

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

RAQUEL HARTMANN

**ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO APROVEITAMENTO DE
BIOGÁS DO LODO GERADO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS
DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE**

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Hartmann, Raquel
ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO
APROVEITAMENTO DE BIOGÁS DO LODO GERADO NAS ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE
/ Raquel Hartmann. -- 2022.
90 f.
Orientadora: Maria Cristina de Almeida Silva.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Estação de tratamento de esgoto. 2. Lodo de
esgoto. 3. Digestão anaeróbia. 4. Biogás. 5.
Aproveitamento energético. I. de Almeida Silva, Maria
Cristina, orient. II. Título.

RAQUEL HARTMANN

**ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO APROVEITAMENTO DE
BIOGÁS DO LODO GERADO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS
DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul apresentado como requisito para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cristina de Almeida Silva

Porto Alegre

2022

RAQUEL HARTMANN

**ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO APROVEITAMENTO DE
BIOGÁS DO LODO GERADO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS
DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharela.

Aprovado em: Porto Alegre, 03 de outubro de 2022.

Prof^a. Dr^a. Maria Cristina de Almeida Silva - UFRGS
Orientadora

Prof^a. Dr^a. Maria Cristina de Almeida Silva - UFRGS
Examinadora

Prof. Gino Gehling - UFRGS
Examinador

Engenheira Adriana Cecchin - DMAE
Examinadora

RESUMO

O tratamento de esgoto, necessário para a preservação do meio ambiente, produz um resíduo sólido orgânico: o lodo de esgoto. A produção de lodo vem sofrendo significativo incremento decorrente da tendência de universalização da coleta e tratamento de esgotos no Brasil. Paralelamente, com o aumento da demanda por energia, a busca pela eficiência energética, a busca por fontes renováveis e pelo melhor aproveitamento dos recursos naturais ganhou força ao redor do mundo. Sabe-se ainda que o lodo pode ser tão ou mais impactante que o próprio esgoto. Porém, com a adoção de sistemas de gerenciamento eficazes, o lodo pode ser considerado um recurso com potencial energético, ao ser utilizado como substrato no processo de digestão anaeróbia. Neste processo, através da degradação biológica do lodo sob condições anaeróbias, é gerado biogás, que é composto principalmente por metano que, por sua vez, pode ser aproveitado para o uso energético. Em vista disso, no presente trabalho avaliam-se os benefícios econômicos e ambientais possibilitados pelo aproveitamento do biogás gerado a partir do lodo de Estações de Tratamento de Esgotos (ETE). Foi estimado o potencial de produção de biogás disponível em 7 (sete) ETE do município de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul. Para isso, calculou-se a capacidade de produção de lodo em cada uma destas estações, considerando as particularidades de cada sistema existente, para então estimar o potencial de geração de biogás e de gás metano. Também foi estimado o potencial energético do biogás e a respectiva economia com a geração desta energia. O conjunto de dados utilizados no estudo foram disponibilizados pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre (DMAE-POA) e contempla o período de janeiro de 2017 a dezembro de 2021, correspondendo aos últimos 5 (cinco) anos completos de operação. Os resultados encontrados demonstram que a geração de eletricidade nas ETE a partir do biogás é uma alternativa atrativa do ponto de vista financeiro e ambiental, dado que a biodigestão atende aproximadamente 40% do consumo de energia das estações avaliadas. Desta maneira, a energia que é disponibilizada pelo aproveitamento do biogás é capaz de suprir parte da demanda do consumo de energia da estação.

Palavras-chave: Estação de tratamento de esgoto. ETE. Lodo de esgoto. Digestão anaeróbia. Biogás. Aproveitamento energético.

ABSTRACT

Sewage treatment, necessary for the preservation of the environment, produces an organic solid waste: sewage sludge. Sludge production has been suffering a significant increase due to the trend of universalization of sewage collection and treatment in Brazil. At the same time, with the increasing demand for energy, the search for energy efficiency, renewable sources and the better use of natural resources has gained strength around the world. It is also known that the sludge can be as or more impactful than the sewage itself. However, with the adoption of effective management systems, the sludge can be considered a resource with energy potential when used as a substrate in the anaerobic digestion process. In this process, through the biological degradation of sludge under anaerobic conditions, biogas is generated, which is composed mainly of methane that, in turn, can be used for energy use. In view of this, in the present study, the economic and environmental benefits made possible by the use of biogas generated from sludge of Wastewater Treatment Plants (WWTP). The potential of biogas production available in 7 (seven) WWTP in the municipality of Porto Alegre, in the state of Rio Grande do Sul, was then estimated. For this, the sludge production capacity was calculated in each treatment plant, considering the particularities of each existing system, to then estimate the potential of biogas and methane gas generation. The energy potential of biogas and its profit from the generation of this energy were also estimated. The set of data used in the study were made available by the Municipal Department of Water and Sewage of Porto Alegre (DMAE-POA) and covers the period from January 2017 to December 2021, corresponding to the last 5 (five) full years of operation. The results found demonstrate that electricity generation in WWTP from biogas is an attractive alternative from a financial and environmental point of view, since biodigestion serves approximately 40% of the energy consumption of the stations evaluated. Thus, the energy that is made available by the use of biogas is able to supply part of the demand for the station's energy consumption.

Keywords: Wastewater Treatment Plants. WWTP. Sewage sludge. Anaerobic digestion. Biogas. Energy use.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição dos sólidos do lodo segundo o tamanho e a fração orgânica.	24
Figura 2 - Fluxograma típico do sistema de lodos ativados convencional.	26
Figura 3 - Fluxograma de um sistema de aeração prolongada.	28
Figura 4 - Esquema de um sistema de lodos ativados com operação intermitente...29	
Figura 5 - Esquema de um sistema de valo de oxidação.	30
Figura 6 - Configuração de um sistema MBBR para remoção de DBO32	
Figura 7 - Fluxograma típico de um sistema de reator anaeróbio de manta de lodo.33	
Figura 8 - Arranjo típico de sistema UASB com lodo ativado convencional.35	
Figura 9 - Composição das despesas correntes de estações de tratamento.37	
Figura 10 - Percentuais de gastos médios nas ETE analisadas.43	
Figura 11 - Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES) de Porto Alegre.48	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalos típicos de remoção do lodo das unidades da fase líquida.	36
Tabela 2 - Valores de operação e manutenção típicas de sistemas de tratamento de esgotos, expressos em valores per capita.	38
Tabela 3 - Sistemas de Esgotamento Sanitário e os dados de suas respectivas Estações de Tratamento de Esgotos.	49
Tabela 4 - Faixas das variáveis para o tipo de lodo misto adensado.	55
Tabela 5 - Variáveis não monitoradas pelo DMAE e obtidas na literatura para o sistema de lodos ativados.	55
Tabela 6 - Variáveis monitoradas e fornecidas pelo DMAE para sistemas de lodos ativados.	56
Tabela 7 - Variáveis não monitoradas pelo DMAE e obtidas na literatura para o sistema UASB.	59
Tabela 8 - Variáveis monitoradas e fornecidas pelo DMAE para sistemas UASB. ...	59
Tabela 9 - Variáveis não monitoradas pelo DMAE e obtidas na literatura para o sistema UASB.	60
Tabela 10 - Variáveis monitoradas e fornecidas pelo DMAE para sistemas UASB. .	61
Tabela 11 - Variáveis não monitoradas pelo DMAE e obtidas na literatura para o sistema de lodos ativados.	62
Tabela 12 - Variáveis monitoradas e fornecidas pelo DMAE para sistemas de lodos ativados.	63
Tabela 13 - Valores médios típicos gastos com operação e manutenção utilizados para cada sistema de tratamento e as respectivas estações estudadas.	70
Tabela 14 - Estimativa da produção diária de lodo para cada uma das ETE com sistema de lodos ativados, bem como as variáveis intermediárias encontradas.	72
Tabela 15 - Estimativa da produção diária de lodo para a ETE com sistema UASB, bem como as variáveis intermediárias encontradas.	73
Tabela 16 - Estimativa da produção diária de lodo para cada uma das ETE com sistema UASB seguido de lodos ativados, bem como as variáveis intermediárias encontradas.	73

Tabela 17 - Estimativa da produção diária de biogás para cada uma das ETE centrais.	75
Tabela 18 - Estimativa da geração anual de metano para cada estação central.	75
Tabela 19 - Estimativa do potencial energético diário e anual das ETE centrais.	76
Tabela 20 - Os custos médios típicos de operação e manutenção e com energia elétrica em cada estação de tratamento estudada.....	77
Tabela 21 - Estimativa do valor equivalente da energia bruta produzida a partir do biogás por ano nas ETE centrais.	78
Tabela 22 - Comparação entre o custo médio com energia e o valor equivalente da energia produzida nas ETE centrais e suas respectivas economias percentuais.	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Gás carbônico
CO ₂ e	Equivalência em dióxido de carbono
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/l)
DEX	Despesas de Exploração
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgotos
DMLU	Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre
DQO	Demanda Química de Oxigênio (mg/l)
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FGV	Fundação Getulio Vargas
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGP-M	Índice Geral de Preços - Mercado
ITE	Indicador de Atendimento Total de Esgoto
ITR	Indicador de Tratamento Total de Esgoto
MBBR	Lodos Ativados de Leito Móvel (<i>Moving Bed Biological Reactor</i>)
N	Nitrogênio
N ₂	Gás Nitrogênio
NBR	Norma Regulamentadora Brasileira
OD	Oxigênio Dissolvido (mg/l)
P	Fósforo
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico de Porto Alegre
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PROBIOGÁS	Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil

SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões de Gases do Efeito Estufa
SES	Sistema de Esgotamento Sanitário
SSF	Sólidos Suspensos Fixos (mg/l)
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNSA/MCidades	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades
SST	Sólidos Suspensos Totais (mg/l)
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis (mg/l)
ST	Sólidos Totais (mg/l)
UASB	Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>)
UTC	Unidade de Triagem e Compostagem

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔX	Produção de lodo em sólidos voláteis (kg SSV/d)
ΔX_{LAe}	Produção de lodo aeróbio em sólidos voláteis (kg SSV/d)
ΔX_T	Produção de lodo em sólidos totais (kg SST/d)
ΔX_{TLAn}	Produção de lodo anaeróbio em sólidos totais (kg SST/d)
ΔX_{TLAe}	Produção de lodo aeróbio em sólidos totais (kg SST/d)
$\Delta X_{TLAe(UASB)}$	Produção de lodo aeróbio retirado do reator em sólidos totais (kg SST/d)
ΔX_{TLM}	Produção de lodo misto em sólidos totais (kg SST/d)
$C_{energia}$	Custo médio com energia elétrica (R\$/ano)
C	Custo médio de operação e manutenção da estação (R\$/ano)
$CH_{4volume}$	Volume de metano produzido (m ³ /d)
$CO_{2volume}$	Volume de dióxido de carbono produzido (m ³ /d)
DQO_{afl}	DQO afluente (kg/m ³)
E	Energia bruta produzida (kWh/d)
Ep	Valor equivalente da energia produzida (R\$/ano)
d^{-1}	1/dia
kd	Coefficiente de autodestruição (d^{-1})
M	Massa de lodo a ser descartada (kg SST/d)
MM_{CH_4}	Massa molar do metano (kg/mol)
MM_{CO_2}	Massa molar do dióxido de carbono (kg/mol)
Θ_c	Idade do lodo (dia)
ρ	Peso específico do lodo (kg/m ³)
P	População atendida pela estação (habitantes)
PCI	Poder calorífico inferior do gás de digestão (kJ/m ³)
Q	Vazão afluente (L/s)
$Q_{biogás}$	Vazão de biogás gerado (m ³ gás/d)
Q_i	Vazão intermediária (m ³ /d)
$R_{SSV/SST}$	Relação SSV/SST
Se	Concentração da DBO efluente (mg O ₂ /L)
Si	Concentração da DBO intermediária (mg O ₂ /L)
So	Concentração da DBO afluente (mg O ₂ /L)

SST_{afl}	Carga de sólidos totais no lodo afluente ao digestor (kg SST/d)
$SSF_{LAe(UASB)}$	Carga de sólidos fixos no lodo aeróbio retirado do reator UASB (kg SSF/d)
SSV_{afl}	Carga de sólidos voláteis no lodo afluente ao digestor (kg SSV/d)
SSV_{efl}	Carga de sólidos voláteis no lodo efluente ao digestor (kg SSV/d)
$SSV_{LAe(UASB)}$	Carga de sólidos voláteis no lodo aeróbio retirado do reator UASB (kg SSV/d)
TS	Teor de sólidos (%)
TS_d	Teor de sólidos do lodo desidratado (%)
V_L	Volume gerado de lodo (m ³ /d)
V_{LAn}	Volume gerado de lodo anaeróbio (m ³ /d)
V_{LS}	Volume gerado de lodo seco (m ³ /d)
$Vol_{gás}$	Volume do gás (m ³ /mol)
γ	Densidade (g/cm ³)
Y	Coefficiente de produção (adimensional)
Y_{obs}	Coefficiente de produção celular específica observada corrigido pela auto oxidação (mg SSV/mg DBO)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 ESGOTO	20
3.2 TRATAMENTO DE ESGOTO.....	20
3.2.1 Estação de tratamento de esgotos.....	22
3.3 LODO.....	24
3.3.1 Geração de lodo em diferentes sistemas de tratamento	25
3.3.2 Tratamento de lodo em estações de tratamento de esgotos	35
3.3.3 Custos de operação e manutenção em estações de tratamento de esgotos	36
3.4 DIGESTÃO DO LODO.....	38
3.4.1 Digestão anaeróbia	39
3.5 BIOGÁS	40
3.6 GERAÇÃO DE ENERGIA.....	42
3.6.1 Emissões atmosféricas na geração de eletricidade	45
4 METODOLOGIA.....	47
4.1 COLETA E LEVANTAMENTO DE DADOS	47
4.2 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO ESTUDADAS.....	47
4.2.1 Estações centrais	51
4.3 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE LODO.....	53
4.3.1 Produção de lodo em sistemas de lodos ativados	53
4.3.2 Produção de lodo em sistemas UASB	58

4.3.3 Produção de lodo em sistema UASB seguido de lodos ativados.....	60
4.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS	66
4.5 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO	67
4.6 ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO	68
4.7 ESTIMATIVA DA ECONOMIA COM A GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS	69
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5.1 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE LODO	72
5.1.1 Geração de lodo em sistemas de lodos ativados	72
5.1.2 Geração de lodo em sistemas UASB	73
5.1.3 Geração de lodo em sistema UASB seguido de lodos ativados	73
5.2 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS	74
5.3 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO	75
5.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO	76
5.5 ESTIMATIVA DA ECONOMIA	77
6 CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de esgoto, necessário para a qualidade de vida requerida pela sociedade moderna e de seu interesse por um ambiente saudável, produz um resíduo sólido predominantemente orgânico, denominado lodo de esgoto. Este resíduo pode ser tão ou mais impactante para o meio ambiente que o próprio esgoto (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

Dessa forma, o tratamento e a disposição final do lodo constituem muitas vezes problemas particularmente difíceis ou complexos. Isso ocorre em razão das grandes quantidades que podem ser geradas, da dificuldade em se encontrar locais adequados ou seguros para o destino final do lodo seco, da própria distância de transporte, aos custos, aos impactos ambientais, e das características de operação e processo (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

Os digestores anaeróbios, que fazem parte do tratamento de lodo em estações de tratamento, são tecnologias que produzem biogás como um de seus subprodutos (PROBIOGÁS, 2015a). A não utilização e a emissão do biogás na atmosfera causa impactos negativos ao meio ambiente, em especial devido ao seu potencial de aquecimento global (UNFCCC, 2014, apud PROBIOGÁS, 2015a).

O descarte dos substratos orgânicos, sem o devido tratamento, causa enormes impactos negativos. Os ambientes naturais terrestres e aquáticos contam com limitada capacidade de autodepuração e a degradação não controlada libera gases de efeito estufa, provoca a eutrofização e resulta em uma série de outros problemas ambientais e na saúde humana (PROBIOGÁS, 2015b).

As estações de tratamento de esgotos do município de Porto Alegre, localizado no estado do Rio Grande do Sul e objetos de estudo deste trabalho, transportam seus lodos gerados e os encaminham para o aterro sanitário de Minas do Leão. Este aterro possui um moderno sistema de coleta do biogás e unidade de geração de energia (CRVR, 2020). Contudo, sabe-se que no Brasil o meio de transporte mais usual de resíduos é o rodoviário, que envolve os maiores riscos de danos ao meio ambiente e à saúde pública (GEHLING, 2020). Além disso, o aproveitamento energético deve ser priorizado no próprio local de geração de lodo, de modo que se torne mais benéfico ambiental e economicamente.

Além disso, a eficiência dos sistemas de tratamento de esgoto existentes e o crescente consumo energético no setor de saneamento apresentam uma série de oportunidades de melhoria (PROBIOGÁS, 2015a). Em 2020, nas estações de tratamento do Brasil, de acordo com o SNIS (2022), a despesa com energia elétrica foi de mais de R\$7,3 bilhões, sendo o terceiro maior custo operacional. Aliado ao alto consumo, os constantes aumentos no preço da energia elétrica reforçam a viabilidade de uma geração local (PROBIOGÁS, 2017).

Adicionalmente, com o aumento do rigor das legislações ambientais, o setor tende a sofrer cada vez mais pressão para aumentar a eficiência dos seus processos de tratamento, minimizando as emissões e reduzindo a produção de resíduos. O resultado, possivelmente, será o advento de ETE mais mecanizadas, e, conseqüentemente, mais energo-intensivas (PROBIOGÁS, 2015a).

Nesse contexto, há uma grande preocupação com o tratamento e disposição final do lodo, assim como as emissões geradas, custos e eficiência atrelados em ambos processos. Em vista disso, tornam-se relevantes estudos que buscam avaliar os benefícios econômicos e ambientais a partir do aproveitamento do biogás gerado em lodos de estações de tratamento de esgotos.

Sendo assim, a geração de eletricidade nas ETE a partir do biogás passa a ser uma alternativa atrativa, do ponto de vista financeiro e ambiental, ao se considerar: 1) a tendência de aumento das tarifas de energia elétrica, 2) a ampliação das ações focadas na mitigação das emissões de gases do efeito estufa, 3) a necessidade de aumento da eficiência nos sistemas de tratamento de esgoto e 4) a disseminação das práticas de eficiência energética. A recuperação e o aproveitamento energético do biogás podem, portanto, contribuir para reduzir a quantidade de lodo aterrado, gerar eletricidade e, conseqüentemente, reduzir os custos operacionais de uma ETE, além de proporcionar benefícios sociais e ambientais (PROBIOGÁS, 2015a).

Outra tendência é o aumento expressivo dos serviços de coleta e tratamento de esgotos no Brasil nas próximas duas décadas. Esse fato revela que o país deve maximizar, continuamente, a eficiência operacional de plantas e a eficácia da remoção da carga poluidora, salvaguardando o destino ambientalmente correto e sanitariamente seguro de subprodutos, bem como a viabilidade financeira dos investimentos (PROBIOGÁS, 2015a).

Neste cenário, a capacidade de converter um passivo ambiental em um ativo energético, o biogás, promove a segurança energética para os mais variados segmentos e gera receita. O aproveitamento energético é uma solução para inúmeros desafios, podendo ainda ser mencionada a queima de combustíveis fósseis para geração de energia (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES et al., 2020).

Dessa maneira, o presente trabalho contempla a estimativa de geração de biogás a partir do lodo gerado nas estações de tratamento de efluentes do município de Porto Alegre. Para tanto, o documento foi estruturado em seis partes, que abrangem esta introdução, os objetivos, a revisão bibliográfica com as definições necessárias para compreensão do tema, a metodologia utilizada para as estimativas, os resultados e discussões e conclusões obtidas a partir do estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho teve como objetivo estimar o potencial energético a partir do aproveitamento do biogás produzido na estabilização, por digestão anaeróbia, do lodo gerado nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) do município de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos do presente trabalho:

- Avaliar a aplicabilidade do estudo nas ETE do município de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, a partir do tratamento utilizado;
- Estimar a capacidade de produção de lodo nas ETE analisadas;
- Estimar a capacidade de produção de biogás proveniente do tratamento anaeróbio do lodo gerado nas ETE analisadas;
- Quantificar o potencial de geração de energia proveniente deste biogás produzido nas ETE analisadas e sua respectiva economia.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESGOTO

Os esgotos são, em geral, classificados em dois grupos principais: os esgotos sanitários e os industriais. Os primeiros são constituídos essencialmente de despejos domésticos, uma parcela de águas pluviais, águas de infiltração, e eventualmente uma parcela não significativa de despejos industriais, tendo características bem definidas (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Assim, o esgoto sanitário, conhecido também como esgoto doméstico e foco deste trabalho, é definido como oriundo de residências e de instalações comerciais, institucionais e públicas (METCALF & EDDY, 2016).

Cerca de 80% da água captada em ambientes naturais, tratada e distribuída por redes públicas para consumo humano se transforma em esgoto após usos domésticos. Nessas atividades, ela incorpora resíduos, material orgânico e nutrientes (SNIS, 2022). Os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,90% de água. A fração restante inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como microrganismos. Portanto, é devido a essa fração de 0,10% que há necessidade de se tratar os esgotos (SPERLING, 1996).

3.2 TRATAMENTO DE ESGOTO

Segundo Metcalf & Eddy (2016), o objetivo do tratamento de esgotos, a partir dos anos 1980, além de melhorar a qualidade da água, é a remoção de constituintes que poderiam causar efeitos de longo prazo sobre a saúde e impactos ambientais. Por conseguinte, ocorreu uma mudança de paradigma em relação ao esgoto e, de acordo com Tchobanoglous (2011, apud METCALF & EDDY, 2016), “esgoto é, agora, considerado uma fonte renovável e recuperável de energia, de recursos e de água”.

Dentro dessa nova visão, o foco do tratamento de esgoto vem se modificando. Novos processos estão sendo desenvolvidos, tornando possível recuperar energia, recursos e água de maneira mais eficaz. De fato, é razoável assumir que, em um futuro não muito distante, as estações de tratamento de esgotos se tornarão exportadoras e não mais consumidoras de energia (METCALF & EDDY, 2016).

Em contrapartida, sem o adequado tratamento e posterior recuperação de energia, recursos e água, o lançamento de esgotos nos corpos hídricos tem resultado no comprometimento da qualidade da água. Isso ocorre, principalmente, próximo às

áreas urbanas, podendo impactar na saúde da população e até inviabilizar o atendimento de usos a jusante, em especial o abastecimento humano (ATLAS ESGOTO, 2017). As consequências ambientais do lançamento indiscriminado de esgotos sanitários nos corpos d'água são a diminuição ou depleção do oxigênio dissolvido na massa de água, e a redução da diversidade da vida aquática. Quanto às consequências de saúde pública, pode contaminar os corpos d'água com a presença de bactérias, vírus, parasitos, todos capazes de transmitir doenças de veiculação hídrica e trazer sérios problemas de saúde pública (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

Conforme consta no estudo “Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas”, lançado em 2017 pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades (SNSA/MCidades), que é o atual Ministério do Desenvolvimento Regional, 38,60% dos esgotos produzidos no Brasil não são coletados nem tratados e 18,80% dos esgotos são coletados, mas acabam sendo lançados nos corpos d'água sem tratamento. Ainda segundo o estudo, o cenário ideal, isto é, esgotos que são coletados e tratados antes de retornarem aos mananciais, correspondem a 42,60% (ANA, 2017).

A situação do município de Porto Alegre pode ser conhecida a partir do último relatório do Ranking do Saneamento. Esse documento foi publicado em abril de 2022 pelo Instituto Trata Brasil (2022), e considera os 100 municípios mais populosos do país, tendo como base a estimativa populacional de 2020 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os dados utilizados para a elaboração do estudo são obtidos no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a fonte mais completa sobre o setor de saneamento no Brasil. A cidade de Porto Alegre se encontra na 43ª posição do ranking das cidades com melhores condições, uma posição inferior em relação ao estudo anterior.

Para definição desta colocação no ranking, o estudo considera o Indicador de Atendimento Total de Esgoto (ITE), que mostra a porcentagem da população total do município que possui seu esgoto coletado. O indicador médio de coleta dos municípios, em 2020, foi de 75,69% e o de Porto Alegre foi de 91,48%, ficando acima da média nacional, de 54,95%. O valor superior a 90% também indica a universalização desse serviço no município, de acordo com a legislação (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2022).

Ainda, o ranking considera o Indicador de Tratamento Total de Esgoto (ITR), que mostra a porcentagem do esgoto que é tratado em relação à água consumida. O indicador médio de tratamento de esgoto dos 100 maiores municípios foi de 64,09% e o de Porto Alegre foi de 52,42%, ficando um pouco acima da média nacional, de 50,75%, mas em patamares muito baixos, indicando uma área com grandes desafios a serem superados (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2022).

3.2.1 Estação de tratamento de esgotos

A Norma Brasileira (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 12209:2011 apresenta as condições recomendadas para a elaboração de projeto hidráulico e de processo de Estações Tratamento de Esgotos (ETE). A norma define Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) como o “conjunto de unidades de tratamento, equipamentos, órgãos auxiliares, acessórios e sistemas de utilidades, cuja finalidade é a redução das cargas poluidoras do esgoto sanitário e condicionamento da matéria residual resultante do tratamento” (NBR 12209, 2011).

Os processos de tratamento dos esgotos são formados por uma série de operações unitárias, empregadas para a remoção e/ou transformação das substâncias indesejáveis (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Os constituintes encontrados no esgoto são removidos por meio físicos, químicos e biológicos. Os métodos individuais são, usualmente, classificados como processos unitários físicos, químicos ou biológicos (METCALF & EDDY, 2016).

Sabe-se que estes processos não atuam isoladamente; as transformações provocadas por um determinado processo de tratamento influirão de forma indireta nos fenômenos inerentes aos demais processos. Assim sendo, os processos de tratamento são definidos em função do fenômeno predominante. Nos processos físicos, há predominância dos fenômenos físicos de um sistema ou dispositivo de tratamento, enquanto nos processos químicos há a utilização de produtos químicos (e são raramente adotados de modo isolado). Já os processos biológicos são aqueles que dependem da ação de microrganismos presentes nos esgotos (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

Sabe-se ainda que a fase líquida corresponde ao fluxo principal de líquido na estação de tratamento de esgotos, enquanto a fase sólida diz respeito aos subprodutos sólidos gerados no tratamento, notadamente o lodo. Assim, as operações

e processos da fase líquida podem ser classificados através dos seguintes níveis, de acordo com Sperling (1996):

- I. Preliminar: destina-se principalmente à remoção de sólidos grosseiros e de areia. Os mecanismos básicos de remoção são de ordem física, como peneiramento e sedimentação.
- II. Primário: esta etapa destina-se à remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis e sólidos flutuantes. Assim, sua remoção por processos simples como a sedimentação implica na redução da carga de DBO dirigida ao tratamento secundário, em que a sua remoção é de certa forma mais custosa. A massa de sólidos sedimentada gradualmente no fundo é denominada lodo primário bruto. Nessa etapa, há predomínio de mecanismos físicos para remoção de poluentes.
- III. Secundário: tem como principal objetivo a remoção da matéria orgânica. Esta se apresenta nas seguintes formas: matéria orgânica dissolvida (DBO solúvel), a qual não é removida por processos meramente físicos, como o de sedimentação; e matéria orgânica em suspensão (DBO suspensa ou particulada), a qual é em grande parte removida no tratamento primário, mas cujos sólidos de decantabilidade mais lenta persistem na massa líquida. Etapa com predomínio de mecanismos biológicos.
- IV. Terciário: objetiva a remoção de poluentes específicos (usualmente tóxicos ou compostos não biodegradáveis) ou ainda, a remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário.

O esgoto, em muitos casos, pode ser tratado por processos biológicos, que buscam reproduzir os fenômenos biológicos observados na natureza. É utilizado, primariamente, para remover substâncias orgânicas biodegradáveis, coloidais ou dissolvidas encontradas no esgoto. Em suma, essas substâncias são convertidas em (a) gases que possam escapar para a atmosfera e (b) tecido celular biológico que pode ser removido por sedimentação ou por qualquer outro processo de separação (METCALF & EDDY, 2016).

Segundo Sperling (1996), os subprodutos sólidos gerados no tratamento dos esgotos são: material gradeado, areia, espuma, lodo primário e lodo secundário. Destes, o lodo é, de longe, o que apresenta maior volume (METCALF & EDDY, 2016). Logo, os lodos primário e secundário são os que apresentam a maior parcela e

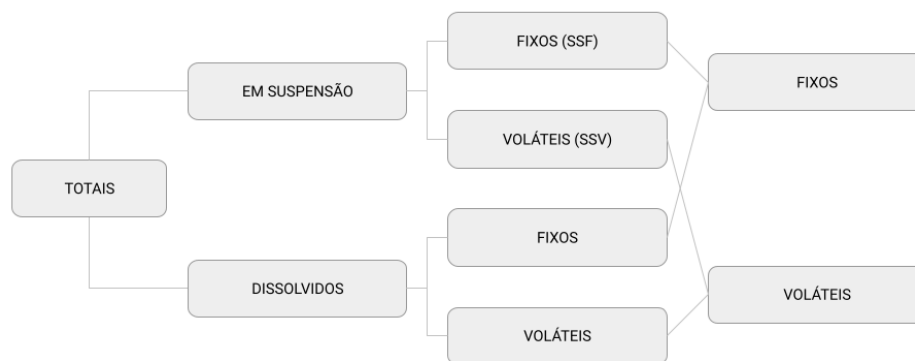
importância, devendo receber atenção particular em relação a seu tratamento - chamado tratamento da fase sólida - e à disposição final (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Em princípio, todos os processos de tratamento biológico geram lodo (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

3.3 LODO

O termo “lodo” tem sido utilizado para designar os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001). Ainda que o lodo possa na maior parte das etapas do seu manuseio ser constituído de mais de 95% de água, apenas por convenção é designado por fase sólida, visando distingui-lo do fluxo do líquido sendo tratado (SPERLING, 1996).

O lodo é composto por sólidos e água. Os sólidos totais (ST) dividem-se em sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos. No lodo, a grande maioria dos sólidos é representada pelos sólidos em suspensão. Com relação à matéria orgânica, os sólidos dividem-se em sólidos fixos ou inorgânicos (SSF) e sólidos voláteis ou orgânicos (SSV) (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001). A Figura 1 ilustra essa distribuição dos sólidos no lodo.

Figura 1 - Distribuição dos sólidos do lodo segundo o tamanho e a fração orgânica.



Fonte: adaptado de Andreoli, Sperling e Fernandes (2001).

Logo, os lodos são usualmente caracterizados pelos parâmetros sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST), que representam a biomassa gerada a partir da conversão da Demanda Química de Oxigênio (DQO) do esgoto em novas células. O conteúdo de matéria orgânica do lodo é caracterizado pelos parâmetros sólidos totais voláteis (STV) e sólidos suspensos voláteis (SSV) (PROBIOGÁS, 2015a).

A matéria sólida contida nos esgotos brutos constitui uma quantidade média de 0,08% do volume total dos esgotos domésticos. Embora o lodo represente de 1% a

2% do volume do esgoto tratado, o seu gerenciamento é bastante complexo e tem um custo geralmente entre 20% a 60% do total gasto com a operação de uma estação de tratamento de esgoto. O gerenciamento é complexo em razão das grandes quantidades que podem ser geradas, da dificuldade em se encontrar locais adequados e seguros para o destino final do material seco, da distância de transporte, dos custos, dos impactos ambientais, e das características de operação e processo (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

Dentro do gerenciamento, Andreoli, Sperling e Fernandes (2001) afirmam que o destino final adequado do lodo é um fator fundamental para o sucesso de um sistema de saneamento. Os autores ainda garantem que é uma operação bastante complexa por, muitas vezes, ultrapassar os limites da ETE e ser muito negligenciada em nosso país.

Com a aprovação da Lei Federal nº 12.305/2010, a partir de 2014, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), apenas a parte não aproveitável dos resíduos (rejeitos) pode ser encaminhada para aterros sanitários. Isso significa que o lodo das ETE precisa ser submetido a todos os processos possíveis de tratamento e recuperação por meio das tecnologias disponíveis e economicamente viáveis, antes de ser depositado em um aterro sanitário. Apesar da viabilidade econômica ser um critério que varia caso a caso, o envio de lodos para aterros já começa a ser considerado impeditivo em alguns municípios, conforme a lei supracitada (PROBIOGÁS, 2015a).

O cumprimento da Lei tem causado um aumento expressivo do custo da disposição final (PROBIOGÁS, 2015a). Importante ressaltar ainda que esta realidade é agravada conforme se ampliam os índices de atendimento de esgoto sanitário e, principalmente, a eficiência dos sistemas de tratamento de esgoto (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001), o que certamente pode ser considerada uma tendência em todos os lugares do mundo.

3.3.1 Geração de lodo em diferentes sistemas de tratamento

Neste tópico serão detalhados os sistemas de tratamento de esgotos de maior interesse para o presente trabalho, bem como suas respectivas características quanto à geração de lodo.

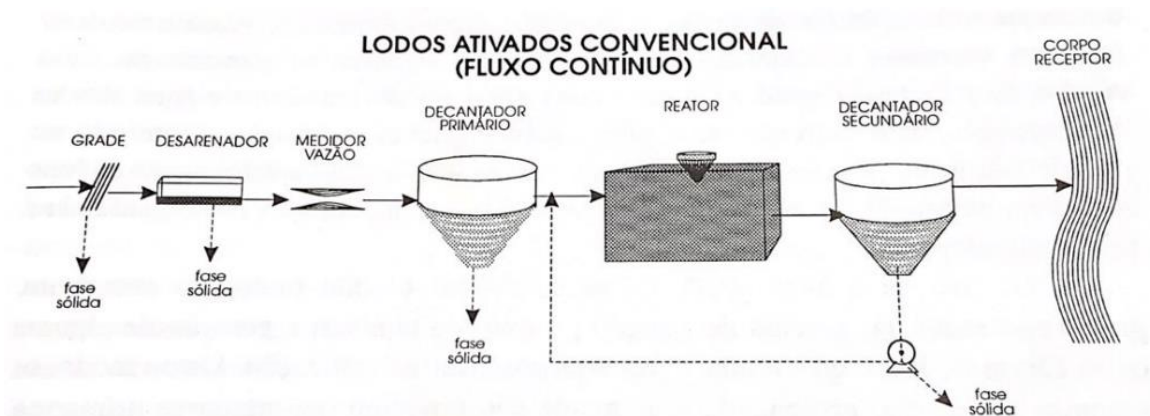
3.3.1.1 Sistema de lodo ativado

O processo de lodos ativados é comumente utilizado para o tratamento biológico de esgotos domésticos e efluentes industriais (METCALF & EDDY, 2016). Nele o esgoto afluente e o lodo ativado são intimamente misturados, agitados e aerados (em unidades chamadas tanques de aeração ou reator), para logo após se separar os lodos ativados dos esgotos (por sedimentação em decantadores). O lodo ativado é o floco produzido num esgoto bruto ou decantado pelo crescimento de bactérias na presença de oxigênio dissolvido e acumulado em concentração suficiente graças ao retorno de outros flocos previamente formados (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Sperling (1996) garante que o floco possui maiores dimensões, o que facilita a sedimentação.

A maior parte do lodo ativado separado retorna para o processo, enquanto uma parcela menor é retirada para tratamento específico ou destino final, o chamado lodo em excesso (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Este é o princípio básico do sistema de lodos ativados, em que os sólidos são recirculados do fundo da unidade de decantação, por meio de bombeamento, para a unidade de aeração (SPERLING, 1996).

Por fim, o esgoto tratado verte pela canaleta vertedoura do decantador, no qual ocorreu a separação, caracterizando o efluente final (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Esta configuração típica de sistema de lodos ativados convencional pode ser verificada na Figura 2 a seguir.

Figura 2 - Fluxograma típico do sistema de lodos ativados convencional.



Fonte: SPERLING (1996).

No tanque de aeração, devido à entrada contínua de alimento, na forma de DBO dos esgotos, as bactérias crescem e se reproduzem continuamente. A fim de que se possa manter uma concentração constante de lodo no tanque de aeração (JORDÃO E PESSÔA, 2017), é necessário que se retire aproximadamente a mesma quantidade de biomassa que é aumentada por reprodução. Este é, portanto, o lodo biológico excedente, que pode ser extraído diretamente do reator ou da linha de recirculação (SPERLING, 1996).

O tempo de detenção do líquido é de 6 a 8 horas no sistema de lodos ativados convencional, implicando em que o volume do tanque de aeração seja reduzido. No entanto, devido à recirculação dos sólidos, estes permanecem no sistema por um tempo superior ao do líquido. A NBR 12209:2011 caracteriza, de forma resumida, o parâmetro da idade do lodo como o “tempo médio, em dias, de permanência da biomassa no processo biológico” (NBR 12209, 2011). Assim, o tempo de retenção dos sólidos no sistema, ou seja, a idade do lodo é da ordem de 4 a 10 dias em lodos ativados convencional (SPERLING, 1996). Em consequência da idade de lodo inferior, o lodo excedente possui maior parcela de matéria orgânica e necessita de uma unidade para sua estabilização anaeróbia, realizada em um digestor (PROBIOGÁS, 2017).

De acordo com Sperling (1996), existem algumas variantes do processo de lodos ativados, sendo as duas principais: aeração prolongada e fluxo intermitente (batelada). Ainda, outros processos de lodo ativado têm sido utilizados, como os valos de oxidação - dentro da modalidade de aeração prolongada, e o reator biológico de leito móvel.

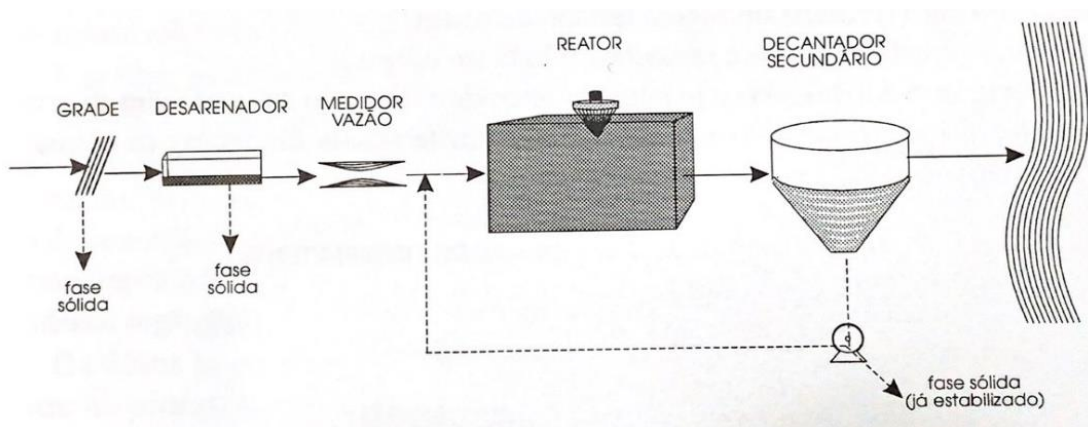
3.3.1.1.1 Aeração prolongada

Neste sistema, a biomassa permanece no sistema por um período mais longo, da ordem de 20 a 30 dias (daí o nome aeração prolongada), recebendo a mesma carga de DBO do esgoto bruto que o sistema convencional. Conseqüentemente, haverá uma menor disponibilidade de alimentos para as bactérias que, para sobreviver, passam a utilizar nos seus processos metabólicos a própria matéria orgânica componente das suas células. Para que a biomassa permaneça mais tempo no sistema, é necessário que o reator seja maior (o tempo de detenção do líquido é em torno de 16 a 24 horas) (SPERLING, 1996).

Esta matéria orgânica celular é convertida em gás carbônico e água através da respiração. Isto corresponde a uma estabilização da biomassa, ocorrendo no próprio tanque de aeração (estabilização aeróbia), fazendo com que esta configuração não necessite de decantador primário (PROBIOGAS, 2017). Assim, Sperling (1996) faz a comparação com o sistema convencional, em que a estabilização do lodo é feita em separado (na etapa de tratamento de lodo), enquanto que na aeração prolongada, pode ser feita conjuntamente no próprio reator.

Em vista disso, obtém-se uma grande simplificação em sua configuração, como demonstra a Figura 3. Esta é a grande vantagem do sistema em comparação às demais tecnologias (PROBIOGAS, 2017).

Figura 3 - Fluxograma de um sistema de aeração prolongada.



Fonte: SPERLING (1996).

O preço desta simplificação do sistema é o gasto com energia para aeração, já que o lodo é estabilizado aerobiamente no reator (SPERLING, 1996). Ademais, desta forma, não há potencial significativo de produção de energia, pois não possui etapa anaeróbia de tratamento do esgoto com produção de biogás (PROBIOGAS, 2017). Contudo, se instalado sistema de aproveitamento do biogás oriundo de digestor anaeróbio em ETE, o potencial da eficiência energética pode ser pronunciado (PROBIOGÁS, 2015b).

Por outro lado, a reduzida disponibilidade de alimento e a sua quase total assimilação, fazem com que a aeração prolongada seja o processo de tratamento dos esgotos mais eficiente na remoção de DBO (SPERLING, 1996). A eficiência de remoção de DQO é de 90%, apresentando ainda boa eficiência na nitrificação e desnitrificação se operada adequadamente (PROBIOGAS, 2017).

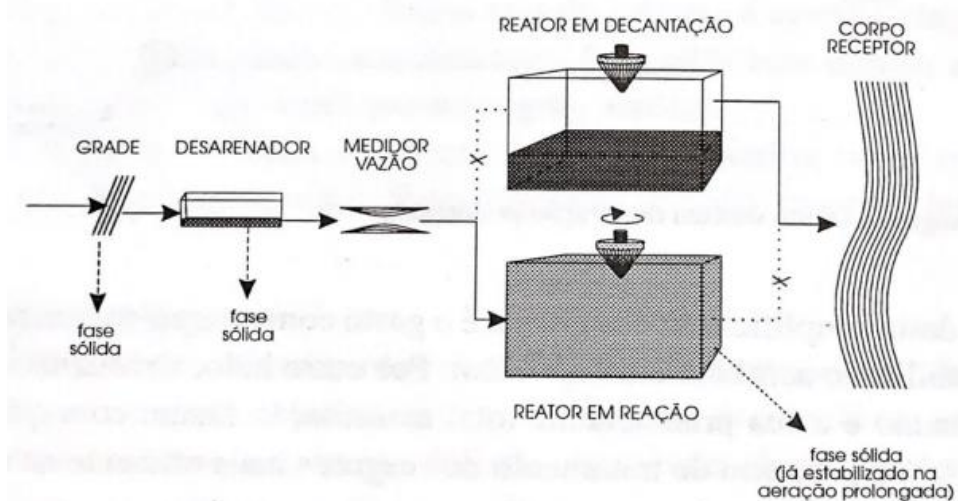
Em relação ao lodo, este é mantido em alta concentração e dispõe de uma idade de lodo muito maior que nos demais processos, podendo-se obter um lodo estabilizado, sem odor, com boas características de sedimentação e filtrabilidade (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

3.3.1.1.2 Fluxo intermitente (batelada)

Consiste na incorporação de todas as unidades, processos e operações normalmente associados ao tratamento convencional de lodos ativados em um único tanque. Utilizando um tanque único, esses processos e operações passam a ser simplesmente sequências no tempo, e não unidades separadas como ocorre nos processos convencionais de fluxo contínuo (SPERLING, 1996).

O processo de lodos ativados com fluxo intermitente pode ser utilizado também na modalidade de aeração prolongada, quando o tanque único passa a incorporar também a unidade de digestão do lodo. A massa biológica permanece no reator durante todos os ciclos, eliminando dessa forma a necessidade de decantadores separados (SPERLING, 1996). A Figura 4 apresenta esse esquema simplificado.

Figura 4 - Esquema de um sistema de lodos ativados com operação intermitente.



Fonte: SPERLING (1996).

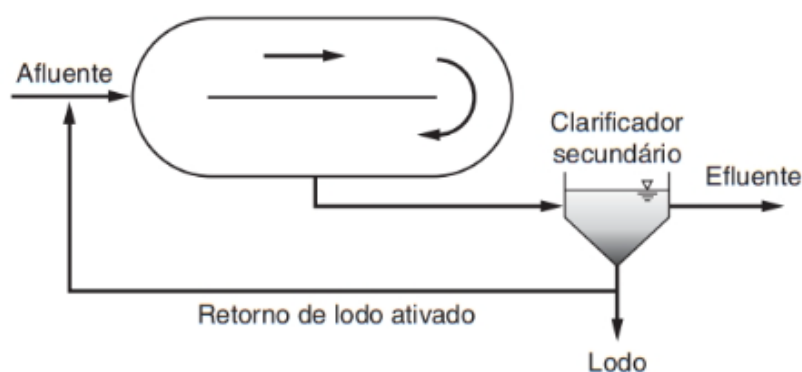
O descarte de lodo excedente geralmente ocorre durante o último ciclo, de repouso. A quantidade e a frequência de descarte do lodo são estabelecidas em função dos requisitos de performance, da mesma forma que nos processos convencionais de fluxo contínuo (SPERLING, 1996).

3.3.1.1.3 Valo de oxidação

Os valos de oxidação são unidades compactadas de tratamento que se incluem no processo de lodos ativados por meio da aeração prolongada. Tem os mesmos princípios básicos dos demais processos biológicos de lodos ativados, com períodos de aeração maiores do que os comumente adotados nos processos convencionais. Têm a finalidade de concentrar os fenômenos físicos, químicos e biológicos em um número mínimo de unidades de tratamento, sem prejuízo do elevado nível de eficiência que caracteriza o processo no que se refere à redução de DBO e possível nitrificação-desnitrificação (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

Um valo de oxidação consiste de um canal na forma de anel ou elíptica, equipada com dispositivos mecânicos para aeração e mistura, como pode ser observado na Figura 5 abaixo. Esta configuração promove o escoamento unidirecional no canal, de maneira que a energia utilizada para a aeração é suficiente para promover a mistura em um sistema com um tempo de detenção hidráulico relativamente longo. À medida que o efluente deixa a região de aeração, a concentração de oxigênio dissolvido diminui e pode ocorrer a desnitrificação a jusante da região de aeração (METCALF & EDDY, 2016).

Figura 5 - Esquema de um sistema de valo de oxidação.



Fonte: Metcalf & Eddy (2016).

Apesar de sua competitividade em razão do grau de compactação, os custos de operação se tornam elevados pelo elevado consumo de energia típico do processo, contra indicando esta solução para instalações de médio e grande porte. Como qualquer instalação de lodo ativado, ou de aeração prolongada, há geração de lodo em excesso (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

3.3.1.1.4 Reator Biológico de Leito Móvel (MBBR)

O processo de Lodos Ativados de Leito Móvel (MBBR - “*Moving Bed Biological Reactor*”) se baseia na introdução de um meio suporte flutuante no interior do tanque de aeração do processo de lodos ativados, com vistas à melhoria de seu desempenho, sem alterar sua configuração original (JORDÃO & PESSÔA, 2017). O meio suporte é separado do efluente do reator por meio de peneiras (METCALF & EDDY, 2016).

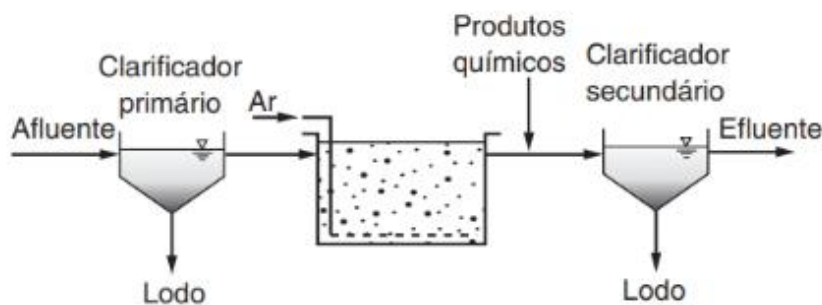
Este meio suporte é constituído de pequenas peças plásticas, que se mantêm em suspensão no interior do tanque de aeração, sujeitas à agitação promovida pelo sistema de ar difuso, apresentando elevada mobilidade, exposição e contato com a massa líquida. Desta forma, os organismos decompositores são mantidos em suspensão na massa líquida e também aderidos ao meio suporte plástico, de modo que o tanque de aeração se comporta como um reator biológico híbrido, segundo Jordão & Pessôa (2017).

De acordo com os autores supracitados, essa combinação permite a elevação da atividade microbiana e do tempo de retenção celular. Como consequência, são aceleradas as taxas de decomposição da matéria orgânica carbonácea e de conversão de compostos nitrogenados, quando comparados aos sistemas convencionais de lodos ativados. Isso possibilita uma pequena área necessária para a sua instalação, equivalente a 1/5 a 1/3 da área requerida para a instalação de um sistema de lodos ativados convencional, sendo esta sua principal vantagem, de acordo com Metcalf & Eddy (2016).

Outras vantagens em relação ao sistema de lodos ativados incluem a possibilidade de processamento de efluentes diluídos e a menor preocupação com eventuais problemas associados à sedimentação do lodo. Mesmo sendo um sistema compacto, o custo de investimento do MBBR é, em geral, superior ao do sistema de lodos ativados (METCALF & EDDY, 2016).

Cabe destacar que, além de remover DBO, os processos com crescimento aderido submerso também podem ser utilizados para nitrificação e desnitrificação quando associados a processos de nitrificação com crescimento aderido ou em suspensão (METCALF & EDDY, 2016). A Figura 6 mostra a configuração de um sistema com altas taxas de remoção de DBO.

Figura 6 - Configuração de um sistema MBBR para remoção de DBO.



Fonte: Metcalf & Eddy (2016).

Quanto à idade do lodo, este é um parâmetro que dificilmente poderá expressar o comportamento do processo MBBR. Isso porque o conceito de descarte de lodo que define o tempo de residência celular se perde ao se considerar que uma parcela dos sólidos se mantém aderida às peças por um tempo diferente do que seria a idade de lodo convencional (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

Logo, o processo MBBR obedece aos mesmos parâmetros operacionais e de controle que são aplicados ao processo convencional de lodos ativados, guardada a característica de que a massa de sólidos no tanque de aeração é composta pelos sólidos em suspensão no meio líquido e também pela biomassa aderida ao meio plástico (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Neste processo, a recirculação de lodo não é necessária (METCALF & EDDY, 2016).

3.3.1.2 Sistema UASB

A tecnologia do Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB - “*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*”) é utilizada no Brasil em várias ETE para o tratamento de esgotos sanitários (PROBIOGÁS, 2015b). Os reatores UASB tratam o esgoto sanitário necessariamente submetido a uma etapa prévia de tratamento preliminar, visando à remoção de sólidos grosseiros (detritos) e areia. O reator anaeróbio reúne as funções de decantador primário, reator biológico, decantador secundário e digestor da biomassa formada (PROBIOGÁS, 2015a).

Nestes reatores, Sperling (1996) afirma que a biomassa cresce dispersa no meio e sua concentração no reator é bastante elevada, justificando a denominação de manta de lodo. A manta de lodo é composta por microrganismos que formam flocos ou grânulos densos suspensos, onde ocorre a digestão anaeróbia (PROBIOGÁS, 2015b). Devido à elevada concentração de biomassa, o volume requerido para os

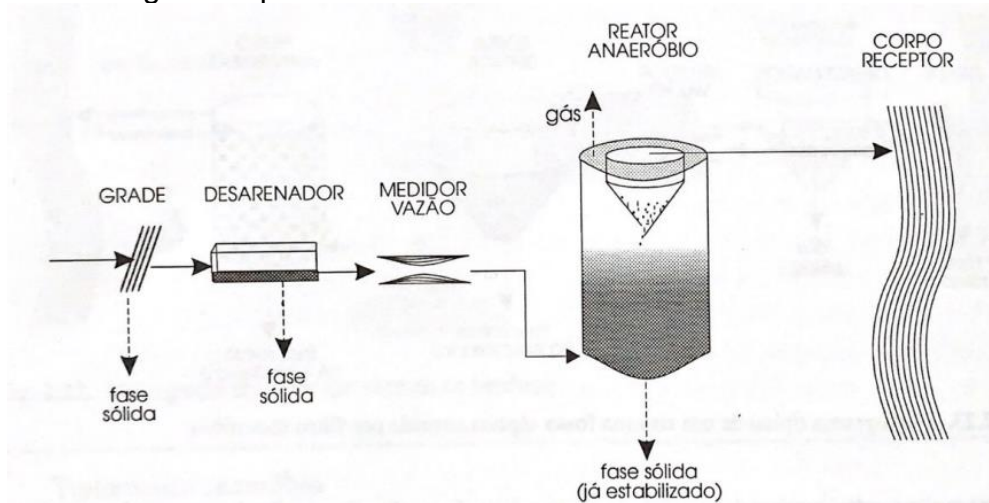
reatores anaeróbios de manta de lodo é bastante reduzido, em comparação com todos os outros sistemas de tratamento (SPERLING, 1996).

O fluxo do líquido é ascendente. Como resultado da atividade anaeróbia, são formados gases (principalmente metano e gás carbônico), as bolhas dos quais apresentam também uma tendência ascendente. O gás é coletado na parte superior, de onde pode ser retirado para reaproveitamento (energia do metano) ou queima (SPERLING, 1996). Em vista disso, o tratamento anaeróbio primário de efluentes possibilita a utilização energética do metano produzido. Outra fonte com potencial de produção de metano, foco deste trabalho, são os lodos gerados no processo de tratamento de esgoto sanitário, caso tenham valor energético suficiente ($> 75\%$ SSV/SST) (PROBIOGÁS, 2015b).

Os sólidos sedimentam na parte superior desta estrutura, escorrendo pelas suas paredes até retornarem ao corpo do reator. O efluente sai clarificado, e a concentração de biomassa no reator é mantida elevada (SPERLING, 1996).

Quanto à sua configuração, Sperling (1996) garante que é bastante simplificada, uma vez que não há necessidade de decantação primária. Na Figura 7 é apresentado o fluxograma deste sistema de tratamento.

Figura 7 - Fluxograma típico de um sistema de reator anaeróbio de manta de lodo.



Fonte: Sperling (1996).

A produção de lodo, por sua vez, é considerável, de acordo com Andreoli, Sperling e Fernandes (2001). Se o seu descarte periódico não for realizado, a tendência é aumentar a concentração do lodo, e ocorrer perda de sólidos com o efluente, o que resulta em um aumento não desejado da concentração de SST, DBO e DQO no efluente tratado (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

Chernicharo (2001) aponta algumas das vantagens proporcionadas pelo sistema UASB: ocupam pequenas áreas, produzem menor quantidade de lodo quando comparado ao sistema de lodos ativados e não necessitam de equipamentos mecânicos. Ainda, a PROBIOGÁS (2015a) cita: o baixo consumo de energia, a maior simplicidade operacional, o reduzido custo de implantação e a possibilidade de operação com elevados tempos de retenção de sólidos e baixos tempos de detenção hidráulica.

A eficiência do tratamento anaeróbio de esgotos domésticos é, no entanto, considerada limitada: a experiência tem indicado remoções de DQO na faixa de 40 a 75%, e de DBO na faixa de 45 a 85%, essa variação sendo principalmente em função do tempo de detenção hidráulica. Além disso, o reator UASB praticamente não remove N e P, e seu efluente apresenta relações N/DQO e P/DQO acima das necessárias para se obter uma boa remoção desses nutrientes por processo biológico (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Porém, em comparação a outras tecnologias de tratamento, o UASB possibilita uma ótima relação custo-benefício, pois remove de 60 a 80% da carga orgânica (DBO5) sem uso de energia (PROBIOGÁS, 2015b).

3.3.1.2.1 UASB com lodo ativado

Normalmente, após a passagem do esgoto pelo reator UASB, ainda se faz necessário um pós-tratamento, por exemplo, com lodos ativados (PROBIOGÁS, 2015a). Isso ocorre quando é necessário um efluente secundário com melhor qualidade, visando à remoção adicional de sólidos coloidais e em suspensão e de DBO (METCALF & EDDY, 2016).

Nesta configuração, ao invés do decantador primário, faz-se uso do reator UASB, cuja eficiência de remoção de DQO é de 90% (PROBIOGÁS, 2017). A Figura 8 demonstra o arranjo de UASB com lodo ativado convencional.

Figura 8 - Arranjo típico de sistema UASB com lodo ativado convencional.



Fonte: PROBIOGÁS (2017).

Assim, o lodo aeróbio excedente ainda não estabilizado pode retornar ao reator UASB para estabilização anaeróbia, juntamente com o lodo anaeróbio já presente no reator (PROBIOGÁS, 2017). Caso seja adotado esse critério, o descarte do excesso de lodo do sistema de lodos ativados, ao retornar, de forma controlada, ao reator UASB, sofre uma redução adicional de remoção de sólidos voláteis, bem como o próprio adensamento (PROBIOGÁS, 2015a).

3.3.2 Tratamento de lodo em estações de tratamento de esgotos

Quando a concepção da ETE prevê a remoção ou redução do lodo, torna-se indispensável a seleção de processo de tratamento da fase sólida, capaz de permitir seu manuseio e destino final, atendendo eficazmente os requisitos, diretrizes e normas de preservação ambiental. Por isso, desde sua geração até seu destino final, o lodo pode ser submetido a algumas fases características, das quais as mais importantes são a estabilização e a remoção de umidade (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

Segundo Sperling (1996), as principais etapas do tratamento do lodo, com os respectivos objetivos, são:

- Adensamento: remoção de umidade (redução de volume);
- Estabilização: remoção da matéria orgânica (redução de sólidos voláteis);
- Condicionamento: preparação para a desidratação (principalmente mecânica);
- Desidratação: remoção de umidade (redução de volume);
- Disposição final: destinação final dos subprodutos.

Os métodos de tratamento primário e secundário de efluentes têm um impacto significativo sobre a quantidade e a qualidade de lodo produzido (METCALF & EDDY, 2016). Andreoli, Sperling e Fernandes (2001) apresentaram, através de uma tabela,

os intervalos típicos de retirada de lodo das unidades de tratamento. A Tabela 1 abaixo apresenta estes intervalos de retirada das unidades de tratamento da fase líquida, de onde o lodo seguirá para a etapa de tratamento.

Tabela 1 - Intervalos típicos de remoção do lodo das unidades da fase líquida.

Sistema	Intervalo de remoção de lodo da fase líquida	
	Lodo primário	Lodo secundário
Lagoas de estabilização		Anos
Reator UASB		Semanas
Reator UASB + lodos ativados		Semanas
Lodos ativados convencional	Horas	Contínuo
Aeração prolongada		Contínuo

Fonte: adaptado de ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES (2001).

A partir das informações acima e conforme observa Andreoli, Sperling e Fernandes (2001), dos sistemas de tratamento listados, as lagoas de estabilização são as que geram a menor quantidade de lodo, ao passo que lodos ativados convencional é o sistema com maior volume de lodo a ser tratado. A razão é que o lodo produzido nas lagoas fica retido vários anos, nos quais sofre digestão (conversão de água e gases) e adensamento, reduzindo sobremaneira seu volume.

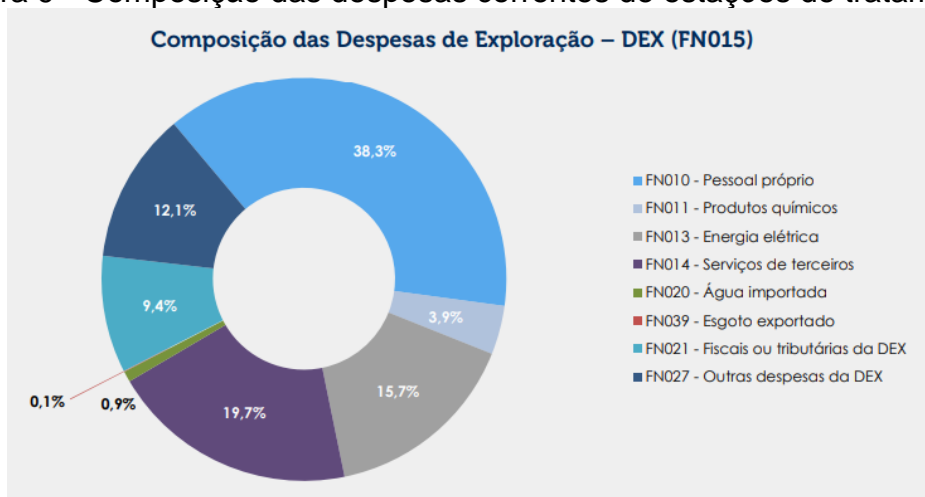
Importante ressaltar ainda que, apesar de pouco frequentes, essas descargas se caracterizam como um problema operacional de difícil solução, uma vez que resultam em intervenções de alto custo, difícil execução e eficiência variável. Já no sistema de lodos ativados convencional, o tempo de permanência do lodo (idade do lodo) é baixo, dando pouca chance para a digestão do lodo no próprio tanque de aeração (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

3.3.3 Custos de operação e manutenção em estações de tratamento de esgotos

Os custos do tratamento dos esgotos variam amplamente com as características do esgoto, processo adotado, clima, critérios de projeto, condições locais e custos locais unitários de mão de obra, materiais, terreno e energia (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001). A Secretaria Nacional de Informações sobre Saneamento (2022), no Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto referente ao ano de 2020, demonstra através da Figura 9 a composição das despesas

de exploração das estações de tratamento. As Despesas de Exploração (DEX) correspondem aos valores de custeio (também chamadas despesas correntes).

Figura 9 - Composição das despesas correntes de estações de tratamento.



Fonte: Secretaria Nacional de Saneamento (2022).

Conforme pode ser observado na Figura 9 acima, a maior parte das despesas de exploração está relacionada a gastos com pessoal próprio, representando 38,3%, seguido da despesa com serviços de terceiros, equivalente a 19,7% da DEX. O terceiro item da DEX é a despesa com energia elétrica, tendo totalizado em 2020 o valor de R\$7.373,3 milhões (15,7%) (Secretaria Nacional de Informações sobre Saneamento, 2022).

Na Tabela 2 estão expostos os valores gastos, por habitante, de operação e manutenção típicos de alguns dos sistemas de tratamento de esgotos que interessam para o presente trabalho. Uma vez que o autor utilizou valores correspondentes ao 2º semestre de 2004, os valores apresentados na tabela foram corrigidos com base no índice de correção IGP-M (FGV). O Índice Geral de Preços - Mercado (IGP-M) é uma medida abrangente do movimento de preços, que engloba diferentes atividades e etapas do processo produtivo. Dessa forma, o IGP é um indicador mensal do nível de atividade econômica do país, englobando seus principais setores (FGV, 2022). O índice de correção no período de 01/07/2004 a 01/07/2022 indicado pelo Banco Central do Brasil (2022) foi de aproximadamente 3,79.

Tabela 2 - Valores de operação e manutenção típicas de sistemas de tratamento de esgotos, expressos em valores per capita.

Sistema	Valor de operação e manutenção (R\$/hab.ano)*
Reator UASB	9,49 - 13,28
UASB + lodos ativados	26,57 - 45,54
Lodos ativados convencional	37,95 - 75,91
Lodos ativados - aeração prolongada	37,95 - 75,91
Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)	37,95 - 75,91
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P	56,93 - 94,88

*Valores já corrigidos com base no índice de correção IGP-M (FGV) (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2022).

Fonte: adaptado de Sperling (2005).

Ainda, Sperling (2005) afirma que, para estações que possuem em seu tratamento o sistema de desinfecção, deve-se acrescentar, em valores já corrigidos de acordo com a calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil (2022), R\$1,90 a 5,69/hab.ano.

3.4 DIGESTÃO DO LODO

Da mesma forma que o tratamento de esgoto, a digestão de lodo tem como objetivo o tratamento, ou seja, a estabilização de lodos do tratamento de esgoto (PROBIOGÁS, 2015b). Jordão & Pessôa (2017) afirmam que os sólidos em suspensão, fixo e voláteis, presentes no esgoto bruto são removidos da massa líquida afluyente à ETE e processados em unidades apropriadas denominadas digestores ou biodigestores. O lodo acumulado, nas concepções convencionais, é encaminhado para tanques especificamente projetados, os digestores, onde é decomposto.

O processo de estabilização tem como objetivo principal a conversão parcial da matéria putrescível em líquidos, sólidos dissolvidos, subprodutos gasosos e alguma destruição de microrganismos patogênicos, bem como redução dos sólidos secos do lodo. Em função da presença de oxigênio livre, este processo de tratamento bioquímico do lodo pode ser realizado através das seguintes modalidades: digestão anaeróbia e digestão aeróbia. Todavia, a digestão aeróbia não permite o aproveitamento de gás, o que pode ser econômico na digestão anaeróbia, sendo, portanto, a etapa com maior destaque no presente trabalho (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

3.4.1 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo bioquímico complexo, em que diversos grupos de organismos anaeróbios e facultativos assimilam e destroem simultaneamente a matéria orgânica, em ausência de oxigênio dissolvido (JORDÃO & PESSÔA, 2017). A partir disso, são formados metano, dióxido de carbono, água, gás sulfídrico e amônia, recuperando, assim, a energia para o próprio crescimento, ou seja, formando o lodo anaeróbio (PROBIOGÁS, 2015a).

De acordo com a PROBIOGÁS (2015a), o processo de digestão anaeróbia é subdividido em 5 etapas (a hidrólise e acidogênese são realizadas pelas mesmas bactérias e consideradas como uma fase):

- a) Hidrólise e acidogênese: ocorre a solubilização da matéria orgânica, ou seja, a quebra de compostos orgânicos complexos presentes nos substratos;
- b) Acetogênese: coexistem bactérias produtoras e consumidoras de hidrogênio, garantindo a manutenção de baixas concentrações de hidrogênio;
- c) Metanogênese: bactérias consomem o hidrogênio e o acetato;
- d) Sulfetogênese: as bactérias utilizam compostos sulfurados para oxidar, bioquimicamente, compostos orgânicos, produzindo os gases sulfeto de hidrogênio e gás carbônico.

Conforme cita Jordão & Pessôa (2017), a digestão anaeróbia do lodo é realizada com as seguintes finalidades: 1) estabilizar total ou parcialmente as substâncias instáveis, matéria orgânica, presente nos lodos frescos; 2) reduzir o volume do lodo; 3) dotar o lodo de características favoráveis à redução de umidade; e 4) destruir ou reduzir a níveis previamente estabelecidos os microrganismos patogênicos.

O processo de digestão anaeróbia, para produção de metano, é o método mais comumente utilizado para a recuperação de energia dos sólidos presentes em efluentes (METCALF & EDDY, 2016). Como reforça a PROBIOGÁS (2015a), para poder ser usado como substrato na digestão anaeróbia, o lodo deve apresentar elevadas concentrações de matéria orgânica biodegradável. A relação entre os sólidos voláteis e os sólidos totais dá uma boa indicação da fração orgânica dos sólidos do lodo, bem como do nível de digestão de lodo. Em lodos não digeridos, a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais (SSV/SST) é entre 0,75 e 0,80, ao passo que em lodos digeridos estes valores situam-se entre 0,60 e 0,65 (ANDREOLI;

SPERLING; FERNANDES, 2001). Em condições controladas, o digestor reduz em torno de 50% do teor de SSV do lodo sanitário (METCALF & EDDY, 2016).

Em muitas estações de tratamento é realizada a co-digestão, que se refere ao tratamento simultâneo de certas quantidades de material orgânico de diferentes fontes em um só biodigestor. Isso pode exigir uma adaptação técnica, bem como um novo licenciamento. Dentre os objetivos da co-digestão, a PROBIOGÁS (2015a) cita o melhor aproveitamento da capacidade de um digestor existente, visto que digestores normalmente possuem um potencial enorme não utilizado.

Vale destacar que, mesmo que a motivação principal do uso da digestão anaeróbia no setor de saneamento seja o tratamento do esgoto e/ou do lodo, a geração de biogás merece atenção especial, uma vez que está relacionada diretamente à eficiência do processo. A otimização das condições visando uma maximização da geração de biogás deve ser considerada desde a fase inicial da elaboração do projeto até a operação dos reatores anaeróbios, proporcionando assim uma melhor gestão dos processos e consequente efficientização da ETE (PROBIOGÁS, 2015a).

3.5 BIOGÁS

O biogás é um produto gasoso da degradação biológica de substratos orgânicos sob condições anaeróbias (PROBIOGÁS, 2015b). Em uma ETE, de acordo com a PROBIOGÁS (2015a), as tecnologias de tratamento que produzem o biogás como um de seus subprodutos são os reatores UASB e os digestores anaeróbios de lodo. Os substratos para esta produção são o esgoto e o lodo, respectivamente.

O biogás é composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) e, em menores quantidades, aparecem o gás sulfídrico (H₂S), a umidade (H₂O) e outros gases como, por exemplo, o nitrogênio (N₂) (PROBIOGÁS, 2015b). Segundo Jordão & Pessôa (2017), o gás produzido apresenta a seguinte composição aproximada:

- metano, CH₄: 65 a 70%;
- gás carbônico, CO₂: 25 a 30%;
- óxido de carbono, CO: 2 a 4%;
- oxigênio, nitrogênio, hidrocarbonetos, gás sulfídrico, em quantidades menores.

Define-se o poder calorífico do lodo como a quantidade de energia que é liberada pela queima de uma unidade de massa de sólidos. De forma análoga, define-se o poder calorífico do gás como a quantidade de energia que é liberada pela queima de uma unidade de volume do gás. Tanto para o gás como para o lodo, o poder calorífico depende da sua composição (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

Para o uso energético (energia elétrica, térmica e veicular), o fator decisivo é a presença e o teor do gás metano, que varia entre 50 e 72% do total, dependendo dos substratos e das condições de degradação. Dessa forma, o fator determinante para o poder calorífico do biogás, isto é, seu potencial energético (PROBIOGÁS, 2015b). O poder calorífico inferior do metano, de acordo com uma tabela apresentada por Jordão & Pessôa (2017), é 35.800 kJ/m³ e o do biogás com 65% de metano é 22.400 kJ/m³, correspondendo a 60% do poder calorífico inferior do gás natural (37.300 kJ/m³).

A situação em que há o menor potencial energético, refere-se a sistemas operando com esgoto mais diluído, concentrações de sulfato maiores, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano. Já a situação com melhor potencial energético, refere-se a sistemas operando com esgoto mais concentrado, menores concentrações de sulfato, maior eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de metano (PROBIOGÁS, 2015a).

De acordo com Jordão & Pessôa (2017), apesar do biogás gerado no digestor (admitindo 65% de metano) ter um poder calorífico muito menor quando comparado com os gases comerciais, tais como propano, butano e gás natural, seu uso é vantajoso. Nesse sentido, o biogás pode, por exemplo, ser utilizado para gerar energia elétrica e/ou para secar termicamente lodos e escumas. Além disso, o biogás pode ser empregado como combustível veicular, industrial ou residencial. No Brasil, entretanto, a maior parte das ETE, quando recupera o biogás, simplesmente o queima antes de lançá-lo para a atmosfera, desperdiçando o seu potencial energético e seus eventuais benefícios econômicos, sociais e ambientais (PROBIOGÁS, 2015a).

Sabe-se que o aproveitamento do biogás se encontra ainda nos primeiros estágios no país, sendo, portanto, observadas diversas dificuldades neste mercado incipiente. Dentre elas, a falta de normas e guias técnicos adaptados à realidade brasileira que indiquem as soluções tecnológicas mais apropriadas para projetos de manejo e recuperação de biogás, incluindo as particularidades de sua produção, de seu tratamento e de sua utilização (PROBIOGÁS, 2015a).

3.6 GERAÇÃO DE ENERGIA

O setor elétrico, que, durante as últimas décadas, sempre contou com uma energia firme de origem hidrelétrica, uma das mais baratas existentes, tem sido questionado sobre a sustentabilidade da perpetuação desse modelo (PROBIOGÁS, 2015a). Um dos motivos é a recorrente crise hídrica na região Sudeste, que teve maior atenção nos anos de 2014 e 2015 no estado de São Paulo, quando o volume do Sistema Cantareira, reservatório que abastece a capital paulista, registrou os índices mais baixos da história desde o início da captação do volume morto, de acordo com o G1 (2014).

Ainda mais recente, no segundo semestre de 2021, Souza (2021) registrou que os principais reservatórios de água do país se encontravam em níveis críticos, devido à falta de chuvas. Segundo a matéria, esta ocasião foi considerada a maior estiagem enfrentada pelo Brasil dos últimos 91 anos, fazendo com que a geração termelétrica fosse acionada além do previsto, resultando em um aumento das tarifas de energia elétrica muito acima das expectativas do setor energético.

Sendo assim, a geração de eletricidade nas estações de tratamento de esgotos, a partir do biogás, passa a ser uma alternativa atrativa do ponto de vista financeiro e ambiental. Para isso, considera-se: (1) o cenário de retomada do crescimento econômico do país, (2) a tendência de aumento das tarifas de energia elétrica, (3) a ampliação das ações focadas na mitigação das emissões de gases do efeito estufa, (4) a necessidade de aumento da eficiência nos sistemas de tratamento de esgoto e (5) os sinais de incentivo para geração distribuída renovável e disseminação das práticas de eficiência energética (PROBIOGÁS, 2015a).

Portanto, Metcalf & Eddy (2017) apontam que as principais motivações para um melhor gerenciamento na utilização de energia nas estações de tratamento de efluentes são:

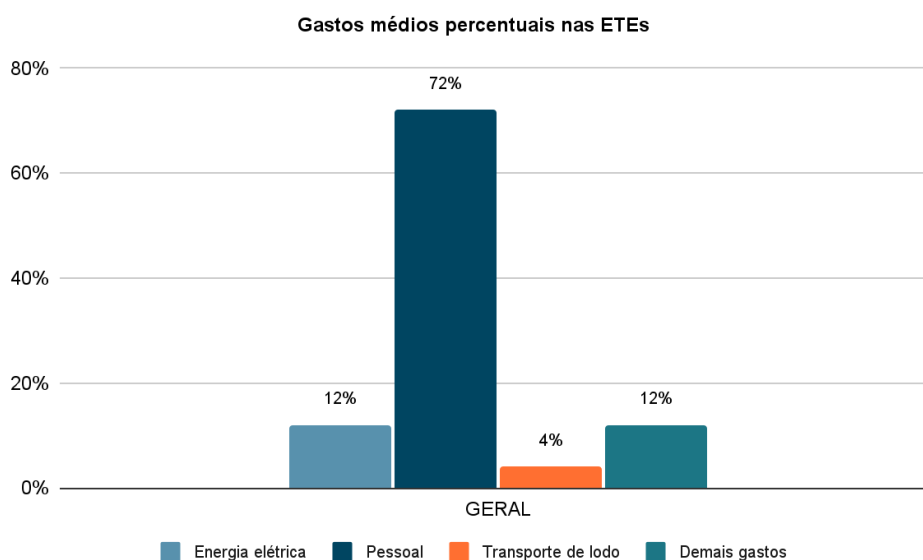
- a. Potencial para a redução de custos, incluindo a possibilidade de se tornar um fornecedor de energia;
- b. Potencial para melhorar a confiabilidade no fornecimento de energia;
- c. Questões associadas à sustentabilidade, incluindo as metas de redução da poluição, impostas pelas agências governamentais locais, estaduais e federais.

Tipicamente, o consumo de energia nas estações de tratamento norte-americanas representa cerca de 30% dos custos operacionais na ETE. Apesar deste

número no Brasil não estar bem determinado, Jordão & Pessôa (2017) traz o exemplo dos custos operacionais da ETE Barueri, localizada no estado de São Paulo, onde os gastos operacionais com energia representavam 20%.

Como mencionado no item 3.3.3, a Secretaria Nacional de Informações sobre Saneamento (2022), verificou-se que a despesa com energia elétrica, em 2020, representou 15,7% da composição das despesas correntes em uma estação de tratamento. Já em uma análise comparativa sobre os custos operacionais de 44 estações de tratamento de esgoto na região sudeste do Brasil, Santos (2018) concluiu que o gasto com energia elétrica representa 12% do total dos gastos médios percentuais nas ETE. Este percentual de gastos médios pode ser visualizado no Figura 10 a seguir, onde o termo “geral” se refere ao agrupamento de diferentes tecnologias utilizadas nos processos de tratamento das 44 ETE analisadas. Os “demais gastos” se referem a compilação de gastos médios menores, tais como: serviços de manutenção e conservação, ordens de manutenção, materiais de consumo e manutenção, água, vigilância e outros.

Figura 10 - Percentuais de gastos médios nas ETE analisadas.



Fonte: Adaptado de Santos (2018).

Ainda de acordo com Santos (2018), a despesa com energia elétrica está relacionada diretamente ao volume de esgoto, tipo de tratamento e qualidade do efluente final desejada. Metcalf & Eddy (2016) frisam que esta avaliação sobre a utilização de energia em estações de tratamento de efluentes é importante em razão

do custo associado a este insumo representar, nos Estados Unidos, entre 15 e 40% do custo total de operação e manutenção da estação. Dessa forma, o custo com energia elétrica representa o segundo maior custo, ficando atrás apenas dos custos associados à mão de obra.

Um projeto que gera eletricidade a partir do biogás deve garantir que a energia produzida tenha um custo inferior ao daquela consumida da rede elétrica. É importante destacar que a tarifa paga para a concessionária de energia varia por estado ou município, portanto a viabilidade deve ser calculada caso a caso (PROBIOGÁS, 2015a). Logo, Jordão & Pessôa (2017) afirmam que sempre que técnica e economicamente viável o gás gerado deve ser aproveitado na própria estação de tratamento.

Nos últimos anos, tem-se reconhecido que as estações de tratamento de efluentes dispõem, pelo menos em teoria, de mais energia do que necessitam para o tratamento. Além disso, as ETE podem se tornar fornecedoras de energia caso a energia contida no afluente às estações seja recuperada de forma eficiente (METCALF & EDDY, 2016). Porém, Jordão & Pessôa (2017) reportam que o que se vê, em geral, é que a energia disponibilizada pelo aproveitamento do biogás não atende o total do consumo da ETE, mas poderá suprir parte da sua demanda. Ainda, a sua efetiva utilização dependerá ainda da viabilidade econômica do projeto, considerando os custos de investimento e operacionais, sendo mais aplicável nas ETE de maior porte.

Um estudo publicado em 2015 analisou a viabilidade econômica e a escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgotos no Brasil. Valente (2015) chegou a conclusão de que ETE que atendem a uma população de 50.000 habitantes não são viáveis economicamente ao usar o biogás para a geração de calor e eletricidade. Quanto à escala mínima de viabilidade, concluiu-se que são aquelas ETE que atendem entre 100.000 e 200.000 habitantes, o que significa, segundo o autor, que deveria ser considerada a análise da utilização do biogás para geração de energia em estações com vazões a partir de 150 L/s. Por fim, o estudo demonstra que para todos os arranjos de ETE com 200.000 habitantes, com exceção de um dentre cinco, e de ETE que atendem 450.000 habitantes se mostraram viáveis.

Portanto e conseqüentemente, os principais custos evitados em estações de tratamento que utilizam o biogás para geração de energia elétrica são o custo da tarifa elétrica local e o custo relacionado ao lodo, como o transporte e sua disposição final. Apesar de não poderem ser gerenciadas diretamente pelo setor de saneamento, o conhecimento sobre essas duas variáveis é muito importante para garantir uma análise de viabilidade adequada sobre um projeto ao longo da sua vida útil (PROBIOGÁS, 2015a).

3.6.1 Emissões atmosféricas na geração de eletricidade

Metcalf & Eddy (2016) apontam que o gerenciamento eficiente de energia passou a ser um tema de grande relevância tanto no setor público como no privado. Isso porque, além do aumento dos custos da energia, há também as incertezas sobre as fontes futuras de combustíveis fósseis e uma maior atenção em relação aos impactos ambientais associados às emissões atmosféricas. Assim, para continuar crescendo, sem aumentar as emissões de gases indutores do efeito estufa, o setor de energia precisará adotar medidas de incentivo à eficiência energética e geração distribuída por fontes renováveis (PROBIOGÁS, 2015a).

Sabe-se que, de acordo com a última análise das emissões brasileiras publicada em 2021, referente ao ano de 2020, pelo Sistema de Estimativa de Emissões de Gases do Efeito Estufa (SEEG), o setor de energia foi responsável pela emissão de 393,7 milhões de toneladas de CO₂e, representando 18% do total das emissões brutas. Esse valor, medido em um ano de pandemia de Covid-19, apresenta uma variação de -4,50% em relação ao ano de 2019, quando as emissões representaram 21% do total (412 milhões de toneladas de CO₂e). Dentro do setor de energia, a maior queda percentual ocorreu no subsetor de geração de eletricidade, ainda que a demanda por eletricidade tenha se mantido relativamente estável (com variação de apenas -0,80% em relação ao ano anterior), mesmo em ano de pandemia. Isso porque outras fontes renováveis tiveram, ao todo, sua geração expandida em 7,60%. Assim, as emissões da geração de energia elétrica caíram de 51,8 milhões de toneladas de gases de efeito estufa em 2019 para 46,2 milhões em 2020 (SEEG, 2021).

Em vista disso, investir em biogás torna-se uma alternativa atrativa e viável (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES et al., 2020). Os lodos e

os biossólidos são considerados uma fonte renovável de energia, uma vez que contêm material orgânico que pode ser utilizado como combustível (METCALF & EDDY, 2016). O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações et al. (2020) afirma que o processo de digestão anaeróbia com captação e uso energético do biogás é, comprovadamente, uma alternativa tecnológica que auxilia na redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Essa redução é decorrente da redução das emissões relacionadas tanto ao setor de energia elétrica quanto ao de resíduos.

Além disso, essa alternativa corrobora o compromisso de redução das emissões brasileiras, firmado em 2015 com o Acordo de Paris. A meta estabeleceu uma redução de 37% até 2025 e 43% até 2030, sobre os níveis de 2005, para ajudar a conter o aquecimento global (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES et al., 2020). Dessa maneira, no contexto de uma estação de tratamento de esgoto sanitário, o uso energético do biogás está em consonância com os conceitos de produção mais limpa, com eficiência ambiental e energética, assim como está alinhado com as iniciativas necessárias para a promoção de uma economia de baixo carbono (PROBIOGÁS, 2015a).

4 METODOLOGIA

4.1 COLETA E LEVANTAMENTO DE DADOS

Os dados de monitoramento dos processos de tratamento de todas as ETE do município foram solicitados ao Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE), através da Lei de Acesso à Informação. O DMAE é o órgão responsável pela captação, tratamento e distribuição de água, assim como pela coleta e tratamento do esgoto sanitário e águas pluviais em Porto Alegre.

Foram solicitadas as seguintes informações: 1) os processos aplicados em cada ETE; 2) a população contribuinte; 3) o percentual de eficiência (% remoção de DBO) do tratamento; 4) o consumo mensal de energia elétrica; 5) o custo mensal de operação; 6) a estimativa de geração de lodo primário e secundário (kg/mês e m³/mês); 7) o destino atual dos lodos gerados nas ETE; e 8) a caracterização dos sólidos presentes nos lodos gerados e a concentração de sólidos totais voláteis ou sólidos suspensos voláteis nos tanques de tratamento biológico.

Além disso, também foram solicitadas as concentrações do afluente (bruto) e efluente (tratado) dos parâmetros demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e vazão de esgoto tratado. Os dados fornecidos pela empresa contemplam o período de janeiro de 2017 a dezembro de 2021, isto é, os últimos 5 anos completos de operação.

Após a obtenção das informações solicitadas, os dados foram organizados em uma planilha eletrônica do Microsoft *Excel* a fim de realizar os cálculos das estimativas de produção de lodo, bem como da quantificação do potencial de geração de energia e seu respectivo impacto financeiro. Para fins de cálculo, foram utilizados valores típicos apresentados na bibliografia para os dados não monitorados ou não fornecidos pela empresa.

4.2 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO ESTUDADAS

O estudo foi realizado no município de Porto Alegre, localizado no estado do Rio Grande do Sul (RS), com uma população estimada pelo IBGE (2017) de 1.492.530 habitantes. De acordo com o DMAE et al. (2015), Porto Alegre possui 10 (dez) Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES). Deste total, 9 (nove) possuem estações de tratamento de esgoto com processos diversificados, que vão desde biodigestor de

fluxo ascendente, passando por lagoa de estabilização do tipo australiano, até reator anaeróbio seguido de lodos ativados com remoção de nutrientes e desinfecção. Estes sistemas de esgotamento sanitário estão ilustrados na Figura 11.

Figura 11 - Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES) de Porto Alegre.



Fonte: DMAE et al. (2015)

As informações referentes aos SES, as ETE e seus respectivos processos de tratamento, dados de população beneficiada e de vazão de cada estação estão dispostas na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Sistemas de Esgotamento Sanitário e os dados de suas respectivas Estações de Tratamento de Esgotos.

Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES)	Estações de Tratamento de Esgotos (ETE)	Processo de tratamento	População beneficiada (habitantes)	Vazão (L/s)
Rubem Berta	Rubem Berta	Lodos Ativados de Aeração Prolongada de Valos de Oxidação	20.592	82
Sarandi	Parque do Arvoredo	Lodos Ativados de Aeração Prolongada em Batelada	16.615*	25
	Bosque	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB)	1.800	4
	Sarandi	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB) + Lodos Ativados com Aeração Prolongada	50.000	203
Navegantes	São João / Navegantes	Lodos Ativados Convencional com Digestão Anaeróbia	143.708	444
Ponta da Cadeia	Serraria	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB) + Lodos Ativados	1.080.000	2.700
Cavanhada	Esgotos são encaminhados para tratamento na ETE Serraria.			
Zona Sul	Ipanema	Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Lagoas de Maturação em Série	141.959	246
Salso	Chácara das Nascentes	Reator Biológico de Leito Móvel	2.658*	4
Belém Novo	Belém Novo	Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Lagoas de Maturação em Série	9.710	60
Lami	Lami	Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Lagoas de Maturação em Série	4.855	30
Ilhas	Não possui, o tratamento de esgotos é realizado de forma individual.			

*A população beneficiada foi estimada em razão do valor não ter sido encontrado/fornecido. O cálculo para a estimativa considerou o dado apresentado pela NBR 7229/1993. A norma define uma contribuição diária de esgoto por ocupante permanente numa residência de padrão médio igual a 130L/hab.d (NBR 7229, 1993).

Fonte: próprio autor com base nos dados obtidos a partir do DMAE et al. (2015), DMAE (2022) e Governo Federal e Agência Nacional de Águas (2017).

A partir dos dados acima, foi possível definir as ETE que serão avaliadas no presente estudo e então, para estas, estimar a geração de energia a partir do aproveitamento de biogás do lodo gerado. Foi possível avaliar, conhecendo o processo de tratamento de cada ETE, a frequência de remoção do lodo para cada sistema de tratamento, a partir da Tabela 1 exposta no item 3.3.2

Portanto, com base na Tabela 1 e a partir do entendimento que quanto maior a geração de lodo, maior será a produção de biogás, e conseqüentemente, maior geração de energia, determinou-se a adoção daquelas ETE que possuem maior frequência de remoção de lodo. Ou seja, as ETE que possuem maior frequência são aquelas que possuem o sistema de tratamento de lodos ativados (intervalo típico de remoção contínuo ou em horas) e UASB (intervalo típico de remoção em semanas). Em vista disso, das 10 (dez) ETE em operação no município de Porto Alegre, para o desenvolvimento do presente estudo, foram adotadas no estudo 7 (sete) ETE, sendo elas: Rubem Berta, Parque do Arvoredo, do Bosque, Sarandi, São João/Navegantes, Serraria e Chácara das Nascentes.

As ETE Rubem Berta, Parque do Arvoredo, São João/Navegantes e Chácara das Nascentes possuem como sistema de tratamento o processo de lodos ativados e, por conseguinte, geram grandes quantidades de lodo excedente. i) A ETE São João/Navegantes possui o sistema de lodos ativados convencional, em que o lodo ativado oriundo do processo é adensado mecanicamente através de centrífugas e, após, é encaminhado para digestores anaeróbios existentes na ETE para a sua estabilização. O lodo anaeróbio estabilizado é encaminhado para um digestor aeróbio (para adensamento) e deste, segue para o desaguamento final com adição de polímero em centrífugas para ser desidratado e, em seguida, é descarregado diretamente dentro de um contêiner apropriado para transporte para destinação final.

ii) A ETE Rubem Berta possui o sistema de lodos ativados com a modalidade de aeração prolongada, que inclui o sistema de valos de oxidação, cuja geração de lodo é menor que o sistema de lodos ativados convencional. No Plano Municipal de Saneamento Básico de Porto Alegre (PMSB), o DMAE et al. (2015) afirma que o lodo estabilizado desta ETE é disposto em leitos de secagem para deságue e, após o período adequado de 20 a 40 dias, o lodo desaguado é removido e colocado em contêiner apropriado para transporte, cujo transbordo é realizado pelo DMLU e encaminhado ao aterro sanitário de Minas do Leão.

iii) A ETE Parque do Arvoredo, por sua vez, possui o sistema de tratamento de lodos ativado com fluxo intermitente, isto é, em batelada. Neste sistema, assim como nas outras modalidades de lodos ativados, apesar de haver necessidade de remoção de lodo em intervalos menores, como mostra a Tabela 1. O destino do lodo em

excesso gerado nesta ETE segue o mesmo padrão de tratamento e destinação da ETE Rubem Berta.

iv) Já a ETE Chácara das Nascentes possui o processo de Lodos Ativados de Leito Móvel. Este sistema obedece aos mesmos parâmetros operacionais e de controle que são aplicados ao processo convencional de lodos ativados.

v) A ETE do Bosque possui o sistema de tratamento UASB, cujo sistema gera uma quantidade relativamente significativa de lodo, visto que, como consta na Tabela 1, o intervalo de remoção de lodo se dá em torno de semanas. O lodo gerado segue o mesmo padrão de tratamento e destinação da ETE Rubem Berta e Parque do Arvoredo.

vi) As ETE Serraria e vii) Sarandi possuem o sistema de tratamento UASB seguido de lodos ativados, que serve como tratamento complementar para objetivos específicos. Porém, no caso da ETE Sarandi, o reator UASB não está pronto para utilização e, dessa forma, a estação opera somente com lodos ativados de aeração prolongada. O lodo gerado e estabilizado em ambas ETE é encaminhado para o aterro Minas do Leão pelo DMLU.

viii) O restante das ETE, as ETE Ipanema, Belém Novo e Lami, não serão abordadas no presente estudo por possuírem como sistema de tratamento lagoas de estabilização. Por terem grande capacidade de estocagem de lodo, Andreoli, Sperling e Fernandes (2001) afirmam que as descargas podem acontecer com intervalos de 7 a 10 anos. Tal fato pode ser verificado no Plano Municipal de Saneamento Básico de Porto Alegre, em que o DMAE et al. (2015) afirma que, nestas ETE, a capacidade de armazenamento de lodo permite que o seu descarte seja efetuado em intervalos de até 10 anos ou mesmo maiores.

4.2.1 Estações centrais

Adotou-se, no presente trabalho, duas ETE centrais com o objetivo de reunir a quantidade de lodo gerado nas 7 (sete) estações de tratamento avaliadas. Para isso, foram considerados fatores econômicos, logísticos, além de ter em vista as pequenas vazões afluentes de esgotos tratados na maioria das estações e, conseqüentemente, apresentar baixa geração de lodo.

Assim, o lodo gerado em todas as estações, exceto a ETE Serraria, será centralizado na ETE São João/Navegantes (ETE central da zona norte). Já o lodo

gerado na ETE Serraria, maior estação do município e que atende uma vazão aproximadamente 352% maior que a soma das outras sete (7) estações, será centralizado na própria ETE Serraria (ETE central da zona sul).

A ETE São João/Navegantes foi adotada como uma das estações centrais por ser uma estação de grande porte, sendo a segunda maior de Porto Alegre. A mesma atende uma vazão de 444 L/s, enquanto a soma das vazões das sete (7) estações que encaminharão seus lodos para a ETE central da zona norte totaliza aproximadamente 768 L/s.

Quanto à logística, ao estimar as distâncias entre as ETE, verificou-se que as 6 (seis) estações de menor porte que encaminharão seus lodos para uma ETE central, possuem uma distância menor até a ETE São João/Navegantes do que até a ETE Serraria. Dessa forma, buscou-se minimizar custos com transporte e que, vale lembrar, já serão significativamente reduzidos ao realizar o transporte apenas dentro do próprio município de Porto Alegre, e não mais até o aterro sanitário Minas do Leão, cuja distância é de aproximadamente 87,4 quilômetros.

Além disso, também se considerou o fato de já existir na ETE São João/Navegantes digestores anaeróbios. Assim, o processo de tratamento utilizado na estação já compreende o tratamento de lodo por digestão anaeróbia e, dessa forma, reduzem-se custos de instalação e otimizam-se processos.

É importante lembrar ainda que, como mencionado no item 3.4 do referencial teórico, os digestores normalmente possuem um potencial enorme não utilizado. Assim, a centralização dos lodos gerados nas ETE de pequeno porte na ETE São João/Navegantes para digestão deve ser viável e ainda benéfica, a fim de melhorar o aproveitamento da capacidade de um digestor existente e, por conseguinte, maximizar a produção de biogás.

Já a ETE Serraria foi adotada como uma das estações centrais em razão de tratar a maior vazão afluyente do município e, conseqüentemente, gerar a maior quantidade de lodo. Ao considerar fatores econômicos e logísticos, essa alta geração de lodo pode ser um elemento significativo para inviabilizar o transporte diário para outra estação.

Ademais, levando em consideração que os digestores são dimensionados por meio do tempo de detenção hidráulica, a grande quantidade de lodo gerada na ETE Serraria, caso encaminhada para a ETE São João/Navegantes, poderia afetar

significativamente o processo. Portanto, entende-se que a melhor alternativa seja, considerando todos os fatores, realizar a digestão na própria estação.

4.3 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE LODO

A capacidade de produção de lodo foi estimada a partir dos dados de vazão de cada estação de tratamento e do relatório de monitoramento de DBO5 e DQO do afluente e efluente. Os cálculos se baseiam no levantamento de dados das estações entre os meses de janeiro de 2017 e dezembro de 2021, contemplando os últimos 5 (cinco) integrais anos de operação. Os dados foram disponibilizados pelo DMAE.

Para os cálculos de capacidade de produção de lodo foram adotadas as metodologias descritas por Jordão & Pessôa (2017) para cada tipo de tratamento. Assim, utilizou-se três metodologias diferente de cálculo de geração de lodo para cada sistema de tratamento, sendo eles:

- 1) de lodos ativados;
- 2) de reatores UASB;
- 3) de reatores UASB com tratamento complementar de lodos ativados.

4.3.1 Produção de lodo em sistemas de lodos ativados

Algumas variáveis necessárias para se estimar a produção de lodo em sistemas de lodos ativados não são monitoradas e/ou não foram enviadas pelo DMAE. Diante disso, foram adotados valores médios obtidos da literatura. Sabe-se, ainda, conforme apresentado na Tabela 3 do item 4.2, que as ETE de Porto Alegre que utilizam o sistema de lodos ativados possuem variações em suas modalidades: a ETE Rubem Berta possui aeração prolongada com valo de oxidação; a ETE Parque do Arvoredo possui de aeração prolongada em batelada; a ETE São João/Navegantes possui o convencional; a ETE Chácara das Nascentes possui o sistema MBBR, semelhante ao convencional; e a ETE Sarandi possui aeração prolongada.

Como visto no item 3.2.1.1 já apresentado no referencial teórico, existe uma fração da matéria orgânica que é sintetizada em novas células, correspondendo a um aumento da massa de organismos. Para o cálculo, esta fração correspondente à fase de síntese é conhecida como coeficiente de produção (Y), que é igual à taxa de conversão do substrato utilizado em microrganismos (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Já a fração das células destruídas na fase de auto oxidação é conhecida como

coeficiente de autodestruição dos organismos (kd). Para estas variáveis, Jordão & Pessôa (2017) define os seguintes valores:

- para Y : faixa de mg SSV/mg DBO, típico = 0,40 a 0,50;
- para kd : faixa de g SSV/g SSV.d, típico = 0,05 a 0,10 d^{-1} .

Em vista disso, para fins de cálculo, para ambas variáveis e para todas modalidades de lodos ativados, foram adotados os valores médios.

A modalidade é importante para a definição de algumas variáveis necessárias para o cálculo de geração de lodo, como a variável idade do lodo (Θ_c). Para fins de cálculo, utilizou-se como guia a sugestão da NBR 12209:2011, que define os valores do parâmetro de idade do lodo de “4 a 15 dias para sistemas de taxa convencional e acima de 18 dias para sistemas de aeração prolongada”.

Por conseguinte, para a ETE São João/Navegantes, optou-se pela adoção da idade do lodo de 13 dias e para a ETE Sarandi, 35 dias, uma vez que, com este valor chegou-se mais próximo ao volume a ser descartado por dia informado pelo próprio DMAE. Para as outras estações com sistemas de aeração prolongada, concomitante com a NBR, considerou-se o valor médio da recomendação de Jordão & Pessôa (2017), que definiram a idade do lodo para aeração prolongada de 20 a 30 dias e, especificamente para valo de oxidação, de 30 a 40 dias.

Já para o caso da ETE Chácara das Nascentes, como mencionado no item 3.3.1.1.4 do referencial teórico, a idade do lodo é um parâmetro que dificilmente poderá expressar o comportamento do processo MBBR. O trabalho de Oliveira (2008) estimou um valor médio para a idade do lodo de 17 dias, cuja idade pode ser enquadrada na modalidade de aeração prolongada.

Como esclarecido pelo DMAE et al. (2015) no PMSB e mencionado anteriormente, o lodo oriundo das ETE Rubem Berta, Sarandi e Parque do Arvoredo, é disposto em leitos de secagem para deságue tendo em vista o transporte do lodo para o seu destino final em aterro sanitário. De acordo com Jordão & Pessôa (2017), o lodo é considerado seco, em leitos de secagem, quando possui boas qualidades para remoção e transporte, e isto acontece quando o lodo atingir uma umidade em torno de 70%, isto é, teor de sólidos (TS) de 30%. A forma com que é realizada a secagem do lodo na ETE Chácara das Nascentes não foi encontrada e, portanto, adotou-se o teor de sólidos de 30%, assim como as demais.

No caso da ETE São João/Navegantes, o lodo é primeiramente adensado para depois ser encaminhado para digestores anaeróbios e, por último, desidratado em centrífugas para ser transportado. Porém, em razão da ETE São João/Navegantes ser a ETE central da zona norte, o lodo gerado não será transportado. Dessa forma, será realizado o cálculo de um volume cru de lodo gerado, isto é, um material de alto teor de umidade, visto que não é considerado o processo de remoção da umidade do lodo.

Dado que a ETE São João/Navegantes possui recirculação de lodo e decantadores secundários, sabe-se que a remoção do lodo ocorre diretamente na linha de recirculação. Assim, este processo propicia um lodo em excesso com teor de sólidos entre 0,75 a 1,50% (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Para esta variável também se adotou os valores médios.

Quanto às variáveis densidade (γ), peso específico do lodo (ρ) e a relação SSV/SST (R_{SSV}/SST) adotaram-se valores médios das faixas calculadas para lodo misto adensado, primeira etapa do gerenciamento do lodo, por Andreoli, Sperling e Fernandes (2001) para todas as modalidades. Estas faixas estão expostas na Tabela 4.

Tabela 4 - Faixas das variáveis para o tipo de lodo misto adensado.

Tipo de lodo	Relação SSV/SST	Densidade do lodo	Massa específica (kg/m ³)
Lodo misto adensado	0,75 - 0,80	1,004 - 1,01	1004 - 1010

Fonte: adaptado de ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES (2001).

Posto isto, os valores médios obtidos da literatura para todas estas variáveis estão expostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Variáveis não monitoradas pelo DMAE e obtidas na literatura para o sistema de lodos ativados.

Variáveis	Valores adotados					Unidade de Medida
	São João / Navegantes	Chácara das Nascentes	Parque do Arvoredo	Sarandi	Rubem Berta	
Coefficiente de produção (Y)			0,45			adimensional
Coefficiente de autodestruição (kd)			0,075			d^{-1}

Variáveis	Valores adotados					Unidade de Medida
	São João / Navegantes	Chácara das Nascentes	Parque do Arvoredo	Sarandi	Rubem Berta	
Densidade (γ)			1,007			g/cm ³
Peso específico do lodo (ρ)			1.007			kg/m ³
Relação SSV/SST (R_{ssv}/sst)			0,775			adimensional
Idade do lodo (Θ_c)	13	17	25	30	35	dias
Teor de sólidos (TS)	1,125	-	-	-	-	%
Teor de sólidos do lodo desidratado (TS_d)			30			%

Fonte: próprio autor (2022).

As variáveis monitoradas pelo DMAE necessárias para estimar a produção de lodo em sistemas de lodos ativados, e seus respectivos valores médios, são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Variáveis monitoradas e fornecidas pelo DMAE para sistemas de lodos ativados.

Variáveis	Valores adotados					Unidade de Medida
	São João / Navegantes	Chácara das Nascentes	Parque do Arvoredo	Sarandi	Rubem Berta	
Vazão afluyente (Q)	444	4	25	203	82	L/s
Concentração da DBO afluyente (S_o)	177	233	233	113	261	mg O ₂ /L
Concentração da DBO efluente (S_e)	35	31	31	18	48	mg O ₂ /L

Fonte: próprio autor (2022).

Nota: Os valores de DBO afluyente e DBO efluente para a ETE Chácara das Nascentes (que possui sistema MBBR) não foram disponibilizados pelo DMAE e, portanto, utilizaram-se os mesmos valores da ETE Arvoredo (que possui sistema de aeração prolongada em batelada), uma vez que é a estação mais próxima, em termos de localização, que possui o sistema de tratamento de lodo ativado.

Com estas variáveis, num primeiro momento foi possível calcular o coeficiente de produção ajustado para compensar a perda pela respiração endógena, isto é, o Y_{obs} . O coeficiente pode ser obtido a partir da Equação 1.

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + kd \times \theta_c} \quad (1)$$

Sendo:

Y_{obs} = coeficiente de produção celular específica observada corrigido pela auto oxidação (mg SSV/mg DBO)

Y = coeficiente de produção (adimensional)

kd = coeficiente de auto-destruição (d^{-1})

θ_c = idade do lodo (dias)

Com esta variável, torna-se possível calcular a produção final de lodo em sólidos voláteis a partir da Equação 2. Esta produção equivale a uma quantidade de sólidos que deve ser descartada do sistema, a fim de que se possa manter uma concentração constante de lodo no tanque de aeração (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

$$\Delta X = Y_{obs} \times (S_o - S_e) \times Q \quad (2)$$

Sendo:

ΔX = produção de lodo em sólidos voláteis (kg SSV/d)

S_o = concentração da DBO afluente (mg O₂/L)

S_e = concentração da DBO efluente (mg O₂/L)

Q = vazão afluente (m³/d)

Para se chegar na produção total de lodo esperada em sólidos totais, torna-se necessária a conversão a partir da relação SSV/SST afluente ao tanque de aeração. A partir da Equação 3, a produção final de lodo em sólidos voláteis (ΔX) é dividida pela relação SSV/SST ($R_{SSV/SST}$) para se chegar ao valor em relação aos sólidos totais (ΔX_T).

$$\Delta X_T = \frac{\Delta X}{R_{SSV/SST}} \quad (3)$$

Sendo:

ΔX_T = produção de lodo em sólidos totais (kg SST/d)

ΔX = produção de lodo em sólidos voláteis (kg SSV/d)

$R_{SSV/SST}$ = relação SSV/SST afluente ao Tanque de Aeração (adimensional)

Por fim, é possível calcular o volume a ser descartado por dia, isto é, o resultado de interesse para o presente estudo. Para a ETE São João/Navegantes, o volume gerado de lodo foi calculado a partir da Equação 4, considerando um teor de sólidos

(TS) anterior à desidratação. Já para o restante das ETE, cujo lodo gerado é transportado, a Equação 5 foi utilizada considerando o teor de sólidos do lodo desidratado (TS_d).

$$V_L = \frac{\Delta X_T}{TS \times \rho \times \gamma} \quad (4)$$

$$V_{LS} = \frac{\Delta X_T}{TS_d \times \rho \times \gamma} \quad (5)$$

Sendo:

V_L = volume gerado de lodo (m^3/d)

V_{LS} = volume gerado de lodo seco (m^3/d)

ΔX_T = produção de lodo em sólidos totais ($kg\ SST/d$)

TS = teor de sólidos (%)

TS_d = teor de sólidos do lodo desidratado (%)

ρ = peso específico do lodo (kg/m^3)

γ = densidade (g/cm^3)

4.3.2 Produção de lodo em sistemas UASB

Com base na Tabela 3 no item 4.2, observa-se que a ETE do Bosque utiliza o sistema UASB. Neste caso, a metodologia para o cálculo da estimativa de produção de lodo é mais simples que a de lodos ativados. A produção de lodo pode ser estimada no caso de esgotos domésticos em 0,15 a 0,20 $kg\ SST/kg\ DQO$ afluyente (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Para o cálculo, admitiu-se o valor médio de 0,18 $kg\ SST/kg\ DQO$ afluyente.

As variáveis teor de sólidos (TS), peso específico do lodo (ρ) e densidade (γ) são necessárias para se estimar a produção de lodo em sistemas UASB. Porém, estas variáveis não são monitoradas e/ou não foram enviadas pelo DMAE e, diante disso, foram adotados valores médios obtidos da literatura. Em razão do lodo oriundo da ETE de pequeno porte do Bosque ser disposto em leitos de secagem, assim como para as ETE de lodo ativado, adotou-se o teor de sólidos médio de 30%.

Para a variável de densidade e peso específico, adotaram-se valores médios das faixas calculadas para lodo desidratado por Andreoli, Sperling e Fernandes (2001) expostos na Tabela 4 do item 4.3.1. Posto isto, os valores médios obtidos da literatura estão expostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Variáveis não monitoradas pelo DMAE e obtidas na literatura para o sistema UASB.

Variáveis	Valores adotados	Unidade de Medida
	ETE Bosque	
Densidade (γ)	1,007	g/cm ³
Peso específico do lodo (ρ)	1.007	kg/m ³
Teor de sólidos do lodo desidratado (TS_d)	30	%

Fonte: próprio autor (2022).

As variáveis monitoradas pelo DMAE necessárias para estimar a produção de lodo em sistemas UASB, e seus respectivos valores médios, são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Variáveis monitoradas e fornecidas pelo DMAE para sistemas UASB.

Variáveis	Valores adotados	Unidade de Medida
	ETE Bosque	
Vazão afluyente (Q)	4	L/s
DQO afluyente (DQO_{afl})	341	mg/L

Fonte: próprio autor (2022).

Com estas variáveis, num primeiro momento é necessário transformar o valor da DQO afluyente (DQO_{afl}) de mg/L para kg/d ao multiplicá-la pela vazão afluyente (Q), em m³/d. Em seguida, é possível calcular a produção de lodo em sólidos totais (ΔX_T), adotando a produção de 0,18 kg SST/kg DQO afluyente, através da Equação 6.

$$\Delta X_T = 0,18 \times (DQO_{afl} \times Q) \quad (6)$$

Sendo:

ΔX_T = produção de lodo em sólidos totais (kg SST/d)

0,18 = produção de kg de sólidos totais por DQO afluyente

DQO_{afl} = DQO afluyente (kg/m³)

Q = vazão afluyente (m³/d)

Por fim, o resultado de interesse para o presente estudo é o volume gerado de lodo seco (V_{LS}), cujo valor é obtido a partir da Equação 7. No cálculo, utiliza-se o teor de sólidos do lodo desidratado (TS_d), visto que o lodo gerado em ambas ETE será transportado para a ETE central da zona norte.

$$V_{LS} = \frac{\Delta X_T}{TS_d \times \rho \times \gamma} \quad (7)$$

Sendo:

V_{LS} = volume gerado de lodo seco (m³/d)

TS_d = teor de sólidos do lodo desidratado (%)

ρ = peso específico do lodo (kg/m³)

γ = densidade (g/cm³)

4.3.3 Produção de lodo em sistema UASB seguido de lodos ativados

A ETE Serraria utiliza o sistema UASB seguido do tratamento complementar por meio de processo aeróbio de lodos ativados. Neste caso, o cálculo da estimativa de produção de lodo deve ser realizado em duas etapas, sendo elas: I) etapa 1: produção de lodo anaeróbio excedente; II) etapa 2: produção de lodo aeróbio excedente.

I) Etapa 1:

Para a primeira etapa, a mesma metodologia para a produção de lodo em reatores UASB, do item 4.3.2, foi utilizada. Para as variáveis densidade (γ) e peso específico do lodo (ρ) foram adotados os mesmos valores médios que as demais estações.

Quanto ao teor de sólidos, Jordão & Pessôa (2017) afirma que o lodo no interior do reator UASB apresenta um teor de sólidos entre 3 e 5%. Posto isto, os valores médios obtidos da literatura para todas estas variáveis estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Variáveis não monitoradas pelo DMAE e obtidas na literatura para o sistema UASB.

Variáveis	Valores adotados		Unidade de Medida
	ETE Serraria		
Densidade (γ)	1,007		g/cm ³
Peso específico do lodo (ρ)	1.007		kg/m ³
Teor de sólidos (TS)	4		%

Fonte: próprio autor (2022).

As variáveis monitoradas pelo DMAE necessárias para estimar a produção de lodo em sistemas UASB, e seus respectivos valores médios, são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Variáveis monitoradas e fornecidas pelo DMAE para sistemas UASB.

Variáveis	Valores adotados	Unidade de Medida
	ETE Serraria	
Vazão afluyente (Q)	2.700	L/s
DQO afluyente composta (DQO_{afl})	321,73	mg/L

Fonte: próprio autor (2022).

Com estas variáveis, foi possível calcular a produção de lodo anaeróbio em sólidos totais (ΔX_{TLAn}) através da Equação 8. Foi utilizado o valor médio de 0,18 kg SST/kg DQO afluyente, assim como no cálculo anterior.

$$\Delta X_{TLAn} = 0,18 \times (DQO_{afl} \times Q) \quad (8)$$

Sendo:

ΔX_{TLAn} = produção de lodo anaeróbio em sólidos totais (kg SST/d)

0,18 = kg de sólidos totais produzidos por DQO afluyente (kg SST/kg DQO)

DQO_{afl} = DQO afluyente composta (kg/m³)

Q = vazão afluyente (m³/d)

Por fim, é possível calcular o volume de lodo anaeróbio gerado a partir da Equação 9. Neste cálculo, o teor de sólidos utilizado foi aquele que o lodo apresenta no interior do reator, e não o teor de sólidos do lodo desidratado, já que neste momento o lodo não foi ainda submetido a desidratação.

$$V_{LAn} = \frac{\Delta X_{TLAn}}{TS \times \rho \times \gamma} \quad (9)$$

Sendo:

V_{LAn} = volume gerado de lodo anaeróbio (m³/d)

ΔX_{TLAn} = produção de lodo anaeróbio em sólidos totais (kg SST/d)

TS = teor de sólidos (%)

ρ = peso específico do lodo (kg/m³)

γ = densidade (g/cm³)

II) Etapa 2:

Para a segunda etapa, o cálculo da produção de lodo aeróbio foi calculado com a mesma metodologia utilizada no item 4.3.1, com algumas modificações. As variáveis necessárias para se estimar a produção de lodo em sistemas de lodos ativados que não são monitoradas e/ou não foram enviadas pelo DMAE foram obtidas a partir da literatura.

A variável idade do lodo (Θ_c) utilizada foi obtida a partir de uma tabela apresentada por Jordão & Pessoa (2017). Os autores indicam que a idade de lodo para sistemas com reator UASB seguido de sistema de lodos ativados para $DBO_5 \leq 20$ mg/L esperada no efluente é de, aproximadamente, 7 dias. Já para $DBO_5 \leq 30$ mg/L esperada do efluente, é indicada uma idade do lodo menor que 4 dias. Portanto, a idade do lodo utilizada para a ETE Serraria é de 4 dias, já que possui a DBO do efluente composto igual a 26 mg/L.

A variável teor de sólidos (TS), para um sistema UASB seguido de pós tratamento aeróbio de lodos ativados, foi determinado por Andreoli, Sperling e Fernandes (2001) na faixa de 3 a 4%. Assim, para a ETE Serraria, que possui este sistema de tratamento, utilizou-se o valor médio de 3,5%. Isso porque a ETE Serraria foi estabelecida como ETE central da zona sul, o que significa que o lodo gerado por esta ETE não será transportado. Portanto, será realizado o cálculo de um volume cru de lodo gerado, visto que não é considerado o processo de remoção da umidade do lodo.

Quanto às variáveis densidade (γ), peso específico do lodo (ρ) e a relação SSV/SST (R_{SSV/SS_T}) adotaram-se os mesmos valores médios que as demais estações. Posto isto, os valores médios obtidos da literatura para todas estas variáveis estão expostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Variáveis não monitoradas pelo DMAE e obtidas na literatura para o sistema de lodos ativados.

Variáveis	Valores adotados	Unidade de Medida
	ETE Serraria	
Coeficiente de produção (Y)	0,45	adimensional
Coeficiente de autodestruição (kd)	0,075	d^{-1}
Relação SSV/SST (R_{SSV/SS_T})	0,775	adimensional
Idade do lodo (Θ_c)	4	dias

Variáveis	Valores adotados	Unidade de Medida
	ETE Serraria	
Teor de sólidos (<i>TS</i>)	3,5	%

Fonte: próprio autor (2022).

As variáveis monitoradas pelo DMAE necessárias para estimar a produção de lodo em sistemas de lodos ativados, e seus respectivos valores médios, são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Variáveis monitoradas e fornecidas pelo DMAE para sistemas de lodos ativados.

Variáveis	Valores adotados	Unidade de Medida
	ETE Serraria	
DBO afluente composto (<i>So</i>)	175	mg O2/L
DBO efluente composto (<i>Se</i>)	26	mg O2/L

Fonte: próprio autor (2022).

Como mencionado no item 3.3.1.2 do referencial teórico, a eficiência do sistema UASB de remoção de DBO está na faixa de 45 a 85%. Para o cálculo utilizou-se o valor médio de 65%, valor este também recomendado em outras bibliografias. Assim, foi possível estimar a partir da Equação 10, a DBO intermediária, isto é, na efluente que sai do reator UASB e, conseqüentemente, no afluente ao reator de lodo ativado.

$$S_i = S_o \times (1 - 65\%) \quad (10)$$

Sendo:

S_i = concentração da DBO intermediária (mg O2/L)

S_o = concentração da DBO afluente composto (mg O2/L)

65% = eficiência de remoção de DBO (%)

Para os cálculos seguintes, é necessário entender a vazão intermediária, isto é, a vazão efluente que sai do reator UASB e, conseqüentemente, afluente ao reator de lodo ativado. Dessa forma, para fins de cálculo, foi considerado que a vazão afluente (*Q*) subtraído o volume gerado de lodo anaeróbio (*V_{LAn}*), resultará na vazão intermediária (*Q_i*). Essa relação pode ser calculada através da Equação 11.

$$Q_i = Q - V_{LAn} \quad (11)$$

Q_i = vazão intermediária (m³/d)

Q = vazão afluyente (m³/d)

V_{LAn} = volume gerado de lodo anaeróbio (m³/d)

A partir daí, foi possível calcular o coeficiente de produção ajustado para compensar a perda pela respiração endógena, isto é, o Y_{obs} , da mesma forma que no item 4.3.1, através da Equação 1. Com este valor, torna-se possível calcular a produção de lodo aeróbio a partir da Equação 12.

$$\Delta X_{LAe} = Y_{obs} \times (S_i - S_e) \times Q_i \quad (12)$$

Sendo:

ΔX_{LAe} = produção de lodo aeróbio em sólidos voláteis (kg SSV/d)

S_i = concentração da DBO intermediária (mg O₂/L)

S_e = concentração da DBO efluente composto (mg O₂/L)

Q_i = vazão intermediária (m³/d)

A partir da Equação 13, a produção de lodo aeróbio em sólidos voláteis (ΔX_{LAe}) é dividida pela relação SSV/SST ($R_{SSV/SST}$) para se chegar ao valor em relação aos sólidos totais (ΔX_{TLAe}).

$$\Delta X_{TLAe} = \frac{\Delta X_{LAe}}{R_{SSV/SST}} \quad (13)$$

Sendo:

ΔX_{TLAe} = produção de lodo aeróbio em sólidos totais (kg SST/d)

$R_{SSV/SST}$ = relação SSV/SST (adimensional)

Sabe-se ainda que o lodo aeróbio excedente é bombeado para o reator UASB, em que foi adotada a redução de 35% dos sólidos voláteis desta fração. Dessa forma, a partir da Equação 14 é possível verificar a carga de sólidos voláteis que permanecem no lodo aeróbio retirado do reator UASB.

$$SSV_{LAe(UASB)} = \Delta X_{LAe} \times (1 - 35\%) \quad (14)$$

Sendo:

$SSV_{LAe(UASB)}$ = carga de sólidos voláteis no lodo aeróbio retirado do reator UASB (kg SSV/d)

ΔX_{LAe} = produção de lodo aeróbio em sólidos voláteis (kg SSV/d)

35% = percentual de redução de sólidos voláteis no reator UASB (%)

A carga de sólidos fixos, por sua vez, permanece inalterada. A partir da Equação 15 é possível calcular então a carga de sólidos fixos do lodo aeróbio retirado do reator UAS.

$$SSF_{LAe(UASB)} = \Delta X_{TLAe} \times (1 - R_{SSV}/SST) \quad (15)$$

Sendo:

$SSF_{LAe(UASB)}$ = carga de sólidos fixos no lodo aeróbio retirado do reator UASB (kg SSF/d)

ΔX_{TLAe} = produção de lodo aeróbio em sólidos totais (kg SST/d)

R_{SSV}/SST = relação SSV/SST afluente ao Tanque de Aeração (adimensional)

Assim, a produção de lodo aeróbio retirado do reator UASB é a soma dos sólidos voláteis e sólidos fixos. O resultado é obtido a partir da Equação 16.

$$\Delta X_{TLAe(UASB)} = SSV_{LAe(UASB)} + SSF_{LAe(UASB)} \quad (16)$$

Sendo:

$\Delta X_{TLAe(UASB)}$ = produção de lodo aeróbio retirado do reator em sólidos totais (kg SST/d)

$SSV_{LAe(UASB)}$ = carga de sólidos voláteis no lodo aeróbio retirado do reator UASB (kg SSV/d)

$SSF_{LAe(UASB)}$ = carga de sólidos fixos no lodo aeróbio retirado do reator UASB (kg SSF/d)

A quantidade total de lodo excedente forma um lodo misto, composto por esta parcela calculada de produção de lodo aeróbio retirado do reator em sólidos totais, acrescentada da parcela da primeira etapa referente ao lodo excedente anaeróbio. Essa quantidade de lodo misto é calculada conforme mostra a Equação 17.

$$\Delta X_{TLM} = \Delta X_{TLAn} + \Delta X_{TLAe(UASB)} \quad (17)$$

ΔX_{TLM} = produção de lodo misto em sólidos totais (kg SST/d)

ΔX_{TLAn} = produção de lodo anaeróbio em sólidos totais (kg SST/d)

$\Delta X_{TLAe(UASB)}$ = produção de lodo aeróbio retirado do reator em sólidos totais (kg SST/d)

Por fim, é possível calcular o volume a ser descartado por dia, isto é, o resultado de interesse para o presente estudo. O volume gerado de lodo na ETE Serraria foi

calculado a partir da Equação 18, considerando um teor de sólidos (TS) anterior à desidratação.

$$V_L = \frac{\Delta X_{TLM}}{TS \times \rho \times \gamma} \quad (18)$$

Sendo:

V_L = volume gerado de lodo (m^3/d)

ΔX_{TLM} = produção de lodo misto em sólidos totais ($kg\ SST/d$)

TS = teor de sólidos (%)

ρ = peso específico do lodo (kg/m^3)

γ = densidade (g/cm^3)

4.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

O gás gerado na digestão anaeróbia pode ser obtido, de acordo com Jordão & Pessoa (2017), a partir da produção aproximada de 15 a 20 L/hab.d, para lodo primário, e de 25 a 30 L/hab.d para lodo misto (primário + secundário). Porém, os autores garantem que os cálculos com base na massa de sólidos voláteis destruídos são mais confiáveis e devem ser prioritariamente utilizados nos balanços energéticos. Assim, a metodologia utilizada para cálculo da estimativa de geração de biogás utiliza como base que o gás produzido no digestor (recebendo lodo misto) é da ordem de 0,8 a 1,1 m^3 por kg de SSV destruídos.

De acordo com Andreoli, Sperling e Fernandes (2001), recomenda-se que a concentração de sólidos na alimentação do digestor esteja na faixa de 4 a 8%, podendo atingir valores superiores, desde que as condições de alimentação e mistura permitam. Sabe-se que parte do lodo que será digerido apresenta um teor de sólidos de 30%, uma vez que a desidratação é necessária em virtude do transporte deste lodo. Torna-se necessário, desse modo, realizar o ajuste de umidade do lodo na entrada no digestor.

A partir dos resultados já calculados da produção de lodo em sólidos totais das ETE, sabe-se a quantidade de carga de sólidos totais presente no lodo gerado (SST_{afl}), em $kg\ SST/d$. Dessa forma, é possível certificar a quantidade de sólidos voláteis no lodo afluente ao digestor (SSV_{afl}) utilizando-se a relação de SSV/SST de 77,5%, uma vez que a produção de biogás é estimada a partir da quantidade de SSV destruídos. A Equação 19 demonstra este cálculo.

$$SSV_{afl} = SST_{afl} \times R_{SSV/SST} \quad (19)$$

Sendo:

SSV_{afl} = carga de sólidos voláteis no lodo afluyente ao digestor (kg SSV/d)

SST_{afl} = carga de sólidos totais no lodo afluyente ao digestor (kg SST/d)

$R_{SSV/SST}$ = relação SSV/SST (%)

Como mencionado no item 3.4.1 do referencial teórico, a eficiência da digestão costuma ser medida através de um indicador de redução de sólidos voláteis, sendo a redução de 50% de SSV o valor usual almejado. Os sólidos fixos, por sua vez, permanecem inalterados. Em vista disso, a Equação 20 calcula a quantidade de sólidos voláteis destruídos no efluente considerando esta eficiência de remoção. É importante salientar que, em razão da eficiência de remoção ser de 50%, a carga de sólidos voláteis no lodo efluente é igual a carga de sólidos voláteis destruídos.

$$SSV_{efl} = (1 - 50\%) \times SSV_{afl} \quad (20)$$

Sendo:

SSV_{efl} = carga de sólidos voláteis no lodo efluente ao digestor (kg SSV/d)

50% = eficiência de remoção de sólidos voláteis na digestão (%)

SSV_{afl} = carga de sólidos voláteis no lodo afluyente ao digestor (kg SSV/d)

Por fim, é possível calcular a estimativa de geração de biogás assumindo que o gás produzido no digestor é da ordem de 0,8 a 1,1 m³ por kg de SSV destruídos. A Equação 21 demonstra este cálculo, em que se adotou para a taxa específica de geração de biogás o valor médio de 0,95 m³ por kg de SSV destruídos.

$$Q_{biogás} = SSV_{efl} \times 0,95 \quad (21)$$

Sendo:

$Q_{biogás}$ = vazão de biogás gerado (m³ gás/d)

SSV_{efl} = carga de sólidos voláteis no lodo efluente ao digestor (kg SSV/d)

0,95 = taxa específica de geração de biogás (m³/kg SSV destruídos)

4.5 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO

Para o uso energético do biogás, o fator decisivo é o gás metano e, portanto, o seu potencial energético está relacionado diretamente com a quantidade de metano em sua composição. Admitindo, para fins de cálculo, um percentual típico de 65% de

metano na constituição do biogás, foi possível calcular a produção de gás metano presente no biogás através da Equação 22.

$$CH_{4\text{volume}} = \frac{Q_{\text{biogás}} \times 65\% \times 365 \times MM_{CH_4}}{Vol_{\text{gás}}} \quad (22)$$

Sendo:

$CH_{4\text{volume}}$ = volume de metano produzido (kg/ano)

$Q_{\text{biogás}}$ = vazão de biogás gerado (m³/d)

65% = percentual de metano na constituição do biogás (%)

365 = dias em um ano (dia/ano)

MM_{CH_4} = massa molar do metano (kg/mol)

$Vol_{\text{gás}}$ = volume do gás (m³/mol)

O cálculo foi realizado com base no balanço de massa, considerando uma temperatura de 20°C. Nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), um mol de qualquer gás ocupa 22,4 litros (RICHTER, 2009). Já para uma temperatura de 20°C, um mol de gás ocupa 24,055 litros (0,024055 m³). A massa molar do metano, obtida da tabela periódica, é de 0,016 kg/mol.

4.6 ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO

A escolha da tecnologia de utilização do biogás considerada neste estudo teve como objetivo a geração de energia elétrica. Como já mencionado previamente, partindo do pressuposto que o gás do digestor apresenta apenas 65% de metano, o poder calorífico inferior do gás de digestão é de, aproximadamente, 22.400 kJ/m³ (METCALF & EDDY, 2016). Assim, a energia bruta produzida pode ser calculada a partir da Equação 23, com uma simples multiplicação.

$$E = \frac{Q_{\text{biogás}} \times PCI}{3.600} \quad (23)$$

Sendo:

E = energia bruta produzida (kWh/d)

$Q_{\text{biogás}}$ = vazão de biogás gerado (m³/d)

PCI = poder calorífico inferior do gás de digestão (kJ/m³)

3.600 = fator de conversão de kJ para kWh

4.7 ESTIMATIVA DA ECONOMIA COM A GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS

A economia calculada neste estudo contempla aquela obtida a partir da geração de energia do biogás produzido. Neste valor não serão contempladas as economias que as ETE terão com o transporte e com a destinação final do lodo. Porém, é muito importante ter em mente que o valor gasto com ambos serviços será significativamente reduzido. Ao considerar o sistema de aproveitamento de biogás proposto no presente estudo, as distâncias de transporte do lodo seriam reduzidas a, no máximo, 17,4 quilômetros - distância aproximada da ETE Chácara das Nascentes até a ETE São João/Navegantes. Quanto à disposição final, atualmente o lodo é depositado em aterro sanitário e, portanto, esse custo de disposição seria totalmente eliminado com o aproveitamento energético do lodo.

Ainda vale destacar que não foram considerados neste cálculo os custos associados às adaptações no sistema existente no biodigestor da ETE São João/Navegantes, nem o custo da instalação do sistema na ETE Serraria para a viabilidade do aproveitamento energético. Logo, estes cálculos, tanto em relação ao transporte e destinação final do lodo, quanto das adaptações necessárias do sistema de tratamento existente, podem ser explorados em trabalhos futuros.

Para estimar a economia com a geração de energia a partir do biogás, tornou-se necessário, em um primeiro momento, calcular os custos de manutenção e operação de cada estação estudada com base nos valores apresentados na literatura, visto que estes valores não foram fornecidos pelo DMAE. Para fins de cálculo, utilizou-se como base a Tabela 2 apresentada no item 3.3.3 do referencial teórico. Em razão da Tabela 2 apresentar a faixa de valores gastos típicos por habitante no ano, tornou-se necessário calcular o custo de cada estação de tratamento a partir da Equação 24.

$$C = \text{Custo médio típico de operação e manutenção per capita} \times P \quad (24)$$

Sendo:

C = custo médio de operação e manutenção da estação (R\$/ano)

P = população atendida pela estação (habitantes)

Para a variável de custo médio típico de operação e manutenção per capita, foram utilizados os valores médios da faixa fornecida por Sperling (2005). Os valores

médios para cada sistema e as estações de tratamento estudadas enquadradas no respectivo sistema são expostos na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores médios típicos gastos com operação e manutenção utilizados para cada sistema de tratamento e as respectivas estações estudadas.

Sistema	Estações estudadas	Valor médio de operação e manutenção (R\$/hab.ano)*
Reator UASB	Bosque	11,39
UASB + lodos ativados	Serraria	36,06
Lodos ativados convencional	São João/Navegantes e Chácara das Nascentes	56,93
Lodos ativados - aeração prolongada	Rubem Berta	56,93
Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)	Parque do Arvoredo	56,93
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P	Serraria e Sarandi	75,91

***Valores já corrigidos com base no índice de correção IGP-M (FGV) (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2022).**

Fonte: adaptado de Sperling (2005).

Em razão das ETE Serraria e Sarandi possuírem remoção biológica de nutrientes, considerou-se aquele sistema que possui o valor mais elevado de operação e manutenção para os cálculos. Foi utilizado, portanto, o valor médio de R\$75,91/hab.ano para as ETE Serraria e Sarandi. Ainda, para ambas estações, deve ser acrescentado no cálculo os custos adicionais com a desinfecção, uma vez que, de acordo com o DMAE et al. (2015), as ETE possuem sistema de desinfecção. O valor médio acrescentado é de R\$3,80/hab.ano.

A ETE Chácara das Nascentes possui o processo de MBBR, que, como mencionado anteriormente no item 3.3.1.1.4 do referencial teórico, obedece aos mesmos parâmetros operacionais e de controle que são aplicados ao processo convencional de lodos ativados. Portanto, foi considerado que a estação está enquadrada no sistema de lodos ativados convencional.

Em um segundo momento, foi possível então estimar o custo médio anual com a energia elétrica, foco deste trabalho. Para fins de cálculo, utilizou-se o dado informado pelo SNIS, citado no item 3.2.2 no referencial teórico, sobre a composição das despesas de exploração das estações de tratamento. O percentual de 15,7% foi utilizado em razão de ser, dentre as fontes citadas, a mais recente. Além disso, o SNIS

dispõe, desde 1995, de um robusto conjunto de dados estruturados sobre os serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2022). Assim, assumiu-se que a despesa com energia elétrica representa 15,7% das despesas correntes de uma estação. A partir da Equação 25 essa relação pôde ser calculada.

$$C_{energia} = 15,7\% \times C \quad (25)$$

Sendo:

$C_{energia}$ = custo médio com energia elétrica (R\$/ano)

15,7 = percentual de despesa com energia elétrica em uma estação (%)

C = custo médio de operação e manutenção da estação (R\$/ano)

Por fim, para estimar o valor em reais equivalente da energia produzida a partir do biogás, utilizou-se como base a tarifa média dos estados do sul do Brasil considerando os 5 (cinco) anos utilizados como base no presente estudo, de 2017 a 2021. Este dado foi obtido a partir da base de dados do histórico do preço médio mensal da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (2022). Os preços foram corrigidos com base no índice de correção IGP-M (FGV) indicado pelo Banco Central do Brasil (2022) e, posteriormente, obtida a média dos valores já corrigidos. A média utilizada no cálculo foi de R\$407,65/MWh. O cálculo da estimativa do valor equivalente da energia produzida a partir da produção de biogás pode ser calculado a partir da Equação 26.

$$Ep = \frac{E \times 407,65 \times 365 \text{ dias}}{1.000} \quad (26)$$

Sendo:

Ep = valor equivalente da energia produzida (R\$/ano)

E = energia bruta produzida (kWh/d)

407,65 = tarifa média do sul do Brasil do período citado (R\$/MWh)

365 = conversão de dia para ano (dias/ano)

1.000 = conversão de kWh para MWh (kWh/MWh)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE LODO

Esse tópico apresenta a estimativa da quantidade de lodo gerada nas ETE, bem como as variáveis intermediárias utilizadas para o cálculo. Os cálculos realizados estão de acordo com as etapas descritas no item 4.3.

5.1.1 Geração de lodo em sistemas de lodos ativados

Os resultados para os cálculos descritos no item 4.3.1 estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14 - Estimativa da produção diária de lodo para cada uma das ETE com sistema de lodos ativados, bem como as variáveis intermediárias encontradas.

Variáveis calculadas	ETE São João / Navegantes	ETE Rube m Berta	ETE Parque do Arvoredo	ETE Sarandi	ETE Chácara das Nascentes
Coefficiente de produção celular específica observada corrigido pela auto oxidação, Y_{obs} (mg SSV/mg DBO)	0,23	0,12	0,16	0,12	0,20
Produção de lodo em sólidos voláteis, ΔX (kg SSV/d)	1.156,47	187,20	68,29	206,84	14,55
Produção de lodo em sólidos totais, ΔX_T (kg SST/d)	1.850,35	299,51	109,26	266,89	23,28
Volume gerado de lodo, V_L (m ³ /d)	140,74	-	-	-	-
Volume gerado de lodo seco, V_{LS} (m ³ /d)	-	0,79	0,29	0,88	0,05

Fonte: próprio autor (2022).

Dentre os dados fornecidos pelo DMAE (2022), a quantidade de toneladas produzidas por dia de lodo desidratado foi informada para as 3 (três) maiores ETE do município, sendo duas delas: a ETE São João/Navegantes e a ETE Sarandi. A estimativa informada de lodo gerado foi de 8 toneladas por dia e 1 tonelada por dia, respectivamente.

Foi informado ainda que este valor se refere a um lodo desidratado com 80% de umidade, isto é, 20% de teor de sólidos. Nos cálculos para a ETE São João/Navegantes realizados no presente trabalho, o teor de sólidos adotado (1,125%) não considerou a desidratação do lodo, uma vez que não será necessário o seu

transporte. Porém, ao manter o valor de todas variáveis dos cálculos e alterar somente o valor da variável teor de sólidos (TS) para 20%, obtém-se o volume de lodo a ser descartado por dia de 7,92 toneladas por dia, valor que se aproxima muito do valor fornecido pelo DMAE (2022). O mesmo cálculo foi feito para a ETE Sarandi, onde o valor encontrado para um teor de sólidos de 20% foi de 1,32 toneladas por dia, valor semelhante ao informado pelo DMAE (2022).

5.1.2 Geração de lodo em sistemas UASB

Os resultados para os cálculos descritos no item 4.3.2 estão dispostos na Tabela 15.

Tabela 15 - Estimativa da produção diária de lodo para a ETE com sistema UASB, bem como as variáveis intermediárias encontradas.

Variáveis	ETE Bosque
Produção de lodo em sólidos totais, ΔX_T (kg SST/d)	21,22
Volume gerado de lodo seco, V_{LS} (m ³ /d)	0,07

Fonte: próprio autor (2022).

5.1.3 Geração de lodo em sistema UASB seguido de lodos ativados

Os resultados para os cálculos descritos no item 4.3.3 estão dispostos na Tabela 16.

Tabela 16 - Estimativa da produção diária de lodo para cada uma das ETE com sistema UASB seguido de lodos ativados, bem como as variáveis intermediárias encontradas.

Variáveis	ETE Serraria
Produção de lodo anaeróbio em sólidos totais, ΔX_{TLAn} (kg SST/d)	13.509,33
Volume gerado de lodo anaeróbio, V_{LAn} (m ³ /d)	333,05
Concentração da DBO intermediária, S_i (mg O ₂ /L)	61,00
Vazão intermediária, Q_i (m ³ /d)	232.944,25
Coefficiente de produção celular específica observada corrigido pela auto oxidação, Y_{obs} (mg SSV/mg DBO)	0,35
Produção de lodo aeróbio em sólidos voláteis, ΔX_{LAe} (kg SSV/d)	2.831,72
Produção de lodo aeróbio em sólidos totais, ΔX_{TLAe} (g SST/d)	3.653,83
Carga de sólidos voláteis no lodo aeróbio retirado do reator UASB, $SSV_{LAe(UASB)}$ (kg SSV/d)	1.840,62

Variáveis	ETE Serraria
Carga de sólidos fixos no lodo aeróbio retirado do reator UASB, $SSF_{LAe(UASB)}$ (kg SSF/d)	822,11
Produção de lodo aeróbio retirado do reator em sólidos totais, $\Delta X_{TLAe(UASB)}$ (kg SST/d)	2.662,73
Produção de lodo misto em sólidos totais, ΔX_{TLM} (kg SST/d)	16.172,06
Volume gerado de lodo, V_L (m ³ /d)	455,66
Volume gerado de lodo seco, V_{LS} (m ³ /d)	-

Fonte: próprio autor (2022).

Dentre os dados fornecidos pelo DMAE (2022), a quantidade de toneladas produzidas por dia de lodo desidratado foi informada também para a ETE Serraria. A estimativa informada de lodo gerado foi de 40 toneladas por dia. Esta estimativa é referente a um lodo desidratado com 80% de umidade, isto é, 20% de teor de sólidos.

Ao manter o valor de todas variáveis em todos os cálculos e alterar somente o valor da variável teor de sólidos (TS) para 20%, obtém-se o volume de lodo a ser descartado por dia de 79,74 toneladas por dia para a ETE Serraria. Este valor difere significativamente da estimativa fornecida pelo DMAE (2022). Entende-se que a diferença decorre do fato da ETE possuir um sistema de tratamento seguido de um pós-tratamento, o que significa uma maior quantidade de cálculos e, por consequência, de variáveis utilizadas. Ainda, os valores utilizados para todas estas variáveis foram obtidos a partir da literatura, considerando sempre os seus valores médios. Por fim, ainda há o fator de recirculação do lodo, cujo excesso de lodo do sistema de lodos ativados retorna de forma controlada ao reator UASB, não conhecendo-se exatamente como é realizado este retorno.

5.2 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

A partir da soma das cargas de sólidos totais das estações agrupadas, foi calculado o potencial de produção diária de geração de biogás de cada ETE central. Os resultados encontrados estão reunidos na Tabela 17.

Tabela 17 - Estimativa da produção diária de biogás para cada uma das ETE centrais.

Variáveis	ETE centrais	
	Zona norte: ETE São João / Navegantes	Zona sul: ETE Serraria
Carga de sólidos totais no lodo afluente ao digestor, SST_{afl} (kg SST/d)	2.242,09	16.172,06
Carga de sólidos voláteis no lodo afluente ao digestor, SSV_{afl} (kg SSV/d)	1.737,62	12.533,35
Carga de sólidos voláteis no lodo efluente ao digestor, SSV_{efl} (kg SSV/d)	868,81	6.266,67
Vazão de biogás gerado, $Q_{biogás}$ (m ³ gás/d)	825,37	5.953,34

Fonte: próprio autor (2022).

5.3 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO

Com os resultados da estimativa de geração de biogás, foi possível estimar a geração de metano em cada estação central. Ao considerar 65% de metano na constituição do biogás, estimou-se a geração anual de metano. Os resultados estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Estimativa da geração anual de metano para cada estação central.

ETE centrais	Volume de metano produzido, $CH_{4volume}$ (kg/ano)
Zona norte: ETE São João/Navegantes	130.247,33
Zona sul: ETE Serraria	939.467,18

Fonte: próprio autor (2022).

Com base nestes resultados, é possível chegar a um valor aproximado de 48,42 kg de metano gerado para cada metro cúbico de lodo gerado. Utilizou-se, para fins de comparação de resultados, o trabalho realizado por Marques (2014), cujo estudo também estimou, dentre outras variáveis, a quantidade de metano produzido a partir do lodo misto de 14 (catorze) estações de tratamento de esgoto com sistema de lodos ativados. As estações de tratamento avaliadas estão localizadas nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro e Distrito Federal.

Todavia, para comparação, foi necessário verificar a relação de quantidade de metano gerado por litro de efluente tratado, uma vez que o trabalho realizado por Marques não calculou a quantidade de lodo gerado em cada estação. O cálculo teve

como base a vazão e a população contribuinte de cada ETE. Neste estudo, a geração de metano, em kg, para cada litro de efluente tratado, teve um valor médio aproximado de 0,2522. No presente trabalho, chegou-se a relação de 0,0353 kg de metano gerado para cada litro de efluente tratado.

Entende-se que essa diferença significativa seja em razão do trabalho de Marques considerar apenas estações com tratamento de lodos ativados convencionais, cujo sistema apresenta alta produção de massa de lodo. No presente trabalho, por outro lado, o cálculo considera também outros sistemas de tratamento, inclusive aqueles que possuem menores produções de massa de lodo, como o caso de reatores UASB. Ainda, o trabalho de Marques considerou 14 (catorze) estações, enquanto o presente trabalho considerou apenas 7 (sete).

Por fim, essa diferença também pode ser atribuída ao fato do trabalho de Marques ter adotado, para o cálculo da geração de biogás, a metodologia sugerida por Jordão & Pessôa (2017) de 25 a 30 L/hab.d para lodo misto. Porém, como mencionado anteriormente no item 4.4 da metodologia, o método utilizado no presente trabalho, com base na massa de sólidos voláteis destruídos, são mais confiáveis e devem ser priorizados. Além disso, no trabalho de Marques (2014) foi estimada a população contribuinte a partir dos dados de vazão para, só então, estimar a geração de biogás com base no número de habitantes, aumentando a margem de erro.

5.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO

Com o objetivo de avaliar o potencial energético produzido em cada uma das ETE centrais a partir do aproveitamento da geração de biogás, foi estimada a energia bruta produzida, tanto diária quanto anual. Os resultados podem ser verificados na Tabela 19.

Tabela 19 - Estimativa do potencial energético diário e anual das ETE centrais.

Variáveis	ETE centrais	
	Zona norte: ETE São João / Navegantes	Zona sul: ETE Serraria
Energia bruta produzida diária, E (kWh/d)	5.135,63	37.043,01
Energia bruta produzida anual, E (kWh/ano)	1.874.504,02	13.520.699,22

Fonte: próprio autor (2022).

Com base nestes resultados, é possível chegar a um valor aproximado de 696,82 kWh para cada m³ de lodo gerado. Assim como a geração de metano, utilizou-se, para fins de comparação de resultados, o trabalho realizado por Marques (2014), cujo valor encontrado foi de 0,91 kWh de energia produzida para cada litro de efluente tratado. No presente trabalho, chegou-se a relação de 0,51 kWh de energia produzida para cada litro de efluente tratado.

A mesma comparação foi realizada em razão do cálculo da energia produzida de Marques (2018) não considerar os resultados anteriores de geração de metano. A energia produzida também foi calculada considerando apenas a população contribuinte, com um aproveitamento do poder calorífico do gás da digestão igual a 15 kWh/hab.ano. O presente trabalho, em contrapartida, considerou a vazão de biogás gerado anteriormente calculada.

Portanto, somado ao fato de as metodologias utilizadas serem distintas, o que presumivelmente justifica a diferença, essa também pode ser atribuída ao fato do trabalho de Marques ter estimado a população contribuinte para, posteriormente, estimar o potencial de energia, aumentando a margem de erro. Ademais, a utilização do coeficiente de 15 kWh/hab.ano não considera as particularidades de cada sistema de tratamento e, conseqüentemente, da quantidade de geração de lodo e biogás.

5.5 ESTIMATIVA DA ECONOMIA

Apesar do cálculo da estimativa do potencial energético ter sido feito para cada ETE central, o cálculo de custos médios anuais com energia elétrica foi realizado para cada ETE separadamente. Isso porque o cálculo teve como base em um valor médio de operação e manutenção distinto para cada tipo de tratamento, cujos custos variam significativamente. Dessa forma, os resultados dos cálculos para cada estação de custos médios anuais com manutenção e operação, bem como os custos médios com energia elétrica, foco deste trabalho, estão dispostos na Tabela 20.

Tabela 20 - Os custos médios típicos de operação e manutenção e com energia elétrica em cada estação de tratamento estudada.

Estações de tratamento estudadas	Valor médio de operação e manutenção (R\$/hab.ano)	Valor adicional desinfecção (R\$/hab.ano)	População atendida pelas ETE	Custo médio de operação e manutenção (R\$/ano)	Custo médio com energia elétrica (R\$/ano)
Rubem Berta	R\$ 56,93	-	20.592	R\$ 1.172.302,56	R\$ 184.051,50

Estações de tratamento estudadas	Valor médio de operação e manutenção (R\$/hab.ano)	Valor adicional desinfecção (R\$/hab.ano)	População atendida pelas ETE	Custo médio de operação e manutenção (R\$/ano)	Custo médio com energia elétrica (R\$/ano)
Arvoredo	R\$ 56,93	-	16.615	R\$ 56.930,00	R\$ 148.505,04
Bosque	R\$ 11,39	-	1.800	R\$ 20.493,00	R\$ 3.217,40
Sarandi	R\$ 75,91	R\$ 3,80	50.000	R\$ 3.985.000,00	R\$ 625.645,00
São João/ Navegantes	R\$ 56,93	-	143.708	R\$ 8.181.296,44	R\$ 1.284.463,54
Serraria	R\$ 75,91	R\$ 3,80	1.080.000	R\$ 86.076.000,00	R\$ 13.513.932,00
Chácara das Nascentes	R\$ 56,93	-	2.658	R\$ 56.930,00	R\$ 23.757,23
TOTAL	-	-	1.315.373	R\$ 100.532.303,89	R\$ 15.783.571,71

Fonte: próprio autor (2022).

Por fim, os resultados estimados do valor equivalente da energia bruta produzida a partir do biogás estão expostos na Tabela 21. Este resultado, assim como o resultado da estimativa do potencial energético, foi calculado para as ETE centrais, e não individualmente para cada estação. Isso porque o biogás será gerado apenas nestas estações centrais, onde haverá a centralização do lodo e, a partir da digestão do lodo, haverá geração de biogás.

Tabela 21 - Estimativa do valor equivalente da energia bruta produzida a partir do biogás por ano nas ETE centrais.

ETE centrais	Valor equivalente da energia produzida, <i>E_p</i> (R\$/ano)
Zona norte: ETE São João/Navegantes	R\$ 764.141,57
Zona sul: ETE Serraria	R\$ 5.511.713,04
TOTAL	R\$ 6.275.854,60

Fonte: próprio autor (2022).

Com estes resultados, é possível realizar a comparação entre os custos médios típicos com energia elétrica e o valor total obtido com a energia bruta produzida a partir do biogás. Para isso, os custos médios com energia elétrica em todas as estações que encaminham seus lodos à ETE central da zona norte foram somados. Desta forma, foi possível entender os resultados de forma mais ampla e verificar o quanto a energia produzida pela digestão de lodo representa em comparação a energia consumida na ETE. Esta comparação, assim como a economia percentual, pode ser visualizada na Tabela 22.

Tabela 22 - Comparação entre o custo médio com energia e o valor equivalente da energia produzida nas ETE centrais e suas respectivas economias percentuais.

ETE centrais	Custo médio com energia elétrica, $C_{energia}$ (R\$/ano)	Valor equivalente da energia produzida, E_p (R\$/ano)	Economia percentual anual (%)
Zona norte: ETE São João/Navegantes	R\$ 2.269.639,71	R\$ 764.141,57	33,67%
Zona sul: ETE Serraria	R\$ 13.513.932,00	R\$ 5.511.713,04	40,79%
TOTAL	R\$ 15.783.571,71	R\$ 6.275.854,60	39,76%

Fonte: próprio autor (2022).

Através da avaliação dos resultados encontrados, pode-se observar que a economia percentual anual nas ETE centrais é significativa. Assim, é possível afirmar que a economia percentual anual gerada a partir do biogás é de aproximadamente 40% do custo gasto com energia elétrica considerando as 7 (sete) estações avaliadas. A biodigestão, desta forma, atende aproximadamente 40% do consumo das ETE avaliadas. Essa economia percentual representa uma economia financeira total de aproximadamente R\$6,27 milhões de reais anualmente para as estações de tratamento de esgoto avaliadas no município de Porto Alegre.

Esta conclusão vai ao encontro com o exposto por Jordão & Pessoa (2017) de que, geralmente, a energia disponibilizada pelo aproveitamento do biogás não atende o total do consumo da ETE, mas a mesma poderá suprir parte da sua demanda. No trabalho realizado por Marques (2014), chegou-se à conclusão que a potência produzida com a digestão anaeróbia corresponde aproximadamente a 68% da potência consumida nas ETE avaliadas (MARQUES, 2014), valor este que carrega as divergências de metodologias citadas anteriormente.

Entende-se que, a partir da centralização dos lodos gerados nas estações de pequeno porte em ETE centrais, o aproveitamento de biogás torna-se mais eficiente. Ainda, nestas ETE não são necessárias nenhuma alteração de processo nem custos adicionais para a viabilidade deste aproveitamento. Sendo assim, a centralização do sistema de digestão do lodo gerado torna-se uma alternativa benéfica do ponto de vista econômico também para as estações de pequeno porte, dado que, segundo Valente (2015), a escala mínima de viabilidade para utilização do biogás para geração de calor e eletricidade encontram-se nas ETE com vazões a partir de 150 L/s.

Para melhor entendimento e mensuração deste benefício econômico, seria desperdiçado um valor de R\$125.981,30 por ano, caso os lodos das ETE de pequeno porte fossem desconsiderados, isto é, aquelas ETE de Porto Alegre que atendem vazões inferiores a 150 L/s. Ainda, este valor desperdiçado representa aproximadamente 35,04% do custo médio com energia elétrica nestas estações pequenas, totalizando um valor anual de R\$359.531,17. Vale frisar que este valor diz respeito somente ao aproveitamento energético do lodo, desconsiderando os benefícios econômicos e ambientais com a eliminação do transporte de lodo em longas distâncias, sua respectiva disposição final em aterro sanitário e ainda ao fato de que a energia gerada na própria área de consumo dispensa os significativos custos associados às linhas de transmissão de energia.

6 CONCLUSÕES

Para o desenvolvimento do estudo, dentre as 10 (dez) estações atualmente em operação no município de Porto Alegre, foram adotadas 7 (sete). Essa seleção foi realizada a partir do entendimento que quanto maior a geração de lodo, maior será a produção de biogás, e conseqüentemente, maior geração de energia. Adotou-se, portanto, as 7 (sete) estações que possuem maior frequência de remoção de lodo, sendo aquelas que possuem o sistema de tratamento de lodos ativados e UASB.

Com base na estimativa da capacidade de produção de lodo destas 8 (oito) ETE, entendeu-se que a geração de lodo varia significativamente de estação para estação, já que as vazões e populações contribuintes também diferem consideravelmente. Portanto, ao considerar fatores econômicos e logísticos, adotou-se duas (2) estações centrais para reunir o lodo gerado. Definiu-se, portanto, a ETE São João/Navegantes como a ETE central da zona norte, em razão do seu grande porte, maior proximidade com as outras estações e o fato de já possuir tratamento de lodo por digestão anaeróbia. Já a ETE Serraria foi definida como a ETE central da zona sul, em razão de tratar a maior vazão afluyente do município e, conseqüentemente, gerar a maior quantidade de lodo.

Por conseguinte, o aproveitamento do biogás nestas estações centrais mostrou-se interessante, apresentando um relevante potencial energético. A economia com a energia anual gerada a partir do biogás é de aproximadamente 40% do custo gasto com energia elétrica considerando as 7 (sete) estações avaliadas. Ainda que as ETE avaliadas não sejam autossuficientes em energia, o potencial energético estimado no presente trabalho é capaz de suprir parte da demanda de energia elétrica consumida na própria estação. Logo, como afirmam Jordão & Pessoa (2017), sempre que técnica e economicamente viável o gás gerado deve ser aproveitado na própria estação de tratamento.

Além dos benefícios energéticos do aproveitamento do biogás para a geração de energia, os resultados apresentados neste trabalho indicam que o biogás é bastante competitivo do ponto de vista financeiro. Isso porque a economia financeira total anual calculada para as estações de tratamento de esgoto avaliadas ultrapassa os R\$6,27 milhões de reais.

Importante lembrar ainda que não foram contemplados neste estudo os valores referentes ao transporte e destinação final do lodo. Acredita-se, porém, que os valores

gastos com estes serviços (que são elevados) serão consideravelmente reduzidos, uma vez que as distâncias de transporte do lodo serão reduzidas em até 5 (cinco) vezes e os custos com a disposição final de lodo em aterros serão eliminados. Além dos benefícios econômicos, pode-se considerar os inúmeros benefícios ambientais associados à redução das distâncias de transporte do lodo, dado que são reduzidos também o consumo de combustível e a geração de poluentes atmosféricos.

Vale destacar ainda que os custos associados às adaptações no sistema existente no biodigestor da ETE São João/Navegantes e de instalação do sistema na ETE Serraria não foram considerados no presente estudo. Portanto, o conhecimento sobre os custos associados com as adaptações necessárias, com as novas instalações e com o lodo, como o transporte e a disposição final, são muito importantes para garantir uma análise de viabilidade adequada sobre um projeto ao longo da sua vida útil. Para isso, estudos adicionais considerando essa avaliação ambiental e financeira são necessários. A partir dessa análise completa, seguramente, o aproveitamento do biogás na própria estação de tratamento se tornará ainda mais atrativo e viável a longo prazo para as ETE do município de Porto Alegre.

Dado o exposto, com a ampliação dos serviços de tratamento de esgoto e a busca por energias renováveis, a produção de lodo pode ser transformada em oportunidade. O aproveitamento do biogás tem-se revelado benéfico em todos os sentidos, de modo que auxilia na sustentabilidade do setor de tratamento de esgotos, garantindo a saúde pública, ambiental e econômica deste serviço.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) (Brasil). **Atlas esgotos : despoluição de bacias hidrográficas**. Brasília: [s. n.], 2017. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf. Acesso em: 14 jul. 2022.
- ANDREOLI, Cleverson V.; SPERLING, Marcos Von; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte, MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA - UFMG) e Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), 2001. v. 6.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, 24 dez. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7229**: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro, 01 set. 1993.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do cidadão**: Correção de valores. [S.l.]: 9 set. 2022. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPublico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores#>. Acesso em: 9 set. 2022.
- Chernicharo, CA. (coordenador) - "**Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios - Coletânea de Trabalhos Técnicos, Volume 1**". [S.l.]: FINEP/PROSAB, 2001.
- CIDADES@. Brasil, 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- CRVR. 2020. Disponível em: <https://crvr.com.br/area-de-atuacao/central-de-residuos-do-recreio/>. Acesso em: 14 set. 2022.
- DMAE *et al.* **Plano Municipal de Saneamento Básico**: Diagnóstico. Porto Alegre, dezembro 2015. v. 1. Disponível em: http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dmae/usu_doc/pmsb_2015_volume_1_diagnostico.pdf. Acesso em: 6 jul. 2022.
- DMAE; PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. **DADOS ETE DMAE**. 2 p. Porto Alegre, 2022.
- DMAE. **Anexo_19705443_ETE.Dmae**. Microsoft *Excel*. Porto Alegre, 2022.
- G1 (São Paulo). Sistema Cantareira atinge 8,1%, menor índice já registrado em SP. **G1**, São Paulo, 21 set. 2014. Disponível em: <https://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2014/09/sistema-cantareira-atinge-81-menor-indice-ja-registrado-em-sp.html>. Acesso em: 19 jul. 2022.

GEHLING, GINO. **12. Resíduos Sólidos Industriais**. 2020. 8 p. Notas de aula.

GOVERNO FEDERAL. Ministério das Cidades; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Relatório de esgotamento sanitário municipal: Porto Alegre, RS. **Atlas esgoto: Despoluição de bacias hidrográficas**, Porto Alegre, 2017. Disponível em: https://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Atlas_Esgoto/Rio_Grande_do_Sul/Relatorio_Geral/Porto_Alegre.pdf. Acesso em: 29 jul. 2022.

IBGE. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. [S.l.]: 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. Acesso em: 20 jul. 2022.

IGP-M: Resultados 2022. [S.l.]: 2 jan. 2022. Disponível em: <https://portal.fgv.br/noticias/igpm-resultados-2022>. Acesso em: 9 set. 2022.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento**: 2022. São Paulo, 21 mar. 2022. Disponível em: http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/documentacao_e_divulgacao/doc_biblioteca/bibli_servicos_produtos/BibliotecaDigital/BibDigitalLivros/TodosOsLivros/Ranking-do-Saneamento_2022.pdf. Acesso em: 6 jun. 2022.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8ª ed. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental: Rio de Janeiro, 2017.

MARQUES, Luísa Santana. **Avaliação dos benefícios ambientais e econômicos do aproveitamento do biogás do digestor anaeróbio para tratamento de lodo de esgoto**. Orientador: Aline Sarmiento Procópio. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.

METCALF & EDDY. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555240/>. Acesso em: 14 jul. 2022.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES *et al.* **Panorama e potencial de crescimento da produção de biogás e biometano no Sul do Brasil**: Nota técnica. Brasília, outubro 2020. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2021/09/121K-Panorama-e-potencial-de-crescimento-da-producao-de-biogas-e-biometano-no-Sul-do-Brasil-Nota-Tecnica.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2022.

PAINEL de preços. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/precos/painel-precos>. Acesso em: 1 set. 2022.

PROBIOGÁS (Brasil). **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. 1. ed. Brasília, 2015a. Disponível em: <https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-guia-etes.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2022.

PROBIOGÁS (Brasil). **Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás**. 1. ed. Brasília, 2017. Disponível em:

<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/Probiogas-EVTE-ETEs.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2022.

PROBIOGÁS (Brasil). **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás**. 1. ed. Brasília, 2015b. Disponível em: <https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-tecnologias-biogas.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2022.

RICHTER, Carlos A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2009.

SANTOS, Filipe Nepomuceno Bicalho. **Análise comparativa dos custos operacionais de 44 estações de tratamento de esgoto na região sudeste do Brasil**. Orientador: César Rossas Mota Filho. 2018. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/31029/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_FilipeBicalho_RFinal_20190903.pdf. Acesso em: 19 jul. 2022.

SEEG. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970 – 2020**. [S.l.]: 2021. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em: 20 jul. 2022.

SISTEMA DE GESTÃO DMAE (SGD); DMAE; PREFEITURA DE PORTO ALEGRE. Dados Gerais 2020. **Dados Gerais**, Porto Alegre, 2020. Disponível em: http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dmae/usu_doc/dados_gerais_2020_r_etificado.pdf. Acesso em: 28 jul. 2022.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto: Gestão Administrativa e Financeira ano de referência 2020**. Brasília: março 2022. Disponível em: [DIAGNOSTICO_TEMATICO_GESTAO_ADMINISTRATIVA_FINANCEIRA_AE_SNIS_2022.pdf](https://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2021.pdf). Acesso em: 09 set. 2022.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto: Visão Geral ano de referência 2020**. Brasília: dezembro 2021. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2021.pdf. Acesso em: 19 jul. 2022.

SOUZA, Cleber. Com crise hídrica, Aneel mantém em setembro bandeira vermelha 2, a mais cara. **CNN Brasil**, São Paulo, 27 ago. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/com-crise-hidrica-aneel-mantem-em-setembro-bandeira-vermelha-2-a-mais-cara/>. Acesso em: 19 jul. 2022.

SPERLING, Marcos von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. rev. Belo Horizonte, MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA); Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. v. 1.

SPERLING, Marcos von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. rev. Belo Horizonte, MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA); Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. v. 1.

Valente, V. B. (2015). **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.