

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**Nara Maria de Oliveira Dornela**

**BALANÇO DE MASSA DE MATÉRIA ORGÂNICA EM UM SISTEMA DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO POR LODOS ATIVADOS COM  
AERAÇÃO PROLONGADA**

**Juiz de Fora**

**2019**

**Nara Maria de Oliveira Dornela**

**BALANÇO DE MASSA DE MATÉRIA ORGÂNICA EM UM SISTEMA DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO POR LODOS ATIVADOS COM  
AERAÇÃO PROLONGADA**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial a obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista. Área de concentração: Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Dr. Edgard Henrique Oliveira Dias.  
Coorientador: Dr. Emanuel Manfred Freire Brandt.

**Juiz de Fora**

**2019**

**Nara Maria de Oliveira Dornela**

**BALANÇO DE MASSA DE MATÉRIA ORGÂNICA EM UM SISTEMA DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO POR LODOS ATIVADOS COM  
AERAÇÃO PROLONGADA**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial a obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista. Área de concentração: Engenharia Ambiental e Sanitária.

Aprovada em 05 de dezembro de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Edgard Henrique Oliveira Dias - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. Dr. Emanuel Manfred Freire Brandt – Coorientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Dr. Paulo Gustavo Sertório de Almeida – Avaliador Externo  
Universidade Federal de Minas Gerais

---

Prof. Dr. Samuel Rodrigues Castro – Avaliador Externo  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## AGRADECIMENTOS

Sou imensamente feliz e grata pela conclusão deste trabalho e conclusão do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária! Significa muito para mim esta realização e sei que esta só foi possível pela contribuição de tantas pessoas as quais eu tive a alegria e oportunidade de encontrar durante a minha trajetória. Agradeço primeiramente à Deus, pela força e pelo amparo, pela transformação proporcionada por encontros com pessoas tão maravilhosas que me ensinaram e foram representação do cuidado de Dele em minha vida!

Agradeço a minha mãe, Sueli, por cada ensinamento, pelos exemplos de humildade, honestidade e amor. A minha vovó Nelita, por todo amparo. Aos meus irmãos, José, Júlio, Nádia e Núbia, por serem exemplos, por torcerem por mim, pelo amor de cada um! Aos meus tios, Silvania e Rômulo, pela força e acolhimento no início dessa caminhada. Às minhas primas Lays e Lívia, pelo incentivo, pelo companheirismo e amor! Agradeço a cada um dos meus familiares, que de alguma forma, me apoiaram ou torceram por mim.

Agradeço aos encontros lindos com amigos que compartilharam das experiências de um novo lar em Juiz de Fora, aos quais considero, minha família: Daniela, Isabelle, Mariana, Marcela, Larisse, república divertidamente e demais amigos do Edifício Queiroz. Obrigada por me apoiarem, partilharem e somarem tanto em minha vida, por me ajudarem a descobrir novos sentidos e por tornarem essa trajetória mais leve. Agradeço ao encontro da vida mais lindo, que este lar me proporcionou, do meu amor, meu amigo, companheiro, Rafael. Obrigada! Agradeço por ter sido tão maravilhoso comigo, pelos momentos incríveis que já compartilhamos e por tudo que nos espera.

Agradeço ao caminho da graduação e todos os colegas envolvidos neste, nos estudos juntos, nos momentos de diversão, nas trocas de conhecimento, tenho cada um em minha memória e em meu coração! Aos professores do Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária e dos demais departamentos que tive oportunidade de trabalhar, pelo compartilhamento do conhecimento e apoio prestado durante a graduação. Em especial, aos professores Edgard e Emanuel, por sua orientação e colaboração na construção deste trabalho, o meu muito obrigada por sua excelência na transmissão do conhecimento e por tanta atenção durante toda a sua elaboração. Por fim, ao professor Samuel e ao Paulo pelas contribuições e avaliação deste trabalho. Muito obrigada!

## RESUMO

O sistema biológico por lodos ativados é amplamente empregado, a nível mundial, no tratamento de efluentes. Entretanto, apesar de apresentar elevada eficiência em termos de remoção da matéria orgânica, esse sistema requer controle operacional rigoroso, entrave principalmente para sistemas de pequeno e médio porte, onde, muitas vezes, são obtidas eficiências de tratamento abaixo do desejado. O balanço de massa é uma potencial ferramenta para o diagnóstico dessas estações. Desse modo, o presente trabalho objetivou avaliar o balanço de massa de matéria orgânica de uma estação de tratamento de esgoto doméstico por lodos ativados com aeração prolongada. Os dados de caracterização físico-química do efluente utilizados nesse trabalho foram disponibilizados pela Companhia de Saneamento responsável pela ETE estudada. As variações dos parâmetros de controle analisados foram representadas por gráficos box-plot, bem como foram calculadas as eficiências de remoção da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) total, e dos sólidos totais e suspensos, fixos e voláteis do sistema. Para o cálculo da produção de sólidos na estação de tratamento, aplicou-se o princípio do balanço de massa, a partir dos valores medianos desses parâmetros. Com base no coeficiente de produção celular observado ( $Y_{obs}$ ), calculou-se a produção líquida teórica de lodo excedente da estação comparando-a com a produção real. Foram encontradas eficiências de remoção elevadas, em termos da DBO, em torno de 91%, valor de acordo com a faixa (90 – 95%) observada em lodos ativados desta variante. No que diz respeito aos sólidos, observou-se concentrações elevadas de sólidos suspensos totais no efluente final devido a reduzida remoção da biomassa produzida no sistema. A produção de sólidos voláteis da ETE foi elevada (4.128 kgSV/d) comparada aos valores produção teórica (219 kgSSV/d), o que não infere, necessariamente, em apenas uma elevada produção, como também, o acúmulo desses sólidos no sistema. Logo, compreende-se que tais resultados convergem para a hipótese de baixa remoção do lodo excedente na estação. Portanto, o estudo aponta para a necessidade de descarte do lodo em excesso, através de um controle adequado, como é feito na recirculação. Tendo em vista o aumento do volume descartado, propõe-se estudos futuros sobre o processo de gerenciamento do lodo atualmente empregado na ETE e a necessidade de adequações, ou adição de técnicas que visam sua higienização (produção de biossólidos), tendo em vista viabilidade técnica e econômica para tal.

**Palavras-chave:** Efluente doméstico. Parâmetros físico-químicos. Produção de lodo. Lodo excedente.

## ABSTRACT

The activated sludge is a biological sewage treatment, which is globally widespread. However, despite its high efficiency, considering organic matter removal, this system requires a good operational control, which is especially difficult for small and medium plants. This issue usually results in low removal efficiencies. The mass balance is a potential instrument for the wastewater treatment plants diagnosis. In this way, this work aims to evaluate the mass balance of organic matter in a domestic sewage treatment plant that uses extended aeration activated sludge. The sewage physico-chemical data was provided by the sanitation company, which is responsible for the plant that was analyzed. The variation of the used control parameters was presented by box-plot graphics. It was also calculated the removal efficiencies of total biochemical oxygen demand (BOD); and the removal efficiencies of total, suspended, fixed and volatile solids of the system. In order to calculate the solids production of the biological treatments units, the mass balance principle was applied, using the median values of these parameters. Based on the observed biomass yield ( $Y_{obs}$ ), it was computed the theoretical sludge liquid production, comparing with its actual value. It was found high BOD removal efficiencies, close to 91%, which is between the observed interval (90 – 95%) of this parameter for activated sludge. It is also noted that the total suspended solids (TSS) concentration in the effluent is high, due to the reduced removal of these, which is approximately 20%, by the end of the treatment. The production of volatile solids was high (4.128 kgVS/d), compared to the theoretical value (219 kgSSV/d), which does not infer, necessarily, in only a high production, but also the accumulation of SSV in the system. Thus, these results converge to the hypothesis of low excess sludge removal in the treatment. Therefore, the study points to the need of disposal of the excess sludge, through an appropriate control, as it happens in the sludge recirculation. Considering the increasing discarded volume, it is proposed future studies on sludge management, which is currently used in the wastewater treatment plant. It is also indicated the need of adequacies, or the use of techniques that aim the biosolids production, considering the techno-economical viability.

**Keywords:** Domestic sewage. Physico-chemical parameters. Sludge production. Excess sludge.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Etapa biológica do sistema de lodos ativados.....	5
<b>Figura 2</b> – Esquema de uma ETE com aeração prolongada.....	9
<b>Figura 3</b> – Balanço de massa em um reator.....	11
<b>Figura 4</b> – Representação da localização dos pontos de coleta na ETE estudada.....	16
<b>Figura 5</b> – Legenda do gráfico box-plot (diagrama de caixa) utilizado neste estudo.....	17
<b>Figura 6</b> – Representação do balanço de massa na ETE estudada .....	20
<b>Figura 7</b> – Vazões afluyente e efluente da ETE estudada referente a agosto/2018 a agosto/2019.....	25
<b>Figura 8</b> – Box-plot dos valores de sólidos suspensos totais obtidos nos efluentes bruto, tanque de aeração, lodo de recirculação e efluente tratado da ETE estudada. ....	27
<b>Figura 9</b> – Box-plot dos valores de sólidos totais (ST) obtidos no tanque de aeração da ETE estudada. ....	28
<b>Figura 10</b> – Box-plot dos valores de sólidos voláteis obtidos nos efluentes bruto e tratado (A) e no tanque de aeração (B) da ETE estudada. ....	29
<b>Figura 11</b> – Box-plot dos valores da demanda química de oxigênio – DQO (A) e da demanda bioquímica de oxigênio – DBO (B) obtidos nos efluentes bruto e tratado da ETE estudada. .	30
<b>Figura 12</b> – Fluxograma do balanço de massa real da ETE estudada, considerando os valores medianos dos parâmetros discutidos. ....	32

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Parâmetros aplicáveis ao processo de lodos ativados com aeração prolongada. ....	10
<b>Tabela 2</b> – Padrões de lançamento de efluentes domésticos conforme legislações nacional e estadual. ....	13
<b>Tabela 3</b> – Estatística descritiva dos dados de vazão da ETE estudada. ....	24
<b>Tabela 4</b> – Estatística descritiva dos sólidos suspensos totais (SST) da ETE estudada. ....	26
<b>Tabela 5</b> – Estatística descritiva dos sólidos totais (ST), voláteis (SV) e fixos (SF) da ETE estudada. ....	28
<b>Tabela 6</b> – Estatística descritiva da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) da ETE estudada. ....	30

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>CONAMA</b>	Conselho Nacional de Meio Ambiente
<b>COPAM</b>	Conselho de Política Ambiental
<b>DBO</b>	Demanda Bioquímica de Oxigênio
<b>DN</b>	Deliberação Normativa
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxigênio
<b>ETE</b>	Estação de Tratamento de Esgoto
<b>pH</b>	Potencial Hidrogeniônico
<b>Relação A/M</b>	Relação Alimento/Microrganismo
<b>SF</b>	Sólidos Fixos
<b>SSTA</b>	Sólidos Suspensos no Tanque de Aeração
<b>SSV</b>	Sólidos Suspensos Voláteis
<b>ST</b>	Sólidos Totais
<b>SV</b>	Sólidos Voláteis
<b>TA</b>	Tanque de Aeração
<b>TDH</b>	Tempo de Detenção Hidráulica
<b>X<sub>b</sub></b>	Sólidos biodegradáveis
<b>X<sub>v</sub></b>	Sólidos voláteis
<b>Y<sub>obs</sub></b>	Coefficiente de Produção Celular Observado
<b>θ<sub>c</sub></b>	Idade do lodo

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
2.1	Objetivo geral.....	3
2.2	Objetivos específicos.....	3
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.1	Tratamento de efluentes domésticos.....	4
3.2	Lodos ativados.....	5
3.3	Lodos ativados com aeração prolongada.....	8
3.4	Balanço de massa.....	10
3.5	Legislações relacionadas ao tratamento de efluentes domésticos.....	12
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	14
4.1	Análise dos dados.....	17
4.2	Balanço de massa aplicado na ETE estudada.....	18
4.3	Produção teórica de sólidos da ETE estudada.....	21
4.4	Avaliação de parâmetros operacionais da ETE estudada.....	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
5.1	Caracterização físico-química de efluentes e lodo biológico da ETE estudada.....	24
5.1.1	Vazões de efluentes e lodo biológico da ETE estudada.....	24
5.1.2	Sólidos, DQO e DBO.....	25
5.2	Balanço de massa: produção de sólidos real e teórica.....	30
5.3	Avaliação de parâmetros operacionais da ETE estudada.....	35
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
	APÊNDICES.....	40
	APÊNDICE A – Balanço de massa real da ETE estudada, considerando os valores medianos dos parâmetros avaliados.....	40

# 1 INTRODUÇÃO

O tratamento de esgoto ainda é um grande desafio no Brasil, uma vez que esse serviço apresenta déficits significativos dentre os componentes do saneamento básico – abastecimento de água, esgotamento sanitário, gestão de resíduos sólidos e gestão de águas pluviais urbanas. Com base no diagnóstico dos serviços de água e esgoto realizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS), referente ao ano de 2017, enquanto 92% da população recebe água em seus domicílios, somente de 69,4% da população tem coleta de esgoto e apenas 46,0% do esgoto gerado recebe algum tipo de tratamento antes de ser lançado em um corpo hídrico.

Os índices médios para a região Sudeste, ainda segundo dados deste diagnóstico (SNIS, 2019), são próximos aos nacionais, com cerca de 50,2% dos esgotos gerados sendo tratados, ou seja, aproximadamente 50% dos esgotos são direcionados de forma irregular e sem qualquer tratamento para cursos d'água, contaminando-os e deixando-os em condições inadequadas para a comunidade biológica dependente, bem como, comprometendo a saúde pública devido à proliferação de vetores de doenças.

Os tratamentos de esgoto mais empregados no mundo são os biológicos, que apresentam como elemento principal os microrganismos fazendo a remoção da matéria orgânica e outros compostos, empregando-se, para tanto, diversos tipos de tecnologias de tratamento, tais como, soluções individuais, como tanques sépticos, e sistemas centralizados, como lodos ativados, filtros biológicos, reatores anaeróbios, lagoas de estabilização, entre outros (METCALF & EDDY, 2014). O sistema de lodos ativados apresenta diversas variantes, dentre as quais, o processo por aeração prolongada recebe bastante destaque e é muito empregado no tratamento biológico de esgoto sanitário, devido à alta eficiência de remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos, possibilidade de remoção de nutrientes, baixos requisitos de área para sua implementação e simplificação das etapas de gerenciamento de lodo. Entretanto, apresentam aspectos negativos, tais como o elevado consumo de energia elétrica, custos elevados de implementação, complexidade de operação e manutenção, além de elevada produção de lodo (VON SPERLING, 2016).

Sob tal perspectiva, vale frisar que apesar das vantagens, este sistema de tratamento aeróbio, apresenta considerável complexidade operacional. Devido a esse entrave, principalmente, em sistemas de pequeno/médio porte, muitas vezes tem-se eficiências de tratamento abaixo do desejado. Nesses casos, o balanço de massa de matéria orgânica pode ser uma ferramenta poderosa e simples para o diagnóstico de estações desse tipo, muitas vezes direcionando um

melhor gerenciamento da recirculação de lodo e o descarte de lodo excedente, subproduto do tratamento que interfere diretamente na eficiência do mesmo.

Nesse sentido, o presente trabalho pretende caracterizar uma estação de tratamento de esgoto doméstico por lodos ativados com aeração prolongada, quanto à eficiência de tratamento da fase líquida, empregando-se o balanço de massa de matéria orgânica, visando a maximização de sua capacidade operacional, de modo a se obter o máximo benefício desta no momento atual, bem como na possibilidade de ampliações futuras. Além disso, tem-se a hipótese da necessidade de maior remoção do lodo excedente, gerado como subproduto do tratamento e, conseqüente, a necessidade de adequação do sistema empregado, de gerenciamento do lodo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar o balanço de massa de matéria orgânica em um sistema de tratamento de esgoto composto por lodos ativados com aeração prolongada.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar o balanço de sólidos totais e suspensos, fixos e voláteis no sistema de lodos ativados com aeração prolongada.
- Avaliar o balanço de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) total no sistema de lodos ativados com aeração prolongada.
- Calcular a produção de lodo excedente real e teórica da ETE estudada.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Tratamento de efluentes domésticos

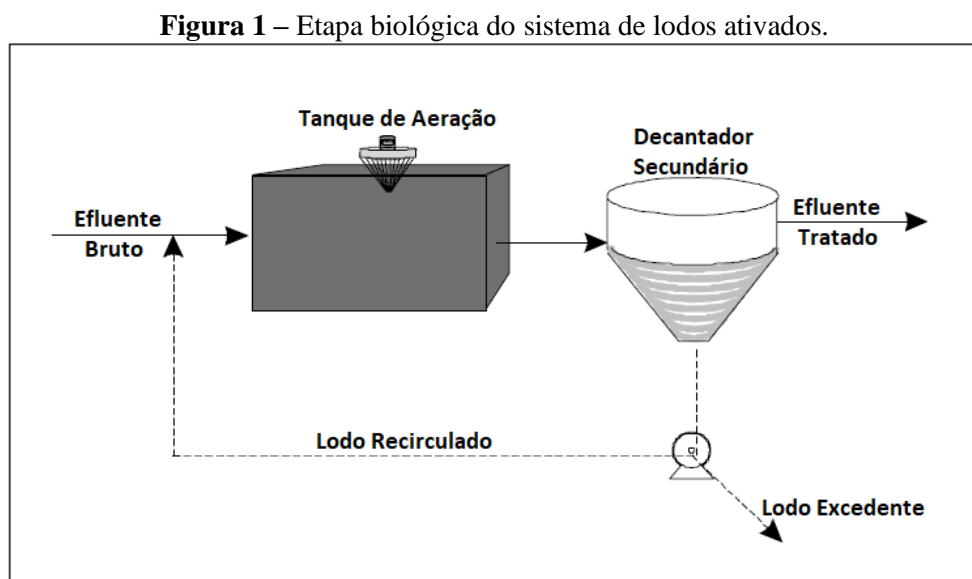
Segundo Von Sperling (2014), o tratamento de efluentes domésticos pode ser dividido em níveis (preliminar, primário, secundário e terciário), processos (físicos, químicos e biológicos) e sistemas (lagoas de estabilização, disposição no solo, *wetlands*, reatores e filtros anaeróbios, lodos ativados etc.). A definição do tratamento mais adequado depende, a princípio, da qualidade final pretendida, tendo em vista, no mínimo, o atendimento aos padrões de qualidade para o efluente e para o corpo receptor, estabelecidos pela legislação vigente. Entretanto, não se pode afirmar que exista um sistema de tratamento melhor em comparação a outro, e sim àquele mais adequado à determinada situação, tendo em vista que a escolha da tecnologia adotada, depende, dentre diversos fatores, da realidade e especificidades de cada local onde esta será implantada.

De modo geral, o tratamento preliminar é utilizado para remover sólidos em suspensão grosseiros. Já o tratamento primário é destinado a remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis por meio de processos físicos, e em alguns casos, processos físico-químicos. O tratamento secundário, por sua vez, ocorre por meio de processos biológicos e visa a remoção de matéria orgânica, principal poluente responsável pela deterioração da qualidade da água dos corpos hídricos receptores, tendo em vista o elevado consumo de oxigênio na sua degradação no ambiente e consequente mortandade de animais, proliferação de algas e desequilíbrio ambiental. Por fim, o tratamento terciário tem por objetivo a remoção de poluentes específicos, não biodegradáveis ou, ainda, complementar a remoção de poluentes não biodegradados na etapa secundária.

Inserido no tratamento secundário de esgotos, o sistema de lodos ativados tem sido utilizado em escala mundial para o tratamento de despejos domésticos e industriais em situações em que faz-se necessária uma elevada qualidade do efluente a ser lançado em um corpo receptor e aliada a reduzidos requisitos de área. Esse sistema permite, ainda, sob certas condições, a remoção biológica de nitrogênio e fósforo (VON SPERLING, 2012). Vale frisar que o tratamento preliminar está incluído em qualquer ETE, porém, o tratamento primário não necessariamente estará, conforme será discutido nos próximos subitens.

### 3.2 Lodos ativados

Jordão e Pessoa (2017) definem lodo ativado como o floco produzido por bactérias e outros microrganismos num esgoto bruto ou decantado na presença de oxigênio dissolvido, com retorno destes e outros flocos previamente formados. Conforme apresentado na Figura 1, a etapa biológica desse sistema é composta pelas unidades de aeração (tanque de aeração), decantação (decantador secundário), elevatória de recirculação do lodo e retirada do lodo biológico excedente.



**Fonte:** Von Sperling (2014).

No tanque de aeração ocorre a assimilação da matéria carbonácea (substrato) presente no esgoto bruto pelos microrganismos (biomassa) presentes no sistema de tratamento, podendo ocorrer também a remoção de matéria nitrogenada. Em seguida, o efluente é transferido ao decantador secundário, onde ocorre a sedimentação dessa biomassa, permitindo que o líquido saia clarificado. Parte do lodo acumulado na sedimentação é recirculado para o tanque de aeração, visto que este se constitui, em sua maior parte, de microrganismos ainda ativos (“lodo ativado”) do ponto de vista da degradação do substrato. Com o aumento da biomassa, propiciado pela recirculação do lodo, o tempo de permanência dos microrganismos passa a ser suficiente para que quase a totalidade da matéria orgânica presente nos esgotos seja metabolizada, resultando em maior remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) nesse processo, conferindo, assim, maior eficiência ao sistema (VON SPERLING, 2012).

Devido à entrada contínua de alimento, na forma de DBO dos esgotos, os microrganismos crescem e se reproduzem continuamente. Assim, para se manter o sistema em equilíbrio, é

necessário que se retire aproximadamente a mesma quantidade de biomassa que é aumentada por reprodução durante a degradação do substrato. Essa parcela, denominada lodo biológico excedente, é equivalente aos sólidos suspensos voláteis (SSV), e pode ser extraída diretamente do tanque de aeração ou do decantador secundário, o qual deve receber gerenciamento e destinação final adequada (VON SPERLING, 2012).

Segundo Metcalf e Eddy (2014), caso a concentração de sólidos atinja níveis excessivos, a transferência de oxigênio para as células é dificultada e o decantador secundário fica sobrecarregado, interferindo, assim, na sedimentação dos sólidos que saem juntamente com o efluente final, deteriorando sua qualidade. Além do arraste de sólidos e má sedimentabilidade do lodo, também pode ocorrer a desnitrificação, devido ao acúmulo excessivo de sólidos no decantador, ocasionando, desse modo, uma ressuspensão de sólidos já sedimentados pelo desprendimento do gás N<sub>2</sub> (JORDÃO e PESSOA, 2017). Neste sentido, a quantificação do lodo a ser removido bem como a boa operação do decantador secundário são fundamentais na eficácia do sistema, de modo a evitar processos indesejados como os anteriormente mencionados.

Em suma, sistemas lodos ativados consistem, basicamente, na remoção de matéria orgânica (substrato) por microrganismos aeróbios que degradam esse substrato e se reproduzem (crescimento bacteriano). No entanto, como as bactérias permanecem no sistema de lodos ativados por alguns dias, devido ao sistema de recirculação, passa a ocorrer, também, a etapa de respiração endógena. Essa etapa consiste no decaimento bacteriano, já que à medida que começa a faltar alimento (substrato), as bactérias metabolizam o seu próprio material celular, o que provoca a sua destruição. Portanto, durante o tratamento há criação e destruição de vários tipos de sólidos presentes no reator. Porém, como comentado, uma quantidade equivalente aos SSV produzidos diariamente pela reprodução bacteriana deve ser descartada para garantia do equilíbrio do sistema. Essa produção líquida de lodo excedente (P<sub>xv</sub>) pode ser representada como (VON SPERLING, 2012):

$$P_{xv} \text{ líquida} = \text{Produção bruta de } X_v - \text{Decaimento de } X_b \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

P<sub>xv</sub>: produção líquida de sólidos em suspensão voláteis;

X<sub>b</sub>: sólidos biodegradáveis;

X<sub>v</sub>: sólidos em suspensão voláteis.

Esta relação pode ser expressa conforme a Equação 2:

$$P_{xv} \text{ líquida} = Y \cdot Q (S_0 - S) - k_d \cdot f_b \cdot X_v \cdot V$$

Equação 2

Onde:

$P_{xv}$  = produção líquida de sólidos em suspensão voláteis (KgSSV/d);

$Y$  = coeficiente de produção celular (g SSV<sub>produzida</sub>/ g DBO<sub>removida</sub>)

$Q$  = vazão (m<sup>3</sup>/d)

$S_0$  = concentração de DBO<sub>5</sub> afluyente (g/m<sup>3</sup>)

$S$  = concentração de DBO<sub>5</sub> efluente (g/m<sup>3</sup>)

$k_d$  = coeficiente de respiração endógena, fração de microrganismos que é oxidada na respiração endógena por unidade de tempo (1/d)

$f_b$  = fração biodegradável dos SSV gerados no sistema ( $X_b/X_v$ ) em função da idade do lodo ( $\theta_c$ ) (g SSV/ g DBO)

$X_v$  = concentração de sólidos em suspensão voláteis no tanque de aeração (mg/L)

$V$  = volume do tanque de aeração;

Entretanto, existem diversos modelos matemáticos, que expressam essa produção ( $P_{xv}$ ) através do conceito de produção celular observada, associado ao coeficiente de produção específica de lodo ( $Y_{obs}$ ). Segundo von Sperling (2012), o  $Y_{obs}$  baseia-se na condição de que uma parte do substrato utilizado pela biomassa é destinado para a síntese de novas células e uma outra parte é utilizado nas funções de manutenção celular. Sendo assim, o  $Y_{obs}$  leva em consideração, além do crescimento celular, o decaimento endógeno da biomassa bacteriana. Diferentemente, o coeficiente de produção celular ( $Y$ ), outro coeficiente comumente utilizado na estimativa da produção de biomassa, não considera tal parcela e, por isso, é sempre maior que  $Y_{obs}$ . Para o autor, a aplicação de  $Y$  e  $Y_{obs}$  refere-se à obtenção da produção bruta e produção líquida de sólidos, respectivamente. Os valores de  $Y_{obs}$  variam de acordo com o processo de lodo ativado adotado. No subitem 3.2.1 são descritas as faixas mais comuns para o sistema de lodos ativados com aeração prolongada, foco deste trabalho.

Nesse contexto, cabe ainda pontuar sobre outros parâmetros de controle associados à eficiência do processo de tratamento, tais como: idade do lodo ( $\theta_c$ ); relação alimento/microrganismo (A/M); sólidos suspensos no tanque de aeração (SSTA); oxigênio dissolvido (OD); potencial hidrogeniônico (pH); temperatura; taxa de consumo de oxigênio (TCO); sedimentabilidade do lodo; microbiologia do lodo, dentre outros. O monitoramento desses parâmetros e o entendimento dos seus mecanismos de atuação são etapas importantes para um bom desempenho dos reatores de lodos ativados. Entretanto, serão discorridos apenas alguns desses, os quais julga-se importantes para o presente estudo.

O conceito de tempo de retenção de lodo, também denominado, tempo de residência celular ou idade do lodo ( $\theta_c$ ), se refere ao tempo médio em que a unidade de biomassa permanece no sistema de tratamento. Esse tempo deve ser suficiente para que ocorra a degradação da matéria orgânica pelos microrganismos. Caso esse tempo seja superior ao necessário, a concentração

de material biológico será elevada, podendo haver arraste de sólidos no efluente final e, em caso contrário, resultar na baixa remoção de matéria orgânica, comprometendo, assim, a eficiência do tratamento (AMORIM *et al.*, 2014).

Estudos demonstram ainda que o  $\theta_c$  é o parâmetro operacional mais utilizado no sistema de lodos ativados, e é inversamente proporcional à taxa de crescimento celular específica (Yobs) (LIU e TAY, 2001). Isso porque quanto mais tempo a biomassa fica retida no lodo, menos substrato estará disponível, propiciando a ocorrência do metabolismo endógeno e, conseqüente, diminuição tanto da biomassa quanto da taxa de crescimento específica. Assim sendo, o tempo de retenção de lodo é diretamente proporcional à taxa de respiração endógena ( $K_d$ ).

Outro parâmetro de controle importante para o sistema de lodos ativados é o tempo de detenção hidráulica (TDH), dado pela razão entre o volume de líquido no sistema e o volume de líquido retirado do sistema por unidade de tempo, ou seja, é o tempo em que os despejos líquidos permanecem no sistema (VON SPERLING, 2011). No cômputo geral, a retirada do lodo excedente é considerada desprezível e, apesar dos sólidos retornarem e permanecerem no decantador secundário, por um tempo maior, o volume do líquido que entra e que sai do tanque de aeração não varia quantitativamente. Portanto, nos reatores com mistura completa com recirculação, tem-se que o tempo de detenção hidráulica (TDH) é menor que tempo de residência celular ( $\theta_c$ ).

Por fim, a concentração de sólidos suspensos no tanque de aeração (SSTA) é a estratégia de controle mais utilizada pelos operadores, mesmo que intuitivamente, e tem por objetivo manter tal concentração constante, a fim de evitar problemas de sobrecarga de sólidos, como supracitado. Esse parâmetro é controlado pela manipulação da vazão de lodo de recirculação e pela vazão de lodo excedente – descartado, a partir da seleção do nível desejado de SSTA (VON SPERLING, 2012).

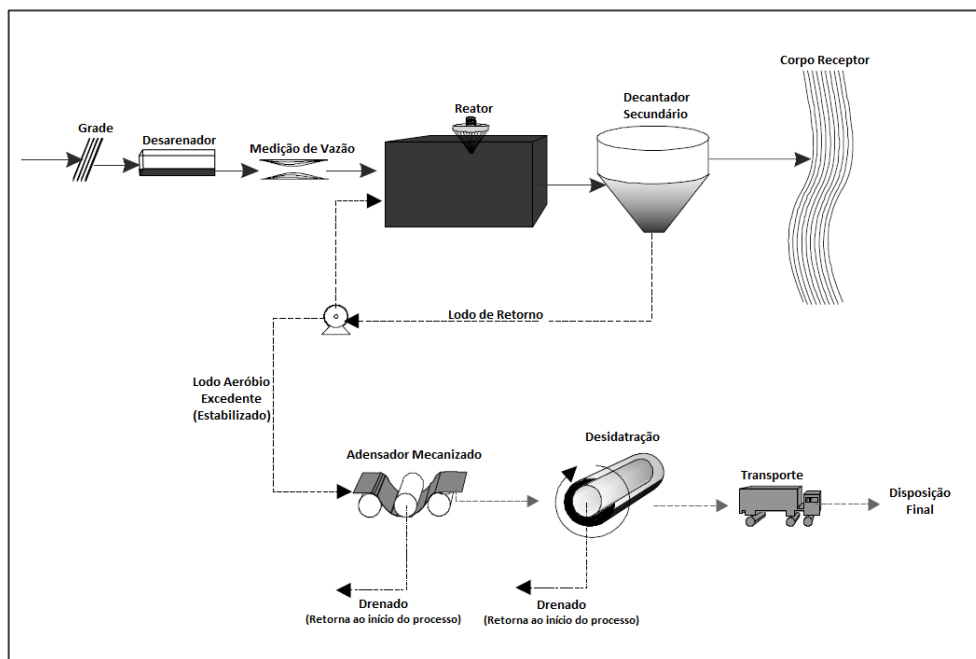
### **3.3 Lodos ativados com aeração prolongada**

Dentre as diversas variantes do processo de lodos ativados, o sistema com aeração prolongada se caracteriza pela maior permanência da biomassa no sistema, geralmente, por um período de 18 a 30 dias. Ademais, apresenta TDH em torno de 16 a 24h, o que corresponde a menos matéria orgânica por unidade de volume do tanque de aeração, bem como por unidade de biomassa no reator. Deste modo, os microrganismos passam a utilizar de forma mais intensa nos seus processos metabólicos a matéria orgânica biodegradável que compõe suas células – respiração endógena (VON SPERLING, 2012).

Portanto, a estabilização da biomassa (lodo) ocorre de forma aeróbia no próprio tanque de aeração. Isso confere uma simplificação na etapa de tratamento da fase sólida (lodo excedente), não havendo necessidade de unidades para a e digestão da mesma. Outra simplificação desse sistema é a ausência de decantadores primários, visto que procura-se evitar a geração de alguma outra forma de lodo que venha requerer posterior estabilização (VON SPERLING, 2012).

Como a carga de DBO fornecida a um valor unitário de biomassa é baixa (reduzida relação A/M), a eficiência de assimilação desse substrato é maior, em torno de 90 a 95%. Entretanto, tal eficiência depende do desempenho do decantador secundário, a fim de que não haja perda de sólidos no efluente final e consequente deterioração da sua qualidade, mesmo com o bom desempenho do reator (VON SPERLING, 2012). O fluxograma da Figura 2 exemplifica a configuração de uma ETE operando com o sistema discorrido.

**Figura 2** – Esquema de uma ETE com aeração prolongada.



**Fonte:** Von Sperling (2014).

Em países de clima tropical como o Brasil, um aspecto importante desses sistemas é a provável ocorrência da nitrificação no reator, removendo nitrogênio do efluente, efeito positivo no tratamento. Entretanto, conforme mencionado no item 3.1, pode-se ocorrer a desnitrificação no decantador secundário, e o ressuspensão do lodo pelas bolhas de  $N_2$ . Como consequência desse efeito, tem-se a elevação na concentração de SS no efluente final, resultando na sua deterioração em termos de SS e DBO em suspensão. Porém, esse e outros aspectos indesejados podem ser evitados ou reduzidos com o aumento da razão de recirculação do lodo, impossibilitando o seu

adensamento, bem como pela remoção contínua do lodo excedente. A remoção do lodo nos decantadores secundários é realizada através de raspadores ou sucção de fundo de forma a evitar a expansão da camada de lodo sedimentado e consequente redução da eficiência do tratamento, já que o decantador secundário é a última etapa de tratamento da fase líquida do esgoto (VON SPERLING, 2012).

Vale ressaltar que a produção líquida de lodo excedente ( $P_{xv}$ ) pode ser expressa em termos do coeficiente de produção celular observado ( $Y_{obs}$ ). É possível obter tal valor, através da razão entre a massa de sólidos gerados acumulados e a massa de substrato consumido acumulado. Em sistema de lodo ativado com aeração prolongada, o coeficiente  $Y_{obs}$  apresenta valores que variam na faixa de 0,15 a 0,48 gSSV/gDBO – massa produzida de SSV por massa consumida de DBO (MAYHEW e STEPHENSON, 1997; METCALF e EDDY, 2014; ASADA, 2007; RAMOS *et al.*, 2014; AMANATIDOU *et al.*, 2015; SAMIOTIS *et al.*, 2018).

Por fim, salienta-se, também, que as razões de recirculação e de lodo excedente estão extremamente ligadas, pois, em resumo, a vazão de lodo de retorno ( $Q_r$ ) afeta o balanço de sólidos entre o reator e decantador secundário, bem como a vazão de lodo excedente ( $Q_{ex}$ ) afeta a massa total de sólidos nessas unidades. Nesse sentido, é fundamental a visão integrada do reator e decantador secundário e da dependência da remoção sólido-líquido na etapa biológica do sistema (VON SPERLING, 2012). A Tabela 1, apresenta uma síntese de alguns parâmetros de controle básicos, largamente utilizados em sistemas de lodos ativados com aeração prolongada.

**Tabela 1** – Parâmetros aplicáveis ao processo de lodos ativados com aeração prolongada.

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
Remoção de DBO	90 – 95	%
Faixa de idade do lodo	18 – 30	dias
Tempo de detenção hidráulica	16 – 24	horas
SSTA	3.000 – 6.000	mg/L
SST no lodo de retorno (fundo do decantador)	8.000 – 12.000	mg/L
Relação A/M	0,08 a 0,15	kgDBO <sub>5</sub> /kgSSV.d

**Nota:** DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio; SSTA = Sólidos Suspensos no Tanque de Aeração; SST = Sólidos Suspensos Totais; Relação A/M = Relação Alimento/Microrganismo.

**Fonte:** Adaptado de Metcalf & Eddy (2003); Jordão e Pessôa (2011) e Von Sperling (2012).

### 3.4 Balanço de massa

O balanço de massa descreve quantitativamente as massas totais e/ou particular dos componentes presentes em um sistema com limites físicos bem definidos, a partir do princípio

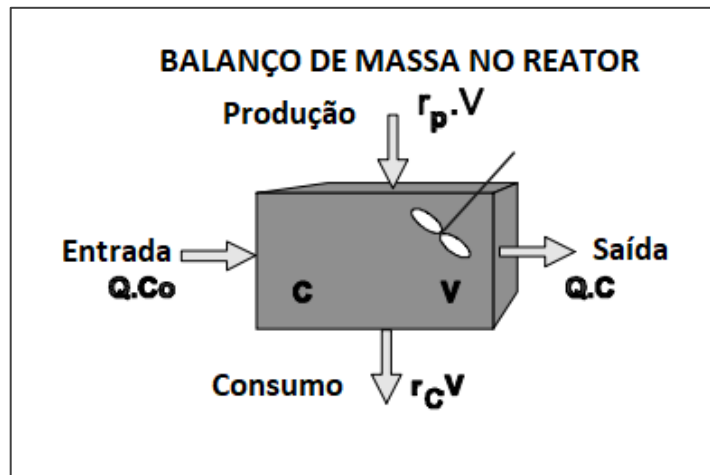
da conservação de massa, como detalha Felder *et al.*, (2015). Apesar das reações químicas e bioquímicas que podem ocorrer no processo, as quais transformam reagentes em produtos, a massa total (reagentes e produtos) não será alterada.

Entretanto, antes da análise dos processos e resultados, faz-se necessária a compreensão do termo “sistema”, o qual é definido como qualquer parte de um processo que pode ser encerrada dentro de um limite hipotético. Esse por sua vez pode ser todo o processo, ou apenas a combinação interconectada de algumas das suas unidades; um ponto no qual dois ou mais fluxos do processo se reúnem ou se dividem em ramos (FELDER *et al.*, 2015, p. 116).

No caso de uma ETE, a expressão básica do balanço de massa pode ser desenvolvida em um determinado volume de controle ou “sistema”, seja ele o tanque de aeração como um todo, ou qualquer volume elementar do mesmo. De maneira geral, considerando um volume qualquer, conforme apresentado na Figura 3, o balanço de massa pode ser escrito da seguinte forma (VON SPERLING, 2011):

$$\text{Acumulação} = \text{Entrada} - \text{Saída} + \text{Produção} - \text{Consumo} \quad \text{Equação 3}$$

**Figura 3** – Balanço de massa em um reator.



**Nota:** C = concentração do composto em um tempo; C<sub>0</sub> = concentração do composto em um tempo;  
V = volume do reator (desde que de mistura completa) ou; volume elementar de qualquer reator;  
r<sub>p</sub> = taxa da reação de produção do composto; r<sub>c</sub> = taxa da reação de consumo do composto;  
Q = vazão; T = tempo

**Fonte:** Von Sperling (2011).

Segundo Von Sperling (2011), matematicamente, pode-se expressar a Equação 4, como:

$$V \frac{d(C)}{dt} = Q \cdot C_0 - Q \cdot C + r_p \cdot V - r_c \cdot V \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$\frac{d(C)}{dt}$  = concentração do composto em um tempo t (M/L<sup>3</sup>)

C0 = concentração do composto em um tempo t (M/L<sup>3</sup>)

V = volume do reator (desde que de mistura completa) ou volume elementar de qualquer reator (L<sup>3</sup>)

Q = vazão (L<sup>3</sup>/T)

t = tempo (T)

rp = taxa da reação de produção do composto (M/L<sup>3</sup>T)

rc = taxa da reação de consumo do composto (M/L<sup>3</sup>T<sup>1</sup>)

Ainda segundo Von Sperling (2011), o modelo matemático do sistema pode apresentar condições distintas, referentes aos estados estacionário ou dinâmico. O primeiro, mais utilizado em projetos devido as suas simplificações matemáticas, é aquele no qual não há acúmulos do composto no sistema analisado, ou seja, a concentração deste é constante. Já o dinâmico considera as variações internas e externas do sistema e o acúmulo do composto, sendo sua concentração variável com o tempo.

Em suma, a escolha do balanço de massa a ser aplicado, deve considerar os processos químicos envolvidos; os procedimentos de entrada e saída de matéria, quanto à dependência das variáveis do processo em relação ao tempo, podendo se apresentar como balanço diferencial ou balanço integral (FELDER *et al.*, 2015, p.94).

Diversos estudos empregam o balanço de massa em unidades de tratamento de esgoto doméstico com vistas a avaliação da eficiência deste. No presente trabalho destaca-se alguns estudos desenvolvidos em estações da tipologia de lodos ativados (ASADA, 2007; FARIAS, 2015; HELOU e VICENTE, 2018 e PROLONGADA, 2014), com vistas a comparar resultados obtidos nestes com o da ETE em estudo.

### **3.5 Legislações relacionadas ao tratamento de efluentes domésticos**

O desempenho de uma estação de tratamento de efluentes deve atender, no mínimo, aos requisitos das legislações vigentes sobre a temática. No âmbito federal, a Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011 (BRASIL, 2011) dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos d'água receptores, alterando parcialmente e complementando a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005).

A Resolução CONAMA 430/2011 preconiza o limite de 120 mg/L de DBO para o lançamento de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários, ou eficiência mínima de remoção de 60%, levando em consideração a taxa de autodepuração do corpo hídrico, sua

classificação e diretrizes ambientais, instituídas pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Com relação aos SST, deve-se garantir eficiência mínima de remoção de 20%, após desarenação (BRASIL, 2011).

Em Minas Gerais, as condições de lançamento de efluentes são determinadas pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 1, de 05 de maio de 2008 (MINAS GERAIS, 2008). No que se refere a DBO, essa deliberação se apresenta mais restritiva quando comparada à resolução federal, determinando para sistemas de tratamento de esgoto um padrão de lançamento de até 60 mg/L ou tratamento com eficiência de redução desse parâmetro de no mínimo 60%, com média anual igual ou superior a 70%. Ademais, estabelece a concentração de até 100 mg/L de SST em efluentes tratados.

Diante disto, tendo como fundamento as legislações – Resolução CONAMA 430/2011 e DN Conjunta COPAM/CERH-MG 1/2008 – que regem as diretrizes e normativas de atendimento aos parâmetros exigidos para remoção da carga poluidora e sólidos de efluentes, a Tabela 2 apresenta alguns dos requisitos legais que devem ser observados antes da disposição final do efluente tratado em curso d’água.

**Tabela 2** – Padrões de lançamento de efluentes domésticos conforme legislações nacional e estadual.

<b>PARÂMETRO</b>	<b>Resolução CONAMA 430/2011</b>	<b>DN COPAM/CERH-MG 1/2008</b>
DBO	Concentração máxima de 120 mg/L <b>ou</b> remoção mínima de 60%	Concentração máxima de 60 mg/L <b>ou</b> remoção mínima de 60% <b>e</b> média anual igual ou superior a 70%
DQO	–	Concentração máxima de 180 mg/L <b>ou</b> remoção mínima de 55% <b>e</b> média anual igual ou superior a 65%
SST	Remoção mínima de 20%, após desarenação	Concentração máxima de 100 mg/L
Materiais sedimentáveis	1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff	1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff
Óleos e Graxas	100 mg/L; óleos minerais: 20mg/L; óleos vegetais e gorduras animais: 50mg/L.	óleos minerais: 20mg/L; óleos vegetais e gorduras animais: 50mg/L.
pH	Entre 5 e 9	Entre 6 a 9

**Nota:** DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio; SSTA = Sólidos Suspensos no Tanque de Aeração; SST = Sólidos Suspensos Totais; Relação A/M = Relação Alimento/Microrganismo.

**Fonte:** Adaptado de BRASIL (2011) e MINAS GERAIS (2008).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Localizada em um município do estado de Minas Gerais, a estação de tratamento de esgoto doméstico (ETE) em estudo é do tipo lodos ativados com aeração prolongada. Sua capacidade de tratamento é de até 60 L/s e a população atendida com o tratamento é de, aproximadamente, 40.000 habitantes. Atualmente, seu sistema é composto pelas seguintes unidades: (i) tratamento preliminar, composto por gradeamento, desarenador e medidor de vazão; (ii) tanque de equalização; e (iii) sistema de lodos ativados com aeração prolongada, composto por tanque de aeração e decantador secundário. Na etapa de lodos ativados, o sistema de aeração ocorre por ar difuso com microbolhas, sopradores e difusores de membrana. Esse reator foi concebido para trabalhar com aeração prolongada, com idade dos biossólidos de 28 dias e concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA) de 4.180 mg/L. O tratamento da fase sólida (lodo), por sua vez, é composto pelas etapas de digestão aeróbia e desaguamento por sistema físico-químico e centrífuga.

No tratamento preliminar, o gradeamento é composto por grades inclinadas, com vistas a retenção de sólidos grosseiros encontrados no esgoto, tais como galhos, papéis, pedregulhos, garrafas e outros. A remoção destes sólidos é feita manualmente e o material removido é encaminhado para o aterro sanitário do município, onde a ETE encontra-se instalada. No tanque de equalização, há a homogeneização do efluente, além da garantia de um volume de esgoto a ser tratado com fluxo constante. Esta unidade possui, ainda, um aerador para não permitir a sedimentação dos sólidos, mantendo, dessa forma, o efluente aerado.

Na etapa biológica do tratamento, o sistema com aeração promovido no reator garante as condições necessárias para que ocorra a digestão da matéria orgânica pelos microrganismos presentes no efluente. Em seguida, este é encaminhado para a unidade decantação, onde a biomassa ou lodo biológico, gerado como subproduto do tratamento será sedimentado. Assim, o esgoto clarificado segue para o corpo d'água receptor final. Parte do lodo sedimentado é então recirculado por sistema de bombeamento para o tanque de aeração, conferindo o grau de tratamento desejado. O excedente desse é descartado do sistema por uma elevatória de lodo que bombeia esta massa até o digestor aeróbio. Em seguida, na casa de química, ocorre a centrifugação do composto que entra com cerca de 90% de líquido e sai com, aproximadamente, 45%. Esse líquido excedente é enviado de volta ao tanque de equalização e passa, novamente, pelos mesmos processos, já a massa sólida é enviada por caminhões para o aterro sanitário da cidade. Na casa de química, também, encontram-se instalados os laboratórios de análise do lodo e do efluente.

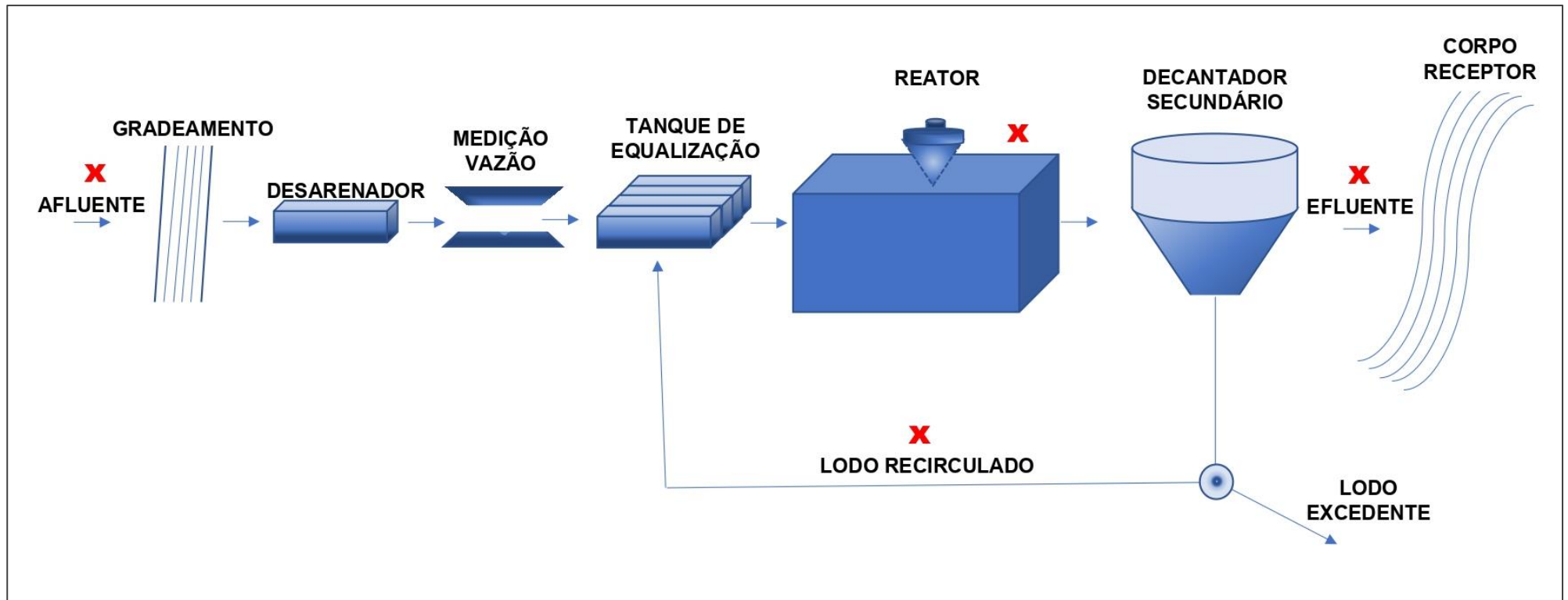
Para concretização do estudo proposto, realizou-se um termo de cooperação entre a Companhia de Saneamento responsável pela ETE em análise e a Universidade Federal de Juiz de Fora/MG, a partir do qual foi possibilitado o acesso a dados de monitoramento da ETE no tocante ao período de agosto de 2018 a agosto de 2019, bem como foram obtidas informações sobre o seu funcionamento. Os dados de caracterização físico-química do efluente disponibilizados são resultados de análises realizadas em laboratório próprio da Companhia de Saneamento, a partir da coleta de amostras do efluente bruto e tratado, lodo do tanque de aeração e do lodo de recirculação, conforme representado na Figura 4.

A seguir são listados os parâmetros de controle da ETE selecionados para realização do presente estudo:

- Efluentes bruto, tratado e do tanque de aeração:
  - vazão de entrada (efluente bruto);
  - vazão de saída (efluente tratado);
  - demanda bioquímica de oxigênio (DBO);
  - demanda química de oxigênio (DQO);
  - sólidos suspensos totais (SST);
  - sólidos totais (ST);
  - sólidos fixos (SF);
  - sólidos voláteis (SV).
- Lodo do sistema de recirculação:
  - vazão de recirculação do lodo;
  - sólidos suspensos totais (SST).

Segundo informações da Companhia de Saneamento, o monitoramento de vazões da ETE é diário. Assim, foram disponibilizadas informações sobre vazões de entrada (efluente bruto), vazões de saída (efluente tratado) e vazões de recirculação do lodo referentes ao período estudado (agosto de 2018 a agosto de 2019). As vazões de lodo excedente foram calculadas com base nas vazões de entrada e saída da ETE, a partir da diferença entre estas. Com relação aos demais parâmetros (Sólidos, DBO e DQO), as coletas e análises laboratoriais foram realizadas semanalmente pela Companhia de Saneamento, sendo possível obter seus valores durante o período supracitado, exceto para o parâmetro de sólidos totais.

**Figura 4** – Representação da localização dos pontos de coleta na ETE estudada



**Nota:** x = Localização dos pontos de coleta.

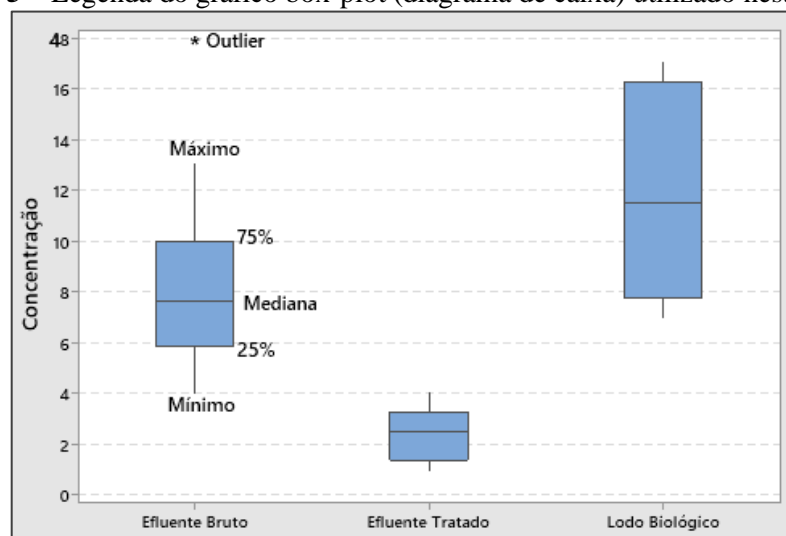
Representação da etapa do tratamento correspondente a fase líquida.

Ressalta-se que além do levantamento quali-quantitativo da ETE, visando atingir o objetivo proposto bem como embasar tal estudo, realizou-se revisão bibliográfica sobre a temática, com intuito de comparar os resultados encontrados com os valores teóricos. Isto posto, nos subitens seguintes são descritas de maneira detalhada as etapas desenvolvidas na metodologia deste trabalho.

#### 4.1 Análise dos dados

Gráficos box-plot, também conhecidos como diagramas de caixa, foram utilizados para apresentar as variações dos parâmetros analisados fornecidos pela Companhia de Saneamento responsável pela ETE estudada. Optou-se por essa forma de representação devido a fácil visualização da distribuição dos dados e pelas descrições estatísticas fornecidas – mediana, valores mínimo e máximo, bem como primeiro (25%) e terceiro (75%) quartis, conforme represento na Figura 5.

**Figura 5** – Legenda do gráfico box-plot (diagrama de caixa) utilizado neste estudo.



Além disso, aplicou-se aos dados analisados, o teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov a nível de significância de 5%, obtendo alguns dados não-paramétricos, ou seja, que não seguiram uma distribuição normal. Deste modo, optou-se por embasar a discussão dos resultados obtidos no balanço de massa e dos dados disponibilizados pela Companhia de Saneamento baseada em valores medianos em detrimento dos valores médios. Portanto, juntamente com os gráficos são apresentadas tabelas com a referida estatística descritiva dos dados, bem como teste de normalidade aplicado.

## 4.2 Balanço de massa aplicado na ETE estudada

Consoante ao abordado na revisão bibliográfica, diversos autores apontam o balanço de massa como ferramenta potencial na compreensão do comportamento dos materiais presentes nas diversas unidades de tratamento de esgotos (VON SPERLING, 2011; METCALF e EDDY, 2014; FELDER *et al.*, 2015). Portanto, para o cálculo das produções de sólidos nas unidades de tratamento biológico da ETE em estudo, bem como para o cálculo de sua vazão de lodo excedente, definiu-se volumes de controles onde foram aplicados o princípio do balanço de massa, representado na Equação 5.

$$\text{Acumulação} = (\text{Entrada} - \text{Saída}) + (\text{Produção} - \text{Consumo}) \quad \text{Equação 5}$$

O balanço realizado foi baseado nos valores medianos dos sólidos (ST, SF e SV) e das vazões monitorados na estação de tratamento. Vale frisar que a hipótese fundamental para efeito dos cálculos pressupôs o regime permanente (*steady state*) no qual as grandezas envolvidas no processo não sofrem alteração no tempo. Diante disso, a Equação 5 pode ser reescrita como (Equação 6):

$$\frac{dm}{dt} = 0 \therefore (\text{massa que entra}) - (\text{massa que sai}) = 0 \quad \text{Equação 6}$$

Neste sentido, o balanço diferencial aplicados ao sistema considerado contínuo de estado estacionário, seguiu as seguintes regras com vistas à sua simplificação (FELDER, *et al.*, 2015):

- Caso a substância balanceada seja uma espécie não reativa, ajusta-se a produção e consumo igualando-os a zero.
- Caso o sistema seja considerado estacionário, define-se a acumulação igual a zero, independentemente do que estiver sendo equilibrado. Por definição, em um sistema de estado estacionário nada pode variar com o tempo.

Tendo em vista as especificações mencionadas, foram calculadas as vazões mássicas e volumétricas (Figura 6), a partir da relação matemática descrita na Equação 5. Tais cálculos foram realizados em todos os pontos da etapa de tratamento biológico da ETE, com exceção aos pontos de coleta, cujos valores foram fornecidos pela Companhia de Saneamento. A Figura

6 apresenta um esboço deste balanço de massa, incluindo um exemplo de volume de controle aplicado neste.

Em seguida, calculou-se as concentrações necessárias à obtenção das produções de sólidos no tanque de aeração, através da relação descrita na Equação 7:

$$[\text{Sólidos}] = \frac{\dot{m}}{Q} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

[Sólidos] = concentração de sólidos totais, fixos ou voláteis (kg/L)

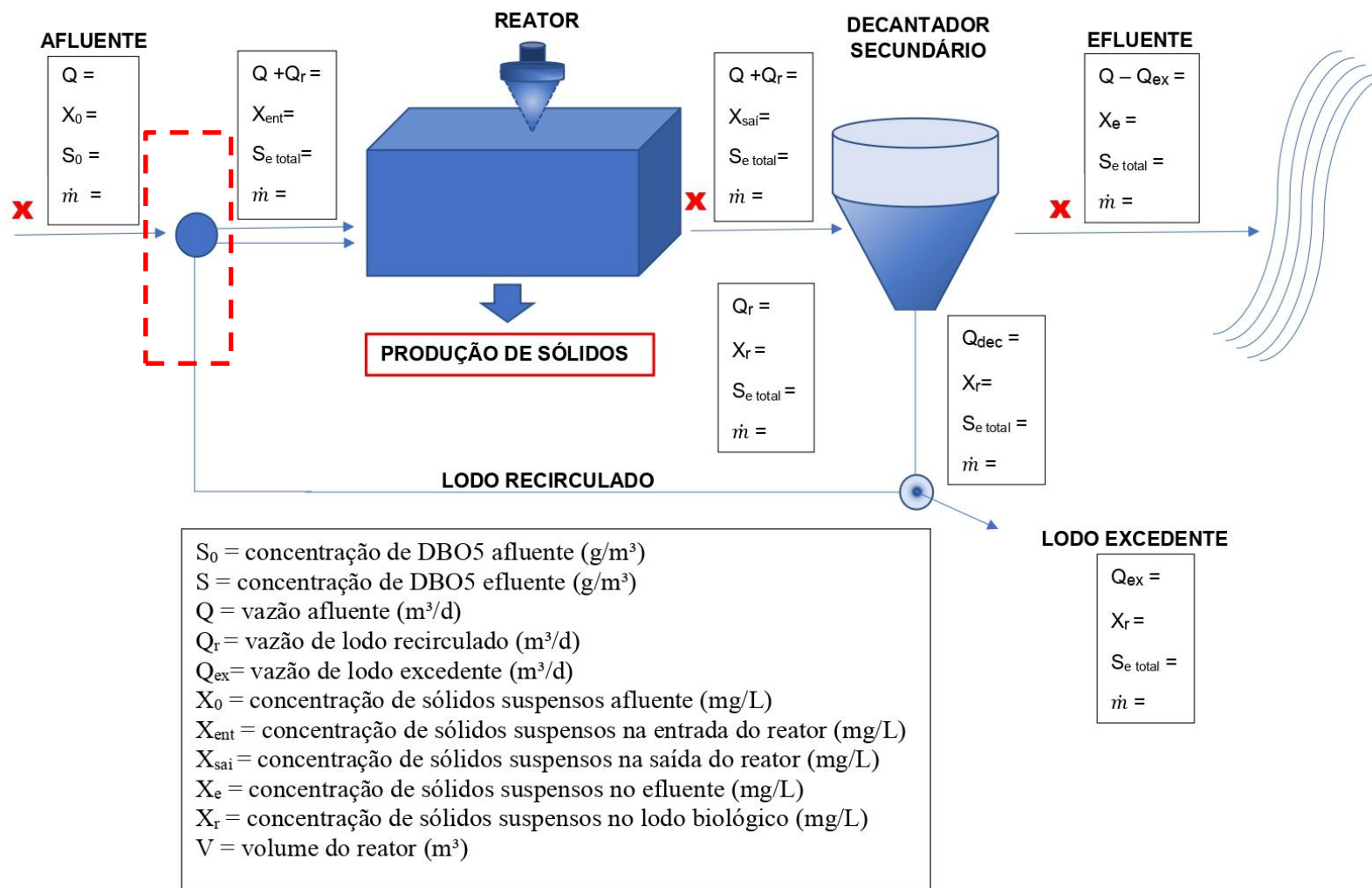
$\dot{m}$  = vazão mássica (kg/h)

Q= vazão volumétrica (L/h)

Assim, obteve-se os valores destas produções ( $P_{\text{sólidos}}$ ) a partir da diferença entre as vazões mássicas de cada um dos parâmetros (ST, SF e SV) de acordo com a Equação 8 genérica:

$$P_{\text{sólidos}} = \dot{m}_{\text{saída TA}} - \dot{m}_{\text{entrada TA}} \quad \text{Equação 8}$$

**Figura 6** – Representação do balanço de massa na ETE estudada



**Nota:** x = Localização dos pontos de coleta dos dados fornecidos; Tracejado = exemplo de volume de controle aplicado;  $\dot{m}$  = vazão mássica.

### 4.3 Produção teórica de sólidos da ETE estudada

Dentre os diversos modelos matemáticos, a produção líquida de sólidos, foi obtida, em termos dos sólidos em suspensão voláteis (SSV), através do conceito de produção específica observada de lodo ( $Y_{obs}$ ), o qual já leva em consideração a destruição dos sólidos biodegradáveis, sendo expressa pela Equação 9 (VON SPERLING, 2012):

$$P_{xv} \text{ líquida} = Y_{obs} \cdot Q \cdot (S_0 - S) \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$P_{xv}$  líquida = produção líquida de sólidos em suspensão voláteis (g SSV/d)

$Y_{obs}$  = coeficiente de produção celular ajustado para compensar a parcela de perda pela respiração endógena (g SSV produzidos / g DBO<sub>5</sub> removida)

$Q$  = vazão afluente (m<sup>3</sup>/d)

$S_0$  = concentração de DBO<sub>5</sub> afluente (g/m<sup>3</sup>)

$S$  = concentração de DBO<sub>5</sub> efluente (g/m<sup>3</sup>)

Adotou-se para este cálculo o valor médio, de acordo com literatura, para o coeficiente  $Y_{obs}$ , igual a 0,315 kg SSV produzidos/kg DBO<sub>5</sub> removida (MAYHEW e STEPHENSON, 1997; METCALF e EDDY, 2014; ASADA, 2007; RAMOS *et al.*, 2014; AMANATIDOU *et al.*, 2015; SAMIOTIS *et al.*, 2018). Para os demais parâmetros da Equação 9, utilizou-se os valores medianos dos dados fornecidos pela Companhia de Saneamento. O resultado obtido, foi então comparado com o valor de produção de sólidos real, encontrado a partir do balanço de massa (Subitem 4.2).

Ainda com o intuito de comparar os dados reais com os valores da literatura e legislações sobre a temática, foram calculadas, também, as eficiências de remoção (Equação 10), da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) total, e dos sólidos totais, suspensos e dissolvidos fixos e voláteis no sistema.

$$E = \frac{C_e - C_s}{C_e} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

Sendo:

$E$  = eficiência de remoção (%);

$C_e$  = concentração na entrada (mg/L);

$C_s$  = concentração na saída (mg/L).

#### 4.4 Avaliação de parâmetros operacionais da ETE estudada

Existem alguns fatores relacionados às condições operacionais que podem influenciar a produção de lodo em processos biológicos de tratamento, dentre os quais, destaca-se o crescimento biológico (produção de sólidos), a relação A/M e a idade do lodo. Em vista disso, tais parâmetros de controle são abordados, neste tópico, pois, conforme mencionado anteriormente, estes são associados à eficiência do processo de tratamento. Conseqüentemente, o monitoramento e o entendimento dos seus mecanismos de atuação são etapas importantes para o bom desempenho da ETE estudada.

Portanto, inicialmente calculou-se a relação alimento/microrganismos (Eq. 11):

$$\frac{A}{M} = \frac{(Q \cdot S_0)}{(V \cdot X_v)} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

A/M = relação alimento / microrganismos (kgDBO/kgSSV.d);

Q = vazão (m<sup>3</sup>/d)

S<sub>0</sub> = concentração de DBO afluente (mg/L);

V = volume do reator (m<sup>3</sup>)

X<sub>v</sub> = concentração de sólidos voláteis no tanque de aeração (mg/L).

Em seguida, obteve-se a idade do lodo (Eq. 12):

$$\theta_c = \frac{(X_v \cdot V)}{(Q_{ex} \cdot X_{rv})} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

θ<sub>c</sub> = idade do lodo (d);

X<sub>v</sub> = concentração de sólidos voláteis no tanque de aeração (mg/L);

V = volume do reator (m<sup>3</sup>);

Q<sub>ex</sub> = vazão de lodo excedente (m<sup>3</sup>/d)

X<sub>rv</sub> = concentração de sólidos voláteis no lodo excedente(mg/L).

Com intuito de estimar a massa ou “passivo de lodo” da ETE estudada, calculou-se, também, a produção de sólidos biológicos desejável (Eq. 13), a partir de parâmetros de projetos, dados da literatura e em função da remoção de substrato, como exposto no item 5.3.

$$X_{v \text{ desejável}} = \frac{Y \cdot (S_0 - S)}{1 + K_d \cdot f_b \cdot \theta_c} \cdot \left( \frac{\theta_c}{t} \right) \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$X_{v \text{ desejável}}$  = concentração desejável de sólidos voláteis no tanque de aeração (mg/L);

$Y$  = taxa de crescimento bacteriano (gSSV/gDBOremovida)

$S_0$  = concentração de DBO<sub>5</sub> total afluente (mg/L)

$S$  = concentração de DBO<sub>5</sub> solúvel efluente (mg/L)

$\theta_c$  = idade do lodo (d);

$K_d$  = coeficiente de respiração endógena (1/d);

$T$  = tempo de detenção hidráulica (d);

$f_b$  = fração biodegradável dos SSV gerados no sistema ( $X_b/X_v$ ) submetidos a uma idade do lodo  $\theta_c$  – Obtido através da Equação 14:

$$f_b = \frac{f'_b}{1 + (1 - f'_b) \cdot K_d \cdot \theta_c} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

$f_b$  = fração biodegradável dos SSV gerados no sistema ( $X_b/X_v$ ) submetidos a uma idade do lodo  $\theta_c$ ;

$f'_b$  = fração biodegradável dos SSV imediatamente após sua geração no sistema, ou seja, com  $\theta_c = 0$ . Tal valor é tipicamente igual a 0,8 (80%);

$K_d$  = coeficiente de respiração endógena (1/d);

$\theta_c$  = idade do lodo (d).

Por fim, foi possível obter a referida massa ou “passivo de lodo” do sistema, ou seja, o lodo que está em excesso neste, com base na seguinte relação (Eq. 15):

$$\text{massa de lodo} = (X_{v \text{ real}} - X_{v \text{ desejável}}) \cdot V \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$X_{v \text{ real}}$  = concentração real de sólidos voláteis no tanque de aeração (mg/L);

$X_{v \text{ desejável}}$  = concentração desejável de sólidos voláteis no tanque de aeração (mg/L);

$V$  = volume do reator (m<sup>3</sup>);

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados os dados disponibilizados pela Companhia de Saneamento responsável pela ETE em estudo, em termos das medianas, dos parâmetros físico-químicos avaliados. A partir destes resultados, apresenta-se uma discussão embasada nas legislações e literatura sobre a temática abordada no presente trabalho. Em seguida, os resultados do balanço de massa realizado são comparados com os valores de produção de sólidos teórico para a ETE em questão e são calculados os parâmetros operacionais da ETE.

### 5.1 Caracterização físico-química de efluentes e lodo biológico da ETE estudada

Os parâmetros físico-químicos expostos neste subitem são decorrentes do monitoramento diário de vazões (entrada e saída) e semanal de sólidos (SST, ST, SF e SV), DBO e DQO, realizado pela Companhia de Saneamento responsável pela ETE estudada, referentes ao período de agosto de 2018 a agosto de 2019.

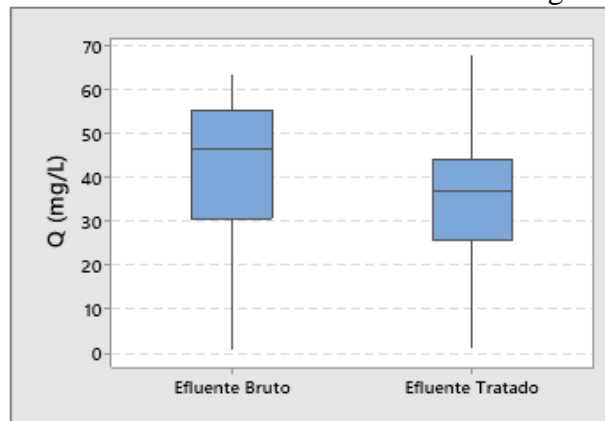
#### 5.1.1 Vazões de efluentes e lodo biológico da ETE estudada

A Tabela 3 apresenta a estatística descritiva das vazões afluente (esgoto bruto) e efluente (esgoto tratado), conforme dados levantados pela Companhia de Saneamento. Em seguida, a Figura 7 representa estes dados graficamente.

**Tabela 3** – Estatística descritiva dos dados de vazão da ETE estudada.

Parâmetro	Vazões (L/s)	
	Q <sub>af</sub>	Q <sub>ef</sub>
<b>N</b>	349	349
<b>Média</b>	40,8	32,9
<b>Desv.Pad</b>	16,9	14,2
<b>Min</b>	0,8	1,2
<b>25%</b>	30,5	25,4
<b>Mediana</b>	46,5	36,9
<b>75%</b>	55,3	44,1
<b>Max</b>	62,9	67,6
<b>Assimetria</b>	-0,8	-0,7
<b>Curtose</b>	-0,6	-0,5
<b>Normalidade</b>	Normal	Normal
<b>(p-valor)</b>	<0.010	<0.010

**Figura 7** – Vazões afluente e efluente da ETE estudada referente a agosto/2018 a agosto/2019.



Conforme observado na Tabela 3 a vazão mediana afluente (efluente bruto) foi igual a 46,5 L/s, apesar de possuir capacidade de tratamento de até 60 L/s, operando, portanto, em subcarga. Segundo informações dos gestores da estação, tal declínio refere-se à necessidade de redução da vazão para realização de reparos em determinadas unidades de tratamento, devido a problemas operacionais ocorridos no período analisado. Com relação ao efluente final (efluente tratado), a vazão mediana foi de 36,9 L/s. Nota-se, a partir da Figura 7, uma diferença considerável entre as vazões afluente e efluente à ETE (9,6 L/s), a qual, em teoria, corresponde a vazão de lodo excedente. Esta diferença elevada pode ocorrer devido a existência do tanque de equalização presente na estação, uma vez que sua bomba é acionada a partir de um determinado nível, funcionando como um sistema em batelada. Dessa forma, a vazão abaixo deste nível não é computada na vazão do efluente final, resultando em uma vazão excedente superior a que realmente ocorre no sistema. Esta, por sua vez, não é gerenciada e não há uma medição do quanto é descartado do sistema, conforme será discorrido no subtópico 5.2.

Por fim, a vazão de recirculação é mantida constante por sistema de bombeamento, apresentando valor médio de lodo de recirculação de 31 L/s, aproximadamente, podendo ser manipulável para o controle de sólidos no tanque de aeração de lodos ativados. Entretanto, observou-se que não há uma administração da vazão de lodo descartado na ETE em estudo, conforme discorrido no subtópico 5.2.

### 5.1.2 Sólidos, DQO e DBO

Dentre os parâmetros abordados nesse subitem, somente os sólidos suspensos totais (SST) foram monitorados no efluente bruto e tratado, no tanque de aeração e no lodo de recirculação (Figura 8). Os demais sólidos não foram analisados no lodo de recirculação no período que

compreendeu este estudo, bem como a DBO e DQO são referentes apenas aos efluentes bruto e tratado da ETE. A Tabela 4 apresenta a estatística descritiva dos dados de SST.

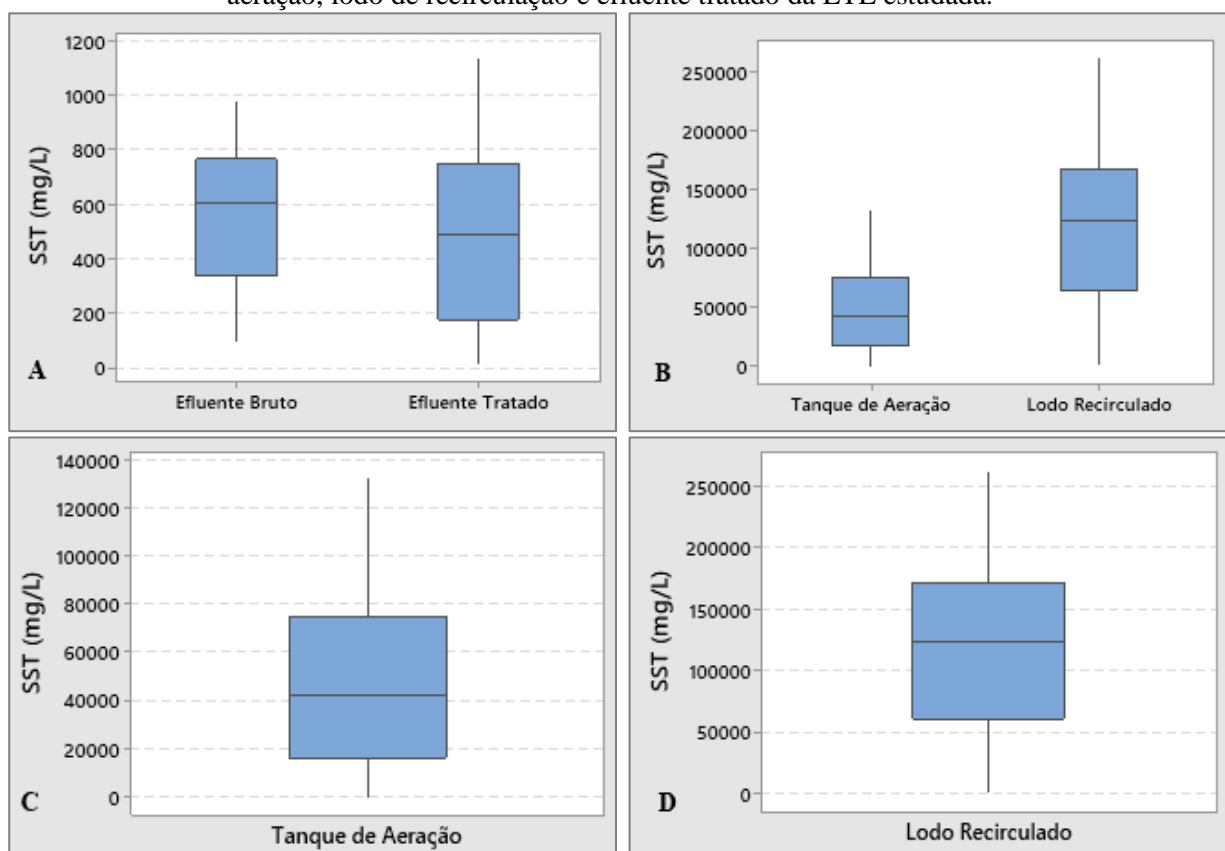
**Tabela 4** – Estatística descritiva dos sólidos suspensos totais (SST) da ETE estudada.

Parâmetro	SST (mg/L)			
	E. Bruto	E. Tratado	TA	Recirc.
<b>N</b>	39	40	38	37
<b>Média</b>	627	534	46108	118956
<b>Desv.Pad</b>	423	429	32919	69937
<b>Min</b>	100	20	314	1270
<b>25%</b>	338	178	16095	60907
<b>Mediana</b>	606	487	41705	122975
<b>75%</b>	766	746	75054	171807
<b>Max</b>	1942	1861	131748	261193
<b>Assimetria</b>	1,7	1,2	0,6	0,2
<b>Curtose</b>	3,7	1,9	-0,2	-0,9
<b>Normalidade</b>	Normal	não-Norm	não-Norm	não-Norm
<b>(p-valor)</b>	<0.010	>0.150	>0.150	>0.150

As concentrações dos SST nos efluentes bruto e tratado são apresentadas na Figura 8.A para melhor visualização dos resultados, uma vez que tais concentração no tanque de aeração (Figura 8.C) e lodo de recirculação (Figura 8.D) são muito elevadas. Assim, tem-se que a concentração mediana de SST encontrada para o efluente bruto foi de 606 mg/L e para o efluente tratado foi de 487 mg/L, o que resultou em uma remoção de 20%. Pode-se inferir que a eficiência encontrada foi muito inferior à esperada em sistemas de tratamento por lodos ativados, uma vez que a remoção média de SST gira em torno de 90% em diferentes variantes deste sistema (VON SPERLING, 2016).

Segundo a Resolução CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011), a eficiência de remoção de SST deve ser de no mínimo 20% após desarenação. Logo, observa-se que o sistema não atingiu, mesmo com o tratamento secundário, o que a norma exige no tratamento primário. No âmbito estadual, a DN COPAM/CERH-MG 1/2008 (MINAS GERAIS, 2008) estabelece que a concentração máxima de SST em efluentes tratados deve ser de 100 mg/L. Desta forma, conclui-se que as concentrações de SST do efluente tratado não atenderam ao padrão de lançamento de ambas as legislações.

**Figura 8** – Box-plot dos valores de sólidos suspensos totais obtidos nos efluentes bruto, tanque de aeração, lodo de recirculação e efluente tratado da ETE estudada.



No tanque de aeração, a concentração de SST foi de 41.705 mg/L, valor considerado muito elevado quando comparados a valores citados na literatura – entre 3.000 a 6.000 mg/L de SST no TA (Tabela 1). De mesmo modo, apesar de esperadas altas concentrações no lodo de recirculação devido a presença de microrganismos ativos neste, o valor mediano (122.975 mg/L) também apresenta-se elevado na ETE estudada. Conforme apresentado na Tabela 1, a concentração de SST no lodo de retorno no fundo do decantador, configuração desta estação, apresenta-se na faixa de 8.000 a 12.000 mg/L. Neste sentido, vale pontuar que a sobrecarga hidráulica ou de sólidos no decantador secundário, podem resultar em elevadas concentrações de sólidos em suspensão no efluente tratado, bem como problemas relacionados ao lodo, como intumescimento, lodo ascendente, lodo pulverizado e lodo disperso (VON SPERLING, 2014). Ainda em termos dos sólidos, tem-se na Tabela 5, a estatística descritiva dos valores dos sólidos totais (ST), fixos (SF) e voláteis (SV), monitorados nos efluentes bruto e tratado e no tanque de aeração desta ETE, os quais são utilizados no balanço de massa e discutidos, em relação a produção de sólidos no TA, no item 5.2.

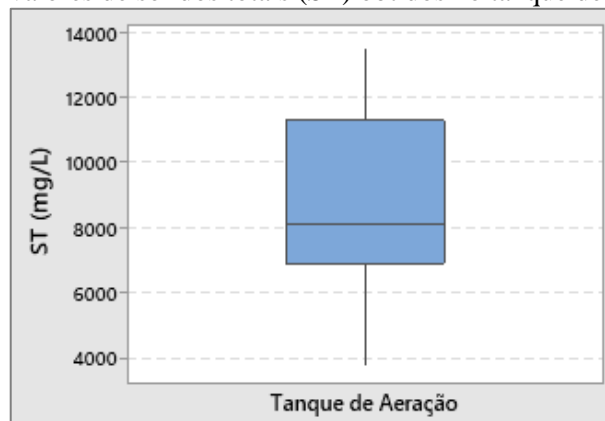
**Tabela 5** – Estatística descritiva dos sólidos totais (ST), voláteis (SV) e fixos (SF) da ETE estudada.

Parâmetro	ST (mg/L)			SV (mg/L)			SF (mg/L)		
	E. Bruto	E. Tratado	TA	E. Bruto	E. Tratado	TA	E. Bruto	E. Tratado	TA
N	44	44	40	43	45	41	43	44	41
Média	804,1	443,9	8807	450,2	277,1	5836	301,4	182,5	3102
Desv.Pad	425	205,5	2583	273,7	230,6	1993	254,3	149,1	961
Min	130	80	3800	20	50	2220	10	10	1260
25%	510	302,5	6875	240	105	4535	80	65	2370
Mediana	770	430	8075	460	250	5240	250	150	2930
75%	985	525	11277	660	385	7510	450	267,5	3920
Max	1940	1160	13440	1200	1130	11220	890	670	4810
Assimetria	0,9	1,0	0,3	0,5	1,9	0,6	0,8	1,4	0,2
Curtose	0,7	2,2	-0,8	-0,1	4,5	0,1	-0,4	2,8	-0,9
Normalidade (p-valor)	Normal <0.010	não-Norm 0,089	Normal 0,034	não-Norm >0.150	Normal <0.010	Normal 0,018	Normal 0,035	Normal 0,016	não-Norm >0.150

De acordo com a Tabela 5, as concentrações medianas de ST nos efluentes bruto e tratado foram iguais a 770 mg/L e 430 mg/L, respectivamente, o que resultou em uma eficiência de remoção de 44%. Conforme representado na Figura 9, a concentração mediana de ST no TA foi igual a 8.075 mg/L, valor típico destes sistemas, conforme apresentado na Tabela 1, devido a expressiva presença de microrganismos no lodo ativado presentes no tanque de aeração.

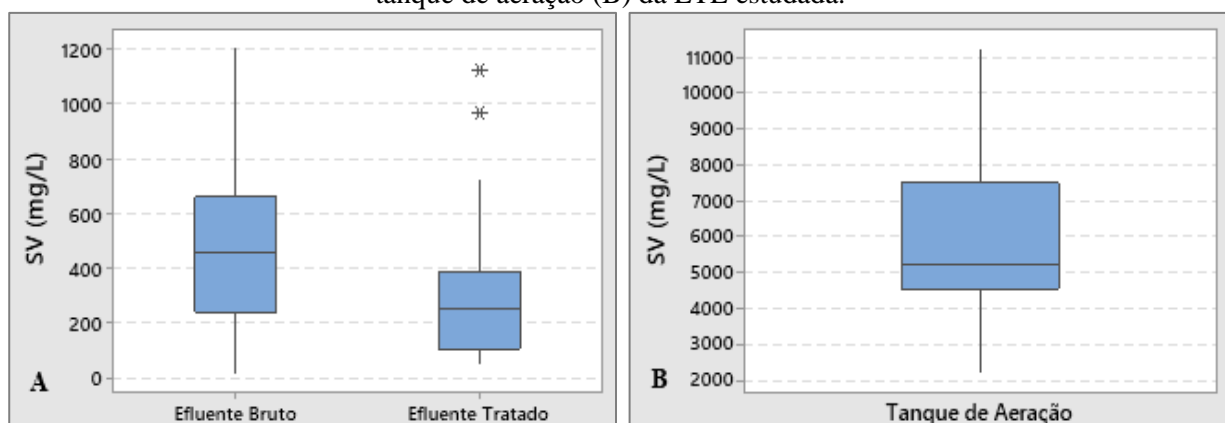
É importante salientar que existe no banco de dados certa incoerência entre valores de SST e ST, visto que SST apresentaram concentrações maiores do que ST, exceto no efluente bruto. Porém, sabe-se que SST se trata de parcela dos ST. Tal divergência pode ser associada a problemas analíticos ou incorreção na compilação de dados por parte da Companhia de Saneamento responsável pela ETE.

**Figura 9** – Box-plot dos valores de sólidos totais (ST) obtidos no tanque de aeração da ETE estudada.



As concentrações medianas de SF nos efluentes bruto e tratado foram iguais a 250 mg/L e 150 mg/L, respectivamente, o que resultou em uma remoção de 40% de SF na ETE. Já no TA, esta concentração foi igual a 2.930 mg/L. Com relação aos sólidos voláteis (SV) – parcela dos sólidos totais que representa a massa de microrganismos presentes no sistema – observou-se concentração mediana no efluente bruto igual a 460 mg/L e no efluente tratado igual a 250 mg/L (Figura 11.A), conferindo uma eficiência de remoção de SV igual a 46%. No reator aeróbio, esta foi igual a 5240 mg/L (Figura 11.B). A partir destes valores (Tabela 5) obteve-se a razão SV/ST de, aproximadamente 0,65 no TA, valor que corresponde a faixa (0,60-0,65) de lodo estabilizado, o que se espera em sistemas de tratamento da tipologia da ETE, lodos ativos com aeração prolongada. Entretanto, este valor é próximo ao limite, se superior a 0,65 o lodo não se encontraria estabilizado.

**Figura 10** – Box-plot dos valores de sólidos voláteis obtidos nos efluentes bruto e tratado (A) e no tanque de aeração (B) da ETE estudada.

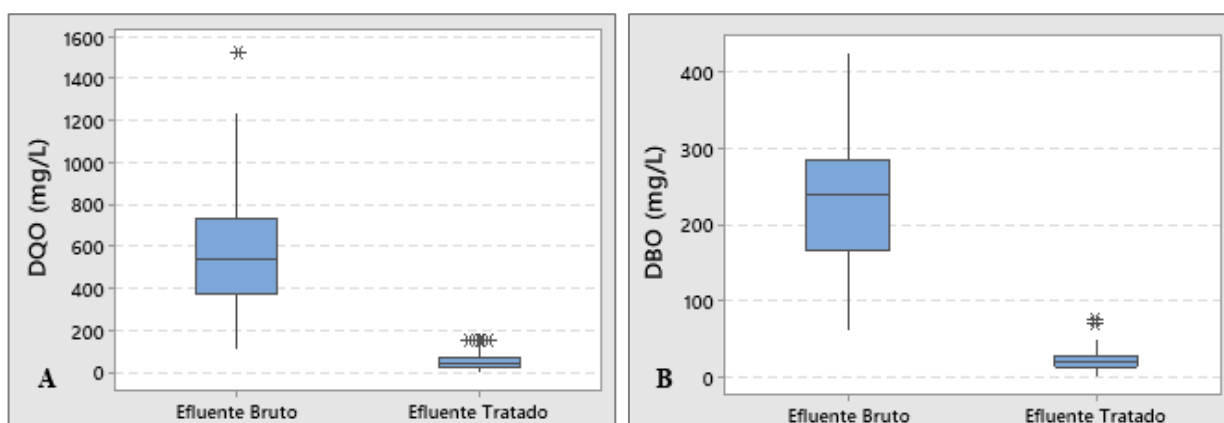


Além dos sólidos, também foram analisadas a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO) dos efluentes bruto e tratado (Figura 11). A ETE apresentou remoção de DQO de 93%, resultado da concentração mediana no efluente bruto igual a 539 mg/L e 36,0 mg/L no efluente tratado (Tabela 6). Tais percentuais são esperados em sistemas de tratamento de lodo ativado com aeração prolongada. Além disso, estes valores atenderam a DN COPAM/CERH-MG N.º 01/2008 (MINAS GERAIS, 2008), a qual firma concentração máxima deste parâmetro igual a 180 mg/L ou remoção mínima de 55% e média anual igual ou superior a 65%.

**Tabela 6** – Estatística descritiva da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) da ETE estudada.

Parâmetro	DBO (mg/L)		DQO (mg/L)	
	E. Bruto	E. Tratado	E. Bruto	E. Tratado
<b>N</b>	45	45	45	45
<b>Média</b>	227	25	574	51
<b>Desv.Pad</b>	84	15	284	43
<b>Min</b>	62	3	113	7
<b>25%</b>	165	13	373	22
<b>Mediana</b>	238	21	539	36
<b>75%</b>	284	28	732	68
<b>Max</b>	422	75	1524	150
<b>Assimetria</b>	0,0	1,5	1,1	1,4
<b>Curtose</b>	-0,3	2,7	1,7	0,8
<b>Normalidade (p-valor)</b>	não-Norm >0.150	Normal <0.010	não-Norm 0,148	Normal <0.010

**Figura 11** – Box-plot dos valores da demanda química de oxigênio – DQO (A) e da demanda bioquímica de oxigênio – DBO (B) obtidos nos efluentes bruto e tratado da ETE estudada.



A DBO apresentou eficiência de remoção de DBO igual a 91% em termos de dados medianos. As concentrações medianas foram iguais a 238 mg/L no efluente bruto e 21 mg/L no tratado (Figura 11.B). Nota-se, portanto, uma eficiência no sistema de tratamento, de acordo com a faixa (90 – 95%) observada em lodos ativados desta variante (Tabela 1). Ademais, a estação apresenta-se adequada a legislação vigente, a qual exige concentração máxima de DBO igual a 60 mg/L ou remoção mínima de 60% e média anual igual ou superior a 70%, para efluente de esgoto doméstico (MINAS GERAIS, 2008).

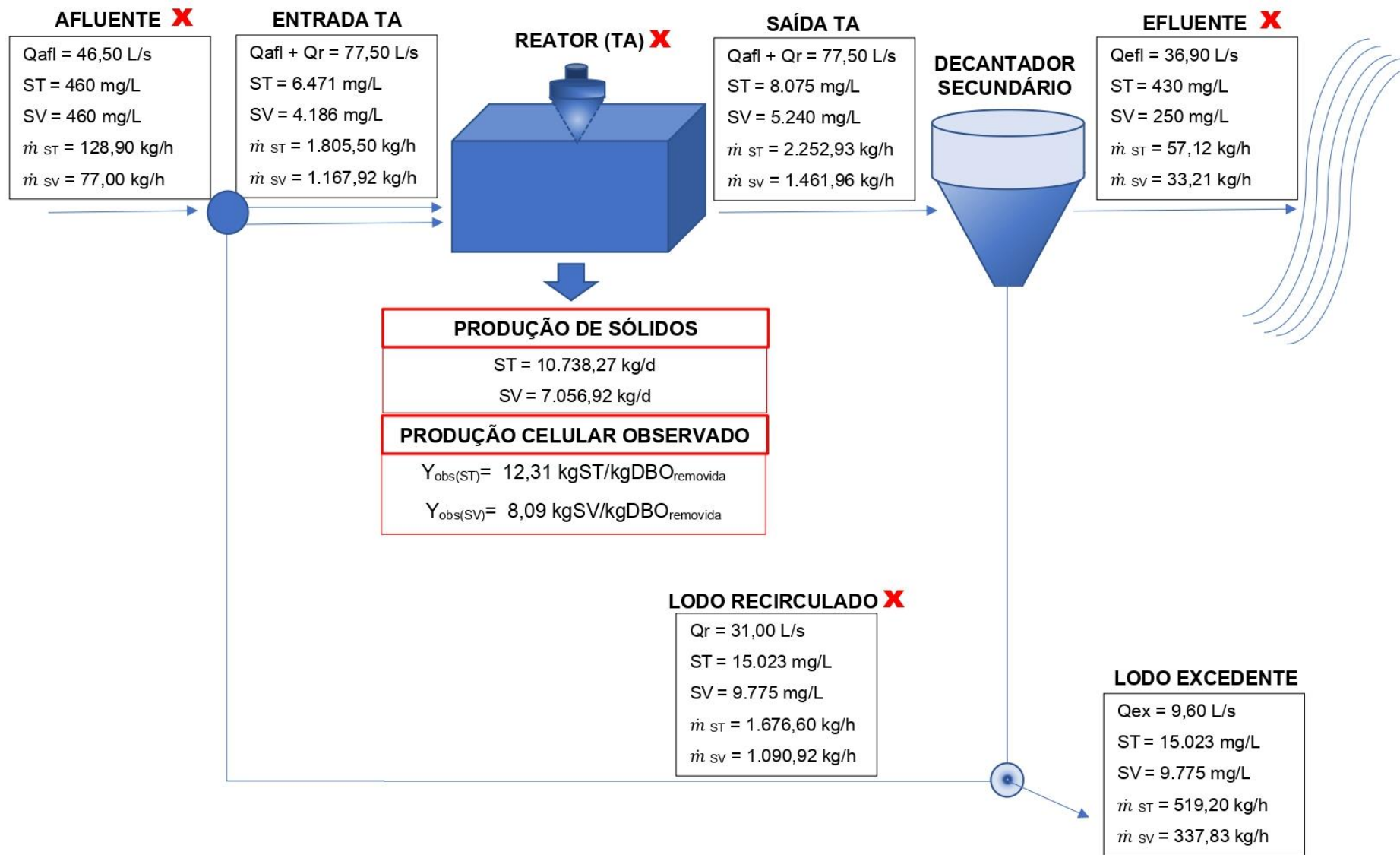
## 5.2 Balanço de massa: produção de sólidos real e teórica

Com base nos parâmetros apresentados no tópico 5.1, realizou-se o balanço de massa real da ETE estudada, a partir de valores medianos obtidos da estatística descritiva, com intuito de

avaliar a produção de sólidos no sistema. O resultado com todos os parâmetros são apresentados no Apêndice A e o resumo destes, para melhor compreensão da discussão, na Figura 12 A produção líquida de sólidos no tanque de aeração obtida neste balanço foi comparada à produção líquida de lodo excedente ( $P_{xv}$  – Equação 8), obtida através do coeficiente de produção celular observado ( $Y_{obs}$ ) médio, encontrado na literatura.

Conforme abordado no tópico 3.2, esse coeficiente teórico ( $Y_{obs}$ ) é dado em g  $SSV_{produzido}$  / g  $DBO_{removida}$ . Entretanto, no presente trabalho o  $Y_{obs}$  é retratado em g  $SV_{produzido}$  / g  $DBO_{removida}$ , uma vez que não são realizadas análises de SSV na ETE em estudo. Sabe-se que os sólidos voláteis totais (SV) é a soma de sólidos suspensos voláteis (SSV) e sólidos dissolvidos voláteis (SDV) ( $SV = SSV + SDV$ ), ou seja, a concentração SV é maior que SSV. Porém, no tanque de aeração e no lodo biológico de sistemas de lodos ativados com aeração prolongada, a concentração de SDV, associados à DBO solúvel, é desprezível quando comparada à elevada concentração de SSV (associados a biomassa). Assim, considerando ínfima a parcela de SDV nas referidas amostras, pode-se inferir que os valores de SSV e SV são próximos, o que justifica a comparação realizada, devido a carência de dados mencionada.

**Figura 12** – Fluxograma do balanço de massa real da ETE estudada, considerando os valores medianos dos parâmetros discutidos.



**Nota:** x = Localização dos pontos de coleta dos dados fornecidos.

O valor obtido para o do coeficiente de produção celular observado ( $Y_{obs}$ ) da ETE analisada foi igual a  $8,09 \text{ kgSV}_{prduzida}/\text{kgDBO}_{removida}$ , associado a uma produção líquida de sólidos igual a  $7.056,92 \text{ kg/SSV/d}$ . Tal valor de  $Y_{obs}$  é muito elevado quando comparado ao da literatura –  $0,315 \text{ kgSSV}_{prduzida}/\text{kgDBO}_{removida}$  (MAYHEW e STEPHENSON, 1997; METCALF e EDDY, 2014; ASADA, 2007; RAMOS *et al.*, 2014; AMANATIDOU *et al.*, 2015; SAMIOTIS *et al.*, 2018). A partir deste último, obteve-se produção líquida teórica de lodo excedente na estação igual a  $275 \text{ kgSSV/d}$ . Comparando essa com a produção real da ETE, ( $7.057\text{kgSV/d}$ ), nota-se uma produção de sólidos muito mais elevada do que a esperada conforme a bibliografia. Visto que estes dados não inferem, necessariamente, em apenas uma elevada produção de sólidos, como também no acúmulo destes no sistema, compreende-se que tais resultados convergem para a hipótese de baixa remoção de lodo excedente na ETE em estudo. Em vista disso, especula-se que a quantidade de lodo descartada não tem sido equivalente à produção de biomassa (crescimento bacteriano).

Conforme mencionado anteriormente, a retirada de lodo em excesso da ETE em estudo é realizada na linha de recirculação de lodo. Porém, foi verificado *in loco* que a vazão de lodo excedente não é constante, sendo prática comum de operação na ETE o acúmulo de lodo no sistema e descarte pontual, com frequência irregular, quando se deduz necessidade de remoção. Dessa forma, não há um controle rigoroso do volume e da frequência do descarte de lodo excedente. Segundo von Sperling (2011), a vazão de lodo excedente em sistemas lodos ativados é de cerca de 5% da vazão afluyente da ETE. Dessa forma, a vazão excedente ( $9,60 \text{ L/s}$ ), calculada pela diferença entre as vazões afluyente e efluyente à ETE, parece estar superestimada (vazão de lodo excedente correspondente a cerca de 20,6% da vazão afluyente). Além disso, a vazão de lodo excedente não reflete a vazão de lodo biológico que realmente é descartada do sistema, uma vez que a medição da vazão tratada sofre alterações e pode reduzida devido à presença do tanque de equalização. Uma alternativa para obtenção de resultados mais condizentes seria considerar o valor da vazão que permanece nesta unidade, a qual não é computada, por se encontrar abaixo do nível da bomba. Ou seja, apesar de os resultados de produção de sólidos no TA, bem como de concentrações de sólidos suspensos elevadas no efluyente final (subitem 5.1) apontarem para uma baixa remoção de lodo excedente do sistema, não foi possível calcular tal vazão administrada na ETE devido as dificuldades apontadas.

Neste sentido, Von Sperling (2016) salienta, como consequência do controle insuficiente dessa taxa, o aumento da camada do lodo tanto no TA quanto no decantador secundário. Ademais, o autor aponta que, devido à elevada permanência dos microrganismos nessa unidade, há

possibilidade de ocorrência de desnitrificação (em virtude do consumo de oxigênio), bem como a descarga de SS no efluente final, provocando, assim, a deterioração da qualidade deste. Ainda segundo vos Sperlíng (2016), algumas estratégias, como o controle de sólidos suspensos constante no tanque de aeração, da carga de lodo pela relação A/M e/ou da idade do lodo, podem ser adotadas a fim de se promover o monitoramento desta vazão. No presente trabalho, propõe-se que este seja realizado em função da idade do lodo (Equação 11).

$$Q_{ex} = \frac{V}{\theta_c} \cdot \frac{X}{X_r} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

$Q_{ex}$  = vazão de lodo excedente (m<sup>3</sup>/d);

V = volume do tanque de aeração (m<sup>3</sup>);

$\theta_c$  = idade do lodo (dias)

X = concentração de sólidos suspensos no reator (mgSS/L);

$X_r$  = concentração do lodo de retorno(mgSS/L).

Portanto, com base na razão de ST das análises realizadas na ETE (Figura 12); adotando-se a idade do lodo de projeto (28 dias) e sabendo que o volume estimado do TA é de 2700 m<sup>3</sup>, obtém-se que a vazão de lodo excedente da ETE estudada deveria ser de, aproximadamente, 0,60 L/s. Tal valor, está de acordo com o esperado para estes sistemas de tratamento, cuja faixa varia de , aproximadamente, 1 a 4% da vazão afluente (46,5 L/s). Nota-se, entretanto, que a vazão de lodo excedente ( $Q_{ex}$ ) aqui calculada (0,60 L/s) trata-se de um valor muito menor do que o obtido no balanço de massa (9,60 L/s). Isso se dá, possivelmente, devido à  $Q_{ex}$  obtida no balanço de massa ter sido calculada com base nos valores de vazões afluente e efluente da ETE. Adicionalmente, durante o acompanhamento da ETE, observou-se que não é adotada prática de remoção contínua de lodo do sistema, como recomendado. Assim, foi impossível se obter valor próximo da realidade. Portanto, acredita-se que uma  $Q_{ex}$  de 0,60 L/s seja algo mais compatível com a realidade de um sistema de lodos ativados com aeração prolongada com vazão afluente de 46,5 L/s operando com remoção contínua de lodo excedente do sistema, conforme práticas usuais.

Vale frisar que, optou-se por calcular tal vazão, em função dos ST, em detrimento dos SS (Eq. 13), pois, como exposto anteriormente, os valores de SST cedidos pela Companhia, apresentam valores muito elevados e superiores aos ST, denotando certa incongruência. Neste sentido, orienta-se que a vazão de lodo excedente desejável, seja recalculada utilizando-se todos os

parâmetros de projeto, ou ainda, através dos dados reais recentes, após eliminação da massa ou “passivo de lodo”, apresentado no item 5.3.

### **5.3 Avaliação de parâmetros operacionais da ETE estudada**

Neste tópico, são discutidos os resultados obtidos para os parâmetros operacionais – produção de sólidos, relação A/M e idade do lodo, conforme abordado no item 4.4

No que diz respeito a relação A/M da ETE estudada (0,07 kg DBO<sub>5</sub>/kg SSV .d), pôde-se inferir, a partir dos dados cedidos pela Companhia de Saneamento, que tal relação foi ligeiramente baixa. Porém, o valor obtido encontra-se bem próxima à faixa esperada (0,08-0,15 kgDBO/kgSSV.d) para lodos ativados com aeração prolongada, segundo von Sperling (2012) (Tabela 1). Ainda segundo o autor, nesta faixa, as bactérias passam a utilizar de forma mais intensa a própria matéria componente de suas células (respiração endógena), promovendo a estabilização do lodo dentro do próprio tanque de aeração, entretanto, quando tal relação é baixa, há possibilidade de intumescimento do lodo.

Ainda quanto ao valor obtido para a relação A/M da ETE, pontua-se que, tanto para o seu cálculo quanto para o cálculo da concentração de sólidos em suspensão voláteis, apresentada no decorrer deste tópico, utilizou-se o valor da DBO total e não solúvel como requer tais equações (Eq.11 e Eq. 13), já que a Companhia de Saneamento responsável pela ETE não dispunha de tal dado. Portanto, para análise destes resultados, deve-se levar em consideração tal distinção.

O segundo parâmetro avaliado, foi a idade do lodo, cujo valor obtido foi de, aproximadamente 1,7 d, valor muito inferior à faixa esperada (18 a 30 d) de acordo com von Sperling (2012) (Tabela 1). Entretanto, isto era previsto, tendo em vista que este cálculo foi baseado na vazão de lodo excedente obtida pelo balanço de massa (9,6 L/s). Conforme mencionado no item 5.1.1, tal vazão, é muito elevada e não condiz com o que de fato é descartado do sistema, visto que este valor sofre interferência da vazão efluente final, que por sua vez, não apresenta em seus registros, a vazão que permanece no tanque de equalização, por exemplo. Além disso, também como discutido nos tópicos anteriores, as concentrações de sólidos no reator e no lodo recirculado são muito elevadas, o que aponta para uma vazão de lodo excedente abaixo da necessária para que não haja acúmulo de sólidos no sistema.

Por fim, estimou-se a massa ou “passivo de lodo” da ETE estudada, com base no cálculo da produção de sólidos biológicos desejável (Eq. 13); da produção de sólidos biológicos real

(Sólidos Voláteis, resultado dos dados fornecidos pela Companhia) e do volume estimado do tanque de aeração.

O resultado da produção de sólidos biológicos desejável ( $X_v$ ) foi de 1.956,02 mg/L, já a produção de sólidos biológicos real da ETE estudada foi de 5.240 mg/L, superior a faixa esperada 2.500 a 4.500 mg/L para estes sistemas (VON SPERLING, 2012). Quanto maior a quantidade de substrato assimilado, maior será essa taxa de crescimento bacteriano (produção de sólidos biológicos). No caso da ETE, há muito substrato, devido a baixa remoção de lodo, o que favorece tal crescimento. Com tais valores, obteve-se a massa ou “passivo de lodo” da ETE de, aproximadamente, 8.866,7 kg de lodo acumulado no reator, convergindo para a hipótese de baixa remoção de lodo do sistema.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do estudo realizado, conclui-se que a estação de tratamento em questão, apresentou eficiências de remoção elevadas (91% e 93%) com relação aos parâmetros de DBO e DQO, respectivamente. Já em relação aos sólidos suspensos totais, observou-se concentrações, no efluente final (487,5 mg/L), acima do esperado em sistemas de tratamento por lodos ativados com aeração prolongada, bem como elevadas concentrações no lodo de recirculação (122.975,0 mg/L). A elevada produção de sólidos biológicos da ETE estudada (5.240 mg/L) também é superior a faixa esperada para estes sistemas. Como analisado, não há um descarte contínuo do lodo excedente e, portanto, encontrou-se certas dificuldades durante a avaliação da produção real de sólidos nesta estação. Outra divergência, em termos de problemas analíticos ou incorreções operacionais, foram os valores de SST mais elevados que os ST, nas amostras analisadas pela Companhia de Saneamento, exceto, para a amostra de efluente final. Entretanto, destaca-se o uso do balanço de massa de matéria orgânica como ferramenta potencial para o diagnóstico de estações de pequeno/médio porte, quando se é realizado análises destes parâmetros, visando a maximização de sua capacidade operacional, de modo a se obter o seu máximo benefício. A partir do balanço de massa aplicado, confrontando valores de  $Y_{obs}$  real (8,09 kgSV<sub>produzida</sub>/kgDBO<sub>removida</sub>) com o valor médio da literatura (0,315 kgSSV<sub>produzida</sub>/kgDBO<sub>removida</sub>), e a partir das produções de lodo excedente, pôde-se inferir que há uma sobrecarga de sólidos no tanque de aeração e lodo de recirculação da ETE, resultando em perdas de eficiência do sistema e deterioração da qualidade efluente tratado. Tais estimativas apontam para a necessidade de remoção do lodo excedente, a partir de um controle adequado, como é feito na recirculação.

Tendo em vista o aumento do volume de lodo descartado, propõe-se estudos futuros sobre o processo de gerenciamento do lodo (fase sólida) atualmente empregado na ETE estudada, e verificação da necessidade de adequações ou adição de técnicas que visam sua higienização (produção de bio-sólidos). A possibilidade de uso benéfico de bio-sólidos (uso agrícola e/ou recuperação de áreas degradadas, por exemplo) apresenta potencial para doação ou mesmo venda do bio-sólido, o que levaria a diminuição de custos relacionados à destinação final de lodo de esgoto em aterro sanitário. Além deste, propõe-se pesquisas sobre a possibilidade de minimização do excesso de produção de lodo gerado no tratamento biológico desta estação.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMANATIDOU, E., SAMIOTIS, G., TRIKOILIDOU, E., PEKRIDIS, G., & TAOUSANIDIS, N. **Evaluating sedimentation problems in activated sludge treatment plants operating at complete sludge retention time.** water research, 2015, 69: 20-29.

AMORIM, L. L. G.; VARGAS, K. P.; de JESUS, E. H. A. **Análise de eficiência do sistema de lodo ativado no tratamento de efluentes de um curtume na cidade de Uberlândia – MG.** In: V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Belo Horizonte, 2014.

ASADA, Lucia Naomi. **Avaliação dos efeitos do recebimento do lodo de estação de tratamento de água em sistema de tratamento de esgoto pelo processo de lodo ativado com aeração prolongada.** 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.** Diário Oficial da União. República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.** Diário Oficial da União. República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 16 de maio de 2011.

Bye, Christopher M. et. al. **Region-wide Wastewater Treatment Plant Modeling Enhances Facility Management and Planning.** WEFTEC, 2012.

FARIAS, Flavia da Silva et al. **O balanço de massa das unidades componentes de uma estação de tratamento de esgoto e a utilização da estatística multivariada como ferramenta de verificação do comportamento físico, químico, bacteriológico e de metais no esgoto bruto e tratado. Estudo de caso: estação de tratamento de esgoto doméstico–ETE Sideral-Belém-PA.** 2013.

FELDER, Richard M.; ROUSSEAU, Ronald W.; BULLARD, Lisa G. **Elementary principles of chemical processes.** NY etc.: Wiley, 4th Edition, 2015.

HELOU, Luiz Carlos; VICENTE, Rosmeiry Vanzella. **Aplicação da modelagem matemática na operação de Estações de Tratamento de Esgotos por Lodos Ativados – O caso de Bragança Paulista.** DOI:10.4322/dae.2018.036. Revista DAE. Edição nº: 213 Ano: 2018.

JORDÃO, E.P. & PESSOA, C.A. **Tratamento de esgotos domésticos.** 6ª Ed., Rio de Janeiro: ABES, 2011.

LIU, Y.; TAY, J.H. **Strategy for minimization of excess sludge production from the activated sludge process.** Water Research, 19, p 97-107, 2001.

MAYHEW, M.; STEPHENSON, T. **Low biomass yield activated sludge: a review.** Environmental technology, v. 18, n. 9, p. 883-892, 1997.

METCALF & EDDY. Inc. **Wastewater Engineering, Treatment and Reuse**. 4. ed. New York, McGraw - Hill Book, 1815p. 2003.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 1, de 05 de maio de 2008. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Diário Executivo, Belo Horizonte, 2008.

PROLONGADA, Aeração. **Dimensionamento, análise e comparação da viabilidade econômica de uma estação de tratamento de esgotos utilizando os processos de lodos ativados convencional**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RAMOS, Sandra Regina Alexandre et al. **Avaliação de processo de lodos ativados com aplicação de ácido fólico como estratégia de minimização da produção de lodo**. 2014.

SAMIOTIS, Georgios et al. **Innovative Approach on Aerobic Activated Sludge Process towards more Sustainable Wastewater Treatment**. In: Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings. 2018. p. 645.

SHERRARD, Joseph H.; SCHROEDER, Edward D. **Cell yield and growth rate in activated sludge**. Journal (Water Pollution Control Federation), p. 1889-1897, 1973.

SNIS – **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2017**. Ministério das Cidades. Brasília, 2017. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br> >. Acesso em: 09 de julho de 2019.

VON SPERLING, M. **Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 2011.

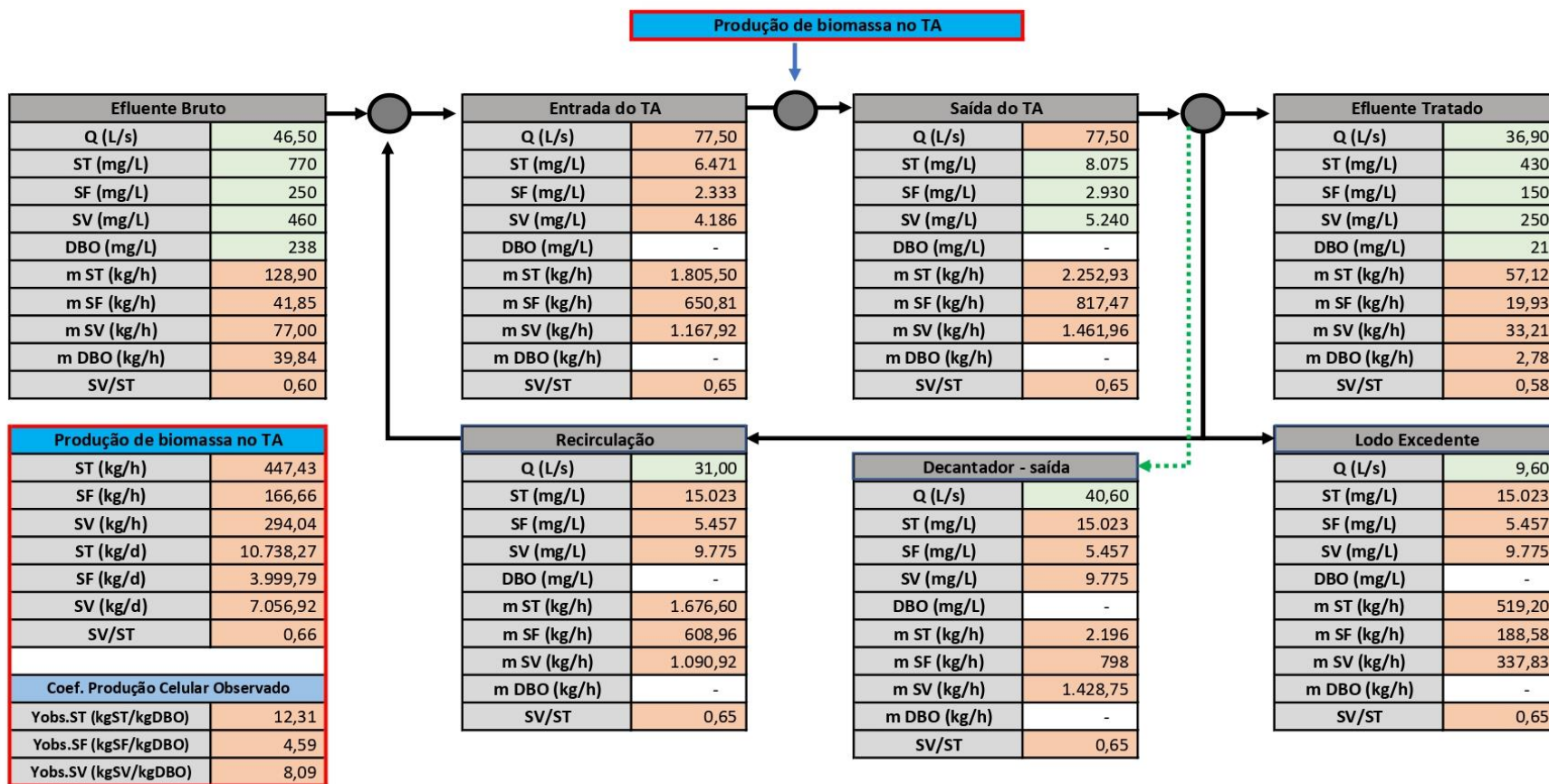
VON SPERLING, Marcos. **Princípios de tratamento de águas residuárias: Lodos Ativados**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 3ª Ed., Belo Horizonte, 2012.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios de tratamento de águas residuárias: Lodos Ativados**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 4ª ed. rev. e ampliada. – Belo Horizonte, MG, 2016.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Universidade Federal de Minas Gerais, 4ª Ed., Belo Horizonte, 2014.

## APÊNDICES

**APÊNDICE A** – Balanço de massa real da ETE estudada, considerando os valores medianos dos parâmetros avaliados.



**Nota:** Na cor verde são expostos os dados fornecidos pela Companhia. Na cor alaranjada, os resultados obtidos pelas relações descritas no tópico 4.2, a partir dos volumes de controle definidos e dos referidos cálculos do balanço de massa apresentados nesta seção.