

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ENGENHARIA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

RODOLFO LOUREIRO ESCUDEIRO

**Estudo de caso para produção de biogás a partir do tratamento de esgoto doméstico em  
vista do novo marco do saneamento básico**

São Paulo  
2022

RODOLFO LOUREIRO ESCUDEIRO

**Estudo de caso para produção de biogás a partir do tratamento de esgoto doméstico em  
vista do novo marco do saneamento básico**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética.

Orientadora: Profa Dra Suani Teixeira Coelho

São Paulo  
Agosto / 2022

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

**Ficha Catalográfica  
EEL USP**

Escudeiro, Rodolfo

Estudo de caso para produção de biogás a partir do tratamento de esgoto doméstico em vista do novo marco do saneamento básico/ Rodolfo Loureiro Escudeiro; Profa. Dra. Suani Teixeira Coelho –São Paulo, 2022.

74 f.

Monografia – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.

1. Biogás 2. Esgoto 3. Aproveitamento 4. Energia Elétrica

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais, Marcos e Marli, que sempre me apoiaram nas minhas decisões e que me ajudaram e ajudam muito na minha rotina extenuante de viagens a trabalho. Também agradeço à minha irmã, Heloisa, que sempre esteve pronta para tirar as minhas dúvidas em relação a recursos hídricos em áreas urbanas, além das dicas valiosas em softwares de desenho. Agradeço também a Santorini Engenharia, que ao longo desses mais de seis anos de jornada me proporcionou inúmeras experiências na área de eficiência energética. Por fim, agradeço aos meus amigos, que através de conversas sérias ou alegres, sempre souberam me fazer distrair das obrigações do dia a dia.

## RESUMO

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), para o ano de 2020, nem 50% do esgoto gerado no Brasil seguia para tratamento adequado. O Instituto Trata Brasil estimou que, apesar dos ganhos com a universalização do acesso ao saneamento básico serem da ordem de até um trilhão de reais ao longo de vinte anos, os investimentos necessários seriam da ordem de 22 bilhões de reais anuais. Para estabelecer regras claras e aumentar a participação do setor privado, foi promulgado em 2020 o Novo Marco Legal do Saneamento cujo objetivo é o atingimento da meta de 99% da população com abastecimento de água tratada e 90% da população com coleta dos esgotos até 31 de dezembro de 2033. Dois dos maiores gastos de uma planta de tratamento de esgoto são a disposição do lodo gerado em diferentes etapas do processo e a energia elétrica. Dependendo do método de tratamento adotado, a etapa biológica do processo pode gerar biogás, que é composto majoritariamente de metano. Esse biogás pode ser queimado para gerar energia térmica para secagem de lodo ou utilizado em geradores de energia elétrica. O objetivo desse trabalho foi comparar quantitativamente e qualitativamente os tratamentos tradicionais, que não produzem biogás, com alternativas que o produzem. Também foram feitas comparações entre as diferentes utilizações do biogás, indicando quais são mais atrativas. O estudo de caso foi aplicado à cidade de Santo André/SP, pois a cidade já possui grande abrangência na coleta de esgoto, mas uma grande defasagem em relação ao tratamento desse esgoto. Observando os resultados apresentados, pode-se perceber que para o estudo de caso proposto, as alternativas que indicam um uso mais nobre para o biogás podem ser bastante atraentes do ponto de vista econômico e ambiental. Apenas a utilização do biogás para a secagem do lodo não torna os projetos lucrativos, mas a partir do momento em que se estudam alternativas em que se produz energia elétrica, os projetos começam a ficar mais atraentes financeiramente.

Palavras-chave: Biogás. Marco Legal. Investimentos. Energia Elétrica. Energia Térmica.

## ABSTRACT

According to the National System of Information for Sanitation (SNIS), in 2020, not even 50% of the domestic sewage generated in Brazil was correctly treated. The “Institute Treatment Brazil” estimated that, despite the capital gains obtained with the universalization of basic sanitation being around 22 trillion Brazilian Reais throughout twenty years, the necessary investment is around 22 billion Brazilian Reais each year. In order to establish clear rules and increase the participation of the private sector, it was stated the New Regulatory Mark for Sanitation, which aims to reach 99% of the population with treated water and 90% of the population with sewage collection until December 31st of 2033. The major costs in a sewage treatment plant are the disposal of the sludge generated in different parts of the treatment and the electric energy for the plant. Depending on the treatment method, the biological step can generate biogas, which is mainly composed of methane. This biogas can be burned to generate thermal energy to dry the sludge or be used in generators for electric energy. The aim of this work was to compare quantitatively and qualitatively the traditional methods of sewage treatment, which do not generate biogas, and the alternatives that produce it. Moreover, different uses for the biogas were analysed, indicating which ones were more attractive. The study case was applied to the city of Santo André/SP because the city already collects most of its domestic sewage, but there is a gap in the treatment of this effluent. The results show that, for the proposed study case, the alternatives that indicate a more noble use for the biogas can be very attractive from an economic and environmental point of view. Using it only to dry the sludge is not financially attractive, but alternatives that include electric energy production can become profitable.

Keywords: Biogas. Legal Mark. Investments. Electric Energy. Thermal Energy.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Localização dos 20 melhores e 20 piores municípios em relação ao saneamento básico.....	18
<b>Figura 2.2</b> - Evolução do índice de abastecimento de água no Brasil.....	19
<b>Figura 2.3</b> - Cobertura do abastecimento de água por Macrorregião.....	20
<b>Figura 2.4</b> - Tipos de impurezas no esgoto sanitário.....	21
<b>Figura 2.5</b> - Índice de atendimento urbano de esgoto. ....	21
<b>Figura 2.6</b> - Porcentagem do esgoto tratado em relação à água consumida em áreas urbanas.	
.....	22
<b>Figura 2.7</b> - Aproveitamento dos resíduos sólidos secos no Brasil em 2020.....	23
<b>Figura 2.8</b> - Destino dos resíduos sólidos no Brasil em 2020. ....	24
<b>Figura 2.9</b> - Etapa de gradeamento com a caixa de areia ao fundo. ....	28
<b>Figura 2.10</b> - Etapas do Tratamento Preliminar. ....	28
<b>Figura 2.11</b> - Esquema de um decantador primário. ....	29
<b>Figura 2.12</b> - Etapas biológicas durante a digestão anaeróbia.....	33
<b>Figura 2.13</b> - Usos do Biogás. ....	35
<b>Figura 2.14</b> - Secagem direta e indireta do lodo.....	36
<b>Figura 2.15</b> - Ciclo de uma turbina a gás.....	37
<b>Figura 2.16</b> - Esquema de um reator UASB.....	40
<b>Figura 2.17</b> - Esquema de um digestor de lodo CSTR.....	41
<b>Figura 3.1</b> - Fluxograma apenas com digestor. ....	45
<b>Figura 3.2</b> - Fluxograma com digestor e UASB.....	45
<b>Figura 3.3</b> - Fluxograma tratamento primário. ....	48
<b>Figura 3.4</b> - Sistema de lodos ativados. ....	50
<b>Figura 3.5</b> - Fluxograma do digestor. ....	53
<b>Figura 3.6</b> - Fluxograma do tratamento anaeróbio com reator UASB. ....	56

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Composição típica do esgoto doméstico .....	26
<b>Tabela 2.2</b> - Composições típicas do biogás.....	34
<b>Tabela 2.3</b> - Requisitos para a utilização de biogás em diferentes processos.....	42
<b>Tabela 3.1</b> - Dados da corrente de entrada. ....	47
<b>Tabela 3.2</b> - Parâmetros típicos para um reator de lodos ativados. ....	52
<b>Tabela 3.3</b> - Dados da corrente para o caso somente com digestor.....	56
<b>Tabela 3.4</b> - Dados da corrente para o caso com digestor e UASB.....	57
<b>Tabela 4.1</b> - Teores de umidade de lodo após diferentes etapas de adensamento.....	58
<b>Tabela 4.2</b> - Tabela de valores do gás natural fornecido pela Comgás a 1 atm e 20°C. ....	60
<b>Tabela 4.3</b> - Gastos com Gás Natural e disposição do lodo. ....	60
<b>Tabela 4.4</b> - Inflação acumulada entre 2017 e 2021.....	61
<b>Tabela 4.5</b> - Preço dos equipamentos para o caso somente com digestor (Caso 3). ....	61
<b>Tabela 4.6</b> - Valor presente líquido do investimento com digestor e apenas secagem do lodo (Caso 3). ....	61
<b>Tabela 4.7</b> - Utilização do Biogás para geração de energia elétrica para consumo próprio....	63
<b>Tabela 4.8</b> - Custo de investimento para aproveitar energia térmica e elétrica com biogás do digestor. ....	63
<b>Tabela 4.9</b> - Valor presente líquido da proposta com biogás do digestor para secagem de lodo e geração de energia elétrica.....	64
<b>Tabela 4.10</b> - Custo de investimento para aproveitar energia térmica e elétrica com biogás do digestor e reator UASB. ....	64
<b>Tabela 4.11</b> - Valor presente líquido da proposta com biogás do digestor e reator UASB para secagem de lodo e geração de energia elétrica. ....	65
<b>Tabela 4.12</b> - Utilização do Biogás para geração de energia elétrica para consumo próprio e venda de excedente.....	66
<b>Tabela 4.13</b> - Custo de investimento para aproveitar energia térmica e elétrica com biogás do digestor, considerando venda de excedente.....	66
<b>Tabela 4.14</b> - Valor presente líquido da proposta com biogás do digestor para secagem de lodo e geração de energia elétrica para autoconsumo e venda de excedente. ....	67
<b>Tabela 4.15</b> - Custo de investimento para aproveitar energia térmica e elétrica com biogás do digestor e do reator UASB, considerando venda de excedente. ....	68

**Tabela 4.16** - Valor presente líquido da proposta com biogás do digestor e do reator UASB para secagem de lodo e geração de energia elétrica para autoconsumo e venda de excedente.....68

**Tabela 4.17** - PLD para ter lucro na opção com reator UASB.....69

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho_{CO_2}$	Densidade do gás carbônico nas condições de saída do digestor (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{CH_4}$	Densidade do metano nas condições de saída do digestor (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{BD}$	Densidade do biogás na saída do digestor (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_E$	Densidade de entrada do sistema (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_F$	Densidade do efluente final (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{ED}$	Densidade do efluente do digestor (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{ED}$	Densidade do efluente líquido do digestor (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{ETP}$	Densidade do efluente líquido do tratamento primário (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{CO_2}$	Densidade do gás carbônico (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_L$	Densidade do lodo para tratamento (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{LP}$	Densidade de lodo primário (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{LS}$	Densidade lodo secundário (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{CH_4}$	Densidade do metano (kg/m <sup>3</sup> )
$\eta_{TP-DBO}$	Eficiência de remoção de DBO no tratamento primário (adimensional)
$\eta_{TP-DQO}$	Eficiência de remoção de DQO no tratamento primário (adimensional)
$\eta_{TP-ss}$	Eficiência de remoção de sólidos suspensos totais no tratamento primário (adimensional)
$\theta_c$	Idade do lodo ativado (s)
$Car$	Custo de carga (R\$/Caminhão)
$C_D$	Custo de Descarte (R\$/mês)
$C_{E-ss}$	Concentração de sólidos suspensos totais na entrada do sistema (kg/m <sup>3</sup> )
$C_{ED-ss}$	Concentração de sólidos suspensos totais do efluente líquido do digestor (kg/m <sup>3</sup> )
$C_{LP-ss}$	Concentração de sólidos suspensos totais no lodo primário (kg/m <sup>3</sup> )
$C_{ETP-ss}$	Concentração de sólidos suspensos totais no efluente líquido do tratamento primário (kg/m <sup>3</sup> )
$C_{LS-ss}$	Concentração de sólidos suspensos do lodo secundário (kg/m <sup>3</sup> )
$C_{L-ss}$	Concentração de sólidos suspensos no lodo para tratamento (kg/m <sup>3</sup> )
$C_{KM}$	Custo de frete (R\$/km)
$D$	Distância percorrida (km)
$D_A$	Custo de disposição do lodo no aterro (R\$/kg)

$DBO_E$	DBO de entrada do sistema ( $\text{kg/m}^3$ )
$DBO_{ED}$	DBO do efluente líquido do digestor ( $\text{kg/m}^3$ )
$DBO_{ETP}$	DBO do efluente líquido do tratamento primário ( $\text{kg/m}^3$ )
$DBO_{LP}$	DBO no lodo primário ( $\text{kg/m}^3$ )
$DQO_{apli-D}$	DQO aplicada no digestor ( $\text{kg/m}^3$ )
$DQO_{CH4-D}$	DQO convertida em metano no reator anaeróbio ( $\text{kg/m}^3$ )
$DQO_E$	DQO de entrada do sistema ( $\text{kg/m}^3$ )
$DQO_{ED}$	DQO do efluente líquido do digestor ( $\text{kg/m}^3$ )
$DQO_{ETP}$	DQO do efluente líquido do tratamento primário ( $\text{kg/m}^3$ )
$DQO_{LP}$	DQO no lodo primário ( $\text{kg/m}^3$ )
$DQO_{LS}$	DQO do lodo secundário ( $\text{kg/m}^3$ )
$f_b$	fração biodegradável dos sólidos suspensos voláteis no reator de lodo ativado (adimensional)
$K$	DQO correspondente a 1 mol de CH <sub>4</sub> ( $\text{kgDQO/mol}$ )
$K_d$	coeficiente de respiração endógena ( $\text{s}^{-1}$ )
$K(T)$	Fator de correção de produção de metano no reator anaeróbio ( $\text{kg/m}^3$ )
$M_L$	Massa de lodo a ser descartada (kg/dia)
$P$	Pressão (Pa)
$P_{lodo}$	Produção de lodo no digestor (kg/s)
$P_{XV}$	Produção de lodo ativado (kg/s)
$Q_{BD}$	Vazão de biogás no digestor ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_{CH4-D}$	Vazão de metano produzido no reator anaeróbio ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_D$	Vazão na entrada do digestor ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_E$	Vazão de entrada do sistema ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_{ED}$	Vazão do efluente líquido do digestor ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_{ETP}$	Vazão do efluente líquido do tratamento primário ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_F$	Vazão efluente final ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_{LP}$	Vazão de lodo primário ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_L$	Vazão do lodo para tratamento ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_{LS}$	Vazão lodo secundário ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$R$	Constante geral dos gases ( $\text{m}^3\text{Pa/K.mol}$ )
$R_C$	Taxa de recirculação do lodo (adimensional)
$S_0$	DBO total do afluente no reator de lodo ativado ( $\text{kg/m}^3$ )

$S$	DBO solúvel do efluente do reator de lodo ativados ( $\text{kg/m}^3$ )
$t$	Tempo de retenção hidráulica no reator de lodo ativado (s)
$T$	Temperatura (K)
$X_v$	concentração de sólidos em suspensão voláteis no reator de lodo ativado ( $\text{kg/m}^3$ )
$V$	Volume do reator de lodo ativado ( $\text{m}^3$ )
$V_C$	Volume do caminhão ( $\text{m}^3/\text{caminhão}$ )
$V_L$	Volume de Lodo a ser descartado ( $\text{m}^3/\text{dia}$ )
$y_{CO_2-D}$	Fração volumétrica do gás carbônico no biogás do digestor (adimensional)
$Y_p$	Coeficiente de produção celular (adimensional)
$Y_S$	Coeficiente de produção de sólidos no reator anaeróbio (adimensional)
$y_{CH_4-D}$	Fração volumétrica de metano no biogás do digestor (adimensional)

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Panorama atual do saneamento básico no Brasil.....	17
2.1.1. Panorama do abastecimento de água .....	19
2.1.2. Panorama do Esgotamento Sanitário.....	20
2.1.3. Panorama dos Resíduo Sólidos .....	22
2.2. Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020) .....	24
2.3. Etapas do Tratamento de Esgoto .....	26
2.3.1. Tratamento Preliminar.....	27
2.3.2. Tratamento Primário.....	28
2.3.3. Tratamento secundário .....	29
2.3.4. Tratamento Terciário .....	30
2.3.5. Tratamento do lodo.....	30
2.4. Biogás .....	32
2.5. Usos do Biogás .....	34
2.5.1. Caldeiras a gás .....	35
2.5.2. Secadores de Lodo.....	36
2.5.3. Cogeração de eletricidade e calor .....	36
2.5.4. Máquinas Rotativas .....	38
2.5.5. Veículos .....	38
2.5.6. Injeção de biometano na rede .....	39
2.6. Geração de biogás no tratamento anaeróbio.....	39
2.6.1. Tratamento anaeróbio da fase líquida: reatores UASB .....	39
2.6.2. Digestores de lodo .....	41
2.7. Tratamento do biogás .....	42
2.7.1. Sulfeto de Hidrogênio.....	43

2.7.2. Umidade .....	43
2.7.3. Gás Carbônico .....	43
2.7.4. Siloxanos .....	44
2.8. Programa Nacional Metano Zero .....	44
3. METODOLOGIA.....	45
3.1. Fluxograma do processo de tratamento de esgoto.....	45
3.2. População escolhida para o estudo de caso .....	46
3.3. Requisitos para emissão do efluente final .....	46
3.4. Balanços de massa e de DBO/DQO .....	46
3.4.1 Esgoto Bruto.....	47
3.4.2. Tratamento Preliminar e Primário .....	47
3.4.3. Tratamento Secundário.....	50
4. Aproveitamento do Biogás .....	57
4.1. Queima do biogás para secagem do lodo gerado no tratamento .....	57
4.2. Geração de Energia Elétrica .....	62
5. CONCLUSÃO.....	69
BIBLIOGRAFIA .....	71

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o saneamento básico abrange o abastecimento de água, o esgotamento sanitário, a limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos e a drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. Apesar da Constituição Federal Brasileira estabelecer que todos os cidadãos têm direito à saúde, moradia e um meio ambiente ecologicamente equilibrado, o que tem uma relação direta com a abrangência do saneamento básico, dados recentes mostram que a situação ainda está muito longe da ideal. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), para o ano de 2020, cerca de 84,2% dos brasileiros possuíam acesso à rede de distribuição de água, sem considerar aqueles que se utilizam de abastecimento próprio a partir de outras fontes. Adicionalmente, cerca de 55% da população total do país era atendida por redes coletoras de esgoto, que tratavam aproximadamente 80% do que era coletado, de modo que nem 50% do esgoto gerado era tratado em 2020. O SNIS também apontou que tantos os dados de água e esgoto quanto os investimentos em saneamento básico eram desigualmente distribuídos pelo país, com melhores índices no Sul e Sudeste, e piores índices no Norte e Nordeste.

A partir dos dados do SNIS, o Instituto Trata Brasil, em parceria com a Go Associados, faz anualmente um estudo sobre o status do saneamento básico nos 100 maiores municípios brasileiros. Dentre esses municípios, o melhor avaliado foi Santos (SP) e o pior avaliado foi Macapá (AP). Esse estudo evidenciou a existência de uma discrepância entre os 20 melhores municípios em relação aos 20 piores, com uma diferença de acesso à água de 99% para 83% e de acesso à coleta de esgoto de 95% para 32%. Esses dados são um fruto de uma diferença de investimentos per capita em saneamento básico, que são quase três vezes maiores nos 20 municípios mais bem avaliados.

As externalidades positivas de um saneamento básico universal abrangem as mais diversas áreas, desde a saúde pública ao turismo. O Instituto Trata Brasil estimou que os ganhos com a universalização do acesso ao saneamento básico seriam da ordem de até um trilhão de reais ao longo de vinte anos. Contudo, também foi estimado que o grau de investimento para essa universalização seria da ordem de 22 bilhões de reais anuais, que estão muito acima dos atuais 11 bilhões levantados pelo SNIS. Outro ponto levantado pelo SNIS é a alta predominância de agentes públicos nos serviços de saneamento, cujo poder de investimentos é limitado.

Dessa maneira, se fazia necessária uma maior abertura econômica no setor, com o estabelecimento de regras mais claras. Assim, em adição a Lei Federal nº 11.445, de 5 de janeiro

de 2007, conhecida como Marco Legal do Saneamento Básico, foi promulgada a Lei nº 14.026/2020, conhecida como Novo Marco Legal. O principal objetivo dessa nova lei é dar as diretrizes para o atingimento da meta de 99% da população com abastecimento de água tratada e 90% da população com coleta dos esgotos até 31 de dezembro de 2033, prorrogando até, no máximo, 1º de janeiro de 2040, desde que haja anuênciia prévia da agência reguladora.

Porém, além do estabelecimento de regras mais claras e uniformes, o setor só se tornará mais atrativo para a iniciativa privada se os processos de tratamento se tornarem mais eficazes e produtivos. Dentre os maiores custos para o tratamento de esgoto doméstico está a utilização de energia elétrica e térmica para diferentes etapas do processo, principalmente o tratamento biológico e a destinação do lodo gerado.

Atualmente, na etapa de tratamento biológico, a grande maioria das estações de tratamento de esgoto no Brasil utilizam processos aeróbios, ou seja, com a presença de oxigênio. Apesar da grande eficiência de remoção de matéria orgânica, o tratamento aeróbio acarreta grandes custos operacionais tanto por causa do fornecimento constante de oxigênio quanto para a disposição final de uma grande quantidade de lodo, uma vez que ele tem que ser seco para reduzir o seu volume antes de ser direcionado a aterros ou ser utilizado como fertilizante.

Uma das maneiras de tornar o processo mais eficiente é a introdução de uma etapa biológica anaeróbia, que atua na ausência de oxigênio. Esse processo requer menos custos operacionais e gera menos lodo. Além disso, ele também gera um subproduto versátil, que é o biogás. Composto majoritariamente de metano, o biogás pode ser utilizado para geração de calor e/ou energia elétrica dentro da própria planta. Alternativamente, após tratamento adequado, o biogás pode ser purificado a biometano e utilizado em veículos ou ser injetado na rede de distribuição. Todos esses usos para o biogás gerado através do tratamento anaeróbio podem deixar todo o processo de tratamento de esgoto mais viável, atraindo investidores.

Para facilitar ainda mais a implementação de projetos nessas áreas, em março de 2022 foi lançado o Programa Nacional de Metano Zero. Entre as principais medidas adotadas nesse programa está a inclusão de investimentos em biometano no Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (Reidi), o que suspende a cobrança de PIS e COFINS para a aquisição de máquinas, materiais de construção, equipamentos, dentre outros componentes. Linhas de crédito e financiamento específicas para essa área também serão implementadas. Também será criado um sistema de compensação similar ao do crédito de carbono, porém com ênfase em processos que evitem a emissão de metano para a atmosfera.

O objetivo desse trabalho é comparar quantitativamente e qualitativamente os tratamentos tradicionais, que envolvem apenas tratamento aeróbio, com os tratamentos que envolvem também o tratamento anaeróbio de esgoto doméstico. Também serão feitas comparações entre as diferentes utilizações do biogás, indicando quais são mais atrativas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Panorama atual do saneamento básico no Brasil

No Brasil, o saneamento básico abrange o abastecimento de água, o esgotamento sanitário, a limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos e a drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. Apesar da Constituição Federal Brasileira estabelecer que todos os cidadãos têm direito à saúde, moradia e um meio ambiente ecologicamente equilibrado, o que tem uma relação direta com a abrangência do saneamento básico, ele era apenas mencionado no texto constitucional ao se instituírem as diretrizes e competências para a sua implementação.

Esse panorama só foi alterado cerca de 19 anos depois, com a Lei Federal nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, conhecida como Lei de Diretrizes Nacionais de Saneamento Básico (LDNSB), também citada como Marco Legal do Saneamento Básico. Ela foi atualizada e complementada recentemente pelo novo Marco, estabelecido pela Lei nº 14.026/2020.

De acordo com a lei de 2007, todos os cidadãos brasileiros devem ter à sua disposição um saneamento básico de qualidade, fornecido de maneira eficiente, economicamente sustentável, segura e regular. Além disso, devido à abrangência das externalidades positivas e negativas do saneamento básico, a lei diz que ele deve ser planejado em conjunto com diversas outras políticas públicas, como o combate à pobreza, o desenvolvimento regional e o fortalecimento do sistema de saúde. Principalmente após o Marco de 2020, todos os planejamentos nessa área devem ser orientados à universalização do saneamento básico no Brasil.

A Lei nº 11.445/2007 também estabelece o Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab), que foi regulamentado em 2010 e aprovado em 2013 após amplo processo participativo da sociedade. Esse plano deve ser feito com horizonte de 20 anos, avaliado anualmente e revisado a cada quatro anos. Para o monitoramento dos dados e das metas, o Plansab se utilizará do Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA), que ainda está em desenvolvimento, e que será uma versão mais abrangente e detalhada do Sistema

Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Os relatórios apresentando os resultados são feitos anualmente pelo SNIS.

O estabelecimento de bases legais, institucionais e de pesquisa são bastante importantes tanto pelo aspecto humano quanto pelo aspecto econômico, uma vez que todos os benefícios obtidos com a universalização do saneamento básico trariam ganhos de mais de um trilhão de reais ao longo dos 20 anos do Plansab, segundo o Instituto Trata Brasil (Instituto Trata Brasil, 2018). Esse valor já está descontando os custos necessários para essa universalização, que seriam de cerca de 22 bilhões de reais anuais.

O último relatório do SNIS foi disponibilizado em dezembro de 2021. Ele mostra que apesar dos avanços dos últimos anos, ainda há um grande caminho para se alcançar a universalização. A partir desses dados, o Instituto Trata Brasil, em parceria com a Go Associados, faz anualmente um estudo sobre o status do saneamento básico nos 100 maiores municípios brasileiros. Dentre esses municípios, o melhor avaliado foi Santos (SP) e o pior avaliado foi Macapá (AP). Esse estudo evidenciou a existência de uma discrepância entre os 20 melhores municípios em relação aos 20 piores, com uma diferença de acesso à água de 99% para 83% e de acesso à coleta de esgoto de 95% para 32%. Esses dados são um fruto de uma diferença de investimentos per capita em saneamento básico, que são quase três vezes maiores nos 20 municípios mais bem avaliados.



**Figura 2.1** - Localização dos 20 melhores e 20 piores municípios em relação ao saneamento básico.

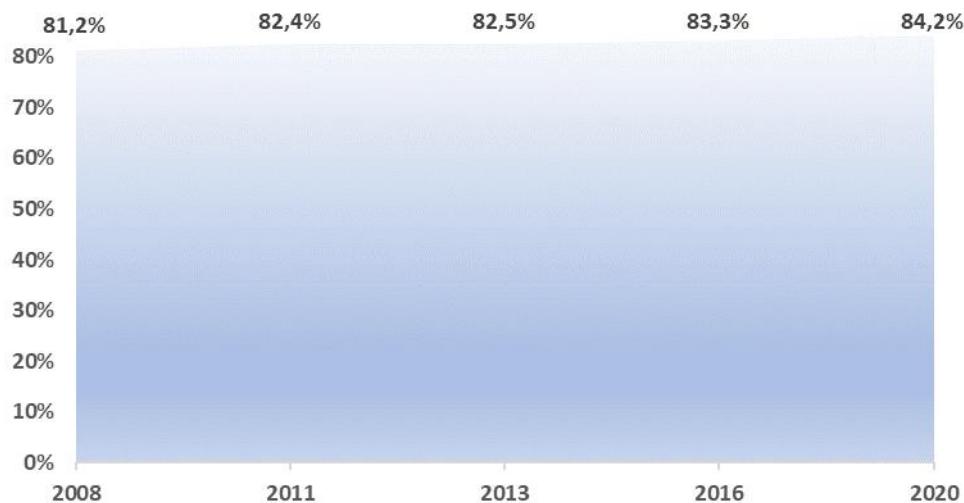
Fonte: Instituto Trata Brasil (2022).

Apesar do presente trabalho focar no tratamento de esgoto sanitário, os principais resultados obtidos pelo SNIS para o abastecimento de água e resíduos sólidos também serão apresentados aqui. Apesar de também impactarem o meio ambiente e corpos d'água, a drenagem e manejo de águas pluviais urbanas está muito mais relacionada a aspectos de urbanismo e regime pluviométrico e não serão abordados aqui.

### **2.1.1. Panorama do abastecimento de água**

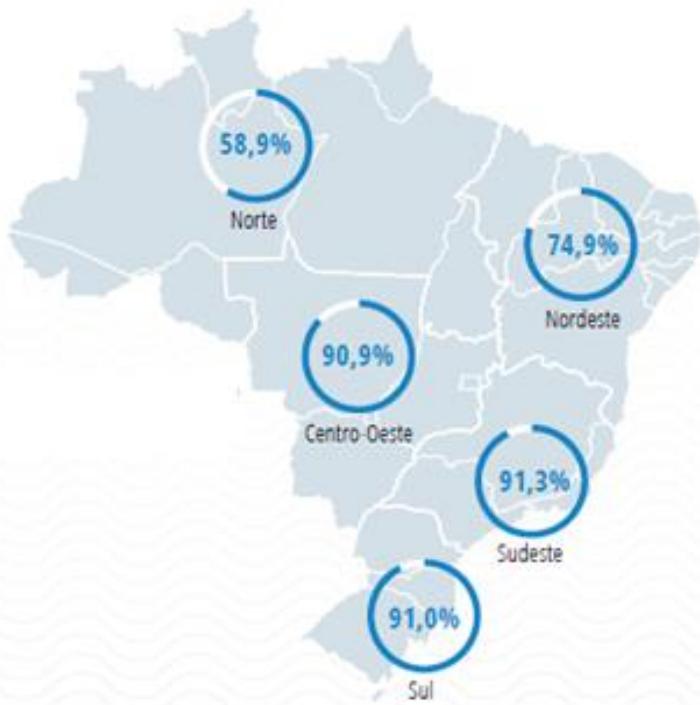
A qualidade da água para consumo humano está intimamente relacionada com a qualidade de vida de uma população. Diversas doenças estão associadas ao consumo de água contaminada com bactérias e vírus, além da proliferação de mosquitos e roedores, que por si só já podem transmitir diferentes patógenos.

Segundo os dados do SNIS publicados em 2021, cerca de 84,2% dos brasileiros possuíam acesso à rede de distribuição de água em 2020, sem considerar aqueles que se utilizam de abastecimento próprio a partir de outras fontes. Nota-se pela Figura 2.2 que apesar do crescimento do alcance do abastecimento ao longo dos anos, o índice ainda está muito aquém do necessário. Além disso, a Figura 2.3 mostra que essa distribuição de acesso é desigual ao redor do Brasil, sendo os índices das regiões Norte e Nordeste bastante inferiores aos índices das outras regiões.



**Figura 2.2 - Evolução do índice de abastecimento de água no Brasil.**

Fonte: Adaptado de Ministério do Desenvolvimento Regional - Secretaria Nacional de Saneamento (2021).



**Figura 2.3 - Cobertura do abastecimento de água por Macrorregião.**

Fonte: Ministério do Desenvolvimento Regional (2021).

### 2.1.2. Panorama do Esgotamento Sanitário

Devido à sua versatilidade e abrangência, a água possui diversas utilidades para a sociedade. No entanto, todas as atividades humanas que envolvem a utilização e água ocasionam na alteração de suas propriedades, sejam elas químicas, biológicas ou físicas. Essa água recebe o nome de esgoto ou água residuária. Tecnicamente falando, a ABNT define esgoto sanitário como despejo líquido constituído de esgotos domésticos e industriais, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária. Contudo, o esgoto industrial só poderá ser lançado no sistema de esgotamento público caso tenha características semelhantes às do esgoto doméstico. Caso contrário, é necessária uma estação de tratamento dentro da indústria.

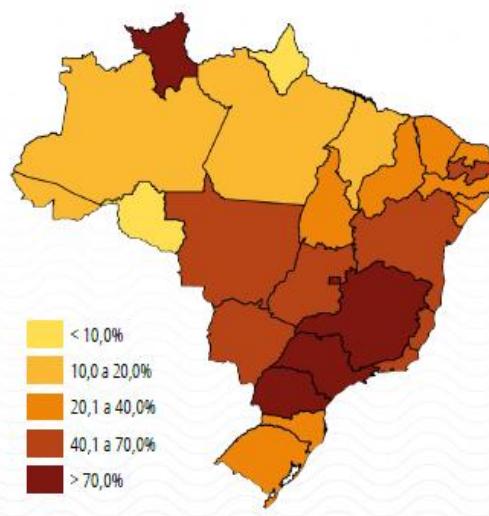
Resumidamente, pode-se dividir as impurezas entre aquelas que alteram as características físicas, químicas e biológicas. Os sólidos suspensos ou dissolvidos e os gases são considerados impurezas físicas. Por sua vez, as características químicas podem ser alteradas por compostos inorgânicos ou orgânicos, sendo que esse último também pode estar relacionado às impurezas de ordem biológica, como bactérias, por exemplo.



**Figura 2.4 - Tipos de impurezas no esgoto sanitário.**

Fonte: Ministério do Desenvolvimento Regional (2021).

O Plano Nacional de Saneamento Básico considera que um atendimento adequado de esgotamento sanitário é alcançado tanto com um sistema de coleta e tratamento de esgoto quanto com soluções alternativas, como fossas sépticas. No entanto, os dados em relação à abrangência do atendimento urbano de esgoto se referem somente ao que é coletado e tratado. Em 2020, cerca de 55% da população total do país era atendida por essas redes. Assim como no caso da água, essa coleta era desigual entre as regiões do país (Figura 2.5).

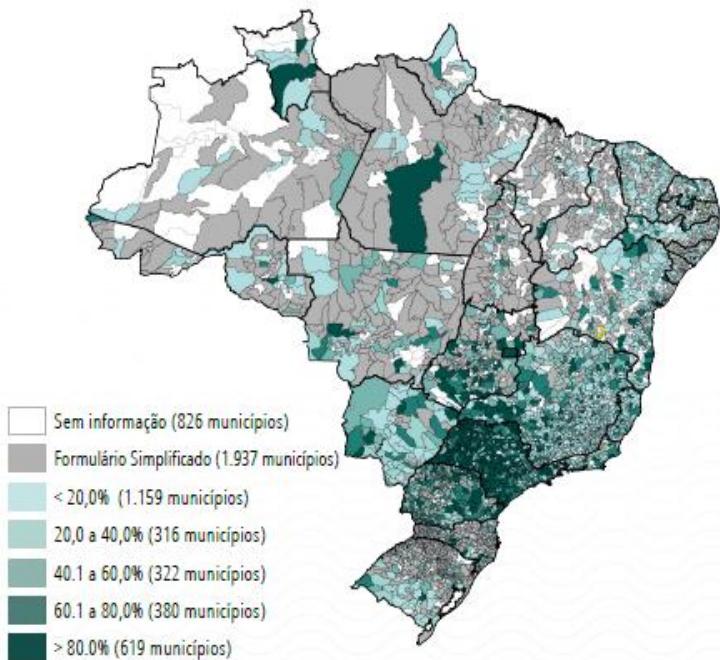


**Figura 2.5 - Índice de atendimento urbano de esgoto.**

Fonte: Ministério do Desenvolvimento Regional (2021).

Outro ponto relevante é que nem todo o esgoto coletado é tratado. Dos 55% da população atendidos pela rede de coleta, cerca de 80% têm esgoto tratado. Dessa maneira, pode-

se inferir que nem 50% do esgoto gerado é tratado no Brasil. Isso fica bem exemplificado pela Figura 2.6, que mostra a porcentagem de esgoto tratado em relação à água consumida em áreas urbanas.



**Figura 2.6 - Porcentagem do esgoto tratado em relação à água consumida em áreas urbanas.**

Fonte: Secretaria Nacional de Saneamento (2021).

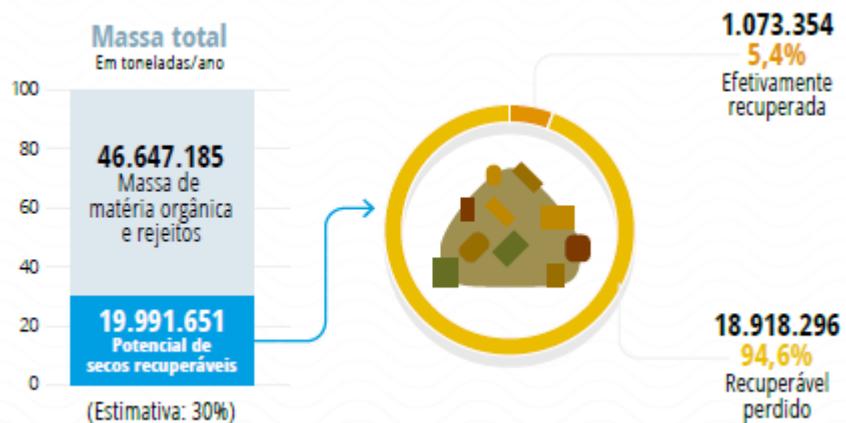
### 2.1.3. Panorama dos Resíduo Sólidos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004) define resíduos sólidos como aqueles, que nos estados sólido e semissólido, são resultados de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Importante lembrar que essa definição também inclui os lodos gerados pelo tratamento de água e esgoto.

Ao contrário do senso comum que associa os resíduos sólidos a lixo sem utilidade, muitos dos itens que são descartados em ambientes urbanos e industriais podem ter algum valor agregado, principalmente metais e outros itens recicláveis. Dessa maneira, quando não se é possível reduzir a geração de determinado resíduo sólido, seu reaproveitamento ou reciclagem é o tratamento mais indicado. As diretrizes para essa área foram estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/2010).

No Brasil, cerca de 90,5% da população era atendida pela coleta de resíduos sólidos através de empresas públicas ou privadas em 2020, totalizando cerca de 66 milhões de toneladas de material coletado. No entanto, a coleta seletiva, que separa os resíduos orgânicos dos

recicláveis, atingiu cerca de apenas 33,9% da população brasileira (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2021). Essa baixa cobertura acaba resultando nos dados apresentados pela Figura 2.7, que indicam que apenas 5,4% dos materiais potencialmente recicláveis foram realmente recuperados. Por sua vez, também foi levantado que apenas cerca de 0,5% da massa orgânica foi aproveitada para fins de compostagem, por exemplo.



**Figura 2.7 - Aproveitamento dos resíduos sólidos secos no Brasil em 2020.**

Fonte: Secretaria Nacional de Saneamento (2021).

A grande maioria dos resíduos sólidos coletados no Brasil é destinada a lixões, aterros controlados ou aterros sanitários. Destes, os lixões são a pior alternativa, uma vez que não há nenhum tipo de controle em relação ao material depositado. Os aterros controlados possuem algum tipo de manejo, com a cobertura do material com terra, mas não proporcionam a proteção para infiltração de chorume no solo ou a possibilidade da recuperação de gás metano gerado na decomposição do material orgânico. Por sua vez, a alternativa mais indicada após outros tipos de uso mais nobre desses resíduos, é o aterro sanitário, que possui diversas medidas de mitigação de impactos ambientais.

Apesar da Política Nacional de Resíduos Sólidos ter determinado que os lixões deveriam deixar de existir, pode-se perceber pela Figura 2.8 que o panorama ainda está longe do ideal no Brasil.



**Figura 2.8** - Destino dos resíduos sólidos no Brasil em 2020.

Fonte: Secretaria Nacional de Saneamento (2021).

## 2.2. Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020)

Observa-se que mesmo após mais de dez anos do primeiro Marco Legal do Saneamento Básico, a Lei Federal nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, os dados de acesso à água e à coleta e tratamento de esgoto no Brasil estão muito longe do ideal, principalmente os dados referentes ao esgoto. Devido aos grandes benefícios do acesso universal a um saneamento básico de qualidade, era necessário que algumas alterações importantes fossem feitas na lei original.

Assim, após alguns anos de tramitação no Congresso, foi aprovada em 2020 a Lei nº 14.026/2020, conhecida popularmente como Novo Marco Legal do Saneamento Básico. O principal objetivo dessa nova lei é dar as diretrizes para o atingimento da meta de 99% da população com abastecimento de água tratada e 90% da população com coleta dos esgotos até 31 de dezembro de 2033, prorrogando até, no máximo, 1º de janeiro de 2040, desde que haja anuência prévia da agência reguladora.

O principal objetivo dessa nova lei é ampliar a concorrência no setor e estabelecer regras e diretrizes claras com abrangência nacional. Anteriormente não havia necessidade de licitação caso a concessão da gestão de água e esgoto fosse feita à uma empresa municipal ou estadual. Como resultado, cerca de 90% das concessões de água eram dadas a empresas públicas, sendo 75,6% para as estaduais e 13,6% para as municipais (13,6), sobrando pouco espaço para as empresas privadas (Ministério do Desenvolvimento Regional - Secretaria Nacional de Saneamento, 2021). Além disso, dos contratos regionais vigentes de abastecimento de água em 2020 no Brasil, cerca de 14,5% já estavam vencidos. No caso do esgotamento sanitário, o alcance de prestadores regionais ou municipais é ainda maior, chegando até mais de 95% dos municípios que forneceram dados ao SNIS (Ministério do Desenvolvimento Regional - Secretaria Nacional de Saneamento, 2021).

Somado a esse quase monopólio estatal no saneamento básico, observou-se que no ano de 2020 foram investidos 5,89 e 6,02 bilhões de reais em esgotamento e abastecimento de água, respectivamente (Ministério do Desenvolvimento Regional - Secretaria Nacional de Saneamento, 2021). Mesmo somados, esses valores estão muito abaixo dos 22 bilhões anuais estimados pelo Instituto Trata Brasil para que se alcance as metas do estabelecidas pelo novo marco. Portanto, o investimento de mais capital privado se faz necessário.

Como o saneamento básico é uma atividade econômica exercida na forma de monopólio natural, onde não é possível existir infraestruturas concorrentes em uma mesma área, para que o capital privado fosse atraído o ambiente de contratação e regulação deveria se tornar mais claro. O primeiro passo para isso foi alterar as competências e atribuições da Agência Nacional de Águas (ANA). Anteriormente, havia diversas normas de referências no setor de saneamento, o que causava confusão. Agora, a ANA estabelece os padrões mínimos de qualidade dos serviços, que deverão ser seguidos por todas as agências regulatórias infracionais. Além disso, a Lei nº 14.026/2020 dita que outras normas de referência que a ANA irá estabelecer são referentes às revisões e reajustes tarifários, contabilidade regulatória, indicadores, governança das agências, reversibilidade de ativos, entre outras.

Outro ponto bastante importe do novo marco é a possibilidade da formação de blocos regionais para concessão. Esse é um grande avanço pois possibilita ganho de escala para o investidor e a inclusão de municípios e regiões de diferentes portes. Assim, pode-se formar blocos que contenham tanto municípios cujo saneamento seja superavitário quanto municípios sejam deficitários, que dificilmente atrairiam investimentos isoladamente. Os Estados tiveram até julho de 2021 para a definição dos blocos de municípios. A formação desses blocos é condicionante para a alocação de recursos da União, salvo casos de contratos firmados antes da Lei Federal nº 11.445. Caso um município não queira fazer parte de um bloco, somente poderá utilizar recursos privados para seu plano municipal de saneamento básico.

Caso sejam feitos estudos que demonstrem a inviabilidade econômico-financeira da universalização em 2033, mesmo após a formação dos blocos, fica permitido o adiamento do prazo, desde que não ultrapasse 1º de janeiro de 2040 e haja anuênciia prévia da agência reguladora.

É importante mencionar que sob a perspectiva do Novo Marco do Saneamento, todos os contratos deverão planejar e monitorar a expansão dos serviços, a redução de perdas na distribuição de água tratada, a qualidade na prestação dos serviços, a eficiência e o uso racional da água, da energia e de outros recursos naturais e o reuso de efluentes sanitários e aproveitamento de águas de chuva.

Portanto, o presente trabalho foca em tornar mais eficiente o processo de tratamento de esgoto, de modo que a viabilidade econômica seja mais facilmente alcançada dentro do prazo estabelecido pela lei.

### 2.3. Etapas do Tratamento de Esgoto

O esgoto sanitário é composto basicamente de 99,8% de água em composição volumétrica, sendo o restante de sólidos suspensos ou dissolvidos, sejam eles orgânicos ou não. As composições e a concentrações dos compostos no esgoto são variáveis com a sua origem, porém a Tabela 2.1 mostra alguns valores médios para esgoto de origem doméstica. Adicionalmente, também é importante a concentração de  $SO_4^{2-}$ , que irá impactar na produção de H<sub>2</sub>S durante a digestão anaeróbia. Normalmente as suas concentrações variam de 20mg a 100mg/L (Ministério das Cidades, 2015).

**Tabela 2.1** - Composição típica do esgoto doméstico.

PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO		
	UNIDADE	FAIXA	TÍPICO
<b>Sólidos Totais</b>	mg/L	700 – 1350	1100
Em suspensão	mg/L	200 – 450	350
Fixos	mg/L	40 – 100	80
Voltelés	mg/L	165 – 350	320
Dissolvidos	mg/L	500 – 900	700
Fixos	mg/L	200 – 550	400
Voltelés	mg/L	200 – 350	300
Sedimentáveis	mg/L	10 – 20	15
<b>Matéria orgânica</b>			
DBO <sub>5</sub>	mg/L	250 – 400	300
DQO	mg/L	450 – 800	600
DBO <sub>2000</sub>	mg/L	350 – 600	450
<b>Nitrogênio total</b>	mgN/L	35 – 60	45
Nitrogênio orgânico	mgN/L	15 – 25	20
Amônia	mgNH <sub>3</sub> /L – N/L	20 – 35	25
Nitrito	mgNO <sub>2</sub> /L – N/L	~0	~0
Nitrato	mgNO <sub>3</sub> /L – N/L	0 – 1	~0
<b>Fósforo</b>	mgP/L	4 – 15	7
Fósforo orgânico	mgP/L	1 – 6	2
Fósforo Inorgânico	mgP/L	3 – 6	5
<b>pH</b>	–	6,7 – 8,0	7,0
Alcalinidade	mgCaCO <sub>3</sub> /L	100 – 250	200
<b>Metais pesados</b>	mg/L	traços	traços
<b>Compostos orgânicos tóxicos</b>	mg/L	traços	traços

Fonte: Adaptado de Ministério das Cidades (2015).

Assim como a composição do esgoto varia com a sua origem, o processo de tratamento dependerá tanto da composição quanto dos requerimentos para a disposição do efluente tratado. Esses requerimentos dependem da legislação local e/ou do uso do efluente, como por exemplo, a utilização do efluente dentro de algum processo industrial como água de resfriamento ou aquecimento.

No entanto, um tratamento completo do esgoto sanitário consistirá nas seguintes etapas:

- Tratamento preliminar
- Tratamento primário
- Tratamento secundário
- Tratamento terciário
- Tratamento da fase sólida (lodo gerado durante o tratamento)

Nem todos os processos conterão todas essas etapas, porém todas serão descritas aqui.

### **2.3.1. Tratamento Preliminar**

Apesar de ser constituído majoritariamente por água e material orgânico suspenso ou dissolvido, o esgoto doméstico também possui sólidos grosseiros e areia. Eles são provenientes do descarte incorreto de materiais e das ligações clandestinas de água de chuva diretamente na rede de esgoto.

Esses sólidos grosseiros e areia ocasionam uma grande gama de problemas caso não sejam removidos, como entupimento e danos estruturais em equipamentos e bombas. Além disso, muitos são sólidos pouco degradáveis que poderão influenciar negativamente nas etapas biológicas do tratamento. Portanto, um bom tratamento preliminar que remova essas impurezas é fundamental para o bom funcionamento da planta inteira (SPERLING, 1996).

A primeira etapa após a medição do esgoto é a remoção de sólidos grosseiros, que é normalmente feita com um conjunto de grades de diferentes dimensões, como na Figura 2.9. A remoção do material retido pode ser feita de maneira automatizada ou manual. Em seguida, o esgoto segue para uma caixa de desaneração ou caixa de areia, que nada mais é do que um tanque de sedimentação onde a areia é depositada no fundo por causa da diferença de tamanho e densidade. A remoção da areia sedimentada também é realizada mecanicamente. Na Figura 2.9, a caixa de areia encontra-se logo após o gradeamento.



**Figura 2.9** - Etapa de gradeamento com a caixa de areia ao fundo.

Fonte: Abreu (2020).

Após essas duas etapas, a vazão do esgoto é novamente medida e encaminhada para tanques equalizadores de vazão, que são bastante importantes, uma vez que a vazão pode variar durante o dia e impactar as etapas subsequentes. O equalizador de vazão trabalha para que não ocorra uma variação muito grande da vazão de entrada dos tratamentos primário e secundário



**Figura 2.10** - Etapas do Tratamento Preliminar.

Fonte: Acervo Próprio.

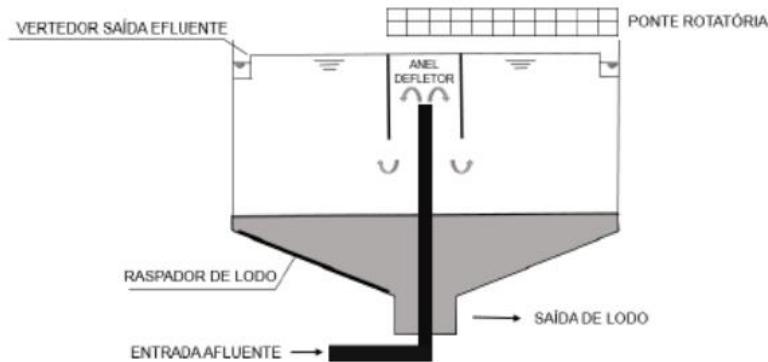
### 2.3.2. Tratamento Primário

Após a remoção dos sólidos grosseiros, ainda há muitos sólidos suspensos não grosseiros, principalmente orgânicos. Como a etapa biológica do tratamento tem a operação mais custosa e complexa, a remoção de parte dessa matéria orgânica pode ser feita de maneira mais barata e eficiente através de tanques de sedimentação, chamados comumente de decantadores primários (SPERLING, 1996).

Esses decantadores podem ser circulares ou retangulares, com alimentação sendo feita ou pelo fundo ou pelo topo do tanque. O material mais denso é removido no fundo enquanto a parte menos densa que a água, como óleos e graxas, é removida pelo topo do tanque. O material sedimentado é normalmente chamado de lodo primário e poderá tanto seguir para as etapas de

condicionamento do lodo ou para uma etapa de digestão anaeróbia, que será abordada mais adiante.

O efluente do decantador primário ainda não tem características próprias para descarte em corpos d'água e seguirá para o tratamento secundário para maior remoção de DBO.



**Figura 2.11** - Esquema de um decantador primário.

Fonte: Lisboa (2015).

### 2.3.3. Tratamento secundário

O tratamento secundário é aquele que envolve digestão da matéria orgânica dissolvida ou suspensa com microrganismos. Ele pode ser dividido em tratamento aeróbio, que ocorre na presença de oxigênio, e tratamento anaeróbico, que ocorre na ausência de oxigênio. Uma etapa complementar à digestão, seja ela anaeróbia ou aeróbia, é a decantação secundária para a remoção do lodo:

**Tratamento Anaeróbio:** É uma etapa não obrigatória no tratamento de esgoto, porém tem sido cada vez mais utilizada devido a diversas vantagens, como a menor geração de lodo em comparação com o tratamento aeróbio, além da geração de biogás, que pode gerar economia em utilidades no processo como um todo (CHERNICHARO, 2007). Dependendo das exigências em relação ao efluente, a remoção de DBO pode não ser suficiente com apenas o tratamento anaeróbico, sendo necessário um tratamento aeróbio posterior. Além disso, caso o biogás não seja aproveitado, ele deve ser queimado para que o metano não seja liberado na atmosfera. Essa etapa é realizada normalmente em reatores de fluxo ascendente (UASB), que serão descritos mais detalhadamente adiante.

**Tratamento Aeróbio:** É uma etapa de tratamento biológico com o auxílio de microrganismos aeróbios, normalmente realizada através de lagoas aeradas ou sistemas de lodos ativados. Realiza uma maior remoção de DBO, porém gera mais lodo. Além disso, a sua implementação e operação é mais custosa devido à necessidade de manter o fornecimento de oxigênio constante. O lodo gerado pode ser encaminhado ao tratamento anaeróbio ou a digestores para redução do seu volume e estabilização (Ministério das Cidades, 2015)

**Decantação secundária:** É um processo similar à decantação primária, porém nesse caso o efluente líquido já pode possuir características físicas, químicas e biológicas dentro dos padrões aceitáveis para disposição ou uso final. O lodo retirado desse decantador pode ir tanto para um digestor para a redução de volume quanto para um processo de secagem e disposição final (Sperling, 2001).

#### **2.3.4. Tratamento Terciário**

Eventualmente os padrões de qualidade do efluente tratado precisam estar em níveis superiores aos exigidos pelos órgãos ambientais, como por exemplo, para a utilização dentro de algum processo industrial ou como água de reuso. Dessa maneira, somente os tratamentos primários e secundários podem não ser suficientes. De maneira geral, o tratamento terciário foca em remover patógenos e compostos dissolvidos.

No caso dos patógenos, as técnicas mais utilizadas são a cloração, o ultravioleta ou o ozônio. As vantagens de se utilizar cloro para essa etapa advém do fato de que o cloro permanece na água após essa etapa, conferindo proteção prolongada, enquanto o ultravioleta apenas elimina os microrganismos presentes no momento do tratamento e não protege contra contaminação posterior (Schorr, 2022).

Para a remoção de compostos dissolvidos, as técnicas mais utilizadas são a osmose reversa, a troca iônica, o carvão ativado, a microfiltração e a adição de compostos químicos. A escolha do método dependerá do que se deseja remover e o custo envolvido (Schorr, 2022).

#### **2.3.5. Tratamento do lodo**

Durante o processo de tratamento de esgoto, o lodo surge em diferentes etapas, sendo o lodo primário, que advém do primeiro decantador e que se constitui majoritariamente de sólidos

suspensos orgânicos, e o lodo secundário ou biológico, que advém do segundo decantador e é construído principalmente de biomassa. Caso exista o tratamento terciário, pode haver uma terceira geração de lodo, que advém de tratamentos químicos da água, como a floculação (BATISTA, 2015).

Apesar do esgoto doméstico ser aproximadamente 99% de água, o processo de tratamento do lodo é uma das etapas mais impactantes na operação de uma estação de tratamento, uma vez que pode ser responsável por até 60% dos custos operacionais (ANDREOLI; LARA; FERNANDES, 1999). Além disso, a quantidade de lodo gerada é proporcional ao tamanho da população, ou seja, para grandes populações, a disposição final do lodo é, por si só, uma grande questão ambiental.

Portanto, o maior objetivo desse tratamento é a redução do volume do lodo, uma vez que ele pode ser constituído de até 95% de água (SPERLING, 1996). As etapas podem variar entre as estações de tratamento, mas normalmente as etapas envolvidas são o adensamento, a flotação, a digestão e a filtração.

1. **Adensadores:** Parte da água é removida do através de um sistema de pás giratórias, que separa parte do lodo da água clarificada, que retorna ao tratamento primário.
2. **Flotadores:** Através de microbolhas, o sólido irá flutuar dentro do tanque, podendo ser removido da água, que fica no fundo.
3. **Digestão:** O lodo adensado entra nos digestores, onde ocorre uma etapa de tratamento biológico anaeróbio, gerando metano e reduzindo o volume de lodo.
4. **Filtração:** Normalmente se utiliza um filtro prensa para que o lodo proveniente do digestor perca ainda mais água, formando “tortas”, que são encaminhadas para secagem ou disposição final.
5. **Secagem:** Para reduzir ainda mais o volume do lodo e facilitar seu transporte, parte da umidade é removida através da secagem.

Por fim, o lodo tratado deverá ser encaminhado para algum destino. Usualmente, existem três opções: incineração, deposição em aterro sanitário e utilização como fertilizante. Para a incineração e deposição em aterro sanitário, não há grandes requerimentos quanto à estabilização e remoção de patógenos. No caso da sua utilização como fertilizante, dependendo da etapa da qual o lodo é proveniente, é necessária estabilização e esterilização antes da sua destinação (Sperling, 2001).

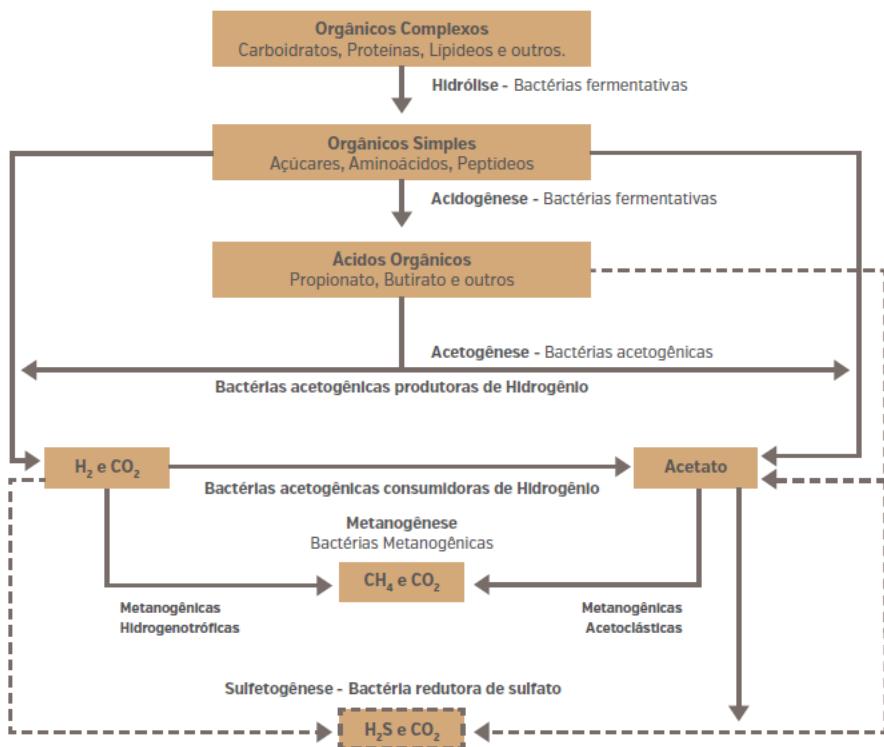
## 2.4. Biogás

Em linhas gerais, o biogás gerado pelo tratamento de esgotos urbanos é o gás resultante da digestão anaeróbia da matéria orgânica, ou seja, da decomposição com ausência de oxigênio. É um processo realizado em etapas por diversas espécies de bactérias, sendo que somente na última etapa é produzido o produto de interesse para utilizações energéticas: o metano. Adicionalmente, para que a produção do biogás seja maximizada e com uma alta concentração de metano, o esgoto deve ter uma grande quantidade de material orgânico.

Como pode-se notar na Figura 2.12, cada uma das etapas produz um subproduto diferente, onde os substratos necessários para a produção de metano são disputados por dois grupos de bactérias, sendo que as redutoras de sulfato produzem o gás sulfídrico, que é altamente indesejado. Dessa maneira, para que a produção de metano seja otimizada, as condições do reator devem ser tais que nenhuma das etapas seja inibida, com exceção da sulfetogênese (Ministério das Cidades, 2015).

Por exemplo, a temperatura de operação na qual se obtém o melhor equilíbrio das temperaturas ótimas para as diferentes bactérias se encontra em torno de 35°C. Dessa maneira, a instalação de sistemas anaeróbios em locais muito frios pode ser dificultosa caso não exista o correto aquecimento do reator ou digestor (Ministério das Cidades, 2015).

Outro fator importante para a maximização da produção de metano é a composição da matéria a ser digerida. O ideal é que ela possua uma alta carga orgânica e baixo nível de compostos contaminantes e inibidores. A presença de sólidos grosseiros, gordura e areia também reduzem a eficiência da operação. Portanto, caso um dos objetivos do processo de tratamento de efluentes seja a geração de biogás para aproveitamento energético, recomenda-se que todo o processo seja desenhado para otimizar a sua geração.



**Figura 2.12** - Etapas biológicas durante a digestão anaeróbia.

Fonte: MINISTÉRIO DAS CIDADES (2015).

A composição do biogás irá variar bastante de acordo com o processo e com a matéria orgânica, mas valores típicos estão entre 60 e 80% de metano em volume, com dióxido de carbono sendo normalmente o segundo composto mais abundante, em cerca de 10 a 25% do volume. Outros componentes comumente presentes em menor quantidade são o H<sub>2</sub>, o N<sub>2</sub> e o H<sub>2</sub>S. Para determinadas aplicações pode ser necessário remover os demais componentes, como por exemplo, a injeção de biometano à rede de distribuição. A remoção do gás sulfídrico também é desejada pois a sua presença aumenta a corrosão dos equipamentos. Por causa dessa composição, o poder calorífico do biogás é de cerca de 21,5 MJ/Nm<sup>3</sup>, ante 35,9MJ/Nm<sup>3</sup> do metano (Ministério das Cidades, 2015).

A composição do biogás também dependerá da origem do efluente a ser tratado: se proveniente do tratamento da fase líquida ou se proveniente do tratamento da fase sólida. A Tabela 2.2 faz uma comparação entre as composições do biogás gerado dependendo da fonte de matéria orgânica.

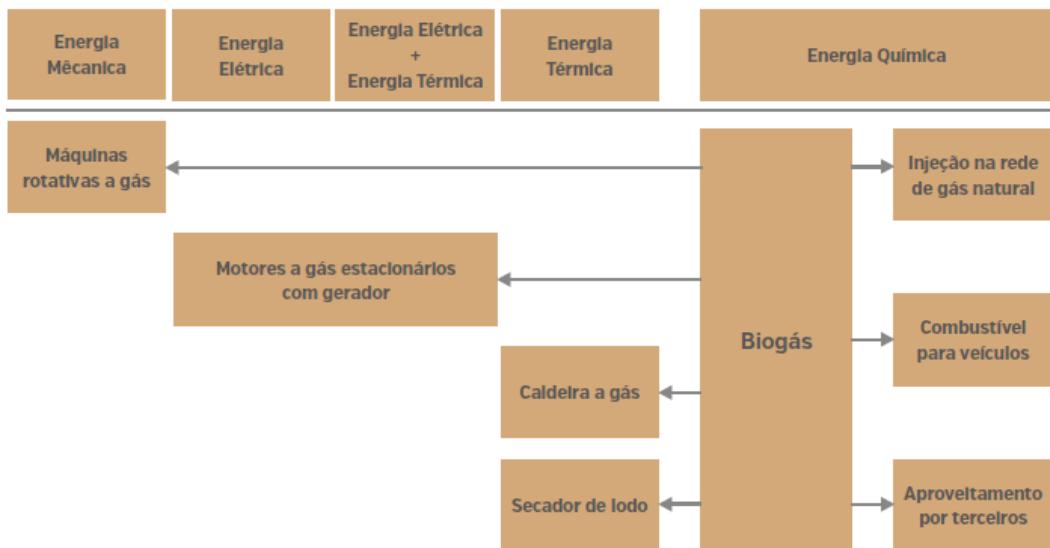
**Tabela 2.2 - Composições típicas do biogás.**

COMPONENTE	UNIDADE	BIOGÁS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO SANITÁRIO	BIOGÁS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE LODO
Sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ )	ppm	1.000 a 5.000	500 – 1.500
Enxofre total [S]	mg/Nm <sub>3</sub>		20 – 2.500
Halogênios	mg/Nm <sub>3</sub>		0 – 100
Cloro [Cl]	mg/Nm <sub>3</sub>		1 – 5
Flúor [F]	mg/Nm <sub>3</sub>		1 – 5
Poeira/partículas (< 10 µm)	mg/Nm <sub>3</sub>		N.E.
Total de compostos orgânicos com silício	mg/Nm <sub>3</sub>		< 40
Compostos aromáticos	mg/Nm <sub>3</sub>		< 10 em 100% $\text{CH}_4$
Umidade relativa	%		90 – 100
Teor de oxigênio [ $\text{O}_2$ ]	% em vol.	0 – 2	0 – 1
Metano [ $\text{CH}_4$ ]	% em vol.	60 – 85	60 – 70
Dióxido de carbono [ $\text{CO}_2$ ]	% em vol.	5 – 15	20 – 40
Monóxido de carbono [CO]	% em vol.	0 – 0,3	-
Nitrogênio [ $\text{N}_2$ ]	% em vol.	2 – 25*	0 – 2
Hidrogênio [ $\text{H}_2$ ]	% em vol.	0 – 3	0 – 1,5
Amônia [ $\text{NH}_3$ ]	% em vol		< 0,05
Número de metano	-		> 100
Poder calorífico superior [PCS]	kWh/Nm <sub>3</sub>	6,6 – 9,4	6,6 – 7,7
Poder calorífico inferior [PCI]	kWh/Nm <sub>3</sub>	6,0 – 8,5	6,0 – 7,0
Índice de Wobbe	kWh/Nm <sub>3</sub>	7,0 – 13,4	7,0 – 9,1

Fonte: MINISTÉRIO DAS CIDADES (2015).

## 2.5. Usos do Biogás

Devido à sua diversidade, o biogás tem diversas utilidades, que podem ser dentro ou fora da própria estação de tratamento de esgoto (ETE) que o gerou. A Figura 2.13 ilustra de forma generalizada as possíveis aplicações. É importante ressaltar que, conforme dito anteriormente, o biogás tem uma composição variável e que alguns desses usos só são viabilizados após o seu correto tratamento para a remoção de impurezas. Para a injeção na rede, por exemplo, a Resolução ANP nº 685/2017 exige que o biogás tenha composição praticamente igual a do gás metano.



**Figura 2.13 - Usos do Biogás.**

Fonte: MINISTÉRIO DAS CIDADES (2015).

Atualmente, muitas das instalações que contam com processos anaeróbios que geram biogás acabam por optar pela sua queima de modo a não despejar metano na atmosfera, uma vez que esse gás é um grande causador do efeito estufa. Como será mostrado, essa é uma opção pouco nobre para o biogás.

### 2.5.1. Caldeiras a gás

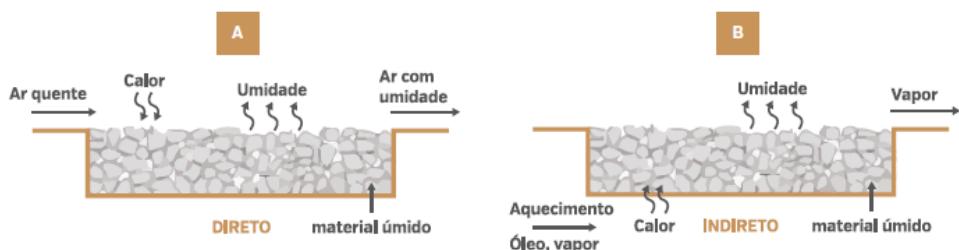
As caldeiras podem utilizar o biogás para a conversão em energia térmica através da produção de fluido quente ou vapor, sendo necessárias adaptações nos queimadores para se adequarem à menor concentração de metano no biogás, com subsequente menor PCI. Além disso, é necessário um maior monitoramento e controle em relação à composição, principalmente a umidade, que pode causar corrosão (COELHO et al., 2018).

O vapor gerado na caldeira poderá ser utilizado como fonte de calor para o processo, principalmente para a secagem do lodo e manutenção da temperatura de operação dos reatores anaeróbios. Outra possibilidade é a integração da caldeira a um ciclo Rankine para geração de energia elétrica.

### 2.5.2. Secadores de Lodo

Conforme dito anteriormente, o calor gerado em uma caldeira através da queima do biogás pode ser utilizado para o processo de secagem do lodo da estação, o que leva a redução do volume e à higienização do material. Essa secagem reduz custos de transporte além de poder transformá-lo em combustível.

Esse procedimento pode ocorrer de diversas maneiras, separadas pela forma de transferência de calor: direta, indireta, radiante ou mista. Na secagem direta, o ar aquecido entra em contato direto com o lodo, na secagem indireta, o lodo entra em contato com uma superfície aquecida, enquanto na secagem radiante, a transferência de calor se dá pela radiação. Uma das vantagens da troca de calor direta é a possibilidade da utilização de uma temperatura mais elevada, porém a geração de odores desagradáveis é mais provável.



**Figura 2.14 - Secagem direta e indireta do lodo.**

Fonte: MINISTÉRIO DAS CIDADES (2015)

### 2.5.3. Cogeração de eletricidade e calor

A alta demanda de energia elétrica no processo de tratamento, aliada a uma possível necessidade de calor para manutenção da reação anaeróbia e secagem do lodo, faz com que a cogeração de eletricidade e calor seja uma opção interessante para a redução dos custos operacionais. Atualmente, duas opções se destacam, sendo elas os motores e as turbinas. Os gases de exaustão desses equipamentos são então utilizados como fonte de calor para o processo, seja para a secagem do lodo, aquecimento ou geração de vapor ou água quente.

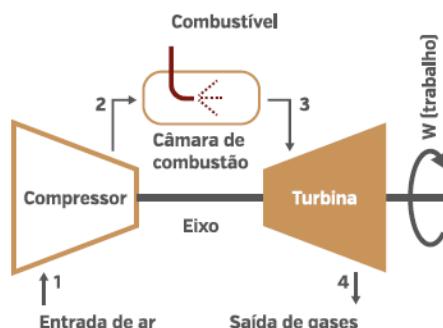
## Motores a gás

O uso de biogás como combustível desses motores a combustão interna, principalmente de ciclo Otto, é importante, devido a sua eficiência e a versatilidade para uso concomitante de propano ou gás natural, pois a mudança de biogás para gás natural é relativamente simples, observadas as mudanças na eficiência e controle de impurezas danosas. Na mudança para propano, haverá uma redução de 25% a 40% na eficiência, a qual será ainda maior quando o caso for o uso de butano (Ministério das Cidades, 2015). Esses motores podem ser utilizados em plantas de pequeno, médio ou grande porte.

Diferente dos motores a ciclo Otto, os motores a ciclo Diesel realizam a ignição da mistura do combustível através de uma pequena quantidade de óleo diesel, conhecido como óleo de ignição. Esses motores têm eficiência mecânica superior ao do gás com ciclo Otto, porém necessitam de maiores alterações estruturais para poderem operar com biogás. Também precisam de mais manutenção do que os motores de ciclo Otto e normalmente são utilizados para plantas pequenas ou médias.

## Turbinas a gás

A geração de energia elétrica com turbinas é feita, de maneira simplificada, como descrita na Figura 2.15. O ar é admitido em um compressor, onde sua pressão e temperatura aumentam até ser alimentado numa câmara de combustão, onde é misturado ao combustível. Essa combustão resulta na expansão dos gases, que realizam trabalho na turbina. Parte desse trabalho é utilizado para movimentar o compressor e o restante é convertido em energia elétrica.



**Figura 2.15 - Ciclo de uma turbina a gás.**

Fonte: MINISTÉRIO DAS CIDADES (2015).

Em plantas onde a demanda por energia elétrica é menor do que a gerada por esse sistema, o excedente pode ser exportado para a rede de distribuição.

#### **2.5.4. Máquinas Rotativas**

Para geração de energia mecânica em máquinas rotativas, o seu eixo é conectado diretamente ao motor a gás, o que leva a diminuição de perdas que seriam causadas pelo gerador e motor elétrico (cerca de 15%) (Ministério das Cidades, 2015). Uma fonte alternativa de energia elétrica deve ser disponibilizada, como redundância, garantindo o funcionamento em caso de falha.

Em uma ETE, o biogás pode ser utilizado para acionar sopradores para aeração do sistema de lodo e bombas. Com isso, é possível gerar variações das rotações, o que leva a alteração na vazão dos sopradores. Outra solução são as conhecidas geminadas, onde um gerador e uma máquinas são conectadas ao eixo da máquina a gás. Assim, é possível operar o motor a gás a plena carga, mesmo que a máquina não esteja. O excedente de energia é absorvido pelo gerador, aumentando a eficiência do sistema.

#### **2.5.5. Veículos**

A utilização do biogás em veículos é possível através da purificação do gás até biometano. Esse processo é feito em diversas etapas, com a remoção do sulfeto de hidrogênio, umidade e dióxido de carbono. Para ser chamado de biometano, o gás deve ter pelo menos 95% de metano em sua composição. Esse tratamento aumenta de forma significativa os custos envolvidos para sua utilização.

O biometano pode ser aplicado em veículos com motores a gasolina de ciclo Otto, que em parte já são preparados de fábrica para utilização desse gás, como também ocorre em motores a gás ciclo Diesel. Existe a possibilidade de alteração do combustível utilizado durante a movimentação do veículo, onde o biometano é mantido em um tanque pressurizado, assim como já é feito com o GNV.

### **2.5.6. Injeção de biometano na rede**

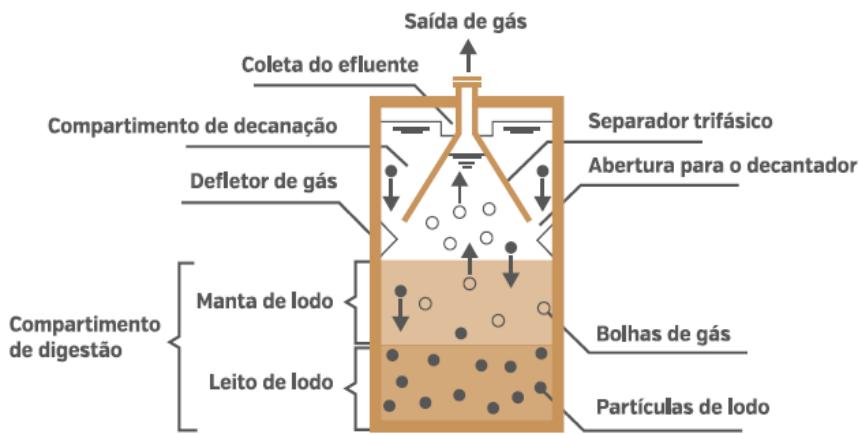
Antigamente só era possível distribuir o biometano em redes particulares, entre o produtor e o consumidor final, como uma indústria. Após a publicação da NBR-16837 - Parte 1: Requisitos, abriram-se as portas para a injeção de biometano na rede de distribuição. Diferentes estudos têm sido feitos em diversos estados sobre a capacidade de geração desse combustível em complemento ao gás já distribuído. É importante ressaltar que, assim como no caso do uso veicular, o biogás deverá passar por diversas etapas de purificação para se tornar biometano e poder ser injetado na rede.

## **2.6. Geração de biogás no tratamento anaeróbio**

Conforme dito anteriormente, durante o processo de tratamento de esgoto, o biogás é gerado tanto no tratamento secundário anaeróbio quanto na digestão do lodo, também de forma anaeróbia. Apesar de existirem diferentes métodos de tratamento anaeróbio, fossas sépticas e lagoas anaeróbias por exemplo, tem baixa eficiência, além do grande espaço ocupado por uma lagoa. Dessa maneira, em escala maiores, cujo objetivo é a alta remoção de DBO além da geração de biogás, normalmente se utiliza o reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA ou UASB) para a parte líquida e reatores de agitação contínua (CSTR) para o tratamento do lodo.

### **2.6.1. Tratamento anaeróbio da fase líquida: reatores UASB**

Como o próprio nome diz, o reator UASB se caracteriza por um fluxo ascendente do efluente a ser tratado, onde o leito e manta de lodo nos quais ocorre a digestão da matéria orgânica se localizam na base do reator. Devido à movimentação dos fluidos dentro do reator, é necessário um separador trifásico no topo para que os sólidos decantem de volta para o fundo, o líquido clarificado seja retirado e o biogás gerado seja coletado.



**Figura 2.16 - Esquema de um reator UASB.**

Fonte: MINISTÉRIO DAS CIDADES (2015).

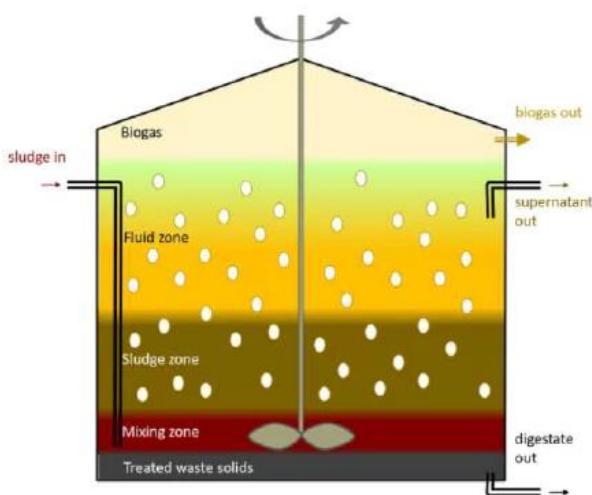
A correta operação do reator UASB para a consequente otimização da geração de biogás depende de diversos fatores. Um dos principais é a qualidade do tratamento preliminar, pois a gordura, sólidos e areia impactam bastante o lodo, principalmente com a formação de “zonas mortas” dentro do reator, que são locais com pouca circulação de correntes. A vazão de entrada do reator também é importante, uma vez que ela não pode ser muito alta para evitar o arraste do lodo e para manter a eficiência do separador trifásico (Ministério das Cidades, 2015). Outros pontos importantes envolvem a remoção contínua de escuma e espuma e a verificação das condições estruturais do reator, principalmente quando a formação de gás sulfídrico está superior à desejada.

Como citado anteriormente, também se faz necessário verificar as condições de operação do reator, como o pH, a temperatura e o ecossistema do lodo, de modo a assegurar a máxima produção de gás metano possível. Apesar disso, a formação de gás sulfídrico é inevitável e é importante que tanto o reator quanto os equipamentos e acessórios subsequentes estejam protegido em relação à corrosão.

As principais vantagens do reator UASB são a alta estabilização do efluente, a baixa produção de lodo, o metano como produto, os baixos custos de instalação e operação e baixa demanda por área. Por sua vez, após a passagem pelo UASB, o efluente ainda precisa de mais remoção de DBO, há a necessidade de aquecimento e a baixa remoção de patógenos (COELHO et al., 2018).

## 2.6.2. Digestores de lodo

Como falado anteriormente, os lodos provenientes da etapa de decantação primária, decantação secundária e tratamento secundário (tanto anaeróbio quanto aeróbio), são encaminhados para etapas nas quais seu volume é reduzido e estabilizado para remover organismos patogênicos. Após o adensamento e a floculação, o lodo é dirigido para os digestores anaeróbios, que são reatores biológicos sem a presença de oxigênio, podendo tanto serem reatores UASB quanto reatores CSTR. Nesse trabalho foram considerados CSTR para a digestão do lodo.



**Figura 2.17** - Esquema de um digestor de lodo CSTR.

Fonte: JUDD (2021).

Conforme mostrado na Figura 2.17, o reator de fluxo contínuo (CSTR) pode ser agitado para melhorar a mistura e deixar a digestão mais eficiente. O lodo digerido é retirado no fundo e encaminhado para as etapas de filtragem e secagem. O biogás é retirado na parte superior do tanque sem a necessidade de um separador trifásico como no reator UASB. A parte líquida retorna para o tratamento primário ou secundário (Sperling, 2001).

O digestor pode ser operado tanto em condições mesofílicas (aproximadamente 35°C) ou termofílicas (aproximadamente 50°C). Temperaturas maiores requerem reatores menores, porém a eficiência energética da planta é afetada. Outro ponto importante é a concentração de sólidos do lodo que entra no digestor. Quanto menor a concentração de sólidos, maior o tamanho do reator requerido para tratar o mesmo volume de lodo (Sperling, 2001).

## 2.7. Tratamento do biogás

Da mesma maneira que a composição do biogás gerado pelas etapas de tratamento anaeróbio pode variar, as exigências quanto à sua composição irão depender da utilização final do biogás. Normalmente as menores exigências são encontradas nos casos em que ele é utilizado em caldeiras para geração de calor, enquanto as maiores exigências são para a obtenção de biometano. A Tabela 2.3 faz um resumo das exigências de tratamento para diferentes utilizações do biogás.

Os componentes mais críticos são o H<sub>2</sub>S, a água e o CO<sub>2</sub>. Há diferentes processos físicos e químicos que proporcionam a adequação da composição do biogás e a escolha do melhor dependerá tanto de aspectos técnicos quanto econômicos. Eventualmente, mesmo a queima para a geração de calor para o processo não é viável por causa do nível de tratamento necessário e o biogás gerado não é incinerado sem nenhum tipo de aproveitamento, de modo a evitar a emissão de metano para a atmosfera.

**Tabela 2.3 - Requisitos para a utilização de biogás em diferentes processos.**

COMPONENTE	QUEIMA PARA A GERAÇÃO DE CALOR	OPERAÇÃO DE MÁQUINAS A GÁS ESTACIONÁRIAS	
		MOTOR A GÁS (CHP)	MOTOR A GÁS COM CATALISADOR (CHP)
Enxofre total [S]	< 1000 ppm	N.E.	N.E.
Sulfeto de hidrogênio [H <sub>2</sub> S]	-	< 560 ppm/10 kWh	< 8 ppm/10 kWh
Halogênios	-	< 100 mg/10 kWh	< 20 mg/10 kWh
Cloro [Cl]	-	< 50 mg/10 kWh	N.E.
Flúor [F]	-	< 50 mg/10 kWh	N.E.
Poeira/partículas (< 10 µm)	livre do ponto de vista técnico	sem sólidos	sem sólidos
Total de compostos orgânicos com silício	-	< 5 – 10 mg/Nm <sup>3</sup>	0 mg/Nm <sup>3</sup>
Compostos aromáticos	-	N.E.	N.E.
Umidade relativa	< ponto de orvalho temp. solo	50% – 80%	< 50%
Teor de oxigênio [O <sub>2</sub> ]	< 3% em vol.	N.E.	N.E.
Metano [CH <sub>4</sub> ]	> 50% em vol.	> 45% em vol.	> 45% em vol.
Número de metano	s. req.	Espec. fabricante	Espec. fabricante
PCS	s. req.	N.E.	N.E.
PCI	> 5 kWh/Nm <sub>3</sub>	4,5 – 7 kWh/Nm <sub>3</sub>	4,5 – 7 kWh/Nm <sub>3</sub>
Amônia [NH <sub>3</sub> ]	-	< 50 mg/10 kWh	< 50 mg/10 kWh
Temperatura do gás	-	< 40°C	< 40°C
Pressão operacional	8 – 25 mbar	> 20 – 80 mbar	> 20 – 80 mbar
Hidrogênio [H <sub>2</sub> ]	-	N.E.	N.E.

Fonte: MINISTÉRIO DAS CIDADES (2015).

### **2.7.1. Sulfeto de Hidrogênio**

A importância da retirada de H<sub>2</sub>S advém da sua toxicidade, além da ação corrosiva. Como falado anteriormente, o processo deve ser projetado para que a menor quantidade possível de H<sub>2</sub>S seja formada na digestão anaeróbia. Uma alternativa é alimentar ar ou oxigênio puro em pequenas quantidades no digestor, de modo que as condições anaeróbias sejam mantidas, mas que possibilite a existência de algumas bactérias aeróbias que consumam o H<sub>2</sub>S e o transformem em enxofre elementar ou íon sulfato (Ministério das Cidades, 2015).

Outra técnica que pode ser utilizada na digestão é a utilização de compostos de ferro, que reagem com o H<sub>2</sub>S formando sulfetos não solúveis que são retirados com o lodo. As demais técnicas são utilizadas diretamente no biogás, como a absorção em soluções de soda cáustica ou dietilamina em contracorrente numa coluna de absorção, adsorção com carvão ativado ou óxido de zinco ou a biodessulfurização em um reator de biopercolação (Ministério das Cidades, 2015).

### **2.7.2. Umidade**

O vapor de água ou condensado devem ser removidos do biogás para a proteção de equipamentos, principalmente pás de turbinas, no caso do condensado. Além disso, na presença de gases que contém enxofre, a umidade pode formar ácido sulfúrico, que é altamente corrosivo. A remoção da água também aumenta o poder calorífico do biogás.

A maneira mais simples de se remover uma grande quantidade de água é através do resfriamento do biogás, fazendo com que parte da água se condense e seja retirada. Contudo, essa técnica não reduz a umidade de maneira suficiente para aplicações mais nobres, como para uso veicular ou injeção na rede (COELHO et al, 2018). Para tanto, outras maneiras mais elaboradas incluem torres de adsorção com sílica gel, óxido de alumínio ou peneiras moleculares, e colunas de absorção com compostos de glicol, como trietilenoglicol.

### **2.7.3. Gás Carbônico**

Como o gás carbônico normalmente é o segundo composto mais presente no biogás, a sua remoção é etapa fundamental para uma utilização mais nobre do biogás, tornando-o em biometano. As principais técnicas de remoção do gás carbônico são a adsorção com modulação de pressão, absorção física ou química utilizando-se solventes orgânicos, separação por

membranas ou resfriamento até temperaturas criogênicas. Cada uma dessas técnicas possui as suas vantagens e desvantagens e irão depender da composição do gás, vazão e uso final do biometano (Ministério das Cidades, 2015).

#### **2.7.4. Siloxanos**

Os siloxanos são compostos orgânicos que contém sílica e a sua importância na composição de biogás tem sido reportada pois causa diversos danos nos equipamentos. No entanto, as pesquisas referentes à sua remoção ainda não são abundantes. Atualmente, o processo mais utilizado na remoção dos siloxanos tem sido a adsorção em carvão ativado, precedido de um pré-resfriamento (Ministério das Cidades, 2015).

### **2.8. Programa Nacional Metano Zero**

Durante a 26<sup>a</sup> Conferência do Clima da ONU (COP 26), realizada em novembro de 2021, o Governo Federal Brasileiro aderiu, junto com mais de 100 países, ao esforço global para reduzir em 30% as emissões de metano até 2030 em relação aos níveis de 2020. Assim, tanto o Marco Legal de Resíduos Sólidos, criado por meio do Decreto 10.936 de janeiro de 2022, regulamentando a Lei nº 12.305, quanto o novo Marco Legal do Saneamento Básico, se tornam fundamentais no atingimento dessa meta.

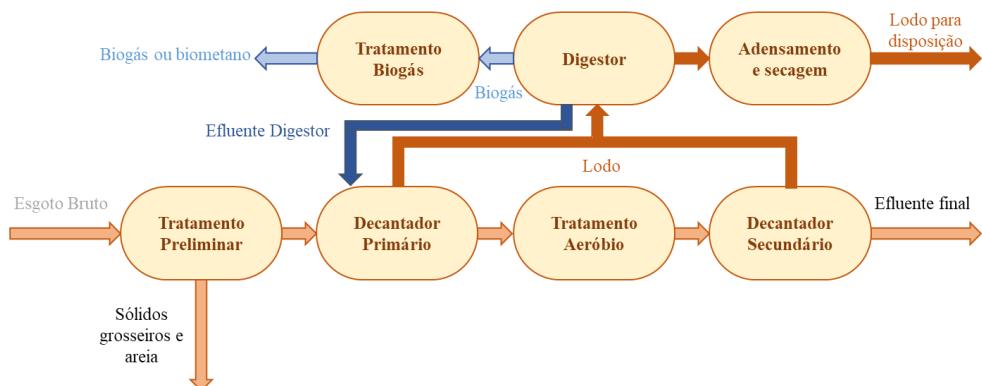
Para facilitar ainda mais a implementação de projetos nessas áreas, em março de 2022 foi lançado o Programa Nacional de Metano Zero. Entre as principais medidas adotadas nesse programa está a inclusão de investimentos em biometano no Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (Reidi), o que suspende a cobrança de PIS e COFINS para a aquisição de máquinas, materiais de construção, equipamentos, dentre outros componentes. Linhas de crédito e financiamento específicas para essa área também serão implementadas.

Outro ponto interessante a ser estruturado a partir desse programa é a criação de um Mercado de Créditos de Metano, nos mesmos moldes do mercado de créditos de carbono. As possíveis compensações para quem investe nessa área e reduz as suas emissões de metano poderão tornar os processos mais lucrativos, atraindo investimentos.

### 3. METODOLOGIA

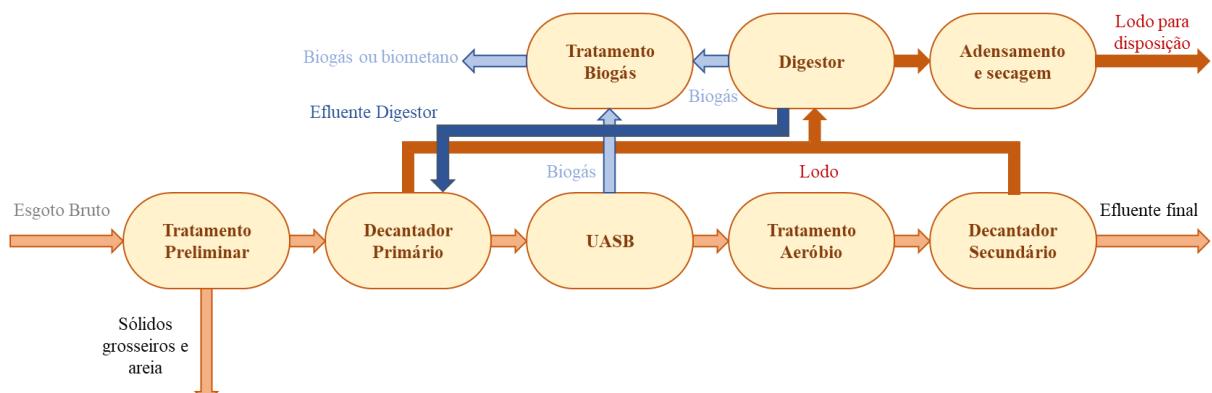
#### 3.1. Fluxograma do processo de tratamento de esgoto

As configurações dos processos de tratamento de esgoto podem variar bastante de acordo com as especificações do esgoto bruto e com requerimentos locais para o efluente final. Contudo, para que exista a produção de biogás, a etapa anaeróbia tem que estar presente. Portanto, existem duas alternativas possíveis, sendo uma que inclui apenas um digestor para o tratamento do lodo gerado no tratamento primário e no tratamento aeróbio, e outra que além do digestor inclui também um processo anaeróbio para a fase líquida, como um reator UASB. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram esses dois fluxogramas. O lodo gerado no processo anaeróbio pode ser direcionado tanto para o tratamento aeróbio quanto diretamente para o digestor (Sperling, 2001).



**Figura 3.1 - Fluxograma apenas com digestor.**

Fonte: Acervo próprio.



**Figura 3.2 - Fluxograma com digestor e UASB.**

Fonte: Acervo próprio.

### **3.2. População escolhida para o estudo de caso**

Para esse estudo de caso, optou-se por escolher uma cidade cuja coleta de esgoto já fosse bastante abrangente, mas com uma defasagem em relação ao tratamento. Assim, os investimentos em tubulações de coleta já foram feitos e o custo para a universalização do tratamento não seria tão elevado. Dentre o Ranking do Saneamento do Instituto Trata Brasil, uma cidade que atendeu esses requisitos foi Santo André/SP.

A população andrenense contemplada com a coleta de esgoto em 2021 era de 97,89%, mas o índice de tratamento de esgoto em relação à água consumida é de apenas 33,72%. Apesar desse índice não representar exatamente o quanto de esgoto que é gerado, pois a água pode ser utilizada para rega de plantas e cozimento, por exemplo, ele é um indicativo importante da defasagem entre coleta e tratamento.

Para fins de simplificação dos cálculos, aqui não serão consideradas as cargas industriais para o cálculo da população equivalente da cidade. Portanto, como a população da cidade era de 721238 habitantes em 2021, aplicando as porcentagens encontradas pelo estudo, encontra-se que cerca de 478096 habitantes não possuem seu esgoto tratado.

### **3.3. Requisitos para emissão do efluente final**

No Estado de São Paulo, a  $\text{DBO}_5$  do efluente a ser jogado no ambiente não deve ultrapassar 60mg/L, enquanto os sólidos sedimentáveis não podem passar de 1mg/L (FUGITA, 2018). Os processos serão dimensionados de modo a atingir esses requisitos legais.

### **3.4. Balanços de massa e de DBO/DQO**

Para estimar a quantidade de biogás produzida, é necessária a realização de um balanço de massa em relação à quantidade de sólidos suspensos, que irá influenciar na quantidade de lodo produzida, e de um balanço em relação à demanda biológica ou química de oxigênio de cada uma das correntes, que é um indicativo de quanta matéria orgânica está presente e pronta para ser utilizada pelos microrganismos.

### 3.4.1 Esgoto Bruto

De acordo com a Tabela 2.1, a contribuição por habitante é de cerca de 35 a 70g/hab.dia para sólidos suspensos, 40 a 60gDBO<sub>5</sub>/hab.dia e 80 a 120gDQO/hab.dia. Serão utilizados os valores médios dentro dessas faixas. O teor de sólidos suspensos totais pode ser considerado como a concentração dividida pela densidade. Como o esgoto é praticamente água, será considerada uma densidade aproximada de 1000kg/m<sup>3</sup>. Para o cálculo do volume total gerado, será utilizado o valor de 176L/hab.dia, que é o consumo médio de água para o Estado de São Paulo (SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO, 2021). Assim, para a população abordada, a Tabela 3.1 mostra as características do esgoto bruto baseando-se nessas estimativas.

**Tabela 3.1** - Dados da corrente de entrada.

<b>Dados Gerais</b>	
<b>Cidade</b>	Santo André
<b>População Total</b>	721.328
<b>% Atendida pela coleta</b>	97,89%
<b>% Atendida pelo tratamento</b>	33,72%
<b>População a tratar</b>	478096
<b>Vazão per capita (m<sup>3</sup>/hab/dia)</b>	0,176
<b>Vazão (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,943
<b>Carga per capita (kgDQO/hab/dia)</b>	0,100
<b>Carga total (kgDQO/s)</b>	0,536
<b>DQO (kg/m<sup>3</sup>)</b>	0,568
<b>Carga per capita (kgDBO<sub>5</sub>/hab/dia)</b>	0,050
<b>Carga total (kgDBO<sub>5</sub>/s)</b>	0,268
<b>DBO<sub>5</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	0,284
<b>Carga per capita (kgSS/hab/dia)</b>	0,053
<b>Carga per capita (kgSS/s)</b>	0,281
<b>C<sub>ss</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	0,298
<b>T<sub>ss</sub>(%)</b>	0,03%
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1000

### 3.4.2. Tratamento Preliminar e Primário

No tratamento preliminar, são retirados sólidos grosseiros e área, ou seja, não há tanta remoção de matéria biodegradável. Dessa maneira, as condições da corrente de entrada do tratamento primário não sofrerão tantas alterações e por isso foi considerada igual à da Tabela 3.1.

Por sua vez, o tratamento primário remove uma quantidade considerável de material suspenso, que será encaminhado para o digestor de lodo para a produção de biogás. As eficiências de remoção giram em torno de 40 a 70% para sólidos em suspensão e cerca de 35% para a DBO<sub>5</sub> e DQO (CAMMAROTA, 2011). O teor de sólidos suspensos do lodo gerado fica entre 2 e 6% (BATISTA, 2015). Será considerado um teor de sólidos suspenso médio de 4% e uma eficiência de remoção média de 55%. A partir das Figuras 3.1 e 3.2, pode-se montar o fluxograma para o tratamento primário, que é o mesmo para as ambas as alternativas.



**Figura 3.3 - Fluxograma tratamento primário.**

Fonte: Acervo próprio.

As equações utilizadas para o balanço de massa, DBO e DQO no tratamento primário estão descritas abaixo. Não foi considerada a digestão aeróbia ou anaeróbia nessa etapa.

#### Balanço de Massa Global:

$$Q_E \rho_E + Q_{ED} \rho_{ED} = Q_{LPP} \rho_{LP} + Q_{ETP} \rho_{ETP} \quad (3.1)$$

#### Eficiência de remoção de Sólidos Suspensos Totais:

$$1 - \eta_{TP-SS} = \frac{Q_{ETP} C_{SS-ETP}}{Q_E C_{SS-E} + Q_{ED} C_{ED-SS}} \quad (3.2)$$

#### Eficiência de remoção de DQO:

$$1 - \eta_{TP-DQO} = \frac{Q_{ETP} DQO_{ETP}}{Q_E DQO_E + Q_{ED} DQO_{ED}} \quad (3.3)$$

#### Eficiência de remoção de DBO:

$$1 - \eta_{TP-DBO} = \frac{Q_{ETP} DBO_{ETP}}{Q_E DBO_E + Q_{ED} DBO_{ED}} \quad (3.4)$$

#### Balanço de DQO:

$$Q_E DQO_E + Q_{ED} DQO_{ED} = Q_{LP} DQO_{LP} + Q_{ETP} DQO_{ETP} \quad (3.5)$$

### Balanço de DBO:

$$Q_E DBO_E + Q_{ED} DBO_{ED} = Q_{LP} DBO_{LP} + Q_{ETP} DBO_{ETP} \quad (3.6)$$

Sendo,

$\rho_E$	Densidade de entrada do sistema ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_{ED}$	Densidade do efluente do digestor ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_{ETP}$	Densidade do efluente líquido do tratamento primário ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_{LP}$	Densidade de lodo primário ( $\text{kg/m}^3$ )
$\eta_{TP-DBO}$	Eficiência de remoção de DBO no tratamento primário (adimensional)
$\eta_{TP-DQO}$	Eficiência de remoção de DQO no tratamento primário (adimensional)
$\eta_{TP-SS}$	Eficiência de remoção de sólidos suspensos totais no tratamento primário (adimensional)
$C_{E-SS}$	Concentração de sólidos suspensos totais na entrada do sistema ( $\text{kg/m}^3$ )
$C_{ED-SS}$	Concentração de sólidos suspensos totais do efluente líquido do digestor ( $\text{kg/m}^3$ )
$C_{ETP-SS}$	Concentração de sólidos suspensos totais no efluente líquido do tratamento primário ( $\text{kg/m}^3$ )
$DBO_E$	DBO de entrada do sistema ( $\text{kg/m}^3$ )
$DBO_{ED}$	DBO do efluente líquido do digestor ( $\text{kg/m}^3$ )
$DBO_{ETP}$	DBO do efluente líquido do tratamento primário ( $\text{kg/m}^3$ )
$DBO_{LP}$	DBO no lodo primário ( $\text{kg/m}^3$ )
$DQO_E$	DQO de entrada do sistema ( $\text{kg/m}^3$ )
$DQO_{ED}$	DQO do efluente líquido do digestor ( $\text{kg/m}^3$ )
$DQO_{ETP}$	DQO do efluente líquido do tratamento primário ( $\text{kg/m}^3$ )
$DQO_{LP}$	DQO no lodo primário ( $\text{kg/m}^3$ )
$Q_D$	Vazão na entrada do digestor ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_E$	Vazão de entrada do sistema ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_{ED}$	Vazão do efluente líquido do digestor ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_{ETP}$	Vazão do efluente líquido do tratamento primário ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_{LP}$	Vazão de lodo primário ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

### 3.4.3. Tratamento Secundário

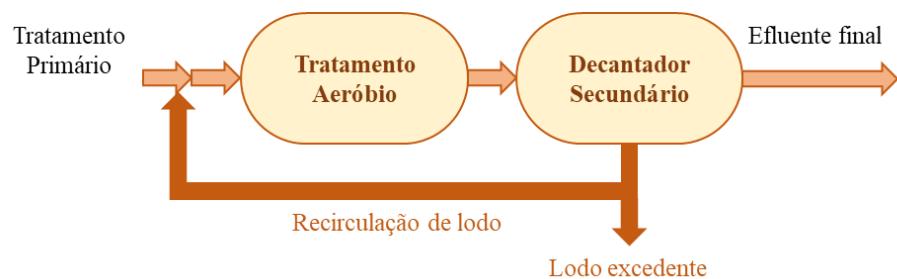
Como dito anteriormente, somente o tratamento anaeróbio com um reator UASB normalmente não é capaz de produzir um efluente às características que atendam às legislações locais. Dessa maneira, é sempre necessário um tratamento aeróbio após essa alternativa. Por outro lado, somente o tratamento aeróbio já pode alcançar os valores desejados, de modo que o tratamento anaeróbio é opcional para redução de custos operacionais.

No caso de somente tratamento aeróbio, o biogás seria gerado somente no digestor do lodo primário e secundário.

#### Opção 1: Tratamento secundário somente aeróbio

Existem diversas alternativas para o tratamento secundário aeróbio, desde lagoas até sistemas com lodo ativado. Para essa avaliação, será considerado o sistema de lodos ativados convencional, que atinge boas eficiências de remoção (SPERLING, 2002).

O sistema de tratamento com lodos ativados é amplamente utilizado no tratamento de esgoto doméstico por causa da sua grande eficiência de remoção de DBO. O sistema consiste em um reator aeróbio onde há a alimentação de ar e um decantador secundário para remoção do lodo excedente. Uma configuração bastante comum contém também uma recirculação do lodo para o reator de modo a manter uma concentração de biomassa mais elevada, conforme representado na Figura 3.4.



**Figura 3.4 - Sistema de lodos ativados.**

Fonte: Adaptado de (Sperling M. , 2002)

O lodo que não é recirculado é encaminhado ao digestor, onde será produzido o biogás. Dessa maneira, é importante calcular qual o lodo excedente gerado nesse sistema para que se possa dimensionar também a etapa de digestão.

A produção do lodo excedente em estado estacionário pode ser descrita como a diferença entre as taxas de crescimento e decaimento celular, conforme as Equações 3.7 e 3.8.

$$P_{XV} = \text{Crescimento celular} - \text{decaimento celular} \quad (3.7)$$

$$P_{XV} = Y_p Q (S_0 - S) - K_d f_b X_v V \quad (3.8)$$

Onde,

$P_{XV}$  = produção de lodo excedente

$Y_p$  = coeficiente de produção celular (massa de sólidos em suspensão voláteis produzidos por unidade de massa de DBO removida). Fica na faixa de 0,5 a 0,7g/g (Sperling M., 2002)

$Q$  = vazão de entrada do reator ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$S_0$  = DBO total do afluente no reator ( $\text{kg/m}^3$ )

$S$  = DBO solúvel do efluente ( $\text{kg/m}^3$ )

$K_d$  = coeficiente de respiração endógena ( $\text{s}^{-1}$ ), ou seja, referente ao consumo de matéria orgânica para manutenção celular

$f_b$  = fração biodegradável dos sólidos suspensos voláteis, ou seja, o que pode ser digerido pelos microrganismos

$X_v$  = concentração de sólidos em suspensão voláteis ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  = Volume do reator ( $\text{m}^3$ )

A concentração de sólidos suspensos voláteis no reator e o volume do reator podem ser descritos pelas Equações 9 e 10, respectivamente.

$$X_v = \frac{Y_p (S_0 - S)}{1 + K_d f_b \theta_c} \left( \frac{\theta_c}{t} \right) \quad (3.9)$$

$$V = \frac{Y_p \theta_c Q (S_0 - S)}{X_v (1 + K_d f_b \theta_c)} \quad (3.10)$$

Onde,

$\theta_c$  = idade do lodo (s) que é o tempo médio que uma partícula em suspensão permanece sob aeração

$t$  = tempo de retenção hidráulica (s), definido como a razão entre o volume do reator e a vazão de alimentação, representa o tempo médio que as células e substratos permanecem dentro do reator

Os valores típicos médios para os parâmetros de operação de um reator de lodos ativados estão listados na Tabela 3.3 (SPERLING, 2002). A vazão de entrada no reator é a soma da vazão que sai do tratamento primário mais a vazão de recirculação de parte do lodo (R). Os valores de R normalmente se encontram entre 0,7 e 1,2 vezes a vazão do efluente do tratamento primário.

**Tabela 3.2 - Parâmetros típicos para um reator de lodos ativados.**

<b>Y(g/g)</b>	0,6
<b>K<sub>d</sub>(s<sup>-1</sup>)</b>	9,26E-07
<b>f<sub>b</sub></b>	0,74
<b>θ<sub>c</sub> (s)</b>	561.600 (6,5 dias)
<b>t (s)</b>	25.200 (7 horas)
<b>R</b>	1,0

Fonte: Sperling, 2002

Dessa maneira, pode-se fazer o balanço de massa global para o sistema de lodos ativados. A concentração de sólidos do lodo secundário normalmente está entre 6kg/m<sup>3</sup> e 12kg/m<sup>3</sup> (SPERLING, 2002). Foi adotada a média de 9kg/m<sup>3</sup>.

### Balanço de Massa

Global:

$$Q_{ETP}\rho_{ETP} = Q_{LS}\rho_{LS} + Q_F\rho_F \quad (3.11)$$

### Vazão de lodo

excedente:

$$Q_{LS} = \frac{P_{XV}}{C_{LS-ss}} \quad (3.12)$$

Onde,

$Q_{ETP}$  Vazão do efluente líquido do tratamento primário (m<sup>3</sup>/s)

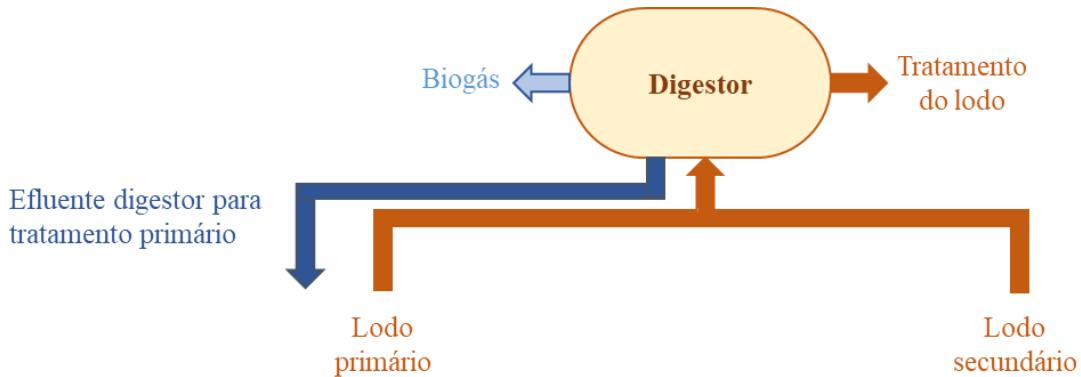
$Q_F$  Vazão efluente final (m<sup>3</sup>/s)

$Q_{LS}$  Vazão lodo secundário (m<sup>3</sup>/s)

$P_{XV}$  Produção de lodo ativado (kg/s)

$C_{LS-ss}$  Concentração de sólidos suspensos do lodo secundário (kg/m<sup>3</sup>)

O próximo balanço de massa a ser feito é no digestor, para a avaliação da produção de biogás, conforme Figura 3.5.



**Figura 3.5 - Fluxograma do digestor.**

Fonte: Acervo Próprio.

$$\begin{array}{ll} \text{Balanço de Massa} & Q_{LP}\rho_{LP} + Q_{LS}\rho_{LS} = Q_{ED}\rho_{ED} + Q_L\rho_L + Q_{BD}\rho_{BD} \\ \text{Global} & \end{array} \quad (3.13)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Balanço de DQO na} & Q_D DQO_{apli-D} = Q_{LP}DQO_{LP} + Q_{LS}DQO_{LS} \\ \text{entrada do digestor} & \end{array} \quad (3.14)$$

Onde,

$DQO_{apli-D}$  DQO aplicada no digestor ( $\text{kg/m}^3$ )

$DQO_{LP}$  DQO no lodo primário ( $\text{kg/m}^3$ )

$DQO_{LS}$  DQO do lodo secundário ( $\text{kg/m}^3$ )

$Q_{ED}$  Vazão do efluente líquido do digestor ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_{LP}$  Vazão de lodo primário ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_L$  Vazão do lodo para tratamento ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_{LS}$  Vazão lodo secundário ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_D$  Vazão na entrada do digestor ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\rho_{ED}$  Densidade do efluente do digestor ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_L$  Densidade do lodo para tratamento ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_{LP}$  Densidade de lodo primário ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_{LS}$  Densidade lodo secundário ( $\text{kg/m}^3$ )

Para a produção de lodo no digestor, será utilizada a Equação 15, onde  $Y_s$  é o coeficiente de produção de sólidos no sistema ( $\text{kgSS/kgDQOapli}$ ) (CHERNICHARO, 2007). Seu valor

varia entre 0,18 e 0,20 kg/kg. A concentração de sólidos no lodo gerado fica entre é de cerca de 10% (BATISTA, 2015).

$$P_{lodo} = Y_S DQO_{apli} \quad (3.15)$$

$$Q_L = \frac{P_{lodo}}{C_{L-ss} \rho_L} \quad (3.16)$$

Onde,

- $P_{lodo}$  Produção de lodo no digestor (kg/s)
- $Y_S$  Coeficiente de produção de sólidos no reator anaeróbio (adimensional)
- $DQO_{apli}$  DQO aplicada no reator (kg/m³)
- $Q_L$  Vazão do lodo para tratamento (m³/s)
- $C_{L-ss}$  Concentração de sólidos suspensos no lodo para tratamento (kg/m³)
- $\rho_L$  Densidade do lodo para tratamento (kg/m³)

Para a produção de biogás, primeiramente é necessário saber quanto da DQO aplicada é convertida em metano:

$$DQO_{CH4-D} = Q_D \left( (DQO_{apli-D} - DQO_{ED}) - Y_S DQO_{apli-D} \right) \quad (3.17)$$

Onde,

- $DQO_{CH4-D}$  DQO convertida em metano no reator anaeróbio (kg/m³)
- $DQO_{apli-D}$  DQO aplicada no digestor (kg/m³)
- $Q_D$  Vazão na entrada do digestor (m³/s)
- $DQO_{ED}$  DQO do efluente líquido do digestor (kg/m³)

A metodologia proposta por (CHERNICHARO, 2007) prevê um fator de correção  $K(T)$ , em função da temperatura operacional do reator, para conversão da massa de metano em produção volumétrica:

$$Q_{CH4-D} = \frac{DQO_{CH4}}{K(T)} \quad (3.18)$$

$$K(T) = \frac{P \cdot K}{R \cdot T} \quad (3.19)$$

Onde,

$Q_{CH4-D}$  Vazão de metano produzido no reator anaeróbio ( $m^3/s$ )

$P$  Pressão (Pa)

$T$  Temperatura (K)

$K$  DQO correspondente a 1 mol de CH<sub>4</sub> (kgDQO/mol)

Para calcular a vazão de biogás, é necessário adotar uma fração volumétrica de CH<sub>4</sub>:

$$Q_{BD} = \frac{Q_{CH4-D}}{\gamma_{CH4-D}} \quad (3.20)$$

Onde,

$Q_{BD}$  Vazão de biogás no digestor ( $m^3/s$ )

$\gamma_{CH4-D}$  Fração volumétrica de metano no biogás do digestor (adimensional)

Considerando gás ideal e que a maioria das impurezas é representada pelo gás carbônico, a densidade do biogás pode ser calculada através da equação abaixo:

$$\rho_{BD} = \gamma_{CH4-D}\rho_{CH4} + \gamma_{CO2-D}\rho_{CO2} \quad (3.21)$$

Onde,

$\rho_{BD}$  Densidade do biogás na saída do digestor ( $kg/m^3$ )

$\rho_{CO_2}$  Densidade do gás carbônico nas condições de saída do digestor ( $kg/m^3$ )

$\rho_{CH_4}$  Densidade do metano nas condições de saída do digestor ( $kg/m^3$ )

$\gamma_{CO2-D}$  Fração volumétrica do gás carbônico no biogás do digestor (adimensional)

Densidade do lodo com 40% de sólidos de  $1080\text{kg/m}^3$  (BATISTA, 2015). As densidades com teores de sólidos diferentes serão calculadas proporcionalmente a esse valor.

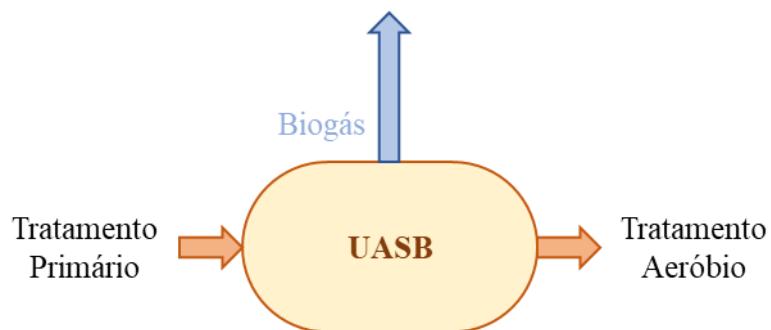
Aplicando todas as equações anteriores, com as condições de entrada da Tabela 3.1 e de saída de DBO<sub>5</sub> e sólidos suspensos estabelecidos pela CETESB no item 3.3, pode-se montar a Tabela 3.4, que apresenta as propriedades de cada uma das correntes do processo. A produção de biogás calculada utilizando-se as equações apresentadas anteriormente é de  $0,49\text{m}^3/\text{s}$  ou  $42404\text{m}^3/\text{dia}$  (a  $20^\circ\text{C}$  e 1 atm).

**Tabela 3.3** - Dados da corrente para o caso somente com digestor.

Etapa	Corrente	Q (m <sup>3</sup> /s)	DQO (kg/m <sup>3</sup> )	DBO <sub>5</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>ss</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	T <sub>ss</sub> (%)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Tratamento Primário</b>	Entrada	0,974	0,568	0,284	0,298	0,03	1000
	Efluente Digestor	0,260	3,000	0,250	6,000	0,60	1001
	Entrada Tratamento Primário	1,234	1,081	0,277	1,501	0,15	1000
	Lodo Tratamento Primário	0,025	18,334	4,696	40,320	4,00	1008
	Efluente Tratamento Primário	1,209	0,718	0,184	0,690	0,07	1000
<b>Tratamento Secundário</b>	Recirculação Lodo	1,209	7,364	4,050	9,000	0,90	1002
	Entrada Tratamento Aeróbio	2,418	3,849	2,117	4,845	0,48	1001
	Efluente Tratamento Aeróbio	2,418	4,455	2,450	5,392	0,54	1001
	Lodo Secundário	0,239	7,364	4,050	9,000	0,90	1002
	Efluente Final	0,969	0,109	0,060	0,001	0,00	1000
<b>Digestão</b>	Entrada Digestor	0,265	8,419	4,112	12,012	1,20	1002
	Lodo Digestor	0,004	103,185	2,946	102,000	10,00	1020
	Gás Digestor	0,507	-	-	-	-	0,99

**Opção 2:** Tratamento secundário anaeróbio e aeróbio

A fim de se produzir mais biogás, outra opção para o tratamento é inserir um reator UASB entre o tratamento primário e o tratamento aeróbio, conforme as Figuras 3.2 e 3.6.

**Figura 3.6** - Fluxograma do tratamento anaeróbio com reator UASB.

Fonte: Acervo Próprio

As equações para cálculo da produção de metano no digestor e a de produção de lodo na etapa aeróbia também se aplicam aqui. Os demais balanços de massa também se aplicam, com a diferença de que a DBO, DQO e sólidos suspensos que entram no reator aeróbio são menores do que no caso somente com tratamento primário. Dessa maneira, realizando-se os cálculos, chega-se na Tabela 3.5, com os dados de cada uma das correntes.

**Tabela 3.4 - Dados da corrente para o caso com digestor e UASB.**

<b>Etapa</b>	<b>Corrente</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>DQO (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>DBO5 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CSS (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>TSS (%)</b>	<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Tratamento Primário</b>	Entrada	0,974	0,568	0,284	0,298	0,03	1000
	Efluente Digestor	0,260	3,000	0,250	6,000	0,60	1001
	Entrada Tratamento Primário	1,234	1,081	0,277	1,501	0,15	1000
	Lodo Tratamento Primário	0,025	18,334	4,696	40,320	4,00	1008
	Efluente Tratamento Primário	1,209	0,718	0,184	0,690	0,07	1000
<b>Tratamento Secundário</b>	Efluente Tratamento Anaeróbio	1,209	0,215	0,074	0,080	0,01	1000
	Gás Anaeróbio	0,222	-	-	-	-	0,99
	Recirculação Lodo	1,209	7,364	4,050	9,000	0,90	1002
	Entrada Tratamento Aeróbio	2,417	4,041	2,117	4,540	0,45	1001
	Efluente Tratamento Aeróbio	2,417	4,455	2,450	5,392	0,54	1001
<b>Digestão</b>	Lodo Secundário	0,239	7,364	4,050	9,000	0,90	1002
	Efluente Final	0,969	0,109	0,060	0,001	0,00	1000
	Entrada Digestor	0,265	8,419	4,112	12,012	1,20	1002
	Lodo Digestor	0,004	103,184	241,71 1	100,00 0	10,00	1020
	Gás Digestor	0,505	-	-	-	-	0,99
<b>Gás</b>	Gás total	0,727	-	-	-	-	0,99

#### **4. Aproveitamento do Biogás**

Serão analisadas duas possibilidades para o aproveitamento do biogás: a queima direta para secagem do lodo digerido e a geração de energia elétrica para a própria ETE.

Apesar de existirem custos operacionais, eles não serão contabilizados aqui pois o detalhamento feito pelo estudo do Ministério das Cidades (Ministério das Cidades, 2017) se baseia no OPEX para a planta como um todo, desde o tratamento primário. Portanto, a estimativa desses custos somente para as etapas de produção e aproveitamento do biogás seria bastante incerta. Os únicos custos operacionais que serão considerados aqui são o de descarte do lodo e o gasto de energia elétrica na etapa de tratamento biológico uma vez que são esses custos que serão reduzidos aproveitando-se o biogás.

##### **4.1. Queima do biogás para secagem do lodo gerado no tratamento**

O tratamento e a disposição do lodo gerado no tratamento de esgoto é uma das etapas mais custosas do processo. Tanto para a disposição em aterro quanto para a utilização do lodo como fertilizante, os custos com transporte do lodo dependem diretamente da concentração de sólidos. Dessa maneira, quanto menor a concentração de sólidos, maiores os gastos com transporte. Porém, o adensamento do lodo também pode ser uma operação custosa por si só

(Sperling, 2001). A Tabela 4.1 mostra os diferentes teores de umidade típicos para lodos que passaram por diferentes processos de adensamento.

**Tabela 4.1** - Teores de umidade de lodo após diferentes etapas de adensamento.

Tipo Biossólido	Teor de umidade (médio)
Lodo Bruto	98,00%
Lodo Adensado	92,00%
Prensa Desaguadora	85,00%
Centrífuga	70,00%
Filtro Prensa	60,00%
Secagem térmica	10,00%

Fonte: (Sperling, Lodo de esgotos: tratamento e disposição final, 2001)

Conforme Tabelas 3.4 e 3.5, tanto para o caso com o reator UASB quanto para o caso sem o reator UASB, as vazões de lodo secundário, de lodo do digestor e os teores de sólidos de ambas as vazões são similares. Dessa maneira, serão avaliadas as seguintes situações:

**Caso 1:** Não há digestor e o lodo bruto que sai do decantador secundário é levado ao aterro após adensamento com filtro prensa.

**Caso 2:** Não há digestor e o lodo bruto que sai do decantador secundário é levado ao aterro após adensamento com filtro prensa e secagem térmica utilizando gás natural.

**Caso 3:** Há digestor, o lodo é adensado com filtro prensa e a secagem térmica é feita utilizando biogás.

Para realizar as comparações entre os três casos, é necessário saber os dados de queima do biogás e do gás natural, bem como os gastos com frete e disposição de resíduos em aterros sanitários.

Para os gastos em relação ao frete, serão utilizados os valores tabelados pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), que estabelecem os valores mínimos para frete segundo a Resolução 5867/2020, atualizada pela Portaria N° 169, de 18 de Março de 2022. Será considerado um caminhão com capacidade de 50m<sup>3</sup>, que segundo pesquisas, apresenta normalmente 5 eixos, carga tipo granel líquido e onde é contratado apenas o veículo. Assim, os custos mínimos de frete são de 4,5153 R\$/km e de carga de R\$ 289,28 (ANTT, 2022).

Os resíduos sólidos de Santo André são direcionados a um aterro em Mauá, cuja distância do centro de Santo André é de cerca de 12km. Dessa maneira, será considerada uma

aproximação de 20km para o transporte do lodo da ETE até o aterro. Para a disposição no aterro, (ANDREOLI, 2006) cita que os custos estavam na ordem de 20 a 60 dólares por tonelada. Já (Polezi, 2020) levantou que para a disposição em aterro na região de Várzea Paulista/SP era de cerca de 187 reais por tonelada. Será considerado o valor médio de 200 reais por tonelada para a disposição do lodo. Assim, o custo mensal para descarte do lodo pode ser calculado a partir da Equação 4.1:

$$C_D = M_L D_A + \frac{V_L}{V_C} (C_{KM} D + Car) \quad (4.1)$$

Onde,

$C_D$  = Custo de Descarte (R\$/mês)

$M_L$  = Massa de lodo a ser descartada (kg/dia)

$D_A$  = Custo de disposição do lodo no aterro (R\$/kg)

$V_L$  = Volume de Lodo a ser descartado (m<sup>3</sup>/dia)

$V_C$  = Volume do caminhão (m<sup>3</sup>/caminhão)

$C_{KM}$  = Custo de frete (R\$/km)

$D$  = Distância percorrida

$Car$  = Custo de carga (R\$/Caminhão)

Para o cálculo da quantidade de gás natural ou de biogás necessárias para mudar o teor de sólidos do lodo de 40% para 90% devem-se utilizar as seguintes considerações:

- 2744kJ para a evaporação de 1kg de água presente no lodo (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2017);
- A temperatura do biogás foi considerada como 20°C (próxima à média anual de Santo André de 19°C). A pressão considerada foi de 1 atm.
- O PCI do biogás com 70% de volume em metano é de 7kWh/Nm<sup>3</sup> (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2015). Para a temperatura de 20°C, é de 23481kJ/m<sup>3</sup>.
- O PCI do gás natural fornecido pela Comgás a 20°C é de 8600kcal/m<sup>3</sup> ou cerca de 36000kJ/m<sup>3</sup> (Comgás, 2017).
- A eficiência de queima tanto do biogás quanto do metano é de 70% (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2017).
- O custo do gás natural industrial fornecido pela Comgás está descrito na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** - Tabela de valores do gás natural fornecido pela Comgás a 1 atm e 20°C.

Classes	Volume (m <sup>3</sup> /mês)	Valores sem ICMS		Valores com ICMS	
		Fixo (R\$/mês)	Variável (R\$/m <sup>3</sup> )	Fixo (R\$/mês)	Variável (R\$/m <sup>3</sup> )
1	Até 50.0000m <sup>3</sup>	278,96	4,262257	330,52	5,050068
2	50.000,01 a 300.000,00m <sup>3</sup>	44.359,09	3,380785	52.558,16	4,005669
3	300.000,01 a 500.000,00m <sup>3</sup>	79.918,16	3,278485	94.689,76	3,884461
4	500.000,01 a 1.000.000,00m <sup>3</sup>	89.323,26	3,259676	105.833,25	3,862175
5	1.000.000,01 a 2.000.000,00m <sup>3</sup>	127.769,77	3,221235	151.385,98	3,816629
6	>2.000.000,00m <sup>3</sup>	228.075,67	3,187304	270.231,84	3,776427

Fonte: Adaptado de (Comgás, 2022)

Assim, a Tabela 4.3 mostra os valores calculados para os gastos com descarte e combustível para cada um dos casos.

**Tabela 4.3** - Gastos com Gás Natural e disposição do lodo.

	Ts (%)	Volume de lodo final (m <sup>3</sup> /mês)	Custo de Descarte (R\$)	Vazão Gás ou Biogás (m <sup>3</sup> /mês)	Custo do Gás (R\$)	Custo Total (R\$)
<b>Caso 1 (sem secagem)</b>	40,00	2.593	588.262	0	0	588.262
<b>Caso 2 (Secagem com GN)</b>	90,00	1.055	253.016	166.626	720.008	983.025
<b>Caso 3 (Secagem com biogás)</b>	90,00	1.055	253.016	259.725	0	263.016

Pode-se notar que o Caso 2, com a secagem térmica com o gás natural, não é viável se comparado com as outras duas opções. Dessa maneira, ela será desconsiderada. Além disso, a vazão de biogás necessária para a secagem é bem inferior à produzida, mesmo no caso da presença somente do digestor (259.725m<sup>3</sup>/mês ante 1.313.965m<sup>3</sup>/mês).

Para o cálculo do investimento em equipamentos, foram seguidos os valores apresentados no estudo de viabilidade técnica apresentado pelo Ministério das Cidades (2017). Os valores foram ajustados de acordo com as inflações anuais, que estão apresentadas na Tabela 4.4. Eles também foram ajustados proporcionalmente de acordo com a população, pois no estudo do Ministério foi considerada uma população de 100mil habitantes, enquanto aqui estão sendo consideradas 478096 pessoas.

**Tabela 4.4** - Inflação acumulada entre 2017 e 2021.

Ano	Inflação
2017	2,95%
2018	3,75%
2019	4,31%
2020	4,52%
2021	10,06%
<b>Acumulado</b>	<b>28,16%</b>

Fonte: (Banco Central do Brasil, 2022)

A Tabela 4.5 mostra os preços dos equipamentos ajustados para a configuração apenas com o digestor (Caso 3) pois o que foi o que apresentou a maior economia com a disposição do lodo final. Considerando uma taxa de juros igual à Taxa Selic atual de 12,75%, pode-se calcular o valor presente líquido desse investimento baseado apenas na economia anual relativa à disposição do lodo em aterros sanitários.

**Tabela 4.5** - Preço dos equipamentos para o caso somente com digestor (Caso 3).

Sistema	Proporção	Unitário em 2017 (R\$)	Total em 2017 (R\$)	Total em 2022 (R\$)
Digestor	4,78	1.085.332	5.188.931	6.650.391
Misturador	4,78	311.920	1.491.278	1.911.296
Tratamento do Gás	4,78	165.419	790.860	1.013.605
Gasômetro	4,78	318.514	1.522.802	1.951.699
Captação	4,78	137.923	659.405	845.126
Transporte	4,78	68.271	326.399	418.329
Medição de vazão	4,78	34.192	163.472	209.514
Composição	4,78	98.465	470.756	603.344
Queimador	4,78	91.864	439.197	562.897
Secador	1	1.000.000		1.000.000
		Total	11.053.100	15.166.201

**Tabela 4.6** - Valor presente líquido do investimento com digestor e apenas secagem do lodo (Caso 3).

Ano	Economia Secagem (R\$)	Saldo (R\$)
0	0	-15.166.201
1	288.467	-14.877.735
2	255.846	-14.621.888
3	226.915	-14.394.974
4	201.255	-14.193.719
5	178.496	-14.015.223
6	158.312	-13.856.911
7	140.409	-13.716.502
8	124.532	-13.591.970

9	110.449	-13.481.521
10	97.959	-13.383.561
11	86.882	-13.296.679
12	77.057	-13.219.622
13	68.343	-13.151.279
14	60.615	-13.090.664
15	53.761	-13.036.903
16	47.681	-12.989.222
17	42.289	-12.946.933
18	37.507	-12.909.425
19	33.266	-12.876.160
20	29.504	-12.846.656
21	26.168	-12.820.488
22	23.209	-12.797.280
23	20.584	-12.776.695
24	18.256	-12.758.439
25	16.192	-12.742.247

Como pode-se ver, não há lucro no projeto somente com a utilização do biogás para a secagem do lodo, mesmo sem considerar despesas operacionais, como mão de obra. Dessa maneira, deve-se encontrar outras fontes de receita para que a colocação de um digestor e de, posteriormente, um reator UASB, seja lucrativa.

#### 4.2. Geração de Energia Elétrica

Após a utilização do biogás para a secagem do lodo, ainda restam cerca de  $1,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mês}$  e  $1,9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mês}$  de biogás para os casos com apenas o digestor e para a combinação UASB e digestor, respectivamente. Assim, pode-se utilizar esse excedente para a geração de energia elétrica para abastecimento do próprio site ou para a geração distribuída.

Para uma população de 100mil habitantes, o consumo de energia elétrica de uma planta com lodos ativados mais digestor é de cerca de 2.139.982kWh/ano e de uma planta com lodos ativados mais UASB e digestor é de cerca de 1.430.422kWh/ano (Ministério das Cidades, 2017). Esses valores serão multiplicados pela proporção de 4,78 para considerar a diferença na população.

Para o cálculo da economia com energia elétrica foi considerada a tarifa de energia industrial A4 verde (2,3 a 25kV) da Enel. As tarifas relacionadas à demanda não foram levadas em consideração pois a demanda contratada não muda com ou sem a instalação do sistema de

aproveitamento energético do biogás. Na Enel, são 3 horas por dia útil de tarifa de ponta, o que significa 780 horas ponta por ano e 7980 horas fora ponta por ano.

Foram consideradas 8000h úteis do equipamento gerador e 38% de eficiência na conversão para energia elétrica (Ministério das Cidades, 2017) para calcular o consumo de biogás para o caso apenas com digestor de lodo e para o caso com o digestor e o UASB, presentes na Tabela 4.7. As sobras de biogás após a sua utilização na secagem do lodo e na geração de energia elétrica para consumo próprio serão avaliadas a posteriori.

**Tabela 4.7** - Utilização do Biogás para geração de energia elétrica para consumo próprio.

	<b>Tarifa A4 Verde</b>	<b>Horas</b>
<b>Ponta (R\$/kWh)</b>	R\$ 1,11	780
<b>Fora Ponta (R\$/kWh)</b>	R\$ 0,36	7980
	<b>Digestor</b>	<b>Digestor + UASB</b>
<b>Consumo (kWh/ano)</b>	10.231.168	6.838.790
<b>Custo (R\$/ano)</b>	R\$ 4.327.003	R\$ 2.892.286
<b>Motogerador necessário (MW)</b>	1,279	0,855
<b>Vazão Biogás para EE (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,143	0,096
<b>Sobra Biogás (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,263	0,531

As Tabelas 4.8 e 4.9 mostram os custos de investimento e o valor presente líquido para o caso somente com o digestor e as Tabelas 4.10 e 4.11 mostram os mesmos dados, mas para o caso com o digestor e o reator UASB. O custo do motogerador foi considerado como 500\$/kW (ajustado pela inflação de (Pauschert, 2009)) e o dólar valendo R\$ 5,00. O preço das instalações elétricas foi baseado no estudo do Ministério das Cidades de 2017, proporcional ao motogerador de 176kW que foi proposta naquele estudo.

**Tabela 4.8** - Custo de investimento para aproveitar energia térmica e elétrica com biogás do digestor.

<b>Sistema</b>	<b>Proporção</b>	<b>Unitário em 2017 (R\$)</b>	<b>Total em 2017 (R\$)</b>	<b>Total em 2022 (R\$)</b>
Digestor	4,78	1.085.332	5.188.931	6.650.391
Misturador	4,78	311.920	1.491.278	1.911.296
Tratamento	4,78	165.419	790.860	1.013.605
Gasômetro	4,78	318.514	1.522.802	1.951.699
Captação	4,78	137.923	659.405	845.126
Transporte	4,78	68.271	326.399	418.329
Medição de vazão	4,78	34.192	163.472	209.514
Composição	4,78	98.465	470.756	603.344
Queima	4,78	91.864	439.197	562.897
Secador	1	1.000.000		1.000.000
Motogerador	1	3.197.240		3.197.240
Instalações Elétricas	7,27	134.054	974.099	1.248.454
		<b>Total</b>	12.027.199	19.611.895

**Tabela 4.9** - Valor presente líquido da proposta com biogás do digestor para secagem de lodo e geração de energia elétrica.

Ano	Economia Secagem (R\$)	Economia EE (R\$)	Saldo (R\$)
0			-19.611.895
1	288.467	3.837.697	-15.485.732
2	255.846	3.403.722	-11.826.164
3	226.915	3.018.822	-8.580.427
4	201.255	2.677.448	-5.701.725
5	178.496	2.374.676	-3.148.552
6	158.312	2.106.143	-884.098
7	140.409	1.867.976	1.124.288
8	124.532	1.656.742	2.905.561
9	110.449	1.469.394	4.485.404
10	97.959	1.303.232	5.886.596
11	86.882	1.155.860	7.129.337
12	77.057	1.025.153	8.231.547
13	68.343	909.226	9.209.117
14	60.615	806.409	10.076.141
15	53.761	715.219	10.845.121
16	47.681	634.340	11.527.142
17	42.289	562.608	12.132.040
18	37.507	498.987	12.668.534
19	33.266	442.561	13.144.360
20	29.504	392.515	13.566.379
21	26.168	348.129	13.940.675
22	23.209	308.761	14.272.645
23	20.584	273.846	14.567.075
24	18.256	242.879	14.828.211
25	16.192	215.414	15.059.816

**Tabela 4.10** - Custo de investimento para aproveitar energia térmica e elétrica com biogás do digestor e reator UASB.

Sistema	Proporção	Unitário em 2017 (R\$)	Total em 2017 (R\$)	Total em 2022 (R\$)
Digestor	4,78	1.085.332	5.188.931	6.650.391
Misturador	4,78	311.920	1.491.278	1.911.296
Tratamento	4,78	165.419	790.860	1.013.605
UASB	4,78	1.085.332	5.188.931	6.650.391
Sistema de Remoção de Escuma	4,78	129.350	618.416	792.593
Sistema de Separação Trifásica	4,78	738.000	3.528.348	4.522.106
Gasômetro	4,78	318.514	1.522.802	1.951.699
Captação	4,78	137.923	659.405	845.126
Transporte	4,78	68.271	326.399	418.329
Medição de vazão	4,78	34.192	163.472	209.514

Composição	4,78	98.465	470.756	603.344
Queima	4,78	91.864	439.197	562.897
Secador	1	1.000.000		1.000.000
Motogerador	1	2.137.122		2.137.122
Instalações Elétricas	4,86	134.054	651.114	834.500
		<b>Total</b>	21.039.909	30.102.914

**Tabela 4.11** - Valor presente líquido da proposta com biogás do digestor e reator UASB para secagem de lodo e geração de energia elétrica.

Ano	Economia Secagem (R\$)	Economia EE (R\$)	Saldo (R\$)
0			-30.102.914
1	288.467	2.565.220	-27.249.227
2	255.846	2.275.140	-24.718.240
3	226.915	2.017.863	-22.473.463
4	201.255	1.789.679	-20.482.530
5	178.496	1.587.298	-18.716.736
6	158.312	1.407.803	-17.150.621
7	140.409	1.248.606	-15.761.606
8	124.532	1.107.411	-14.529.663
9	110.449	982.183	-13.437.031
10	97.959	871.115	-12.467.956
11	86.882	772.608	-11.608.466
12	77.057	685.240	-10.846.169
13	68.343	607.752	-10.170.074
14	60.615	539.026	-9.570.433
15	53.761	478.072	-9.038.601
16	47.681	424.010	-8.566.909
17	42.289	376.062	-8.148.558
18	37.507	333.536	-7.777.514
19	33.266	295.819	-7.448.429
20	29.504	262.368	-7.156.557
21	26.168	232.699	-6.897.691
22	23.209	206.385	-6.668.098
23	20.584	183.046	-6.464.468
24	18.256	162.347	-6.283.864
25	16.192	143.988	-6.123.684

Pode-se notar que o caso com apenas o digestor apresentou payback descontado de aproximadamente seis anos e meio, o que pode ser explicado pelo grande consumo de energia elétrica para esse sistema, uma vez que o tratamento secundário é completamente realizado de maneira aeróbica. Como a presença do reator UASB reduz o consumo de energia elétrica no

sistema de lodos ativados, o consumo de eletricidade é menor, acarretando numa menor economia de energia elétrica e a ausência de lucro nesse sistema, mesmo para 25 anos.

Porém, segundo a Tabela 4.7, ainda sobra biogás após a sua utilização para a secagem e geração de energia elétrica para autoconsumo. Considerando que a queima desse excedente é um desperdício de energia e pouco sustentável ambientalmente falando, uma alternativa é gerar ainda mais energia elétrica, que seria vendida no mercado livre. É esperado que o PLD médio de 2022 fique em torno de 55 reais o MWh (CCEE, 2022). Dessa maneira, pode-se montar a Tabela 4.12, que serve de base para o cálculo do valor presente líquido nas duas configurações de sistemas.

**Tabela 4.12** - Utilização do Biogás para geração de energia elétrica para consumo próprio e venda de excedente.

	<b>Tarifa A4 Verde (R\$)</b>	<b>Horas</b>	
<b>Ponta (R\$/kWh)</b>	1,11	780	
<b>Fora Ponta (R\$/kWh)</b>	0,36	7980	
			<b>Digestor + UASB</b>
<b>Consumo (kWh/ano)</b>	10.231.168	6.838.790	
<b>Custo (R\$/ano)</b>	4.327.003	2.892.286	
<b>Motogerador Autoconsumo (MW)</b>	1,279	0,855	
<b>Vazão Biogás para EE (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,143	0,096	
<b>Sobra Biogás (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,263	0,531	
<b>Motogerador Venda (MW)</b>	2,350	4,737	<b>PLD (R\$/kWh)</b>
<b>Energia Gerada (kWh/ano)</b>	18.801.711	37.892.168	0,055
<b>Receita Venda (R\$/ano)</b>	1.034.094	2.084.069	

As Tabelas 4.13 e 4.14 mostram os custos de investimento e o valor presente líquido para o caso somente com o digestor e as Tabelas 4.15 e 4.16 mostram os mesmos dados, mas para o caso com o digestor e o reator UASB. Os custos de equipamento seguiram as mesmas premissas utilizadas anteriormente.

**Tabela 4.13** - Custo de investimento para aproveitar energia térmica e elétrica com biogás do digestor, considerando venda de excedente.

<b>Sistema</b>	<b>Proporção</b>	<b>Unitário em 2017 (R\$)</b>	<b>Total em 2017 (R\$)</b>	<b>Total em 2022 (R\$)</b>
Digestor	4,78	1.085.332	5.188.931	6.650.391
Misturador	4,78	311.920	1.491.278	1.911.296
Tratamento	4,78	165.419	790.860	1.013.605
Gasômetro	4,78	318.514	1.522.802	1.951.699
Captação	4,78	137.923	659.405	845.126

Transporte	4,78	68.271	326.399	418.329
Medição de vazão	4,78	34.192	163.472	209.514
Composição	4,78	98.465	470.756	603.344
Queima	4,78	91.864	439.197	562.897
Secador	1	1.000.000	0	1.000.000
Motogerador Autoconsumo	1	3.197.240	0	3.197.240
Instalações Elétricas	7,27	134.054	974.099	1.248.454
Motogerador Venda	1	5.875.535	0	5.875.535
Instalações Elétricas	13,35	134.054	1.790.092	2.294.271
		<b>Total</b>	13.817.291	27.781.701

**Tabela 4.14** - Valor presente líquido da proposta com biogás do digestor para secagem de lodo e geração de energia elétrica para autoconsumo e venda de excedente.

Ano	Economia Secagem (R\$)	Economia EE (R\$)	Venda Energia (R\$)	Saldo (R\$)
0				-27.781.701
1	288.467	3.837.697	917.157	-22.738.381
2	255.846	3.403.722	813.443	-18.265.370
3	226.915	3.018.822	721.457	-14.298.176
4	201.255	2.677.448	639.873	-10.779.601
5	178.496	2.374.676	567.515	-7.658.913
6	158.312	2.106.143	503.339	-4.891.120
7	140.409	1.867.976	446.421	-2.436.313
8	124.532	1.656.742	395.938	-259.102
9	110.449	1.469.394	351.165	1.671.906
10	97.959	1.303.232	311.454	3.384.552
11	86.882	1.155.860	276.235	4.903.528
12	77.057	1.025.153	244.997	6.250.736
13	68.343	909.226	217.293	7.445.598
14	60.615	806.409	192.721	8.505.343
15	53.761	715.219	170.927	9.445.250
16	47.681	634.340	151.599	10.278.870
17	42.289	562.608	134.456	11.018.223
18	37.507	498.987	119.251	11.673.968
19	33.266	442.561	105.766	12.255.560
20	29.504	392.515	93.806	12.771.385
21	26.168	348.129	83.198	13.228.879
22	23.209	308.761	73.790	13.634.639
23	20.584	273.846	65.445	13.994.514
24	18.256	242.879	58.045	14.313.694
25	16.192	215.414	51.481	14.596.781

**Tabela 4.15** - Custo de investimento para aproveitar energia térmica e elétrica com biogás do digestor e do reator UASB, considerando venda de excedente.

Sistema	Proporção	Unitário em 2017 (R\$)	Total em 2017 (R\$)	Total em 2022 (R\$)
Digestor	4,78	1.085.332	5.188.931	6.650.391
Misturador	4,78	311.920	1.491.278	1.911.296
Tratamento	4,78	165.419	790.860	1.013.605
UASB	4,78	1.085.332	5.188.931	6.650.391
Sist. de Remoção de Escuma	4,78	129.350	618.416	792.593
Sist. de Separação Trifásica	4,78	738.000	3.528.348	4.522.106
Gasômetro	4,78	318.514	1.522.802	1.951.699
Captação	4,78	137.923	659.405	845.126
Transporte	4,78	68.271	326.399	418.329
Medição de vazão	4,78	34.192	163.472	209.514
Composição	4,78	98.465	470.756	603.344
Queima	4,78	91.864	439.197	562.897
Secador	1	1.000.000	0	1.000.000
Motogerador Autoconsumo	1	2.137.122	0	2.137.122
Instalações Elétricas	4,86	134.054	651.114	834.500
Motogerador Venda	1	11.841.302	0	11.841.302
Instalações Elétricas	26,91	134.054	3.607.675	4.623.776
		<b>Total</b>	<b>24.647.585</b>	<b>46.567.992</b>

**Tabela 4.16** - Valor presente líquido da proposta com biogás do digestor e do reator UASB para secagem de lodo e geração de energia elétrica para autoconsumo e venda de excedente.

Ano	Economia Secagem (R\$)	Economia EE (R\$)	Venda Energia (R\$)	Saldo (R\$)
0				-46.567.992
1	288.467	2.565.220	1.848.398	-41.865.906
2	255.846	2.275.140	1.639.378	-37.695.542
3	226.915	2.017.863	1.453.994	-33.996.772
4	201.255	1.789.679	1.289.573	-30.716.265
5	178.496	1.587.298	1.143.745	-27.806.725
6	158.312	1.407.803	1.014.408	-25.226.202
7	140.409	1.248.606	899.697	-22.937.490
8	124.532	1.107.411	797.957	-20.907.590
9	110.449	982.183	707.723	-19.107.235
10	97.959	871.115	627.692	-17.510.468
11	86.882	772.608	556.711	-16.094.267
12	77.057	685.240	493.757	-14.838.212
13	68.343	607.752	437.922	-13.724.195
14	60.615	539.026	388.401	-12.736.153
15	53.761	478.072	344.480	-11.859.841
16	47.681	424.010	305.525	-11.082.624
17	42.289	376.062	270.976	-10.393.296

18	37.507	333.536	240.333	-9.781.919
19	33.266	295.819	213.156	-9.239.678
20	29.504	262.368	189.052	-8.758.754
21	26.168	232.699	167.674	-8.332.215
22	23.209	206.385	148.713	-7.953.909
23	20.584	183.046	131.896	-7.618.383
24	18.256	162.347	116.981	-7.320.799
25	16.192	143.988	103.752	-7.056.866

Nota-se que novamente o processo que possui somente o digestor apresentou um valor presente líquido positivo, com payback descontado em torno de 9 anos. Por sua vez, o processo que utiliza também o reator UASB não apresentou lucro, mesmo em 25 anos. Mesmo vendendo mais energia, a economia anual ainda é menor que para o outro caso. Além disso, os investimentos são mais elevados, tanto para a utilização de um novo reator quanto para a utilização de um motogerador maior.

Contudo, foi considerado o PLD médio esperado para 2022 nos cálculos, que é bastante inferior ao PLD médio de 2021, que foi de cerca de R\$280/MWh (CCEE, 2022). Dessa maneira, pode-se calcular qual valor de PLD iria transformar o projeto com o reator UASB lucrativo em determinadas faixas de tempo. Os resultados estão na Tabela 4.17.

**Tabela 4.17 - PLD para ter lucro na opção com reator UASB.**

<b>Payback</b>	<b>PLD para lucro (R\$/MWh)</b>
5	262
10	139
25	80

Devido à variação do PLD nos últimos anos devido às diversas crises hídricas que o país tem passado, é difícil prever qual seria o payback desse projeto. Porém, pela Tabela 4.17 pode-se concluir que caso a crise hídrica se prolongue e o PLD voltar a ficar alto, o projeto será lucrativo.

## 5. CONCLUSÃO

Observando os resultados apresentados, pode-se perceber que para o estudo de caso proposto, as alternativas que indicam um uso mais nobre para o biogás podem ser bastante atraentes do ponto de vista econômico ambiental. Apenas a utilização do biogás para a secagem do lodo não torna os projetos lucrativos, mas a partir do momento em que se estudam alternativas em que se produz energia elétrica, os projetos começam a ficar mais atrativos.

Dentre as opções propostas, a que teve os melhores resultados foi a configuração de tratamento aeróbio com a geração do biogás através da digestão do lodo. Como a aeração é uma etapa que consome muita energia elétrica, o autoconsumo de energia elétrica gerada pela utilização do biogás em um moto-gerador é bastante lucrativa. O excedente também pode ser vendido, o que torna essa opção ainda mais versátil nas suas fontes de lucro. A opção que utiliza também um reator UASB para a geração de biogás não se mostrou tão atrativa atual de juros altos e PLD baixo pois é uma configuração que utiliza menos energia elétrica.

Deve-se ressaltar que o estudo de caso foi feito baseado no tratamento de esgoto de uma cidade que já atende quase 100% dos seus habitantes com coleta de esgoto. Dessa maneira, os investimentos necessários com infraestrutura civil para a universalização da coleta não estão considerados no retorno do investimento.

Espera-se que com o novo Marco Legal do Saneamento Básico e com subsequente entrada de novos investidores, não só cidades que já possuam altos níveis de coleta de esgoto, mas mesmo localidades menores e mais humildes possam ser contempladas com a universalização dos serviços de água e esgoto. E a utilização do biogás para secagem de lodo e geração de energia elétrica de modo a reduzir os gastos operacionais é uma alternativa interessante dentro desse processo.

## BIBLIOGRAFIA

ABREU, Natália. Como o esgoto é tratado? Saiba como funciona uma ETE – Estação de Tratamento de Esgoto. [S.I.]. **Autossustentável**, 2020. Disponível em: <https://autossustentavel.com/2020/08/como-o-esgoto-e-tratado-conheca-como-funciona-uma-ete.html>. Acesso: 17/03/2022.

ANDRADE NETO, C. O.; CAMPOS, J. R. Introdução. In.: CAMPOS, J. R. (Org). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

ANDREOLI, C. **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 417 p.

ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. (Org.). **Reciclagem de biossólidos: Transformando problemas em soluções**. Curitiba: Finep, 1999. 288p.

ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Portaria nº 169, de 18 de março de 2022. Diário Oficial: seção 1, Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-169-de-18-de-marco-de-2022-387043278>. Acesso em: 27/05/2022.

BATISTA, L. F. **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no distrito federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final**. 2015. 197p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade de Brasília: Brasília, 2015.

BCB. Banco Central do Brasil. Histórico das metas para a inflação. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicometas>. Acesso em: 17/05/2022.

CAMMAROTA, M. C. Tratamento de Efluentes Líquidos. UFRJ: Rio de Janeiro, 2011. 72p. **Notas de Aula**.

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

COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P.; JUNIOR, A. D.; SANTOS, M. M.; JOPPERT, C. L. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano: Part. I Biogás; Part. II Biometano.** São Paulo: Synergia, 2018.

COMGÁS. Manual de Instalação Industrial. Tarifas Industriais. Disponível em: <https://www.comgas.com.br/tarifas/industrial/>. Acesso em: 16/05/2022.

COSTA, E. D.; FILHO, O. B.; GIORDANO, G. **Reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB): uma abordagem concisa.** Rio de Janeiro: COAMB / FEN / UERJ, 2014. 121p.

FUGITA, Sandra Ruri. **Fundamentos do Controle de Poluição das Águas.** CETESB: São Paulo, 2018. 22p.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Benefícios Econômicos e Sociais da Expansão do Saneamento no Brasil.** Org.: FREITAS, F. G.; MAGNABOSCO, A. L. Ex Ante Consultoria Econômica, 2018.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento Instituto Trata Brasil 2022 (SNIS 2020).** São Paulo: GO Associados, 2022.

JUDD, Simon. Sludge incineration vs anaerobic digestion – the simple truth. **Sludge Processing** [S.I.], 2020. Disponível em: <https://www.sludgeprocessing.com/blog/sludge-incineration-vs-anaerobic-digestion-the-simpletruth/>. Acesso em: 25/05/2022.

LISBOA, Thalles Pedrosa. Aula 5: Química das Águas Parte 3b. Purificação de águas: tratamento de esgotos. Departamento de Química – UFJF. Disciplina de Química Ambiental. 2015, 27 slides. Disponível em: [https://www.ufjf.br/baccan/files/2012/11/Aula-5-Qu%C3%ADmica-das-Aguas\\_Parte3b-Thalles.pdf/](https://www.ufjf.br/baccan/files/2012/11/Aula-5-Qu%C3%ADmica-das-Aguas_Parte3b-Thalles.pdf). Acesso em: 25/05/2022.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto.** Probiogás: Brasília, 2015, 183p.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETE's a partir do biogás.** Probiogás: Brasília, 2017, 145p.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. Secretaria Nacional de Saneamento. **Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021.** Brasília, 2021. 223p.

PAUSCHERT, D. **Study of Equipment Prices in the Power Sector.** Energy Sector Management Assistance Program, 2009.121p.

POLEZI, M. **Redução de custos com transporte e disposição final de lodo: o caso da Estação de Tratamento de Esgotos de Várzea Paulista,** 2020. 27 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em MBA em Saneamento Ambiental). Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo. FESPSP: São Paulo, 2020.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto. SNIS: Brasília, 2021.

SPERLING, M. **Lodos Ativados.** Belo Horizonte: Imprensa Universitária da UFMG, 2002.

SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1996. 452p.

SPERLING, M. V. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG. 2001. 484 p.

WAELKENS, B. E.; STERNAD, W.; Miki, R. E. Bio-Methane from Sludge Digestion as Vehicle Fuel in Franca - Brazil. IWA Specialist Conference On Sludge Management – Sludge Tech 2017.

