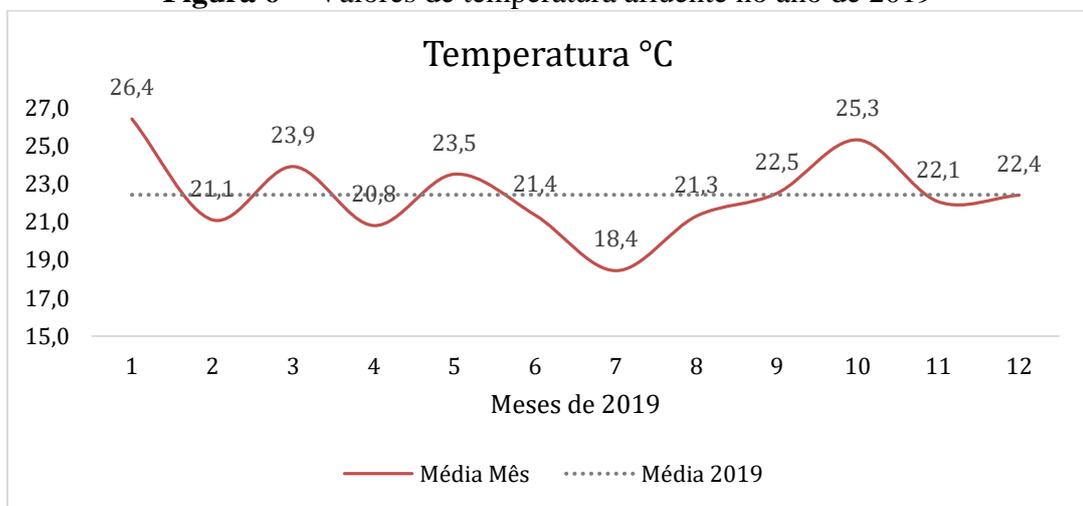
Fonte: Autoria Própria

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

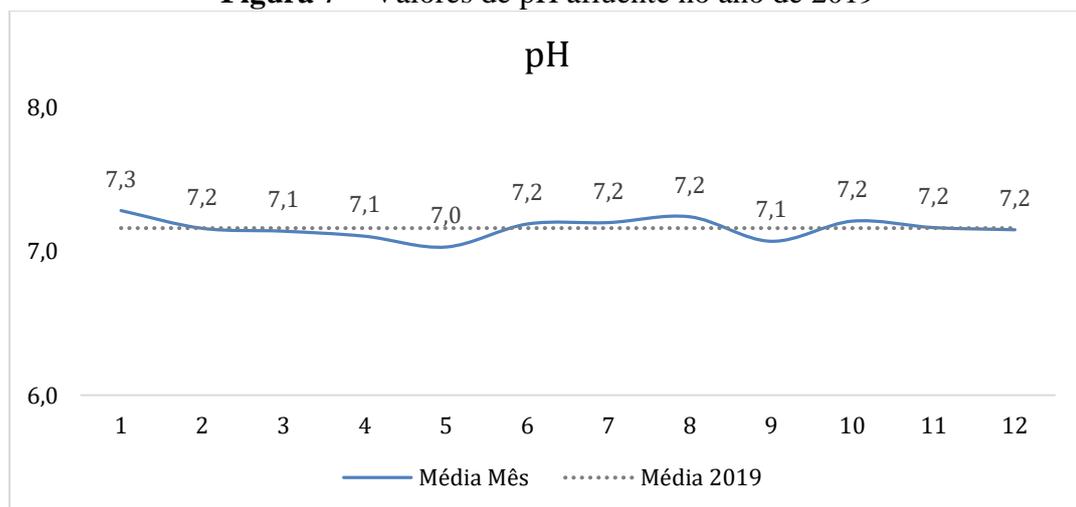
### 5.1 Condições Operacionais do Sistema

As Figura 6 e Figura 7 apresentam os valores obtidos de temperatura e pH do esgoto afluente ao longo dos meses de 2019. Como a temperatura é um fator que compromete diretamente na termodinâmica das reações e o pH pode afetar de maneira drástica as bactérias, é importante verificar em qual média de temperatura e pH o sistema operou durante o ano de 2019 (MENDONÇA, 2009).

**Figura 6 – Valores de temperatura afluente no ano de 2019**



**Figura 7 – Valores de pH afluente no ano de 2019**

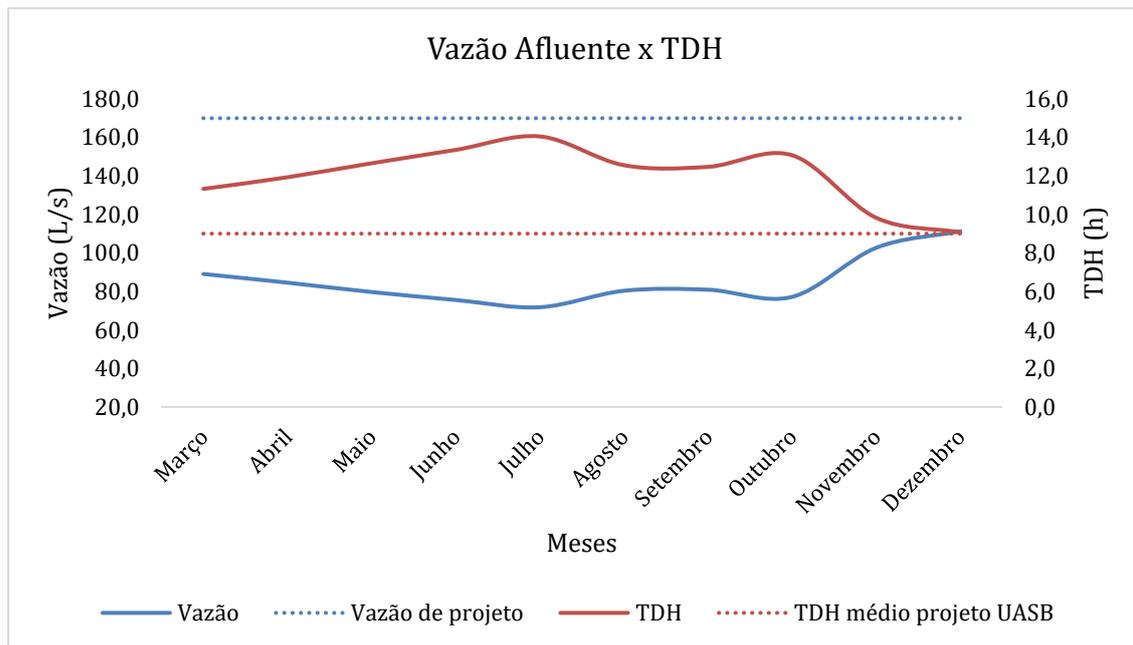


Foresti *et al.* (2006), indicam a faixa de temperatura de 25°C a 35°C como ótima para a atividade bacteriana no processo de digestão anaeróbia. Durante o ano de 2019, a temperatura média foi de 22,4°C, apresentando valores dentro do nível mesofílico (20 a 50°C) para o

desenvolvimento bacteriano, como relatado por Metcalf & Eddy (2016). Analisando a Figura 8, é possível verificar que a média do pH foi de 7,0, valor satisfatório já que a maioria das bactérias desenvolvem-se melhor sempre em torno da neutralidade, entre pH nos limites de 6,5 e 7,5 (VIEIRA e SOUZA, 1981).

Em relação à vazão afluyente, a Figura 8 apresenta as vazões médias ao longo dos meses de 2019 e os correspondentes tempos de detenção hidráulica nos reatores UASB.

**Figura 8** – Gráfico Vazão versus Tempo de Detenção Hidráulica (TDH)



Por meio da análise do gráfico apresentado, é possível perceber que as vazões médias afluentes aos seis reatores da ETE *Laboreaux* no ano de 2019 se mantiveram abaixo da vazão de projeto (170 L/s), variando entre 70 e 110 L/s. Esse comportamento foi relatado também por Floripes (2015), que encontrou vazões médias afluentes aos reatores da ETE *Laboreaux*, entre 60 e 90 L/s. Devido à vazão baixa e conseqüentemente os valores de TDH alto, é possível deduzir que os reatores estão operando em subcarga. Portanto, o espelhamento das unidades da ETE, segunda fase de projeto, em andamento, torna-se ocioso, uma vez que as unidades antigas ainda são capazes de atender a vazão total de entrada na ETE com folga de 60 a 100 L/s.

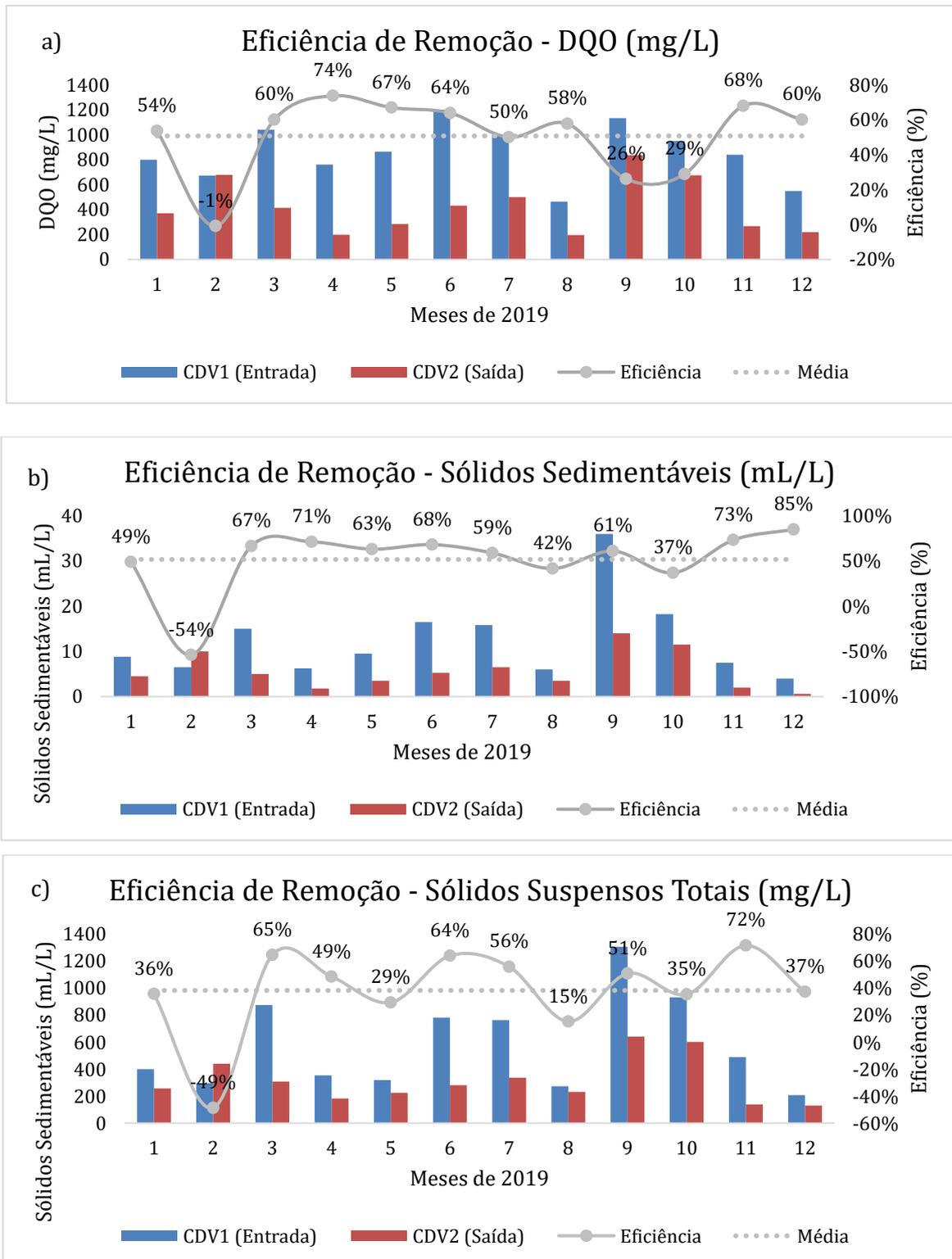
No contexto do município, tais fatores são indicativos de que, apesar da cidade já ter superado a população de projeto, a rede coletora de esgoto não está atendendo a 100% do contingente populacional ou, se está, pode estar ocorrendo vazamento na rede coletora ou lançamento clandestino. Outra possibilidade, é que a vazão do esgoto produzido nos distritos de Ipoema e Senhora do Carmo, que compõem o município, foi levada em consideração no dimensionamento da população de projeto. Porém, esses distritos já possuem unidades simplificadas/compactadas de tratamento de esgoto, a vazão possivelmente não está sendo mais direcionada até à ETE *Laboreaux*.

Floripes (2015) mostrou que a adequação do TDH médio da ETE *Laboreaux*, para o TDH de projeto (9h), foi essencial para o ideal monitoramento da estação, já que ao ajustar o TDH, é possível aproximá-lo do que é usualmente definido em projeto de reatores UASB, contribuindo assim para que o tratamento obtenha resultados satisfatórios e comparável a outras ETEs, que operem com ou sem retorno de lodo.

## **5.2 Efeito do Retorno de Lodo dos Decantadores sobre o Desempenho dos Reatores UASB**

O efeito do retorno de lodo, sobre os reatores estudados, pode ser avaliado de forma geral pelas Figura 9, que apresenta os gráficos de série histórica dos parâmetros DQO (mg/L), SSed (mL/L) e SST (mg/L), para os pontos de tomada de amostra CDV 1 (caixa de distribuição de esgoto, em que o esgoto bruto afluente é misturado ao lodo de retorno vindo dos decantadores secundários) e CDV2 (mistura dos efluentes de cada reator UASB).

**Figura 9** – a) Eficiência de Remoção de DQO (mg/L) b) Eficiência de Remoção de Sólidos Sedimentáveis (mL/L) c) Eficiência de Remoção de SST (mg/L)



O valor médio afluente aos reatores anaeróbios foram de 858,0 mg/l de DQO e 584,0 mg/L de SST, resultando em uma carga orgânica média de 12807,94 kgDQO/d e 4304,0 mgSST/L afluente à estação, ou seja 2134,66 kgDQO/reator.d e 717 kgSST/reator.d (considerando os 6 reatores). É possível perceber que o mês de fevereiro apresentou resultados insatisfatórios em todos os parâmetros, causando assim uma considerável queda na média de eficiência do tratamento anaeróbio.

Dessa forma, as concentrações médias do efluente foram iguais a 423 mgDQO/L, 315 mgSST/L e 6mLSSed/L. A eficiência de remoção de DQO dos sistemas UASB variou entre 26% a 74%, apresentando uma eficiência média de remoção de 51%, a eficiência de remoção de Sólidos Suspensos Totais variou entre 15% e 72%, apresentando então uma eficiência média de 38% e a eficiência de remoção de Sólidos Sedimentáveis variou entre 37% e 85%, apresentando então uma eficiência média de 52%.

Ao analisar estudos de reatores UASB sem retorno de lodo, como o de Aisse *et al.* (2000), encontra-se eficiência no tratamento de esgoto sanitário em relação à remoção de DQO e sólidos suspensos totais de 70% e 72,6%, respectivamente. Sendo assim, os valores de eficiências de remoção observados não se aproximam dos valores encontrados em estudos de estações que operam sem o retorno de lodo, mostrando que de certa forma, o retorno está influenciando na redução da eficiência do sistema.

Ao constatar que os resultados do desempenho dos reatores UASB com retorno de lodo se diferenciam dos resultados encontrados na literatura dos reatores UASB sem retorno de lodo, é necessário avaliar trabalhos que estudaram operações que tenham essa prática em seu fluxograma. Como citado anteriormente, estudos realizados por Pontes (2003) e Pontes e Chernicharo (2009), avaliando reatores UASB recebendo lodo excedente de filtro biológico percolador, observaram eficiências médias de remoção de DQO no sistema operando com retorno de lodo de 70 a 75%, valores acima da média encontrada nos reatores UASB da ETE *Laboreaux*. Porém, por se tratarem de sistemas em escala piloto e demonstração, há ainda a necessidade de avaliar também resultados em escala plena.

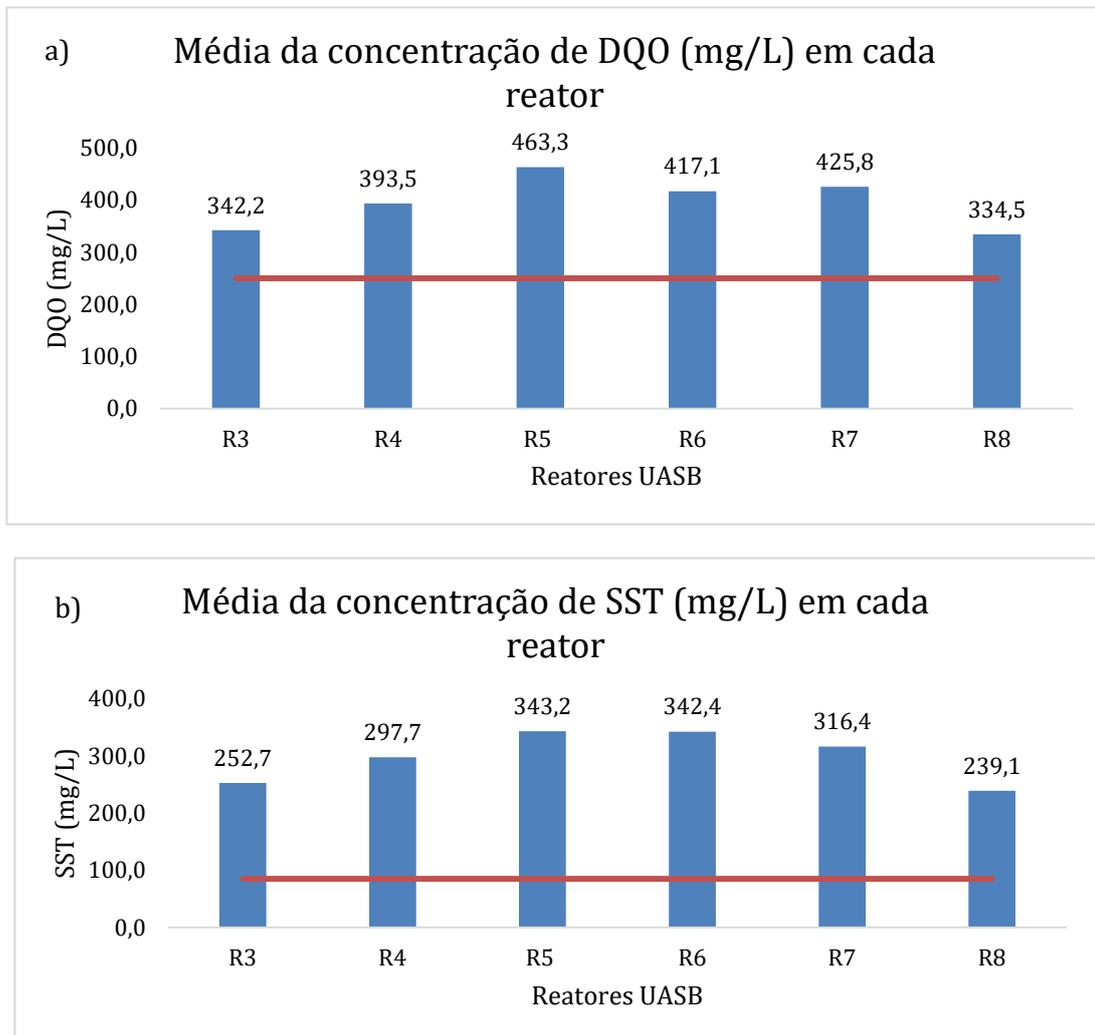
Avaliando os valores encontrados por Magalhães (2012) e Floripes (2015), observa-se que em ambos os estudos o retorno de lodo nos reatores UASB não acarretou prejuízos na

qualidade do efluente dos reatores UASB e nem na eficiência global do sistema na ETE. Magalhães (2012), encontrou eficiências médias de remoção de DQO e SST no período com retorno de lodo de 72% de DQO e 80% de SST, valores próximos à reatores UASB operando sem retorno de lodo. Assim como Floripes (2015), que encontrou eficiências de remoção satisfatórias: 73% de DQO, 84% para SST e 88% SSed.

Um fator importante observado nos dois trabalhos foi que os autores descreveram que, para chegar a esses valores de eficiência, foi necessário um gerenciamento adequado do lodo de excesso nos reatores UASB. Floripes (2015), relata que durante a operação, houve retirada do passivo de lodo dos reatores e manutenção da concentração de lodo, acompanhando assim a massa de lodo no interior dos reatores anaeróbios. Magalhães (2012), também afirma que os resultados encontrados demonstram que a rotina de descarte realizada durante a pesquisa influenciou substancialmente a qualidade do efluente e a eficiência do reator UASB.

Ainda visando avaliar o desempenho dos reatores, foi realizada uma comparação entre os valores médios de concentração de DQO e SST nos efluentes de cada reator UASB estudado (R3, R4, R5, R6, R7 e R8), com o valor médio encontrado em estudo realizado por Oliveira e Von Sperling (2005) em 116 ETEs nacionais, com reatores UASB operando sem retorno de lodo, onde os autores apresentam valores de referência para os parâmetros DQO e SST iguais a 250 mgDQO/L e 85 mgSST/L, respectivamente. Dessa forma, é possível verificar se o desempenho de cada reator que recebe o retorno de lodo é semelhante ao desempenho dos reatores UASB estudados por Oliveira e Von Sperling (2005).

**Figura 10** – a) Comparação entre a média da concentração de DQO (mg/L) em cada reator e valor de referência b) Comparação entre a média da concentração de SST (mg/L) em cada reator e valor de referência



Por meio dos gráficos apresentados na Figura 10, observa-se que todos os reatores obtiveram 100% dos valores de concentração de DQO e SST acima do valor de referência adotado. Sendo assim, é possível observar comportamento semelhante em todos os reatores, ou seja, o procedimento de retorno e descarte de lodo possuiu a mesma sistemática e impactou de forma padrão todos os reatores, excluindo a possibilidade de que apenas algum reator poderia estar apresentando problemas operacionais devido essa interferência.

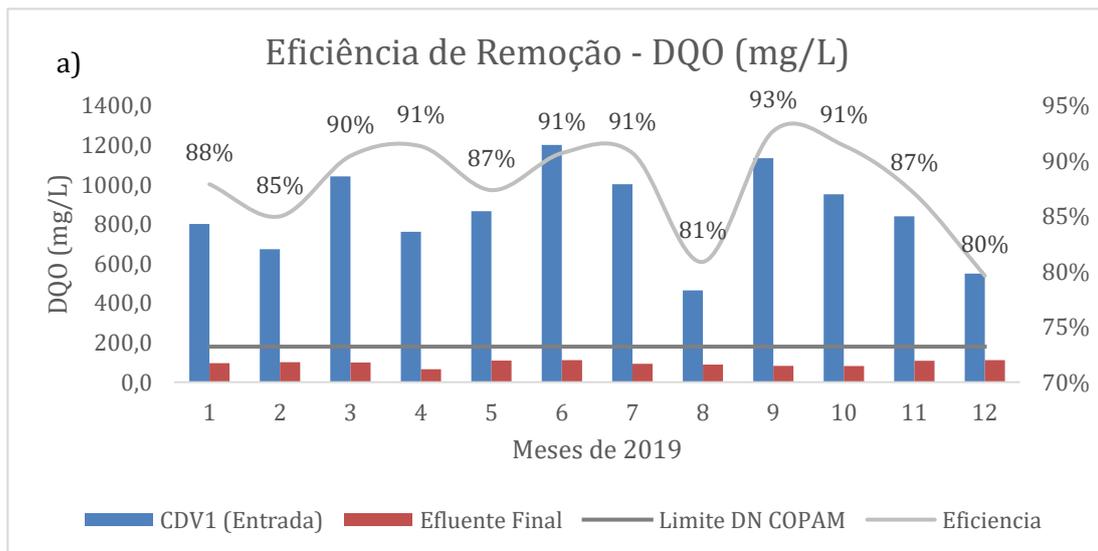
Ainda que os valores encontrados no presente estudo em relação ao desempenho dos reatores UASB com retorno de lodo não sejam satisfatórios, por consistir em um sistema combinado por meio da associação de reatores anaeróbios e aeróbios, só será possível afirmar que o

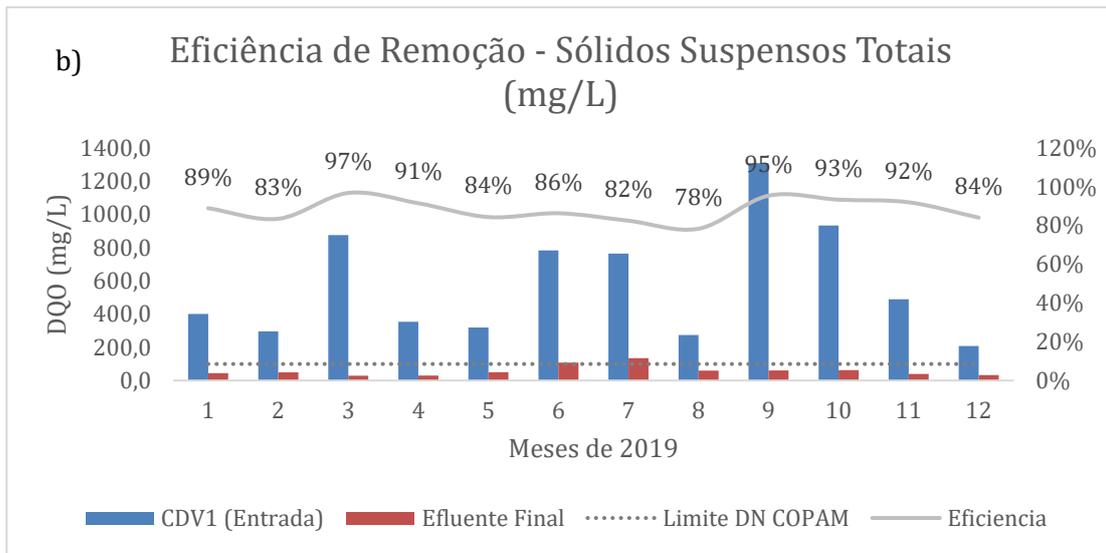
retorno de lodo causou prejuízo ao tratamento de efluentes da estação após avaliar os valores de concentração obtidos no efluente final, os quais serão discutidos a seguir.

### 5.3 Atendimento dos Parâmetros DQO e SST aos Limites Estabelecidos

Para avaliação da influência do retorno de lodo nos reatores UASB em relação ao sistema de tratamento como todo, realizou-se uma análise dos resultados obtidos dos parâmetros DQO e SST no efluente final, para comparação com os valores estabelecidos pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N° 01 de 05 de maio de 2008, a qual estabelece que as condições de lançamento de efluentes para os parâmetros DQO e SST sejam inferiores a 180 mg/L e 100 mg/L, respectivamente. Os gráficos com os valores obtidos estão apresentados a seguir (Figura 11).

**Figura 11** – a) Eficiência de Remoção de DQO da estação no ano de 2019 b) Eficiência de Remoção de SST da estação no ano de 2019





Para o efluente final, com o sistema operando com retorno de lodo, 100% dos resultados das concentrações de DQO estiveram abaixo dos padrões de lançamento estabelecidos pela COPAM/CERH-MG N° 01 05/08. Em relação ao SST, apenas o mês de julho apresentou valor acima do padrão de lançamento, porém por ser uma concentração de 134,5mg/L, pode ser um valor desconsiderado comparando-se aos demais valores de eficiência desse parâmetro no ano de 2019.

Essas observações demonstram que o retorno de lodo dos decantadores secundários influencia consideravelmente a eficiência dos reatores UASB da estação, no entanto, não afeta a qualidade do efluente final e a eficiência global do sistema de tratamento.

## 6 CONCLUSÕES

A partir da realização deste trabalho foi possível perceber que o retorno de lodo aeróbio dos decantadores para os reatores UASB impactou a eficiência de remoção de matéria orgânica nos reatores UASB, apresentando uma média de 50% de eficiência de remoção. Tal valor de eficiência é menor que as eficiências de remoção de reatores UASB sem retorno de lodo, encontrada na literatura (70%), demonstrando que tal intervenção altera de fato o desempenho do sistema.

Porém, ao avaliar a qualidade do efluente final da estação, obteve-se valores satisfatórios, tanto de remoção de DQO quanto de remoção de SST, atendendo assim aos padrões estabelecidos para lançamento no corpo receptor: Ribeirão do Peixe. Os resultados obtidos demonstraram que os filtros biológicos percoladores podem promover uma remoção complementar de DQO e SST do efluente dos reatores UASB.

Ao avaliar estudos realizados em escala plena, observou-se que foram encontrados valores de eficiência maiores que 50%. Entretanto, tais estudos consistiram, durante toda pesquisa, em um gerenciamento adequado do retorno de lodo e monitoramento constante da operação da ETE, algo que não foi possível neste trabalho. Dessa forma, o baixo desempenho do tratamento anaeróbio quando há retorno de lodo pode estar ligado diretamente ao gerenciamento ineficiente do lodo aeróbio gerado na unidade de pós-tratamento, principalmente por se tratar de uma ETE que não seguiu uma rotina padronizada de operação de retorno e descarte de lodo no ano de 2019 e que recebeu uma vazão afluente muito menor do que a de projeto.

Assim como Chernicharo *et al.* (2018) aponta em seu trabalho "*Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário*", os problemas logísticos e administrativos relacionados ao controle do lodo enviado para adensamento e estabilização, além da ausência da remoção sistemática de lodo dos reatores UASB, pode gerar grandes problemas ao tratamento, sendo assim necessário diretrizes de operação que detalhem todos os procedimentos e rotinas operacionais para o adequado gerenciamento do lodo na ETE.

Ao mesmo tempo, os resultados obtidos demonstram a aplicabilidade do sistema UASB/FBP para o tratamento de esgotos sanitários, até mesmo em situações desfavoráveis, como quando o desempenho dos reatores UASB não estão dentro do esperado. Diante das vantagens que consistem o retorno de lodo, esta pode tornar-se uma alternativa promissora para o tratamento de esgotos no Brasil, ao contribuir na economia do descarte de lodo, garantindo também em menores descargas de matéria orgânica e nutriente nos corpos receptores.

De forma geral, conclui-se que a técnica de retorno de lodo é vantajosa para o sistema em escala plena e que os aspectos negativos apresentados são reduzidos com a presença do tratamento aeróbio realizados pelos filtros biológicos percoladores e podem ser cessados por meio de um gerenciamento adequado do lodo aeróbio de retorno.

## 7 REFERÊNCIAS

ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Formation and impact of granules in fostering clean energy production and wastewater treatment in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1696–1708, 2012.

ABREU, S. B.; ZAIAT M. Desempenho de Reator Anaeróbio-Aeróbio de Leito Fixo no Tratamento de Esgoto Sanitário. **Eng. sanit. ambient.** Vol.13 - Nº 2 - abr/jun 2008, 181-188.

AISSE, M. M. 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.

AISSE, M M.; LOBATO, M B.; BONA, A; GARBOSSA, L H. P. Estudo comparativo do reator UASB e do reator anaeróbio compartimentado sequencial no tratamento de esgoto sanitário. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27. 2000, Porto Alegre. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2000.

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. p. 16-22.

ALMEIDA, Paulo Gustavo Sertório de; OLIVEIRA, Sílvia Corrêa; CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. Operação de filtros biológicos percoladores pós-reatores UASB sem a etapa de decantação secundária. **Eng. Sanit. Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 3, p. 281-290. Setembro de 2011.

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 20. ed.. Washington: APHA,1998.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011**. Diário da União, Brasília, 16 mai. 2011.

BRASIL. **Lei Nº 8.080, de 19 de setembro de 1990**. Disponível em: [http://www.cff.org.br/Legisla%C3%A7%C3%A3o/Leis/lei\\_8080\\_90.html](http://www.cff.org.br/Legisla%C3%A7%C3%A3o/Leis/lei_8080_90.html). Acesso em 19 set. 2020.

BICALHO, J. R. S. **Modelagem computacional de um reator anaeróbico fabricado em polietileno de alta densidade rotomoldado**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, RJ, Brasil, 2007.

CAMPOS, J. R. (coordenador). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. São Carlos: Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: FINEP, 464 p., 1999.

CAMPOS, C M. M.; CARMO, F. R. DO; BOTELHO, C. G; COSTA C. C. da, Development and operation of an upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) treating liquid effluent from swine manure in laboratory scale. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 140-147, 2006.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípio do tratamento biológico de águas residuárias – Reatores anaeróbios**. Departamento de engenharia sanitária e ambiental – DESA/UFMG, Belo Horizonte, v. 5, p. 245, 1997.

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. **Projeto PROSAB**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CHERNICHARO, C. A. L. (coordenador). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: FINEP/PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 544 p., 2001.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG. V. 5, 2a edição, 380 p., 2007.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: reatores anaeróbios**. Vol. 5. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2008.

CHERNICHARO, C.A.L.; ALMEIDA, P. G. S. DE. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por filtros biológicos percoladores**. 2009. Apostila ABES. UFMG.

CHERNICHARO, C. A. L. *et al.* 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. **Anais...** LA HABANA, CUBA, 2014.

CHERNICHARO, C.A.L., BRESSANI-RIBEIRO, T., PEGORINI, E., POSSETTI, G. R. C., MIKI, M. K., NONATO, S. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 1: Tópicos de Interesse. **Revista DAE – edição especial**, v. 66, n. 214, p. 5-16, 2018.

COLARES, C. J. G.; SANDRI, D.; Eficiência do tratamento de esgoto com tanques sépticos seguidos de leitos cultivados com diferentes meios de suporte. **Revista Ambiental Água, Taubaté**, v.8, n.1, p.172-185, abril. 2013.

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.

CUERVO-LOPEZ, F.M. *et al.* Effect of nitrogen loading rate and carbon source on denitrification and sludge settleability in upflow anaerobic sludge blanket reactors, **Water Science and Technology**, v. 40, n. 8, p. 123-130, 1999.

FANG, H.H.P.; KWONG, T.S. **Degradation of starch particulates in a hybrid reactor.** *Water Science Technology*, v.30, n.4, p.97-104, 1994.

FLORIPES, T. C. **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 de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

FLORIPES, T. C., CHERNICHARO, C. A. L., FILHO, C. R. M. Avaliação do descarte de excesso de lodo secundário de FBP sobre o desempenho de reatores UASB em escala plena: estudo de caso da ETE *Laboreaux* – Itabira-MG. **Revista DAE** – núm. 211, vol. 66, Julho a Setembro de 2018.

FRANCO, A.; ROCA, E.; LEMA, J.M. Improvement of the properties of granular sludge in UASB reactors, by flow pulsation. In: VII LATINAMERICAN WORKSHOP AND SEMINAR ON ANAEROBIC DIGESTION, **Proceedings...** Mérida: Associação Interamericana de Engenharia Sanitária e Ambiental, p. 228-235, 2002.

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.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; HAANDEL, A. V.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. **Fundamentos do tratamento Anaeróbio.** In: CAMPOS, J.R. (coord.). Tratamento de Esgotos 68 Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 29-51. Projeto PROSAB.

FORESTI, E.; ZAIAT, M.; VALLERO, M. Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 5, n. 1, p. 3-19, 2006.

GERARDI, M. H. **The microbiology of anaerobic digesters**. 2th ed. John Wiley & Sons, Inc. 2003. p. 177.

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

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.

JORDÃO, J.E., PESSOA, C.A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 4ª Ed. Rio de Janeiro: SEGRAC, 2009, 935 p.

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

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.

LEITÃO, R. C.; LOPES, A. C.; van HAADEL, A. C.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. Expansibilidade da manta de lodo de reatores UASB. In: **XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 23, Campo Grande, Anais, 6 p. 2005.

LEITÃO, R. C., SANTAELLA, S. T., van HAADEL, A. C., ZEEMAN, G., LETTINGA, G. The effect of operational conditions on the hydrodynamic characteristics of the sludge bed in UASB reactors. In: 12th World Congress on Anaerobic Digestion, 2010, Guadalajara, México. **Proceedings**... Guadalajara, México: International Water Association - IWA, 2010.

LEONEL, L.F. **Desempenho de estações de tratamento de esgoto-uma análise de sistemas de lagoas de estabilização de pequeno e médio porte integradas à avaliação da qualidade dos corpos hídricos na UGRHI 12 – Baixo pardo/grande.** (Dissertação de Mestrado) São Carlos, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), 2016.

LETTINGA, G., HULSHOFF POL, L.W. UASB - Process design for various types of wastewaters. **Water Science Technology**, v. 24, n. 8, p. 87-107, 1991.

LETTINGA, G. **Anaerobic digestion and wastewater treatment system.** Antonie van Leeuwenhoek, v 6, p. 3-28, 1995.

LOBATO, L. C. S., BRESSANI-RIBEIRO, T., SILVA, B. S., FLÓREZ, C. A. D., NEVES, P. N. P., CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 3: Gerenciamento de lodo e espuma. **Revista DAE – edição especial**, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

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

MAHMOUD, N., ZEEMAN, G., GIJZENB, H., LETTINGA, G. Anaerobic stabilization and conversion of biopolymers in primary sludge — effect of temperature and sludge retention time. **Water Research**, v.38, p. 983-991, 2004.

MCCARTY, P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals. **Public Works**, n 9, p. 107-112, n 10, p. 123-126, n 11, p. 91-94, n 12, p. 95-99, 1964

MENDONÇA, E. F. **Tratamento anaeróbio de efluentes oriundos da bovinocultura de leite em biodigestor tubular.** 2009. 62 f. Dissertação (Mestrado 29 em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Cascavel, 2009.

METCALF; EDDY. **Waste water engineering: treatment, disposal and reuse**. 4. ed. rev. New York: McGraw-Hill. 1830 p. 2003.

METCALF & EDDY, Inc. (2013). **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. McGraw-Hill Education; 5 Editions, P. 2048. Versão traduzida, Porto Alegre, AMGH, 2016.

MIKI, M.K. Dilemas do UASB. **Revista DAE**, v. 183, n.1504, p. 25- 37, 2010.

MONTILHA, F. Biogás – Energia renovável. 2005. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil com ênfase Ambiental) – Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2005.

NASCIMENTO, M. C. P. **Filtro biológico percolador de pequena altura de meio suporte aplicado ao pós-tratamento de efluente de reator UASB**. 2001. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – DESA, UFMG, Belo Horizonte, 2001.

NETO, M. S. A. **Tratamento e águas residuárias de suinocultura em reator anaeróbio compartimentado seguido de reator UASB**. Dissertação (mestrado em Microbiologia Agropecuária) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, São Paulo, 2007.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: Odor control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 5, n. 1, p. 93–114, 2006.

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 reator 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.

PARKER, D.S.; MERRIL, D.T. Effect of plastic media configuration on trickling filter performance. **Journal of Water Pollution Control Federation**. v.56, p. 955-961, 1984.

PEÑA, M. R., MARA, D. D., AVELLA, G. P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. **Water Research**, v.40, p. 445- 452, 2006.

PINHEIRO, D. M. **Influência da velocidade de recirculação no tratamento anaeróbio de esgoto sintético em biorreator operado em batelada sequencial contendo biomassa granulada**. 2006. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2006.

PMSB - **PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO DO MUNICÍPIO DE ITABIRA**. Produto 3 – Diagnóstico Técnico-Participativo dos Serviços de Saneamento Básico. Elaboração do Plano Municipal de Saneamento do Município de Itabira. BásicoEngecorps engenharia S.A. Itabira, 2015.

PONTES, P.P. **Reatores UASB aplicados ao tratamento combinado de esgotos sanitários e lodo excedente de filtro biológico percolador**. 220f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, 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.

SILVA, G.M.; GONÇALVES, R. F. Desempenho de um sistema UASB + filtro biológico percolador sem etapa de decantação tratando esgoto sanitário (Performance of a UASB + trickling filter system without secondary settler treating domestic wastewater). In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. **Anais...** Campo Grande, Brasil, 2004. (in Portuguese)

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), 2019.** Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Ministério do Desenvolvimento Regional - Secretaria Nacional de Saneamento (SNS)

SOUSA, J. T. **Pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio de fluxo ascendente em reator aeróbio sequencial 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.

SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. A.; AQUINO, S. F. **Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions.** *Water Science and Technology*, v. 64, n. 11, p. 2259-2264, 2011.

TIRABOSCHI, M. H. F. de S. **Contribuição para concepção e análise de alternativas de tratamento de esgotos sanitários com base em princípios e critérios de sustentabilidade.** (Dissertação de Mestrado) São Carlos, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), 2004.

TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento 2019.** Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/esgoto>. Acesso em: 19 set. 2020

UEMURA, S., HARADA, H. Treatment of sewage by UASB reactor under moderate to low temperature conditions. **Bioresource Technology**, v 72, p. 275-282, 2000.

UNESCO World Water Assessment Programme. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2020: água e mudança climática, resumo executivo. **ÁGUA E MUDANÇA CLIMÁTICA.** World Water Assessment Programme United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Sustainable Development Goals. Water and Sanitation. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2020.

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.

VIEIRA, S. M. M.; SOUZA, M. E. Métodos analíticos para o acompanhamento da biodigestão. **Revista Energia**, v. 3, n. 15, p. 26-36, 1981.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1995. 240 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1).

VON SPERLING, M. **Princípio do tratamento biológico de águas residuárias – Lodos ativados**. Departamento de engenharia sanitária e ambiental – DESA/UFMG, Belo Horizonte, v. 4, p. 428, 1997.

VON SPERLING, M., CHERNICHARO, C.A L. Selection of wastewater treatment systems in urban areas. Comparison between conventional aerobic systems (activated sludge) and anaerobic-aerobic systems (UASB-activated sludge). In: TALLER Y SEMINARIO LATINOAMERICANO TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES, 5, 1998, Viña del Mar, Chile. **Anais...** Viña del Mar: IAWQ - Universidade Católica de Valpariso/Universidad Técnica Federico Santa María, 1998, p 01-08.

VON SPERLING, M. **Níveis, processos e sistemas de tratamento de esgotos. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª Ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. v.1. p. 249-337.

VON SPERLING, M. **Princípio do tratamento biológico de águas residuárias – Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Departamento de engenharia sanitária e ambiental – DESA/UFMG, Belo Horizonte, v. 2, 2ª edição, 211 p., 2016.

VON SPERLING, M. *et al.* **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistema de Lodos Ativados. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 2001. p. 543.

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.

WEBER, M. I. **Avaliação da eficiência de um reator anaeróbio de leito fluidizado para tratamento de resíduos líquidos da indústria de refrigerantes.** Dissertação (Mestrado) em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, da Universidade Federal do Paraná. 166 p. 2006.