

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA

Análise comparativa da produção de biogás e geração de energia elétrica a partir da biodigestão de lodo de diferentes sistemas de tratamento de esgoto doméstico

GABRIELA MARIA PAVANI GARCIA

SÃO PAULO – SP

2023

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA

GABRIELA MARIA PAVANI GARCIA

Análise comparativa da produção de biogás e geração de energia elétrica a partir da biodigestão de lodo de diferentes sistemas de tratamento de esgoto doméstico

Monografia apresentada à Universidade de São Paulo, como requisito básico para conclusão do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética

Área de Concentração: Uso de Biomassa, Saneamento e Biogás

Orientadora: Vanessa Pecora Garcilasso

SÃO PAULO – SP

2023

EPÍGRAFE

“Que Oxalá traga a luz; Nanã, a sabedoria; Xangô, a justiça; Iemanjá, o afeto; Ogum, a vitória; Iansã, a força; Oxóssi, a fartura; Ibeji, a alegria; Oxum, o amor; Omolu a saúde e Exu os caminhos abertos.”

(Oração popular da Religião Umbanda)

“Isto sabemos: a terra não pertence ao homem, o homem pertence à terra. Todas as coisas estão ligadas como o sangue que une uma família. Há uma ligação em tudo.

O que ocorrer com a terra recairá sobre os filhos da terra. O homem não tramou o tecido da vida, ele é simplesmente um de seus fios. Tudo o que fizer ao tecido, fará a si mesmo.”

(Cacique Sioux Ts'ial-la-kum, 1855)

RESUMO

GARCIA, G. M. P. **Análise comparativa da produção de biogás e geração de energia elétrica a partir da biodigestão de lodo de diferentes sistemas de tratamento de esgoto doméstico**. 2023. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023).

O lodo de esgoto produzido nos diversos processos de tratamento de esgotos sanitários representa uma biomassa rica energeticamente e com um alto potencial para a produção de biogás. Diante disto, o presente estudo teve como objetivo a análise comparativa da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia do lodo de esgoto proveniente de três tratamentos distintos: (i) UASB + Lodos Ativados; (ii) Lodos Ativados e; (iii) MBBR, e ainda analisar a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em cada cenário estudado. A metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo tiveram as seguintes etapas: a avaliação da produção de lodo para diferentes vazões em sistemas de tratamento de esgoto (50 L/s, 100 L/s, 200 L/s, 300 L/s, 500 L/s, 700 L/s e 1000 L/s); a comparação da produção de biogás a partir da biodigestão de lodos UASB + LA, LA e MBBR; a análise do potencial de geração de energia elétrica em motores de Ciclo Otto e a estimativa da receita com a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido e economia com os custos operacionais de energia elétrica. Os resultados demonstraram que o sistema UASB + LA apresentou a menor produção volumétrica de biogás e o menor potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás, cerca de 60% menor do que o sistema de LA e 48% menor do que o MBBR. Para o processo UASB + LA e LA cerca de 87,7% da energia elétrica produzida é consumida para o funcionamento do sistema de aeração, obtendo-se um saldo de 12,3% de energia elétrica remanescente. No caso do sistema MBBR, o consumo de energia elétrica excede a sua produção, apresentando um déficit de cerca de 14%. Concluiu-se que para os três sistemas as receitas com o reaproveitamento energético do biogás foram promissoras permitindo uma economia dos custos operacionais com energia elétrica integral para os processos de LA e UASB + LA e parcial para o processo de MBBR.

Palavras-chave: Aproveitamento energético. Digestão anaeróbia. Biogás. Saneamento básico. Biomassa. Lodos ativados. MBBR. UASB.

ABSTRACT

GARCIA, G. M. P. **Comparative analysis of biogas production and electricity generation from the anaerobic digestion of sludge from different domestic sewage treatment systems.** 2023. Final Project (Specialization Course in Renewable Energies, Distributed Generation, and Energy Efficiency – Continuing Education Program of the Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, 2023).

The sewage sludge produced in various sewage treatment processes represents an energetically rich biomass with high potential for biogas production. Therefore, this study aimed to perform a comparative analysis of biogas production through anaerobic digestion of sewage sludge from three different treatments: (i) UASB + Activated Sludge; (ii) Activated Sludge; and (iii) MBBR. Additionally, the study aimed to analyze the generation of electrical energy from the biogas produced in each studied scenario. The methodology adopted for the study included the following steps: evaluating sludge production for different flow rates in sewage treatment systems (50 L/s, 100 L/s, 200 L/s, 300 L/s, 500 L/s, 700 L/s, and 1000 L/s); comparing biogas production from the anaerobic digestion of UASB + AS, AS, and MBBR sludges; analyzing the potential for electricity generation in Otto cycle engines; and conducting an economic analysis of the impact of energy utilization from the studied sludges on the operational costs of wastewater treatment plants. Results showed that the UASB + AS system exhibited the lowest volumetric biogas production and the lowest potential for electricity generation from biogas, approximately 60% lower than the AS system and 48% lower than MBBR. For the UASB + AS and AS processes, about 87.7% of the generated electrical energy is consumed for the aeration system, resulting in a remaining 12.3% of electrical energy. In the case of the MBBR system, the electrical energy consumption exceeds its production, showing a deficit of about 14%. It was concluded that, for all three systems, the revenues from the energetic reuse of biogas were promising, allowing for cost savings in electrical energy expenses, fully for AS and UASB + AS processes and partially for the MBBR process.

Keywords: Energy recovery. Anaerobic digestion. Biogas. Basic sanitation. Biomass. Activated sludge. MBBR. UASB.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Desenho esquemático de um reator UASB.....	24
Figura 2.2 – Configuração típica de uma ETE com reator UASB e lodos ativados.....	25
Figura 2.3 – Esquema das fases microbiológicas da digestão anaeróbia.....	27
Figura 2.4 – Influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento de arqueias metanogênicas.....	29
Figura 2.5 – Esquema das unidades da etapa biológica dos sistemas de lodos ativados.....	31
Figura 2.6 – Esquema de um sistema de lodos ativados com operação por batelada.....	33
Figura 2.7 – Possíveis utilizações já comercializadas do biogás.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais características físicas e químicas do esgoto sanitário e suas contribuições per capita.....	21
Tabela 2.2 – Principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios em reatores UASB.....	25
Tabela 2.3 – Principais vantagens e desvantagens do processo de lodos ativados com aeração prolongada.....	32
Tabela 2.4 – Principais vantagens e desvantagens do processo de MBBR.....	35
Tabela 2.5 – Origem e descrição de alguns tipos de lodos secundários gerados no tratamento de esgotos.....	36
Tabela 2.6 – Características e quantidade de lodo produzido em alguns sistemas de tratamento de esgotos.....	37
Tabela 2.7 – Principais alternativas de disposição final do lodo.....	39
Tabela 2.8 – Intervalo de composição de misturas gasosas combustíveis.....	41
Tabela 2.9 – Composição típica de biogás em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário e digestores anaeróbios de lodo.....	42
Tabela 2.10 - Principais características físicas e químicas do biogás (60% de metano), do gás natural e do SynGas.....	43
Tabela 2.11 – Estimativas do consumo de biogás e produção diária de energia elétrica em base-Load.....	46
Tabela 2.12. Relação entre o consumo de biogás e a eficiência dos sistemas.....	49
Tabela 3.1. Parâmetros do efluente bruto e concentrações e cargas orgânicas para diferentes vazões.....	50
Tabela 3.2. Concentrações e cargas orgânicas do efluente encaminhado para o sistema de lodos ativados (pós tratamento anaeróbio em reator UASB).....	51
Tabela 3.3. Produção de sólidos no sistema por dia e vazão volumétrica de lodo diária para as diferentes vazões estudadas.....	52

Tabela 3.4. Produção de sólidos no sistema por dia e vazão volumétrica de lodo diária para as diferentes vazões estudadas.....	54
Tabela 3.5. Produção de sólidos no sistema por dia e vazão volumétrica de lodo diária para as diferentes vazões estudadas.....	55
Tabela 3.6. Produção volumétrica de gás metano diária e anual.....	55
Tabela 3.7. Volume anual de biogás produzido.....	56
Tabela 3.8. Potencial geração de energia elétrica por ano a partir do biogás a partir da biodigestão do lodo de ETE.....	56
Tabela 3.9. Consumo médio total diário de oxigênio (kgO ₂ /dia) e vazão diária de ar requerida nos processos de tratamento aeróbios (m ³ /d).....	56
Tabela 3.10. Potência estimada dos sopradores de ar (kW) e consumo anual de energia elétrica do sistema de fornecimento de ar (MWh/ano).....	58
Tabela 3.11. Receita com a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido e economia com os custos operacionais de energia elétrica (R\$/ano).....	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 – Comparação da produção diária de sólidos suspensos (SS) e sólidos suspensos voláteis (SSV) para o processo de tratamento UASB + Lodos Ativados....	60
Gráfico 3.2 – Comparação da produção diária de sólidos suspensos (SS) e sólidos suspensos voláteis (SSV) para o processo de tratamento de Lodos Ativados.....	61
Gráfico 3.3 – Comparação da produção diária de sólidos suspensos (SS) e sólidos suspensos voláteis (SSV) para o processo de tratamento MBBR.....	61
Gráfico 3.4 – Comparação da produção anual volumétrica de biogás ($\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{ano}$) para os diferentes processos e vazões (l/s) estudados.....	62
Gráfico 3.5 – Comparação do potencial geração de energia elétrica por ano a partir do biogás a partir da biodigestão do lodo de ETE.....	63
Gráfico 3.6 – Comparação do consumo anual de energia elétrica (MWh/ano) e do consumo diário de oxigênio (kgO_2/d) para os sistemas estudados.....	64
Gráfico 3.7 – Comparação da produção e consumo de energia elétrica e saldo energético para o sistema UASB + Lodos Ativados.....	65
Gráfico 3.8 – Comparação da produção e consumo de energia elétrica e saldo energético para o sistema de Lodos Ativados.....	65
Gráfico 3.9 – Comparação da produção e consumo de energia elétrica e saldo energético para o sistema de MBBR.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estações de Tratamento de Efluentes
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
GEE	Gases do Efeito Estufa
GN	Gás Natural
LA	Lodos Ativados
MBBR	<i>Moving Bed Bio Reactor</i>
NBR	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
OD	Oxigênio Dissolvido
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior
pH	Potencial de Hidrogênio
SINS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SS	Sólidos Suspensos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais
STV	Sólidos Totais Voláteis
SV	Sólidos Voláteis
TRS	Tempo de Retenção de Sólidos
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanke</i>

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1	Contextualização	15
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivos Gerais	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Metodologia	18
1.4	Estrutura do Trabalho	19
2	Revisão Bibliográfica	20
2.1	Saneamento Básico	20
2.1.1	Definição e Características do Esgoto Doméstico	20
2.2	Tecnologias de tratamento de esgoto	22
2.2.1	Reatores UASB	23
2.2.1.1	Biodigestão Anaeróbia	26
2.2.1.2	Principais Fatores que Influenciam no Processo de Digestão Anaeróbia	28
2.2.2	Lodos Ativados	30
2.2.3	MBBR	34
2.3	Lodos de Esgoto Sanitário	35
2.3.1	Uso e disposição final	38
2.4	Biogás	40
2.4.1	Definição e Composição do Biogás	40
2.4.2	Conteúdo Energético	42
2.4.3	Usos Finais do Biogás	43
2.5	Conversão do Biogás em Energia Elétrica	45
2.5.1	Tecnologias Para Aproveitamento Energético do Biogás	45
3	Estudo de Caso – Aproveitamento Energético do Biogás Obtido por meio do Tratamento Anaeróbio de Lodo de Esgoto	48
3.1	Descrição do Estudo de Caso	48
3.2	Estimativa da Produção de Lodo	49
3.2.1	Reatores UASB + Lodos Ativados	49
3.2.2	Lodos Ativados	51
3.2.3	MBBR	53
3.3	Biodigestão Anaeróbia do Lodo de ETE	54

3.3.1	Produção de Biogás	54
3.4	Produção de Energia – Cálculo da energia elétrica disponível no biogás	55
3.5	Consumo de Oxigênio e Energia Elétrica	57
3.6	Resultados e Discussões.....	60
4	Conclusão.....	67
	Referências Bibliográficas	69
	APÊNDICE A – Planilhas de Cálculo	71

1 Introdução

1.1 Contextualização

Conforme os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SINS, apenas cerca de 51% do esgoto sanitário gerado no Brasil é submetido a algum tipo de tratamento antes de ser despejado na natureza, o que indica que os índices de tratamento de esgoto ainda são precários no país. Analisando os dados percentuais para as macrorregiões brasileiras, verifica-se grande discrepância para os índices de tratamento de esgoto. Nas regiões Norte e Nordeste os índices de tratamento de esgoto são de apenas 20,6% e 35,5%, respectivamente. Na região Sul um pouco menos do que a metade do esgoto sanitário gerado é tratado, apresentando um índice de 46,7%. As demais regiões apresentam os maiores índices, sendo 58,6% para o Sudeste e 60,5% para o Centro-Oeste (SNIS, 2021). Por isso, as discussões sobre as diretrizes para a universalização dos serviços de saneamento são extremamente necessárias e, nos últimos anos, estratégias para a promoção do saneamento vêm sendo amplamente debatidas.

Além da necessidade de maximizar os índices de tratamento de esgoto com a implantação de novos sistemas, também é necessário realizar a manutenção e o aperfeiçoamento das unidades já existentes, investindo em tecnologias que otimizem os processos de tratamento contribuindo para um incremento na tratabilidade e eficácia dos sistemas e, também, na redução dos custos operacionais (OPEX - *Operational Expenditure*).

As rotas tecnológicas para o tratamento biológico do esgoto sanitário podem ser divididas, de forma geral, em processos aeróbios e anaeróbios. O processo anaeróbio sempre foi representativo no saneamento devido a sua alta eficácia para a remoção de matéria orgânica e baixo custo operacional, destacando-se a implementação de reatores do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). Entretanto, devido as novas políticas ambientais, a demanda por sistemas que possibilitem a remoção de substâncias de difícil degradação aumentou e, por isso, os sistemas aeróbios estão ganhando cada vez mais espaço no mercado do saneamento, destacando-se os processos de Lodos Ativados e MBBR (*Moving Bed Bio Reactor*).

Por se tratarem de processos com mecanismos de ação microbiológicos e bioquímicos distintos, a produção de lodo e o consumo energético das Estações de

Tratamento de Efluentes (ETE's) divergem de acordo com a tecnologia de tratamento selecionada.

Com o aumento das restrições ambientais quanto aos métodos de disposição de resíduos, a destinação ambientalmente correta para os subprodutos dos sistemas de tratamento de esgoto apresenta grande impacto para o desenvolvimento do setor de saneamento.

Os subprodutos do tratamento de esgoto representam uma fonte relevante de emissões de GEE (Gases do Efeito Estufa), à medida que sofrem decomposição a céu aberto devido a seu descarte inadequado. Ao sofrerem a degradação anaeróbia os resíduos sólidos e efluentes líquidos orgânicos, emitem metano (CH_4), cujo potencial de aquecimento global é 28 vezes o do dióxido de carbono (CO_2) (COELHO et al., 2020).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecida pela lei federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010) define destinação final ambientalmente adequada como:

(...) destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético (...) distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

As Companhias de Saneamento comprometidas com a leis e normas vigentes, em geral, destinam os lodos proveniente do tratamento de esgotos para os aterros sanitários, entretanto, apesar de encontrar amparo na legislação vigente, tal destinação não se apresenta como uma alternativa sustentável, à medida que o lodo de esgoto é um material orgânico que possui características físico-químicas com potencial para geração de energia elétrica e térmica, bem como para a produção de fertilizantes. Ou seja, um produto que possui alto potencial econômico vem sendo tratado meramente como um resíduo e passivo ambiental.

O segundo maior custo operacional para as concessionárias brasileiras de água e esgoto está atrelado ao consumo de energia elétrica, atrás, apenas, dos gastos com mão de obra (SNIS, 2022), sendo em alguns casos a maior despesa operacional. Adicionalmente, os custos com transporte e disposição do lodo residual pode representar até 60% dos custos operacionais em uma ETE (SNSA, 2015).

Neste cenário a biodigestão anaeróbia é vista como uma alternativa promissora para a estabilização do lodo gerado nos processos de tratamento de esgotos sanitários, sejam eles oriundos de processos anaeróbios ou aeróbios, à medida que permitem a redução do volume de material a ser disposto adequadamente e também a geração de biogás que pode ser convertido em energia elétrica.

No ano de 2015, 196 países incluindo o Brasil, assinaram o Acordo de Paris com o objetivo de fortalecer a resposta à ameaça das mudanças climáticas, por meio da redução das emissões de gases do efeito estufa (GEG). Uma das medidas que se faz necessária é a diminuição do uso dos combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) sem que haja impacto no suprimento de energia, à medida que o uso dos combustíveis fósseis é expressivo para a matriz energética brasileira. Para tanto, visando garantir um suprimento de energia sustentável, a busca por fontes renováveis alternativas é estratégica para a orientação da política energética (COELHO et al., 2020).

Em uma sociedade em que a Economia Circular vem ganhando cada vez mais espaço, alternativas que busquem eliminar o desperdício em quaisquer etapas da cadeia de produção e que permitam a valorização de subprodutos, possuem grande potencial para a captação de investimentos. Portanto, no contexto das Estações de Tratamento de Esgotos, tecnologias que promovam a sinergia entre o Setor de Saneamento e o Setor de Energia apresentam-se como soluções ambientalmente adequadas para o atual cenário sócio-econômico-ambiental.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem por objetivo realizar análise comparativa da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia do lodo de esgoto proveniente de três tratamentos distintos: (i) UASB + Lodos Ativados; (ii) Lodos Ativados e; (iii) MBBR. É objetivo ainda analisar a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em cada cenário analisado.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar e comparar a produção de lodo para diferentes vazões em sistemas de tratamento de esgoto doméstico por meio de processos anaeróbios (reatores UASB) e aeróbios (Lodos Ativados e MBBR);
- Analisar e comparar a produção de biogás a partir da biodigestão de lodos UASB + Lodos Ativados, Lodos Ativados e de Lodos MBBR provenientes do tratamento de esgoto doméstico;
- Analisar e comparar o potencial de geração de energia elétrica em motores de Ciclo Otto a partir do biogás produzido por meio da biodigestão de lodos provenientes de processos distintos utilizados no tratamento de esgoto doméstico;
- Estimar a receita com a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido e economia com os custos operacionais de energia elétrica para as Estações de Tratamento de Esgotos.

1.3 Metodologia

No presente trabalho foram realizados cálculos de estimativa de produção de lodo, considerando-se diferentes vazões de esgoto doméstico, para três tratamentos distintos: (i) UASB + Lodos Ativados; (ii) Lodos Ativados e; (iii) MBBR. Os dados utilizados neste trabalho para realização dos cálculos e os parâmetros qualitativos e quantitativos considerados para o esgoto doméstico, são em sua maioria, referências encontradas nas bibliografias acerca dos sistemas de tratamento de esgotos domésticos.

O passo seguinte foi o cálculo do potencial de biogás a ser produzido para cada um dos cenários avaliados por meio da biodigestão anaeróbia dos lodos de esgoto. A tecnologia selecionada para análise do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido nos diferentes cenários foi o motor Ciclo Otto, tecnologia comercialmente disponível no Brasil.

Ao final, foi estudado de forma comparativa o impacto econômico da geração e aproveitamento de energia elétrica nos custos operacionais para os diferentes sistemas de tratamento avaliados.

1.4 Estrutura do Trabalho

Após a introdução, objetivos e metodologia, o Capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica, onde é apresentada a definição e caracterização do tema, os processos e os parâmetros envolvidos no presente trabalho, a caracterização dos esgotos domésticos, as tecnologias de tratamento de esgotos (UASB, Lodos Ativados e MBBR) e suas respectivas produções de lodos, os conceitos referentes ao biogás e a biodigestão anaeróbia e a conversão do biogás em energia elétrica.

No Capítulo 3 é apresentada a descrição do estudo de caso adotado “Aproveitamento Energético do Biogás Obtido por meio do Tratamento Anaeróbio de Lodo de Esgoto”, bem como os parâmetros utilizados e vazões de efluente adotadas. Também são descritos os cálculos para a estimativa da produção de lodo para vazões distintas por meio das tecnologias UASB + Lodos Ativados, LA e MBBR, a produção de biogás por meio da biodigestão anaeróbia dos lodos de ETE e os cálculos da energia elétrica disponível no biogás. Além dos pontos anteriormente mencionados, é apresentada a estimativa da receita com a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido e economia com os custos operacionais de energia elétrica, visando avaliar o impacto do reaproveitamento energético no OPEX das ETEs. Por fim, são expostos os resultados obtidos para o estudo de caso avaliado.

No Capítulo 4 são descritas as considerações finais, sintetizando as conclusões obtidas ao longo do presente estudo.

O Capítulo 5 apresenta as referências bibliográficas citadas na monografia.

O Capítulo 6 refere-se o anexo onde são apresentadas as planilhas detalhadas dos cálculos desenvolvidos para obtenção dos resultados.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo tem por objetivo introduzir e discutir brevemente (1) o saneamento básico e as características do esgoto doméstico, (2) algumas tecnologias de tratamento de esgoto, (3) os tipos de lodo proveniente do tratamento de esgoto, (4) a produção de biogás a partir da biodigestão do lodo de esgoto e (5) as tecnologias para o aproveitamento energético do biogás.

2.1 Saneamento Básico

O saneamento básico pode ser definido como um conjunto de medidas que objetivam a preservação ou modificação das condições do meio ambiente visando a prevenção de doenças e a promoção da saúde pública e a melhoria da qualidade de vida da população. (Instituto Trata Brasil, 2012). No Brasil, o saneamento básico é um direito assegurado pela Constituição e definido pela Lei nº. 11.445/2007 como o conjunto dos serviços, infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais.

O tratamento correto do esgoto minimiza os impactos ambientais além de contribuir para saúde pública, diminuindo a ocorrência das doenças de veiculação hídrica, causadas majoritariamente por microrganismos patogênicos de origem entérica, animal ou humana (Instituto Trata Brasil, 2018).

Visando a correta destinação e tratamento dos despejos líquidos urbanos, a implantação de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), objetiva a remoção de poluentes do esgoto sanitário antes do seu lançamento em corpos hídricos, por meio da combinação de processos físico-químicos e biológicos (Instituto Trata Brasil, 2012).

2.1.1 Definição e Características do Esgoto Doméstico

De acordo com a norma brasileira NBR 9648 (ABNT, 1986) o esgoto sanitário doméstico pode ser definido como sendo um despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas. A composição volumétrica do esgoto, quando não contém resíduos industriais, é de aproximadamente 99,8%. O restante é formado por sólidos suspensos e sólidos dissolvidos que se encontram na forma de compostos orgânicos, nutrientes, microrganismos e sólidos inertes. As

concentrações destes compostos no esgoto variam de acordo com a região atendida pelo saneamento básico e de sua respectiva disponibilidade de água, do nível socioeconômico e da ocorrência de infiltrações na rede coletora de esgoto (VON SPERLING, 2005)

O Tabela 2.1. apresenta, resumidamente, as principais características físicas e químicas do esgoto sanitário doméstico e suas contribuições per capita.

Tabela 2.1 – Principais características físicas e químicas do esgoto sanitário e suas contribuições per capita.

Parâmetro	Contribuição per capita (g/hab.d)		Unidade	Concentração	
	Faixa	Típico		Faixa	Típico
Sólidos Totais	120 - 220	180	mg/L	700 - 1350	1100
Em suspensão	35 - 70	60	mg/L	200 - 450	350
Fixos	7 - 14	10	mg/L	40 - 100	80
Voláteis	25 - 60	50	mg/L	165 - 350	320
Dissolvidos	85 - 150	120	mg/L	500 - 900	700
Fixos	50 - 90	70	mg/L	200 - 550	400
Voláteis	35 - 60	50	mg/L	200 - 350	300
Sedimentáveis	-	-	mL/L	10 - 20	15
Matéria orgânica					
DBO5	40 - 60	50	mg/L	250 - 400	300
DQO	80 - 120	100	mg/L	450 - 800	600
Nitrogênio total	6,0 - 10,0	8,0	mgN/L	35 - 60	45
Nitrogênio orgânico	2,5 - 4,0	3,5	mgN/L	15 - 25	20
Amônia	3,5 - 6,0	4,5	mgNH3/ - N/L	20 - 30	25
Nitrito	~ 0	~ 0	mgNO2/ - N/L	~ 0	~ 0
Nitrato	0,0 - 0,2	~ 0	mgNO3/ - N/L	0 - 1	~ 0
Fósforo	0,7 - 2,5	1,0	mgP/L	4 - 15	7
Fósforo orgânico	0,2 - 1,0	0,3	mgP/L	1 - 6	2
Fósforo inorgânico	0,5 - 1,5	0,7	mgP/L	3 - 6	5
pH	-	-	-	6,7 - 8,0	7,0
Alcalinidade	20 - 40	30	mgCaCO3/L	100 - 250	200
Metais pesados	~ 0	~ 0	mg/L	traços	traços
Compostos orgânicos tóxicos	~ 0	~ 0	mg/L	traços	traços

Fonte: PROBIOGÁS (2015b).

2.2 Tecnologias de tratamento de esgoto

Considerando a composição complexa do esgoto, as estações de tratamento de efluentes são formadas por múltiplas unidades e processos combinados que objetivam a remoção destes componentes do esgoto.

O tratamento de esgoto é composto por unidades de tratamento preliminar, como decantação e sedimentação, seguido por tratamentos biológicos e químicos, primários e secundários.

O tratamento preliminar tem por objetivo a remoção dos sólidos grosseiros que se encontram em suspensão no efluente (estopas, sacolas plásticas, etc.) e sólidos sedimentáveis (areia). Nesta etapa do tratamento são utilizados processos de gradeamento manual ou mecanizado, caixas de retenção de areia e caixas de separação de óleos e gorduras (COELHO et al., 2018).

No tratamento primário são removidos sólidos em suspensão de pequena dimensão por meio do processo físico de sedimentação, usualmente realizado em decantadores primários, onde ocorre a formação de lodo primário não digerido. Como neste processo a remoção de carga orgânica é baixa, eliminação média de DBO¹ em cerca de 30%, este tipo de tratamento necessita uma complementação para que níveis mais altos de tratabilidade sejam atingidos (COELHO et al., 2018).

O tratamento secundário é biológico e pode ser aeróbio ou anaeróbio. Neste processo ocorre a remoção da matéria orgânica de maneira efetiva, podendo alcançar 90% ou mais de redução da DBO dependendo da escolha da configuração do processo de tratamento (COELHO et al., 2018).

Nos sistemas que operam na presença de oxigênio (aeróbios), ocorre apenas cerca de 40 a 50% de degradação biológica, com a consequente conversão em gás carbônico. Nestes processos, por volta de 30 a 40% da matéria orgânica é incorporada como biomassa, formando o lodo excedente do sistema. O material orgânico que não é convertido em gás carbônico ou em biomassa, ao final do processo, apresenta-se como material não degradado (5 a 15%) (CHERNICHARO, 2016).

¹ Demanda Bioquímica de Oxigênio, uma medida da quantidade de oxigênio (mgO₂/L) requerida para estabilizar biologicamente o esgoto.

Já no caso dos sistemas que operam na ausência de oxigênio (anaeróbios), a maior parcela do material orgânico biodegradável presente no efluente é convertida em metano (cerca de 50 a 70%), que é removido da fase líquida e deixa o reator na forma gasosa. Somente uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (por volta de 5 a 15%), formando o lodo excedente do sistema. Além da baixa produção de lodo excedente, este se encontra mais concentrado e mais adensado. Ao final do processo, o material que não é convertido em biogás ou biomassa apresenta-se como material não degradado (10 a 30%) (CHERNICHARO, 2016).

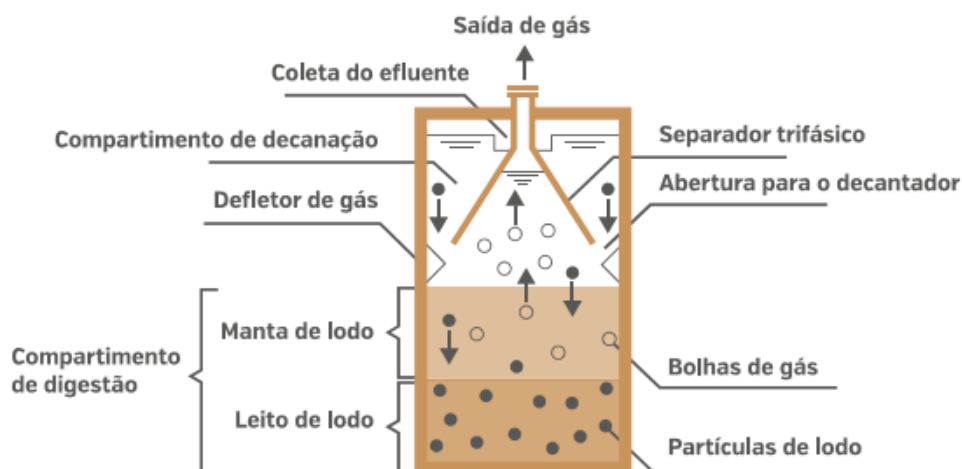
A seguir são descritas três tecnologias distintas para o tratamento a nível secundário do esgoto doméstico: (i) Reatores UASB (*Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*), (ii) Lodos Ativados e (iii) MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactor*).

2.2.1 Reatores UASB

Atualmente, a tecnologia anaeróbia UASB (*Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*), também conhecida como RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente), encontra-se consolidada para o tratamento do esgoto, sendo uma das principais opções avaliadas como rota operacional em estudos de alternativas para confecção de projetos e construção de uma ETE. Mesmo assim, a sua capacidade de remoção de matéria orgânica poluidora contida nos esgotos domésticos é limitada a cerca de 75%, sendo necessário a instalação de unidades de pós-tratamento para enquadrar o efluente final dentro dos valores permitidos para os parâmetros exigidos pela legislação ambiental vigente (CHERNICHARO, 2016).

Nos reatores anaeróbios ocorrem as etapas de digestão e adensamento, a matéria orgânica expressa em DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), em ausência de oxigênio e por meio da ação das bactérias anaeróbias, é convertida a compostos mais simples e degradáveis. De maneira simplificada, a digestão acontece em duas fases praticamente simultâneas, acidogênica e metanogênica, que serão abordadas no Capítulo 2.2.1.1. Como resultado final dessas reações biológicas tem-se metano (CH_4), gás carbônico (CO_2), água (H_2O) e amônia (NH_4), além de novas células bacterianas (CHERNICHARO, 2016).

Figura 2.1 – Desenho esquemático de um reator UASB.



Fonte: PROBIOGÁS, 2015b.

O fluxo do esgoto no reator é ascendente e durante o processo ocorre a produção de biogás, principalmente metano. O biogás produzido é coletado pelo sistema de cobertura, instalado na superfície do reator. Os reatores UASB podem ser empregados em conjunto com unidades de pós-tratamento, permitindo a produção de biogás e seu aproveitamento energético.

A estrutura interna dos reatores anaeróbios é constituída por dispositivos que permitem que ocorra a separação da fase líquida, dos gases e do lodo biológico. Ao passar pelo separador trifásico, o líquido atinge os vertedouros (calhas dentadas) encaminhado para a próxima etapa do tratamento. O lodo, devido a sua maior densidade, concentra-se no fundo do reator, sendo o seu excedente descartado (Figura 2.1).

O Tabela 2.2 apresenta algumas vantagens e desvantagens da digestão anaeróbia, evidenciando principalmente, a produção de gás metano e a baixa produção de sólidos.

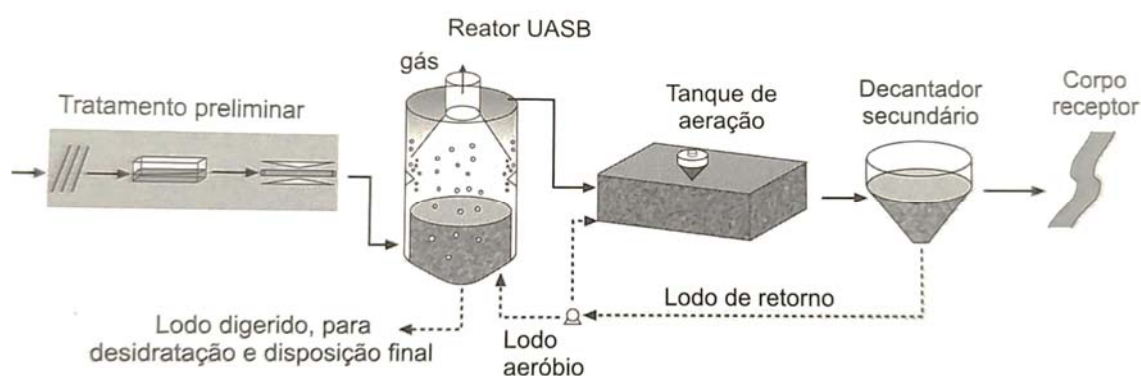
Tabela 2.2 – Principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios em reatores UASB.

Vantagens	Desvantagens
- Reduzida produção de sólidos, cerca de 2 a 8 vezes inferior do que processos aeróbios; - Baixo consumo de energia com economia de até 90% nos custos operacionais quando comparado aos sistemas aeróbios; - Baixa demanda de área de implantação; - Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico que pode ser utilizado para a produção de energia térmica e/ou elétrica; - Maior tolerância a elevadas cargas orgânicas; - Versatilidade para aplicação em pequena e grande escala; - Baixo consumo de nutrientes.	- Baixa remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo, e de patógenos, quando comparados aos processos aeróbios; - Produção de efluente com qualidade insuficiente para atender aos padrões ambientais mais elevados de tratabilidade, sendo necessária a implantação de um pós-tratamento; - Start-up do processo pode ser lento; - Gases que se encontram dissolvidos no efluente, como o H_2S, podem escapar para a atmosfera gerando maus odores e problemas de corrosão quando não controlados.

Fonte: CHERNICHARO (2016) e CHEN et al. (2020).

Para os casos em que se faz necessária uma unidade de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios (altos índices de tratabilidade requeridos), uma alternativa é a associação ao processo aeróbio de lodos ativados (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Configuração típica de uma ETE com reator UASB e lodos ativados



Fonte: CHERNICHARO (2016).

Após passar pelo tratamento anaeróbio no reator UASB, o efluente é encaminhado para o sistema de lodos ativados (tanque de aeração e decantador secundário). Neste processo, uma parcela do lodo aeróbio, depositada no fundo do decantador, é constantemente recirculada para a entrada do (tanque de aeração) e, a parcela de lodo aeróbio excedente, é encaminhada para o reator UASB, onde sofre

adensamento e digestão, juntamente com o lodo anaeróbio. Nesta configuração, o controle operacional do reator UASB não é afetado à medida que a vazão de retorno do lodo aeróbio excedente para o reator UASB é baixa quando comparada a vazão afluyente. (CHERNICHARO, 2016).

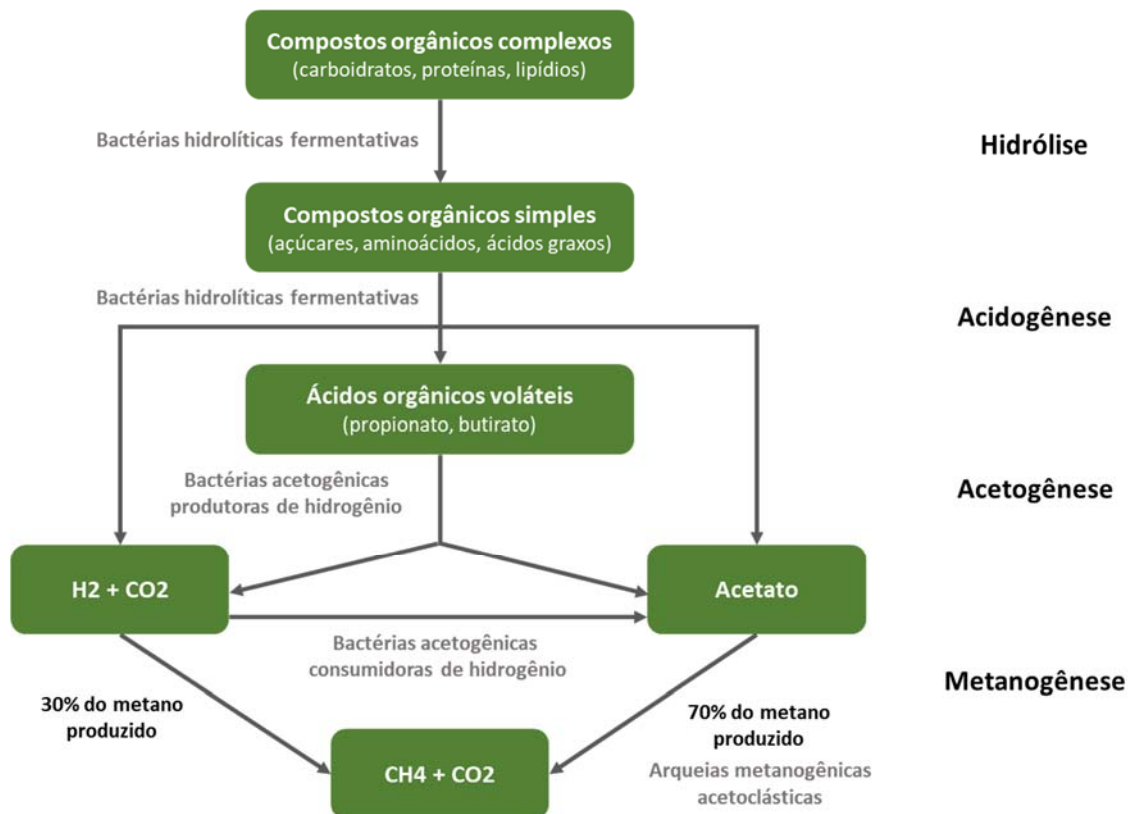
Como uma das vantagens deste sistema combinado UASB-lodos ativados destaca-se a diminuição dos custos operacionais com energia devido ao menor consumo de oxigênio nos reatores aeróbios (VON SPERLING, 2012), à medida que a maior parcela da matéria orgânica (cerca de 75%) já foi previamente removida durante o processo anaeróbio (CHERNICHARO, 2016).

2.2.1.1 Biodigestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um dos processos mais antigos utilizados para a estabilização de lodo, conhecida e empregada desde o final do século XIX, caracterizando-se pela estabilização da matéria orgânica por meio da ação de bactérias anaeróbias que crescem e se reproduzem na ausência de oxigênio molecular (ANDREOLI, 2014).

Trata-se de um processo bioquímico de múltiplos estágios, apresentando diversas rotas metabólicas que ocorrem simultaneamente e promovem a conversão da matéria orgânica complexa em metano (CH_4), gás carbônico (CO_2), água (H_2O), gás sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3), entre outras substâncias químicas, além de novas células de microrganismos. As principais rotas metabólicas envolvidas no processo de biodigestão anaeróbia são: hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese (METCALF & EDDY, 2016). A Figura 2.3 ilustra as sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.

Figura 2.3 – Esquema das fases microbiológicas da digestão anaeróbia.



Fonte: Adaptado de ANDREOLI et al. (2014).

Conforme apresentado na Figura 2.3, na hidrólise, as bactérias fermentativas realizam a conversão dos compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídeos) em materiais orgânicos de menor complexidade (açúcares, aminoácidos e peptídeos). Os microrganismos acidogênicos, também fermentativos, metabolizam esses substratos mais simples e formam substâncias como ácidos orgânicos (ácido acético, propiônico e butírico), álcoois (etanol), cetonas (acetona), dióxido de carbono e hidrogênio. Na acetogênese, os ácidos orgânicos produzidos na acidogênese são convertidos em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Esse produto é então metabolizado pelas arqueias metanogênicas, responsáveis pela produção do CH₄ (ANDREOLI et al., 2014).

Os digestores de lodo são utilizados no saneamento visando a estabilização de lodos primários e secundários, provenientes do tratamento de esgotos. A alimentação do digestor anaeróbio ocorre de forma contínua, ou quase contínua, e o lodo é mantido no seu interior por um determinado intervalo de tempo. Este processo permite a redução do

volume de lodo a ser encaminhado à disposição final e ainda possibilita o aproveitamento da energia bioquímica, por meio da sua conversão em biogás (PROBIOGÁS, 2015b).

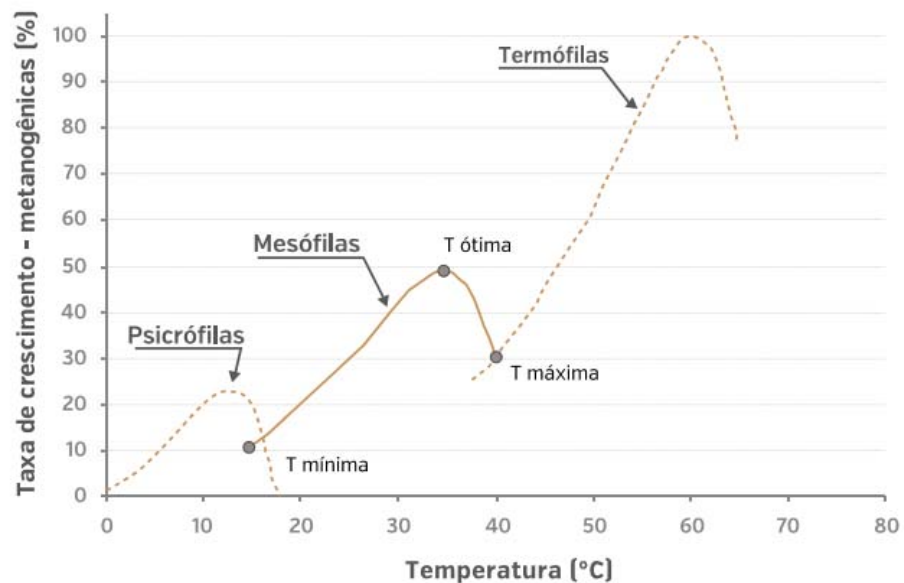
2.2.1.2 Principais Fatores que Influenciam no Processo de Digestão Anaeróbia

A eficiência e estabilidade do processo de digestão anaeróbia variam de acordo com as características do lodo afluente ao digestor. Os principais parâmetros que influenciam o processo de digestão anaeróbia são:

- **Ausência de oxigênio:** as arqueias metanogênicas operam apenas na ausência de oxigênio. Na presença de oxigênio a decomposição da matéria orgânica produz somente o gás carbônico, não ocorrendo a formação do metano.
- **Composição do substrato:** visando a determinação da eficiência do processo de digestão anaeróbia, é importante conhecer as características da matéria orgânica utilizada como substrato. Quanto maior for o conteúdo de matéria orgânica presente no substrato, maior será o potencial de produção de biogás.
- **Temperatura:** alterações de temperatura podem interferir na atividade metabólica da população bacteriana e também podem impactar nas taxas de transferência de gás e nas características de sedimentação do lodo biológico. No processo de digestão anaeróbia, a temperatura influencia na obtenção da taxa de digestão, especialmente nas taxas de hidrólise e formação de metano (METCALF & EDDY, 2016).

As arqueias metanogênicas são muito sensíveis às alterações de temperatura. A Figura 2.4. abaixo demonstra que as espécies termofílicas atingem a sua taxa máxima de crescimento a 60°C, enquanto em condições mesofílicas alcançam cerca de 50% da taxa para temperaturas entre 32 e 36°C. Abaixo de 28°C e por volta de 40°C, os reatores operam com menos de 30% da eficiência máxima (PROBIOGÁS, 2015b).

Figura 2.4 – Influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento de arqueias metanogênicas.



Fonte: PROBIOGÁS (2015b).

Em geral, para temperaturas abaixo de 10°C o processo é interrompido, e acima de 65°C, em decorrência do excesso de calor, as enzimas ficam inativadas perdendo a função de degradar a matéria orgânica (COELHO et al., 2018).

- **pH do meio:** os microrganismos envolvidos no processo de digestão anaeróbia necessitam de um meio com pH ótimo para que as reações bioquímicas ocorram. Para as bactérias hidrolíticas e acidogênicas o pH ideal do meio é de 5,2 a 6,3, podendo ser um pouco mais elevado e, tendo neste caso como consequência uma diminuição de suas atividades. Já nas ultimas fases do processo as bactérias acidogênicas e metanogênicas dependem estritamente de um pH neutro, podendo variar entre 6,5 e 8,0 (COELHO et al., 2018).
- **Alcalinidade:** bicarbonatos de cálcio, magnésio e amônio são algumas substâncias com capacidade de tamponamento encontradas nos digestores anaeróbios. A alcalinidade presente no reator é consumida pelo CO₂ formado nas fases de fermentação e metanogênese, que ao se solubilizar no líquido forma ácido carbônico. O conteúdo de um digestor operando em regime permanente deve apresentar uma alcalinidade total variando entre 2.000 e 5.000 mg/L (METCALF & EDDY, 2016).

- **Tempo de retenção de sólidos (TRS):** o dimensionamento dos reatores é baseado no tempo de retenção do lodo no reator, de forma que possibilite uma redução expressiva na concentração de sólidos suspensos voláteis (SSV). As reações de hidrólise, fermentação e metanogênese estão diretamente relacionadas com o TRS. Um aumento ou uma diminuição no TRS acarreta em um aumento ou uma diminuição da duração de cada reação. Caso o tempo de retenção de sólidos seja menor do que o mínimo necessário, os microrganismos não crescerão na velocidade necessária para a manutenção do processo de digestão (METCALF & EDDY, 2016).

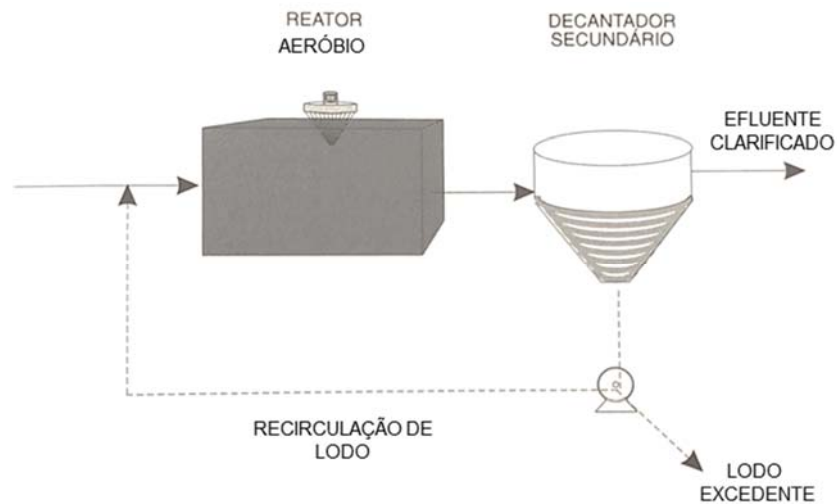
O grande volume de resíduos gerados em atividades urbanas, rurais e industriais, apresenta elevada carga poluente que pode gerar impactos ambientais, sociais e econômicos. Desta forma, o tratamento destes resíduos em sistemas anaeróbios apresenta-se como uma alternativa promissora à medida que além de despoluir, permite o aproveitamento energético do biogás, que pode contribuir para a amortização dos custos dos sistemas utilizados (COELHO et al., 2018).

2.2.2 Lodos Ativados

O sistema de tratamento lodos ativados consiste em: tanques de aeração seguidos de decantação e sistema de recirculação do lodo (Figura 2.5). É amplamente utilizado em situações em que se exige um maior índice de tratabilidade para o efluente final e reduzida área de implantação. Entretanto, trata-se de um sistema que possui um índice de mecanização superior ao de outros processos, ocasionando em maiores custos operacionais e de manutenção, além de maior consumo de energia elétrica (VON SPERLING, 2012).

O efluente é conduzido para o tanque de aeração, onde é feita a aeração e mistura. São nestes tanques que ocorrem as reações de remoção de substrato carbonáceo e amônia (matéria nitrogenada), à medida que as bactérias se utilizam do substrato presente no efluente bruto para se desenvolver (VON SPERLING, 2012).

Figura 2.5 – Esquema das unidades da etapa biológica dos sistemas de lodos ativados.



Fonte: Adaptado VON SPERLING, 2012.

No decantador ocorre a sedimentação de sólidos (biomassa), resultando na saída de um efluente clarificado. A maior parcela de lodo sedimentado no fundo do decantador é retornada ao tanque de aeração visando aumentar a concentração de biomassa no mesmo, o que ocasiona em elevada eficiência do sistema (VON SPERLING, 2012). E, a menor parcela de lodo sedimentado é retirada para manter constante a biomassa no sistema (lodo excedente).

O lodo excedente gerado no sistema de lodos ativados pode ser encaminhado para biodigestores anaeróbios onde o lodo sofrerá adensamento e digestão, produzindo biogás.

O Tabela 2.3 apresenta algumas vantagens e desvantagens do sistema de lodos ativados com aeração prolongada.

Tabela 2.3 – Principais vantagens e desvantagens do processo de lodos ativados com aeração prolongada.

Vantagens	Desvantagens
- Elevada eficiência de remoção de DBO (93 a 98%); - Reduzida possibilidade de maus odores por se tratar de um sistema aeróbio; - Possibilita a remoção biológica de N e P através dos processos de nitrificação e desnitrificação; - Elevada resistência a variações de carga orgânica e cargas tóxicas devido ao maior tempo de detenção da biomassa no reator (18 a 30 dias); - Estabilização do lodo no próprio reator, produção apenas do lodo secundário.	- Elevados custos de implantação devido ao sistema de aeração e volume do reator; - Elevado custo operacional com energia devido ao sistema de aeração. Uma maior quantidade de oxigênio deve ser fornecida para que a matéria orgânica seja oxidada quando operando no sistema de aeração prolongada; - Elevado índice de mecanização: sopradores de ar, difusores, de ar, instrumentação para o monitoramento e controle do oxigênio no processo;

Fonte: VON SPERLING (2012) e CHEN et al. (2020).

Existem algumas variações do processo de lodos ativados, entretanto o foco do presente estudo é o processo de lodos ativados com aeração prolongada por batelada. Nesta configuração a biomassa fica retida no sistema por um período mais longo, entre 18 e 30 dias, recebendo a mesma carga de DBO, portanto, haverá menor disponibilidade de alimento para as bactérias. Devido a menor quantidade de matéria orgânica por unidade de volume do tanque de aeração e por unidade de biomassa do reator, as bactérias intensificam nos seus processos metabólicos a utilização da própria matéria orgânica celular. Esta matéria orgânica celular através da respiração é transformada em gás carbônico e água, correspondendo a uma estabilização da biomassa no próprio reator aeróbio. Como consequência do consumo adicional de oxigênio para a estabilização do lodo (respiração endógena), é necessário um maior fornecimento de ar ao sistema, ocasionando em um aumento dos custos operacionais com energia elétrica para o funcionamento dos sopradores de ar (VON SPERLING, 2012).

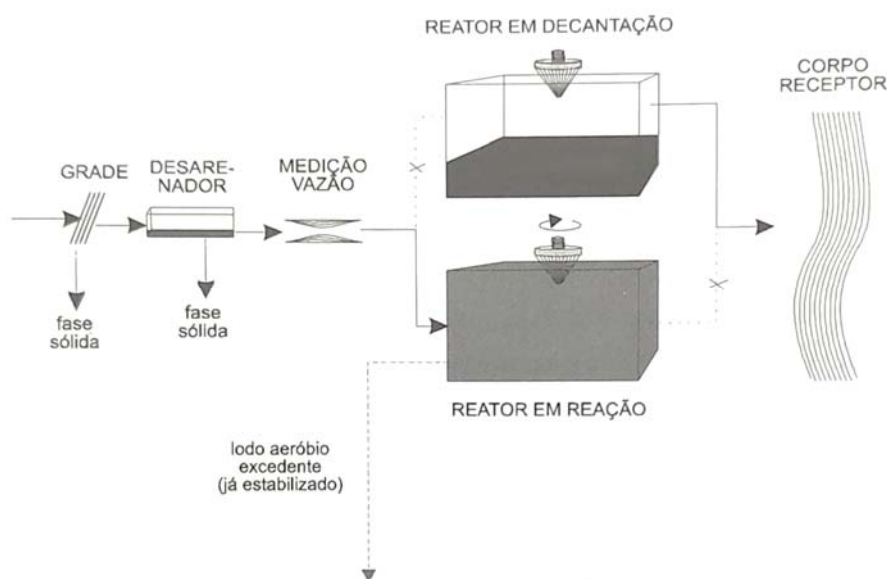
No processo de lodos ativados convencional, visando a redução dos custos com energia para a aeração e a redução do volume do reator biológico aeróbio, uma parcela da matéria orgânica é removida do efluente antes do tanque de aeração, por meio do decantador primário. Nesta configuração, o tempo de detenção da biomassa no sistema é da ordem de 4 a 10 dias e o lodo excedente removido por meio do decantador secundário ainda necessita de uma etapa de estabilização. Pelo fato da carga de DBO aplicada por unidade de volume ser alta e devido ao baixo tempo de

detenção da biomassa no sistema, o processo de lodos ativados convencional apresenta menor eficiência de remoção de DBO (85 a 90%) quando comparado ao processo de lodos ativados com aeração prolongada (93 a 98%) (VON SPERLING, 2012).

Conforme ilustrado na Figura 2.6, o processo de lodos ativados com aeração prolongada por batelada consiste em um ou mais reatores de mistura completa onde ocorrem todas as etapas do tratamento: enchimento, aeração, sedimentação/decantação e descarte. A biomassa permanece no reator durante todos os ciclos, eliminando a necessidade de implantação de decantadores separados.

Na etapa de enchimento o reator é alimentado pelo efluente bruto até atingir o nível operacional. Os aeradores são então ativados e inicia-se o processo de aeração e mistura da massa líquida contida no reator. Ao final da fase de aeração, os aeradores são desligados e ocorre a sedimentação e separação dos sólidos em suspensão do esgoto tratado. Por fim, é realizado o descarte do efluente clarificado do reator. Como a chegada de esgoto bruto na ETE é constante, os reatores operam de maneira alternada realizando simultaneamente fases distintas do processo. Ou seja, enquanto um reator está na fase de aeração, o outro já está realizando a fase de decantação. Desta forma, o tempo de operação de cada ciclo pode ser modificado de acordo com as variações da vazão de entrada do sistema. (VON SPERLING, 2012).

Figura 2.6 – Esquema de um sistema de lodos ativados com operação por batelada.



2.2.3 MBBR

O sistema biológico de tratamento MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactor*) consiste em um processo aeróbio com crescimento aderido no qual a biomassa responsável pelo tratamento está aderida a algum tipo de meio suporte (material de enchimento). Usualmente, são utilizadas biomédias² de baixa densidade e elevada área superficial para favorecer o crescimento aderido da biomassa (METCALF & EDDY, 2016).

O processo de MBBR é uma tecnologia adaptada aos sistemas de lodos ativados, por meio da introdução de biomédias no interior do tanque de aeração, que atuam como meio suporte para desenvolvimento do biofilme³. As biomédias são mantidas em suspensão devido a constante circulação e mistura que ocorre em função da introdução de ar difuso no reator aeróbio, o que garante uma melhor mistura do efluente e maior adesão da biomassa nesses meios suportes (METCALF & EDDY, 2016).

Assim como no processo de lodos ativados, o sistema é formado por um reator aerado e um decantador secundário. O efluente tratado no reator aeróbio é encaminhado para o decantador secundário, onde é separado em água clarificada e lodo sedimentado. A água clarificada transborda na parte superior do clarificador secundário, e o lodo é então recirculado para o tanque de aeração. Este lodo é formado por bactérias ainda ávidas por matéria orgânica e, por isso, são enviadas novamente para o reator (METCALF & EDDY, 2016).

O lodo de excesso formado na aeração, fruto da produção de sólidos do sistema, adentra os decantadores secundários, onde sedimentam em direção ao fundo do decantador. O lodo excedente deve ser removido periodicamente e pode ser encaminhado para uma unidade de tratamento de lodo ou digestor anaeróbio de lodo visando a produção de biogás (METCALF & EDDY, 2016).

Este sistema apresenta eficiências mais altas de remoção de DBO (entre 95 a 98%) quando comparadas ao processo de lodos ativados. As principais vantagens e

² Meio suporte utilizado em processos biológicos de tratamento com o crescimento da biomassa aderida. Usualmente são fabricadas em materiais como polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP) e esponjas patenteadas (LINPOR®, MONERA®). As biomédias possuem elevada área superficial ($100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ - $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$) possibilitando a operação dos reatores com uma maior concentração de biomassa em um menor volume.

³ Camada de biomassa que se desenvolve sobre a superfície de um meio suporte utilizado nos processos com crescimento aderido.

desvantagens do processo de MBBR quando comparado ao processo de Lodos Ativados encontram-se discriminadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Principais vantagens e desvantagens do processo de MBBR.

Vantagens	Desvantagens
- Menor área necessária para instalação; - Operação simples, sem a necessidade do descarte manual do lodo e controle do tempo de retenção de sólidos (idade do lodo), bem como da recirculação de lodo; - Eliminação da preocupação com a formação de lodos de difícil sedimentação (<i>bulking</i>) que poderiam comprometer as etapas de clarificação; - Sistema mais robusto para suportar variações nas vazões de pico em períodos de chuva.	- Maior consumo de energia elétrica devido à necessidade de se operar o sistema com concentrações mais elevadas de OD (oxigênio dissolvido); - Problemáticas atreladas à manutenção dos difusores de ar devido à necessidade de remoção dos meios suportes; - Perda de carga adicional em decorrência do escoamento do líquido através do meio suporte e de dispositivos de retenção, impactando no perfil hidráulico do reator; - Utilização de meios suportes patenteados; - Necessidade de aumentar a qualidade do afluente ao sistema por meio do uso de peneiras.

Fonte: Adaptado METCALF & EDDY (2016).

2.3 Lodos de Esgoto Sanitário

O termo “lodo” é utilizado para se referir aos subprodutos sólidos dos sistemas de tratamento de esgotos. Na etapa referente ao tratamento, parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, sendo componente da biomassa microbiana, denominada de lodo biológico (secundário), que é composto majoritariamente por sólidos biológicos (biossólido). Se a remoção da biomassa não for realizada, pode ocorrer um acúmulo da mesma no sistema, ocasionando em problemas de arraste de lodo para as etapas subsequentes, comprometendo a qualidade do efluente final em termos de matéria orgânica e sólidos em suspensão (ANDREOLI et al., 2014).

A classificação do lodo secundário varia de acordo com o processo gerador, distinguindo-se em lodos aeróbios (não estabilizados), lodos aeróbios (estabilizados) e lodos anaeróbios (estabilizados). O Tabela 2.5. apresenta uma descrição sucinta dos tipos de lodo citados e sua origem no tratamento de esgotos.

Tabela 2.5 – Origem e descrição de alguns tipos de lodos secundários gerados no tratamento de esgotos.

Lodo Secundário	Origem	Descrição
Lodo biológico aeróbio (não estabilizado)	- Lodos ativados convencional - Reatores aeróbios com biofilmes – alta carga (filtro biológico de alta carga, biofiltros aerados submersos e biodiscos)	Formado pela biomassa resultante da remoção de matéria orgânica presente no esgoto devido à ação de microrganismos aeróbios. Esta biomassa apresenta crescimento constante devido a entrada contínua de matéria orgânica nos reatores biológicos. Para o equilíbrio do sistema, praticamente a mesma massa que é gerada de sólidos biológicos, deve ser removida. Caso o tempo de detenção dos sólidos no sistema seja baixo e houver disponibilidade de alimento, haverá maiores teores de matéria orgânica na composição celular dos sólidos biológicos. Estes sólidos ainda não estão estabilizados (digeridos), sendo necessária uma etapa subsequente de digestão.
Lodo biológico aeróbio (estabilizado)	- Lodos ativados – aeração prolongada - Reatores aeróbios com biomódia - MBBR - Reatores aeróbios com biofilmes – baixa carga (filtro biológico de baixa carga, biodisco, biofiltro aerado)	É majoritariamente formado por microrganismos aeróbios que crescem e se multiplicam utilizando a matéria orgânica do esgoto bruto. Entretanto, nos sistemas de baixa carga, a disponibilidade de material orgânico é reduzida, e a biomassa possui maior tempo de residência no sistema, o que acarreta na predominância das condições de respiração endógena. Como consequência, a biomassa usa as próprias reservas de matéria orgânica de sua composição celular, originando um lodo com um conteúdo reduzido de matéria orgânica e maior teor de sólidos inorgânicos, ou seja, digerido.
Lodo biológico anaeróbio (estabilizado)	- Lagoas de estabilização (lagoas facultativas, lagoas anaeróbias-facultativas, lagoas aeradas facultativas, lagoas aeradas de mistura completa-lagoas de decantação) - Reatores anaeróbios (reatores UASB, filtros anaeróbios)	Em condições anaeróbias (sem a presença de oxigênio), a biomassa anaeróbia também faz uso da matéria orgânica para promover o seu crescimento e multiplicação. Nestes processos, geralmente o tempo de retenção da biomassa é longo, período no qual ocorre a digestão anaeróbia do próprio material celular, portanto, o lodo também se encontra digerido ao final do processo.

Fonte: ANDREOLI et al. (2014).

Os parâmetros utilizados para a caracterização dos lodos são sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST), oriundos da conversão da DQO⁴ do esgoto em lodo. Durante a etapa biológica do tratamento de esgotos, uma parcela da DQO removida é convertida em biomassa, constituindo o lodo biológico. A quantidade de lodo produzida e que será encaminhada para a etapa de tratamento de lodo pode ser expressa em termos de massa e volume. A Tabela 2.6. apresenta a massa de sólidos em suspensão removidos por unidade de DQO aplicada (afluente ao sistema), assumindo-se eficiências típicas de remoção de DQO para alguns dos processos de tratamento de esgotos. Apresenta ainda a produção per capita de SS (sólidos suspensos) usando com base eficiências típicas de remoção de SS nas etapas do tratamento de esgotos.

Tabela 2.6 – Características e quantidade de lodo produzido em alguns sistemas de tratamento de esgotos.

Sistema de Tratamento	Características do lodo produzido e descartado da fase líquida (direcionado para a etapa de tratamento do lodo)			
	kgSS / kgDQO aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.d) (a)	Volume de lodo (l/hab.c) (b)
Lodos ativados convencional				
- Lodo primário	0,35 - 0,45	2,0 - 6,0	35 - 45	0,6 - 2,2
- Lodo secundário	0,25 - 0,35	0,6 - 1,0	25 - 35	2,5 - 6,0
- Total	0,60 - 0,80	1,0 - 2,0	60 - 80	3,1 - 8,2
Lodos ativados – aeração prolongada	0,50 - 0,55	0,8 - 1,2	40 - 45	3,3 - 5,6
MBBR	0,50 - 0,55	0,8 - 1,2	40 - 45	3,3 - 5,6
Reator UASB (c)	0,12 - 0,18	3,0 - 6,0	12 - 18	0,2 - 0,6
UASB + lodos ativados				
- Lodo anaeróbio (UASB)	0,12 - 0,18	3,0 - 4,0	12 - 18	0,3 - 0,6
- Lodo aeróbio (lodos ativados) (d)	0,08 - 0,14	3,0 - 4,0	8 - 14	0,2 - 0,5
- Total	0,20 - 0,32	3,0 - 4,0	20 - 32	0,5 - 1,1

Fonte: ANDREOLI et al. (2014).

(a) Considerando 0,1 kgDQO/hab.d e 0,06 kgSS/hab.d

(b) Litros de lodo / hab.d = [(gSS/hab.d) / (sólidos secos (%))] x (100/1000) (considerando densidade de 1000 kg/m³)

(c) Os valores incluem a digestão e adensamento que ocorrem na própria unidade (redução de massa e volume de lodo)

⁴ Demanda Química de Oxigênio, parâmetro que mede a quantidade de matéria orgânica presente no esgoto, baseado na concentração de oxigênio (mgO₂/l) consumido no processo de oxidação da matéria orgânica, biodegradável ou não.

(d) Lodo aeróbio é retirado do UASB, após redução de massa e volume na digestão e adensamento que ocorrem no próprio reator UASB (o lodo aeróbio excedente afluente ao UASB é menor, pois neste caso a influência da perda de sólidos no efluente do decantador secundário passa a desempenhar uma maior influência)

Para avaliar o conteúdo de matéria orgânica do lodo utilizam-se os parâmetros sólidos totais voláteis (STV) e sólidos suspensos voláteis (SSV). De acordo com Andreoli et al. (2014), os lodos primários, tipicamente, têm entre 75 e 80% SV/ST e os lodos secundários têm entre 60 e 65% SV/ST, sendo como um dos requisitos para o funcionamento do digestor que o lodo passe por um adensamento prévio.

2.3.1 Uso e disposição final

As alternativas viáveis para a disposição final do lodo de esgoto, no que se refere à correta gestão de resíduos, devem buscar os meios de minimização da produção, maximização do reuso e da reciclagem e a promover a disposição e tratamento ambientalmente adequado (ANDREOLI et al., 2014).

Desta forma, visando garantir uma destinação adequada, a disposição final do lodo de esgoto deve ser parte integrante do projeto de uma ETE, levando em consideração os aspectos técnicos, econômicos, operacionais, ambientais e as características do lodo.

Dentre as alternativas de disposição final comumente empregadas no mundo, a produção do biogás por meio da digestão anaeróbia do lodo de esgoto apresenta-se como uma opção promissora para o setor de saneamento à medida que apresenta reduzido impacto ambiental quando comparado as outras alternativas, como a disposição em aterro sanitário ou incineração, por permitir o aproveitamento energético do biogás e de seus subprodutos na agricultura (utilização do digestato como fertilizante). A Resolução CONAMA Nº 375, de 29 de agosto de 2006, define os critérios e procedimentos para a aplicação do lodo de esgoto e seus derivados em áreas agrícolas, com o objetivo de trazer benefícios à agricultura sem que a saúde pública e o meio ambiente sejam prejudicados.

A Tabela 2.7. apresenta as principais alternativas de disposição e tratamento de lodo, indicando as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

Tabela 2.7 – Principais alternativas de disposição final e tratamento de lodo.

Alternativa	Descrição	Vantagem	Desvantagem
Descarga oceânica	Destinação do lodo de esgoto no mar. Este processo é realizado por emissários oceânicos ou navios lameiros após pré-condicionamento.	- Baixo custo	- Poluição do ecossistema oceânico
Incineração	Decomposição térmica por meio do processo de oxidação. Neste processo os sólidos voláteis presentes no lodo são submetidos à queima na presença de oxigênio, formando CO ₂ e água. Uma parcela dos sólidos fixos é transformada em cinzas	- Redução drástica de volume - Esterilização	- Custos elevados - Disposição das cinzas - Poluição atmosférica
Aterro Sanitário	Disposição do lodo em aterro sanitário, onde é compactado a fim de reduzir seu volume. Posteriormente é adicionado solo até a total cobertura do lodo. e posteriormente coberto com solo até o total preenchimento	- Baixo custo (a)	- Necessidade de grandes áreas - Localização próxima a centros urbanos - Produção de gases e percolado - Dificuldade de reintegração da área após desativação
“Landfarming” – disposição superficial no solo	Áreas de disposição de resíduos onde a matéria orgânica presente no lodo é degradada por meio de processos biológicos na própria superfície do solo, sendo a porção inorgânica transformada ou fixada nesta mesma camada de solo	- Degradação microbiana de baixo custo - Disposição de grandes volumes por unidade de área	- Acúmulo de metais pesados e elementos de difícil decomposição no solo - Possibilidade de contaminação do lençol freático - Liberação de maus odores e atração de vetores - Dificuldade de reintegração da área após desativação
Recuperação de áreas degradadas	Disposição de lodo em áreas degradadas, como áreas de atividade mineradora, onde o solo não possui condições que permitam o crescimento e a fixação vegetal, em função da ausência de matéria orgânica e de nutrientes no solo	- Elevadas taxas de aplicação - Resultados positivos sobre a reconstituição do solo e flora	- Liberação de maus odores - Limitações de composição e uso - Contaminação do lençol freático, fauna e flora

Fonte: Adaptado de ANDREOLI et al. (2014).

(a) Ressalta-se que esta avaliação leva em consideração o custo em comparação com as demais tecnologias citadas, entretanto, sabe-se que os custos com disposição de lodo em aterros sanitários podem representar até 60% dos custos operacionais de uma ETE.

Alternativa	Descrição	Vantagem	Desvantagem
Reciclagem agrícola	Disposição do lodo em áreas associadas ao plantio de culturas agrícolas	- Grande disponibilidade de áreas - Efeitos positivos sobre o solo – resposta positiva das culturas ao uso	- Limitações referentes a composição e taxas de aplicação - Contaminação do solo com metais - Contaminação de alimentos com elementos tóxicos e organismos patogênicos - Liberação de maus odores
Produção de Biogás	Biodigestão anaeróbia (na ausência de oxigênio) do lodo formando biogás e digestato	- Aproveitamento energético do biogás – geração de energia térmica e elétrica - Aproveitamento do digestato como fertilizante agrícola - Captação de investimentos – sinergia entre o setor de Saneamento e de Energia - Produção de biometano	- Altos custos de implantação - Necessidade de proximidade entre a unidade geradora de lodo e a unidade de biodigestão - Necessidade de proximidade entre a unidade geradora de biogás e o consumidor final

(Continuação).

2.4 Biogás

2.4.1 Definição e Composição do Biogás

O biogás, produto da biodigestão anaeróbia, possui composição variada dependendo do substrato e das condições físicas e químicas do processo de biodigestão. De forma geral, a composição volumétrica do biogás é cerca de 60% metano (CH₄), 35% dióxido de carbono (CO₂) e 5% de outros gases (nitrogênio, amônia, gás sulfídrico, etc.), apresentando também em sua composição pequenas frações de umidade (COELHO et al., 2018).

A Tabela 2.8. ilustra o intervalo de composição do biogás geralmente encontrado, em comparação a outras duas misturas gasosas: Gás Natural e Gás de Síntese (SynGas), proveniente do processo de gaseificação de biomassa.

Tabela 2.8 – Intervalo de composição de misturas gasosas combustíveis.

Compostos	Concentração (Vol. %)		
	Biogás	Gás Natural	SynGas
Metano (CH ₄)	55 – 70	91	0 – 15
Etano (C ₂ H ₆)	0	5,10	0
Propano (C ₃ H ₈)	0	1,80	0
Butano (C ₄ H ₁₀)	0	0,69	0
Pentano (C ₅ H ₁₂)	0	0,30	0
Gás Carbônico (CO ₂)	25 – 40	0,61	25 – 35
Hidrogênio (H ₂)	0	0	20 – 40
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	0,5 – 1	< 0,001	0
Nitrogênio (N ₂)	< 0,001	0,32	2 – 5
Amônia (NH ₃)	< 0,010	< 0,001	< 0,001
Monóxido de Carbono (CO)	< 0,010	0	35 – 40

Fonte: Adaptado Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano (COELHO et al., 2018).

As matérias-primas comumente utilizadas para a produção de biogás por meio da biodigestão anaeróbia são os resíduos alimentares, esgoto, dejetos animais e também gorduras óleos. Isto se deve pois a biodigestão é mais indicada para processos em que se utilizam substratos considerados “úmidos”. (COELHO et al., 2020).

No saneamento o biogás pode ser obtido através do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário e pelo tratamento anaeróbio do lodo residual dos sistemas, portanto, a composição do biogás é variável de acordo com o processo escolhido para a sua produção (Tabela 2.9.).

Tabela 2.9 – Composição típica de biogás em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário e digestores anaeróbios de lodo.

Compostos	Unidade	Biogás de Tratamento	Biogás de Tratamento
		Anaeróbio de Esgoto Sanitário	Anaeróbio de Lodo
Metano (CH ₄)	% (v.)	60 – 85	60 – 70
Gás carbônico (CO ₂)	% (v.)	5 – 15	20 – 40
Monóxido de carbono (CO)	% (v.)	0 – 0,3	–
Nitrogênio (N ₂)	% (v.)	2 – 25 (a)	0 – 2
Hidrogênio (H ₂)	% (v.)	0 – 3	0 – 1,5
Amônia (NH ₃)	% (v.)		< 0,05
Poder calorífico inferior (PCI)	kWh/Nm ³	6,0 – 8,5	6,0 – 7,0
Índice de Wobbe	kWh/Nm ³	7,0 – 13,4	7,0 – 9,1
Umidade relativa	%		90 – 100
Total de compostos orgânicos com silício	mg/Nm ³		< 40
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	ppm	1.000 – 5.000	500 – 5.000
Enxofre total (S)	mg/Nm ³		20 – 2.500
Halogênios	mg/Nm ³		0 – 100
Cloro (Cl)	mg/Nm ³		1 – 5
Flúor (F)	mg/Nm ³		1 – 5

Fonte: PROBIOGÁS (2015b).

(a) Elevados níveis de nitrogênio no biogás de reatores anaeróbios deve-se ao N₂ dissolvido no esgoto doméstico afluente ao reator.

2.4.2 Conteúdo Energético

O potencial energético do biogás relaciona-se à energia química nele acumulada pelo fato de ser um composto formado majoritariamente por metano, uma substância inflamável, inodora, incolor, com densidade menor que a do ar e com poder calorífico inferior igual a 35,9 MJ/Nm³. Portanto, o poder calorífico do biogás varia de acordo com a sua composição. Quanto maior a concentração de metano no biogás, maior será o seu poder calorífico, sendo o poder calorífico inferior do biogás com 60% de metano igual a 21,5 MJ/Nm³, valor que corresponde a 67% do poder calorífico inferior do gás natural (Tabela 2.10.) (PROBIOGÁS, 2015b).

Tabela 2.10 - Principais características físicas e químicas do biogás (60% de metano), do gás natural e do SynGas.

Parâmetro	Unidade	Biogás (60% CH ₄)	Gás Natural	SynGas
Poder calorífico inferior (a)	MJ/m ³	21,5	31,8	16,1
	kcal/m ³	5.134	7.600	3.846
Densidade	kg/m ³	1,21	0,82	1,51
Índice de Wobbe (inferior)	MJ/m ³	19,5	39,9	22,5
Velocidade máxima de chama	m/s	0,25	0,39	0,70
Requisito teórico de ar	m ³ ar/m ³ gás	5,71	9,53	3,83
Concentração máxima de CO ₂ após combustão	% (v)	17,8	11,9	13,1
Ponto de condensação	°C	60 - 160	59	60

Fonte: PROBIOGÁS (2015b).

(a) Refere-se ao calor de combustão menos o calor de vaporização do vapor de água presente no gás.

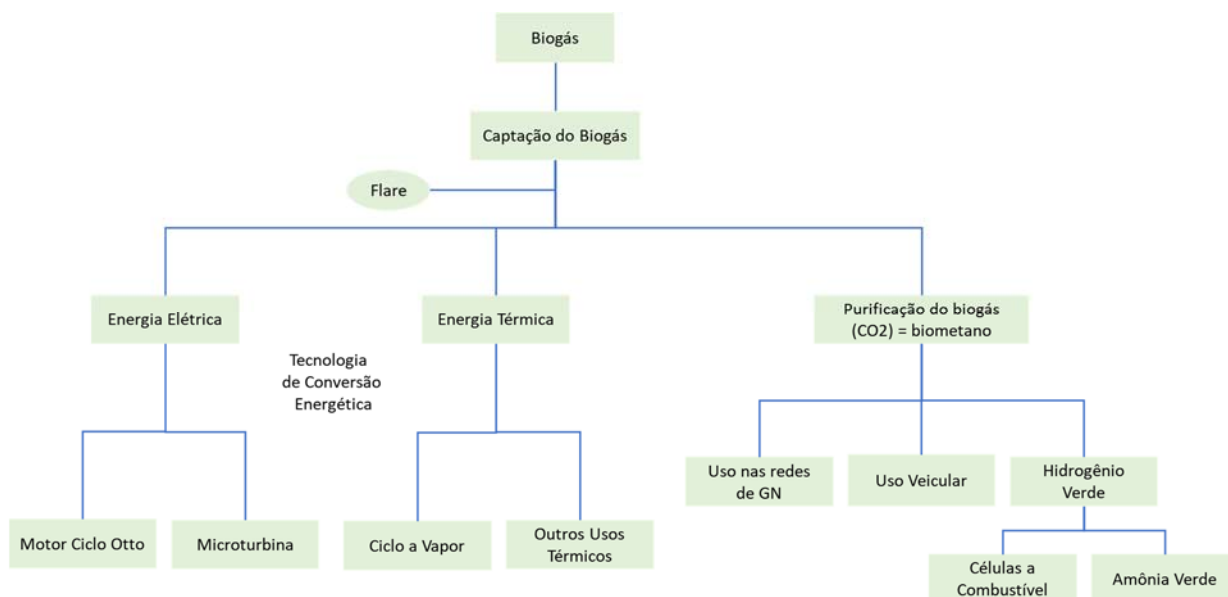
Entretanto, é importante salientar que o metano é um gás indutor do efeito estufa, possuindo um potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o atribuído ao dióxido de carbono. Por isso, a recuperação do biogás possui o objetivo de minimizar os impactos ambientais associados a liberação deste gás na atmosfera (PROBIOGÁS, 2015b).

2.4.3 Usos Finais do Biogás

O biogás produzido na biodigestão anaeróbia pode ser utilizado para diferentes fins energéticos: produção de energia elétrica e/ou térmica, substituição de combustíveis fósseis convencionais em veículos e também injeção em redes de distribuição de gás natural. Entretanto, independente do seu uso final é necessário que o biogás passe por um pré-tratamento e seja purificado. O tipo de tratamento do biogás depende das suas características e das exigências tecnológicas de aproveitamento energético (PROBIOGÁS, 2015b).

Referente ao aproveitamento energético do biogás, as principais alternativas são: (i) a queima direta para geração de calor, (ii) a cogeração de eletricidade e calor, e (iii) a produção de biometano. Dependendo da composição do biogás e do equipamento utilizado, para o caso da queima direta e da cogeração, pode ser necessária realizar a remoção de compostos contaminantes, como o sulfeto de hidrogênio (H₂S), por meio da adição de uma etapa de limpeza do biogás (COELHO et al., 2020).

Figura 2.7 – Possíveis utilizações já comercializadas do biogás.



Fonte: Adaptado de COELHO et al., 2018.

Pela necessidade de haver uma demanda térmica próxima ao local de produção, o uso do biogás diretamente como fonte de calor ainda apresenta restrições. Por sua vez, a energia elétrica é um produto que pode ser transmitido a partir de uma conexão à rede elétrica e permite diversas formas de comercialização. Desta forma, a geração de energia elétrica como alternativa para o aproveitamento energético do biogás vem ganhando espaço, por diversos fatores, como a simplicidade dos processos e disponibilidade dos equipamentos, e a existência de modelos de negócio nos sistemas elétricos do mundo para diferentes escalas de plantas (COELHO et al., 2020).

A terceira opção é o biometano, um gás que possui altas concentrações de metano produzido pela purificação do biogás, que exige processos de remoção das impurezas e também do CO₂ (COELHO et al., 2020).

Assim, a energia elétrica foi a forma de energia escolhida para serem apresentados os resultados deste estudo de potencial energético do lodo de ETE, nos casos em que se optou pela biodigestão como forma de conversão.

2.5 Conversão do Biogás em Energia Elétrica

2.5.1 Tecnologias Para Aproveitamento Energético do Biogás

A conversão energética do biogás se dá por meio do processo de combustão controlada em que ocorre a transformação da energia química do gás em energia térmica ou em mecânica. A energia mecânica produzida ativa um gerador, que por sua vez a converte em energia elétrica (COELHO et al., 2018).

Os motores ciclo Otto e as microturbinas a gás são as tecnologias disponíveis mais utilizadas para o aproveitamento energético do biogás. Entretanto, visando a geração de energia térmica, também é possível realizar a queima direta do biogás em caldeiras ou fornos.

Os motores ciclo Otto são máquinas térmicas onde ocorre a transformação da energia química do combustível (biogás) em energia mecânica por meio da combustão da mistura de ar e combustível. Para a aplicação em questão, é usual a utilização de motores a gasolina adaptados para operarem com biogás. Também é possível utilizar motores tipo diesel para operação diesel-biogás.

O regime de operação dos motores de combustão interna do tipo ciclo Otto a gás é diferente dos motores a diesel. A industrialização do motor deve ser realizada de acordo com as especificidades do gás a ser utilizado, considerando as suas características de combustão. A conversão do motor consiste em modificações nos cabeçotes para instalação de velas e rebaixamento dos pistões com o objetivo de diminuir a pressão de combustão. Além disso, é necessário realizar a industrialização total do motor por meio do redimensionamento do sistema de arrefecimento, turbina, ignição e injeção eletrônica dependendo do tipo de gás utilizado como combustível (biogás com alto, médio ou baixo teor de metano) (COELHO et al., 2018).

Quanto maior a concentração de metano, menor será consumo de biogás no grupo gerador e maior será a eficiência do sistema. A Tabela 2.11. apresenta as estimativas do consumo de biogás e produção diária de energia elétrica em *base-Load*

⁵ de acordo com a potência do motor. A Tabela 2.12. apresenta a relação entre o consumo de biogás e a eficiência dos sistemas.

Tabela 2.11 – Estimativas do consumo de biogás e produção diária de energia elétrica em *base-Load*.

Potência do Motor	Geração em <i>base-load</i>		65% do Metano presente no Biogás		75% do Metano presente no Biogás	
	Por hora	24 horas	Consumo de Biogás		Consumo de Biogás	
30 kVA	20 kW/h	480 kW	14 m ³ /h	336 m ³ /dia	12 m ³ /h	288 m ³ /dia
50 kVA	32 kW/h	768 kW	20 m ³ /h	480 m ³ /dia	17 m ³ /h	408 m ³ /dia
80 kVA	55 kW/h	1.320 kW	34 m ³ /h	816 m ³ /dia	29 m ³ /h	693 m ³ /dia
120 kVA	77 kW/h	1.848 kW	47 m ³ /h	1.128 m ³ /dia	40 m ³ /h	960 m ³ /dia
330 kVA	211 kW/h	5.064 kW	97 m ³ /h	2.328 m ³ /dia	82 m ³ /h	1.968 m ³ /dia
420 kVA	260 kW/h	6.240 kW	118 m ³ /h	2.832 m ³ /dia	100 m ³ /h	2.400 m ³ /dia

Fonte: COELHO et al., 2018.

* Informações fornecidas pela empresa ER-BR Energias Renováveis Ltda.

Tabela 2.12. Relação entre o consumo de biogás e a eficiência dos sistemas.

Potência do Motor (kVA)	Potência do Motor (kW)	70% Metano PCI 5.500 kcal/Nm ³		65% Metano PCI 5.500 kcal/Nm ³		60% Metano PCI 5.000 kcal/Nm ³	
		Consumo (Nm ³ /h)	Eficiência (kWh/Nm ³)	Consumo (Nm ³ /h)	Eficiência (kWh/Nm ³)	Consumo (Nm ³ /h)	Eficiência (kWh/Nm ³)
30	20	13	1,56	14	1,43	15	1,30
50	32	19	1,72	20	1,58	22	1,44
80	55	31	1,75	34	1,60	38	1,45
120	77	43	1,80	47	1,65	51	1,50
250	460	69	2,33	75	2,14	82	1,94
330	211	89	2,38	97	2,18	106	1,99
420	260	109	2,40	118	2,20	130	2,00

Fonte: COELHO et al., 2018.

* Informações fornecidas pela empresa ER-BR Energias Renováveis Ltda.

Outra tecnologia que pode ser utilizada para o aproveitamento energético do biogás é a microturbina que consiste em uma máquina térmica que opera segundo o ciclo Brayton, na faixa de 20 kW a 1 MW (COELHO et al., 2018). Neste processo ocorre a compressão do ar de admissão que é então direcionado para a câmara de combustão, local em que ocorre a combustão do biogás com o consequente aumento da temperatura. O aquecimento do ar comprimido leva a sua expansão na turbina,

⁵ *base-Load*: geração de energia elétrica contínua, durante 24 horas de operação com potência total do grupo gerador.

gerando trabalho eletromecânico no seu eixo, que pode ser conectado a um gerador elétrico (MOREIRA et al., 2021).

As microturbinas apresentam baixo nível de ruído e vibração, facilidade de instalação e dimensões reduzidas, o que facilita a sua implementação em módulos, podem ser instaladas em paralelo sem que haja a necessidade de equipamentos adicionais. Entretanto, para a sua operação com biogás é necessário que haja um eficiente sistema de limpeza do gás visando a remoção de umidade e sulfeto de hidrogênio. Além disso, quando operadas com biogás de ETE é necessário que seja realizada a retirada dos siloxanos⁶ presentes no biogás (COELHO et al., 2018).

⁶ Siloxanos são compostos derivados de produtos cosméticos e detergentes que fazem parte da composição do efluente doméstico (esgoto sanitário) encaminhado para o tratamento em Estações de Tratamento de Efluentes.

3 Estudo de Caso – Aproveitamento Energético do Biogás Obtido por meio do Tratamento Anaeróbio de Lodo de Esgoto

Este capítulo tem por objetivo apresentar o estudo de caso do aproveitamento energético do biogás proveniente do tratamento anaeróbio de lodo de esgoto. É apresentada a estimativa da produção de lodo, de biogás proveniente do tratamento do lodo, bem como da energia elétrica a partir do biogás nas três configurações analisadas. É objetivo ainda deste capítulo apresentar a estimativa da receita com a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido e economia com os custos operacionais de energia elétrica das ETEs. Por fim, são discutidos os resultados obtidos para o estudo de caso avaliado.

3.1 Descrição do Estudo de Caso

Foram estudadas três configurações de processo biológico visando a análise comparativa entre os processos. As configurações escolhidas são análogas no que se refere ao grau de tratabilidade do efluente, mas produzem lodos com características diferentes, conforme elucidado na Tabela 2.5.

Configuração I: UASB + Lodos Ativados + Decantador Secundário > Lodo excedente encaminhado para o biodigestor.

Configuração II: Lodos Ativados + Decantador Secundário > Lodo excedente encaminhado para o biodigestor.

Configuração III: MBBR + Decantador Secundário > Lodo excedente encaminhado para o biodigestor.

Para o caso da Configuração I, optou-se por estudar o processo conjugado UASB + Lodos Ativados para que este sistema fosse equivalente aos outros no que se refere a qualidade do efluente obtido ao final do tratamento, à medida que o reator UASB sem um pós tratamento adequado, não possui o mesmo índice de tratabilidade que os processos de Lodos Ativados e MBBR.

Como o presente trabalho visa estudar, especificamente, o potencial de geração de biogás e energia elétrica a partir do lodo remanescente produzidos nas ETEs, a produção de biogás que ocorre diretamente no reator UASB foi desconsiderada para

os cálculos de geração de biogás, considerando-se apenas o biogás gerado a partir da biodigestão do lodo proveniente do decantador secundário.

O tempo de operação diária para os sistemas estudados foi de 24 horas, considerando que todos os equipamentos eletromecânicos que compõe o sistema de aeração possuem uma unidade reserva para que o processo de tratamento não pare durante as manutenções corretivas e preditivas.

Como a produção de biogás depende da quantidade de sólidos suspensos voláteis (SSV) do lodo que irá alimentar o biodigestor anaeróbico, visando obter quantidades expressivas de biogás, foram consideradas as vazões afluentes aos processos de 50 l/s, 100 l/s, 200 l/s, 300 l/s, 500 l/s, 700 l/s, 1000 l/s.

Visando a padronização dos sistemas estudados, foram adotados valores típicos para os parâmetros do efluente bruto e foram então calculadas as concentrações e cargas orgânicas para as diferentes vazões estudadas (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Parâmetros do efluente bruto e concentrações e cargas orgânicas para diferentes vazões.

Vazão	DBO		DQO		SST	
	mg/L	kg/d	mg/L	kg/d	mg/L	kg/d
50 L/s	300	1296	600	2592	350	1512
100 L/s	300	2592	600	5184	350	3024
200 L/s	300	5184	600	10368	350	6048
300 L/s	300	7776	600	15552	350	9072
500 L/s	300	12960	600	25920	350	15120
700 L/s	300	18144	600	36288	350	21168
1000 L/s	300	25920	600	51840	350	30240

Fonte: Autoria própria (2023).

3.2 Estimativa da Produção de Lodo

3.2.1 Reatores UASB + Lodos Ativados

Na configuração proposta o efluente que sai do reator UASB é encaminhado para o sistema de lodos ativados (reator aeróbico). As eficiências de remoção de DBO, DQO e SST consideradas no processo anaeróbico foram, respectivamente, 60%, 65% e 70%. Utilizando-se as eficiências citadas acima, as concentrações e cargas orgânicas afluentes ao sistema de lodos ativados foram calculadas (Tabela 3.2):

Tabela 3.2. Concentrações e cargas orgânicas do efluente encaminhado para o sistema de lodos ativados (pós tratamento anaeróbio em reator UASB).

Vazão	DBO		DQO		SST	
	mg/L	kg/d	mg/L	kg/d	mg/L	kg/d
50 L/s	120	518,4	210	907,2	105	453,6
100 L/s	120	1036,8	210	1814,4	105	907,2
200 L/s	120	2073,6	210	3625,8	105	1814,4
300 L/s	120	3110,4	210	5443,2	105	2721,6
500 L/s	120	5184,0	210	9072,0	105	4536,0
700 L/s	120	7257,6	210	12700,8	105	6350,4
1000 L/s	120	10368,0	210	18144,0	105	9072,0

Fonte: Autoria própria (2023).

Calculou-se então a geração de lodo no sistema de lodos ativados:

$$P_{lodo1} = Y_1 \times Co_{DBO} \quad (3.1)$$

Onde:

Y_1 : Coeficiente de sólidos no sistema = 0,65 kgSS/kg DBOaplicada (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)

Co_{DBO} : Carga de DBO aplicada por dia (kgDBO/d) (Tabela 3.2)

P_{lodo1} : Produção de sólidos no sistema por dia (kgSS/d)

O lodo produzido nos reatores aeróbios é sedimentado nos decantadores secundários. Considerando a massa específica do lodo 1030 kg/m³ e a concentração de sólido do lodo sedimentado no decantador secundário 4,0%, obteve-se a vazão volumétrica de lodo diária:

$$V_{lodo} = \frac{P_{lodo1}}{(\gamma \times C_{sol})} \quad (3.2)$$

Onde:

P_{lodo1} : Produção de sólidos no sistema por dia (kgSS/d) (Equação 3.1)

γ : Massa específica do lodo = 1030 kg/m³

C_{sol} : Concentração de sólidos = 4,0% (ANDREOLI et al, 2012)

V_{lodo1} : Vazão volumétrica de lodo diária (m^3/d)

Os resultados obtidos, para as diferentes vazões estudadas, das produções volumétricas de lodos que serão encaminhados para a digestão anaeróbia encontram-se discriminados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Produção de sólidos no sistema por dia e vazão volumétrica de lodo diária para as diferentes vazões estudadas.

Vazão	Produção de sólidos no sistema (kgSS/d)	Produção de sólidos suspensos voláteis no sistema (kgSSV/d)	Vazão volumétrica de lodo diária (m^3/d)
50 L/s	336,96	252,72	8,18
100 L/s	673,48	505,44	16,36
200 L/s	1347,84	1010,88	32,71
300 L/s	2021,76	1516,32	49,07
500 L/s	3369,60	2527,20	81,79
700 L/s	4717,44	3538,08	114,50
1000 L/s	6739,20	5054,40	163,57

Fonte: Autoria própria (2023).

3.2.2 Lodos Ativados

Calculou-se a geração de lodo nos reatores aeróbios de lodos ativados, utilizando-se a equação abaixo:

$$P_{lodo2} = Y_2 \times Co_{DBO} \quad (3.3)$$

Onde:

Y_2 : Coeficiente de sólidos no sistema = 0,65 kgSS/kg DBOaplicada (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)

Co_{DBO} : Carga de DQO aplicada por dia (kgDBO/d) (Tabela 3.1)

P_{lodo2} : Produção de sólidos no sistema por dia (kgSS/d)

O lodo produzido nos reatores aeróbios é sedimentado nos decantadores secundários. Considerando a massa específica do lodo 1030 kg/m³ e a concentração de sólido do lodo sedimentado no decantador secundário 4,0%, obteve-se a vazão volumétrica de lodo diária:

$$V_{lodo2} = \frac{P_{lodo2}}{(\gamma \times C_{sol})} \quad (3.4)$$

Onde:

P_{lodo2} : Produção de sólidos no sistema por dia (kgSS/d) (Equação 3.3)

γ : Massa específica do lodo = 1030 kg/m³

C_{sol} : Concentração de sólidos = 4,0% (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)

V_{lodo2} : Vazão volumétrica de lodo diária (m³/d)

Os resultados obtidos, para as diferentes vazões estudadas, das produções volumétricas de lodos que serão encaminhados para a digestão anaeróbia encontram-se discriminados na Tabela 3.4 abaixo:

Tabela 3.4. Produção de sólidos no sistema por dia e vazão volumétrica de lodo diária para as diferentes vazões estudadas.

Vazão	Produção de sólidos no sistema (kgSS/d)	Produção de sólidos suspensos voláteis no sistema (kgSSV/d)	Vazão volumétrica de lodo diária (m ³ /d)
50 L/s	842,40	631,80	20,45
100 L/s	1684,80	1263,60	40,89
200 L/s	3369,60	2527,20	81,79
300 L/s	5054,40	3790,80	122,68
500 L/s	8424,00	6318,00	204,47
700 L/s	11793,60	8845,20	286,25
1000 L/s	16848,00	12636,00	408,93

Fonte: Autoria própria (2023).

3.2.3 MBBR

Calculou-se a geração de lodo nos reatores aeróbios de lodos ativados, utilizando-se a equação abaixo:

$$P_{lodo3} = Y_3 \times Co_{DBO} \quad (3.5)$$

Onde:

Y_3 : Coeficiente de sólidos no sistema = 0,50 kgSS/kg DBOaplicada (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)

Co_{DBO} : Carga de DQO aplicada por dia (kgDBO/d) (Tabela 3.1)

P_{lodo3} : Produção de sólidos no sistema por dia (kgSS/d)

O lodo produzido nos reatores aeróbios é sedimentado nos decantadores secundários. Considerando a massa específica do lodo 1030 kg/m³ e a concentração de sólido do lodo sedimentado no decantador secundário 4,0%, obteve-se a vazão volumétrica de lodo diária:

$$V_{lodo3} = \frac{P_{lodo3}}{(\gamma \times C_{sol})} \quad (3.6)$$

Onde:

P_{lodo3} : Produção de sólidos no sistema por dia (kgSS/d) (Equação 3.5)

γ : Massa específica do lodo = 1030 kg/m³

C_{sol} : Concentração de sólidos = 4,0% (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)

V_{lodo3} : Vazão volumétrica de lodo diária (m³/d)

Os resultados obtidos, para as diferentes vazões estudadas, das produções volumétricas de lodos que serão encaminhados para a digestão anaeróbia encontram-se discriminados na Tabela 3.5 abaixo:

Tabela 3.5. Produção de sólidos no sistema por dia e vazão volumétrica de lodo diária para as diferentes vazões estudadas.

Vazão	Produção de sólidos no sistema (kgSS/d)	Produção de sólidos suspensos voláteis no sistema (kgSSV/d)	Vazão volumétrica de lodo diária (m³/d)
50 L/s	648,00	486,00	15,73
100 L/s	1296,00	972,00	31,46
200 L/s	2592,00	1944,00	62,91
300 L/s	3888,00	2916,00	34,37
500 L/s	6480,00	4860,00	157,28
700 L/s	9072,00	6804,00	220,19
1000 L/s	12960,00	9720,00	314,56

Fonte: Autoria própria (2023).

3.3 Biodigestão Anaeróbia do Lodo de ETE

3.3.1 Produção de Biogás

A produção de biogás está diretamente relacionada com a remoção de sólidos voláteis. Sabendo que a razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo (fcv) é igual a 1,5 kgDQO/kgSSV e que a relação da produção de metano por DQO aplicada é de 4 kgDQO/kgCH₄, a produção de metano foi calculada como $1,5/4 = 0,375$ kgCH₄/kgSSV (A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012).

O volume de metano produzido depende da temperatura e pressão do biogás. Em condições normais (0°C ou 273K e 1 atm), o volume de 1 mol de gás metano é 22,4 litros. Portanto, o volume de metano produzido por kg de lodo digerido (assumindo fcv = 1,5 kgDQO) é $1,5/4 \cdot 22,4/16 = 0,525$ Nm³CH₄ / kgSSV. Ou equivalentemente, por kgDQO convertido $0,525/1,5 = 0,35$ Nm³ de CH₄ são produzidos.

Utilizando-se as relações descritas acima, calculou-se a produção volumétrica de gás metano diária e anual para os lodos remanescentes para os processos de tratamentos estudados.

Tabela 3.6. Produção volumétrica de gás metano diária e anual.

Vazão	UASB + Lodos Ativados		Lodos Ativados		MBBR	
	Nm ³ CH ₄ /dia	Nm ³ CH ₄ /ano	Nm ³ CH ₄ /dia	Nm ³ CH ₄ /ano	Nm ³ CH ₄ /dia	Nm ³ CH ₄ /ano
50 L/s	133	48.427	332	121.069	255	93.130
100 L/s	265	96.855	663	242.137	510	186.230
200 L/s	531	193.710	1.327	484.275	1.021	372.519
300 L/s	796	290.565	1.990	726.412	1.531	558.779
500 L/s	1.327	484.275	3.317	1.210.687	2.552	931.298
700 L/s	1.858	677.985	4.644	1.694.961	3.572	1.303.817
1000 L/s	2.654	968.549	6.634	2.421.374	5.103	1.862.595

Fonte: Autoria própria (2023).

O volume de produção de biogás depende da concentração de metano no gás, que no caso dos processos de digestão de lodo, segundo Araújo e Van Haandel (1998) varia entre 55 e 70%. Considerando a concentração de metano presente no biogás igual a 70%, obteve-se o volume anual de biogás produzido:

Tabela 3.7. Volume anual de biogás produzido.

Vazão	Nm ³ biogás produzido/ano		
	UASB + Lodos Ativados	Lodos Ativados	MBBR
50 l/s	69.182	172.955	133.043
100 l/s	138.364	345.915	266.085
200 l/s	276.728	691.821	532.170
300 l/s	415.093	1.037.732	798.255
500 l/s	691.821	1.729.553	931.298
700 l/s	968.549	2.421.374	1.862.595
1000 l/s	1.383.642	3.459.105	2.660.850

Fonte: Autoria própria (2023).

3.4 Produção de Energia – Cálculo da energia elétrica disponível no biogás

Para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica por ano a partir do biogás gerado, utilizou-se a metodologia descrita no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO et al., 2020):

$$EE = \frac{(V_{biogás} \times Con_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \times EF_{ele})}{1000} \quad (3.7)$$

Onde:

EE = Potencial de geração de energia elétrica por ano a partir do biogás proveniente da biodigestão do lodo de ETE (MWh/ano)

$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido (Nm³ biogás produzido/ano)

Con_{CH_4} = Concentração de metano presente no biogás da biodigestão anaeróbia do lodo de ETE (70% conforme Araújo e Van Haandel, 1998)

PCI_{CH_4} = Poder Calorífico Inferior do metano (kWh/Nm³CH₄) (fator de 9,97 kWh/m³CH₄)

EF_{ele} = Eficiência de conversão energética para motor ciclo Otto a biogás (considerando os fatores de 0,35 para vazões de biogás de até 5.000 Nm³/dia e de 0,42 para vazões acima 5.000 Nm³/dia, conforme metodologia fornecida pela ABIOGAS, 2018)

1000 = conversão de kWh para MWh

Os valores encontrados para o potencial de geração de energia elétrica anual para os diferentes processos estudados, encontram-se discriminados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8. Potencial geração de energia elétrica por ano a partir do biogás a partir da biodigestão do lodo de ETE.

Vazão	MWh/ano		
	UASB + Lodos Ativados	Lodos Ativados	MBBR
50 L/s	168,99	422,47	324,98
100 L/s	337,98	844,94	649,95
200 L/s	675,95	1.689,88	1.299,91
300 L/s	1.013,93	2.534,81	1.949,86
500 L/s	1.689,88	4.224,69	3.249,76
700 L/s	2.365,83	5.914,57	4.549,67
1000 L/s	3.379,75	8.449,38	6.499,53

Fonte: Autoria própria (2023).

3.5 Consumo de Oxigênio e Energia Elétrica

Considerando que a cada kg de DBO aplicada, 1,50 kg de oxigênio (O₂) são consumidos nos processos aeróbios de tratamento de esgoto e uma taxa de transferência de oxigênio no efluente de 15% (METCALF & EDDY, 2016). Assim, calculou-se o consumo médio diário de oxigênio e, por meio da Equação 3.8, calculou-se a vazão de ar requerida nos processos de tratamento estudados (Tabela 3.9).

$$Q_{ar} = \frac{Con_{O_2}}{\rho_{ar} \times R_{O_2/ar} \times Ef} \quad (3.8)$$

Onde:

Q_{ar} = Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm) (m³/d)

Con_{O_2} = Consumo médio total de O₂ = Tabela 19

ρ_{ar} = Massa específica do ar (condição padrão: 20°C e 1 atm) = 1,20 kg/m³

$R_{O_2/ar}$ = Relação de O₂ / ar = 0,23 gO₂/gAr

Ef = Eficiência de transferência de O₂ = 15%

Tabela 3.9. Consumo médio total diário de oxigênio (kgO₂/dia) e vazão diária de ar requerida nos processos de tratamento aeróbios (m³/d).

Vazão	UASB + Lodos Ativados		Lodos Ativados		MBBR	
	Consumo de Oxigênio (kgO ₂ /dia)	Vazão de Ar Requerida (m ³ /d)	Consumo de Oxigênio (kgO ₂ /dia)	Vazão de Ar Requerida (m ³ /d)	Consumo de Oxigênio (kgO ₂ /dia)	Vazão de Ar Requerida (m ³ /d)
50 l/s	778	18.783	1.944	46.957	1.944	46.957
100 l/s	1.555	37.565	3.888	93.913	3.888	93.913
200 l/s	3.110	75.130	7.776	187.826	7.776	187.826
300 l/s	4.667	112.696	11.664	281.739	11.664	281.739
500 l/s	7.776	187.826	19.440	469.565	19.440	469.565
700 l/s	10.886	262.957	27.216	657.391	27.216	657.391
1000 l/s	15.552	375.652	38.880	939.130	38.880	939.130

Fonte: Autoria própria (2023).

A potência estimada dos sopradores de ar foi então calculada utilizando-se a Equação 3.9. (METCALF & EDDY, 2016). Como os processos estudados são operados de forma contínua, o tempo de operação considerado para os sopradores foi de 24 horas diárias, obtendo-se assim, o consumo anual de energia elétrica do sistema de fornecimento de ar (Tabela 3.10.).

$$P_w = \frac{M_{ar} \times R \times T_0}{8,41 \times E} \left[\left(\frac{P_s}{P_e} \right)^{0,283} - 1 \right] \quad (3.9)$$

Onde:

P_w = Potência estimada do soprador (kW)

M_{ar} = Vazão mássica de ar (kg/s) = Tabela 19

R = Constante do gás = 8,31 kJ/kmol^oK

T_0 = Temperatura absoluta de entrada = 26 °C = 299 °K

E = Eficiência do compressor = 75%

P_e = Pressão absoluta de entrada = 1 atm

P_s = Pressão absoluta de saída = 1,3 x profundidade da lâmina d'água = 1,3 x 5,5 m = 7,15 mca = 0,69 atm > $P_s = 1 + 0,69 = 1,69$ atm

Tabela 3.10. Potência estimada dos sopradores de ar (kW) e consumo anual de energia elétrica do sistema de fornecimento de ar (MWh/ano).

Vazão	UASB + Lodos Ativados		Lodos Ativados		MBBR	
	Potência Sopradores (kW)	Consumo Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Sopradores (kW)	Consumo Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Sopradores (kW)	Consumo Energia Elétrica (MWh/ano)
50 L/s	16,90	148,18	42,30	370,46	42,30	370,46
100 L/s	33,80	296,37	84,60	740,91	84,60	740,91
200 L/s	67,70	592,73	169,20	1.481,83	169,20	1.481,83
300 L/s	101,50	889,10	253,70	2.222,74	253,70	2.222,74
500 L/s	169,20	1.481,83	422,90	3.704,57	422,90	3.704,57
700 L/s	236,80	2.074,56	592,10	5.186,40	592,10	5.186,40

Vazão	UASB + Lodos Ativados		Lodos Ativados		MBBR	
	Potência Sopradores (kW)	Consumo Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Sopradores (kW)	Consumo Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Sopradores (kW)	Consumo Energia Elétrica (MWh/ano)
1000 L/s	338,30	2.963,66	845,80	7.409,14	845,80	7.409,14

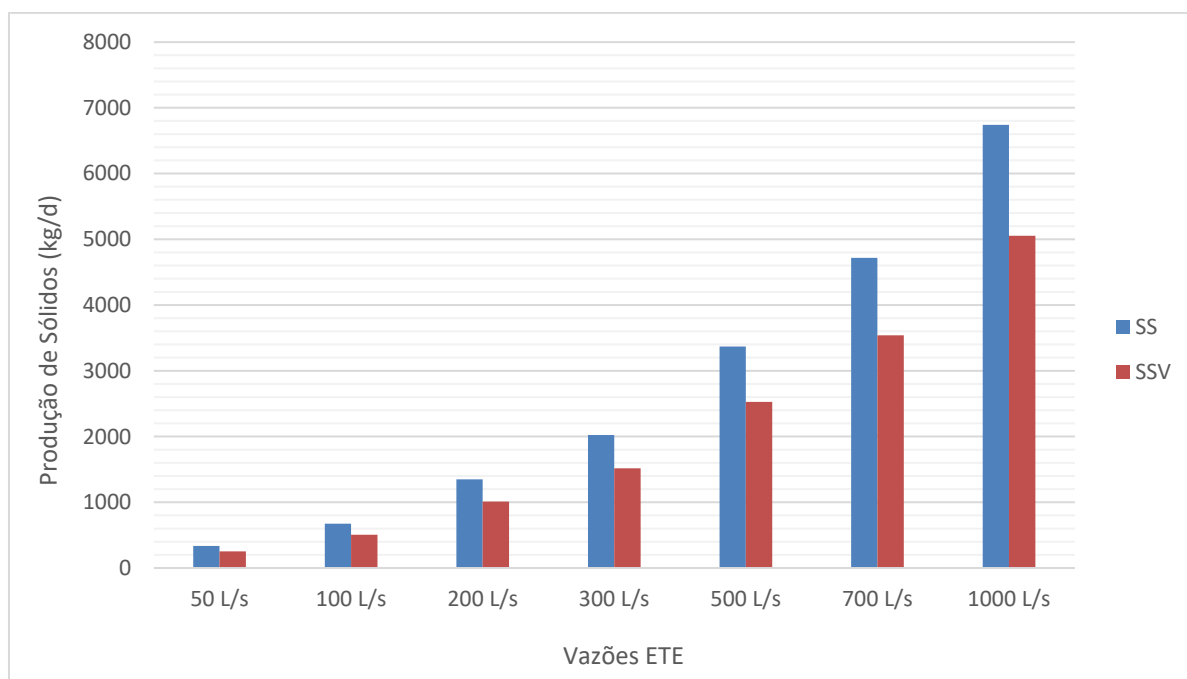
Fonte: Autoria própria (2023).

3.6 Resultados e Discussões

Analisando a produção volumétrica de lodo para os diferentes processos estudados, observou-se que a produção de sólidos suspensos (SS) do sistema aumenta de forma proporcional ao aumento da vazão afluyente a ETE. O processo que apresentou maior produção de sólidos foi o de Lodos Ativados (Gráfico 3.1), seguido pelo processo de MBBR (Gráfico 3.3) e pelo processo combinado UASB + Lodos Ativados (Gráfico 3.2).

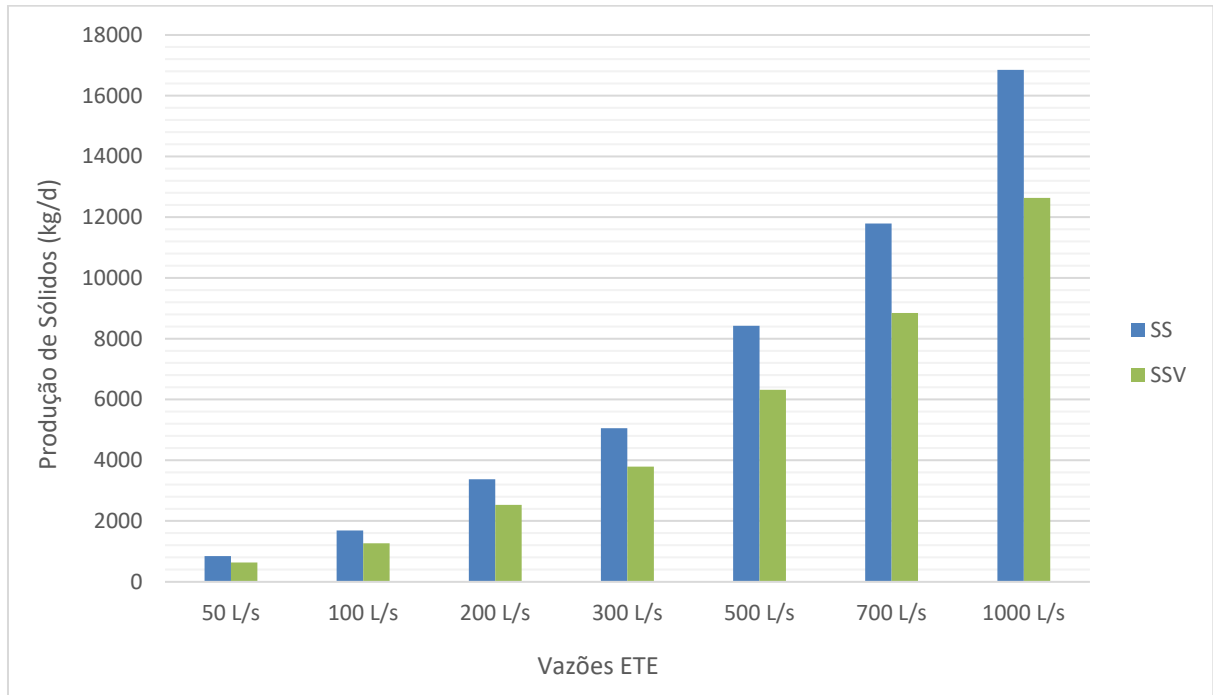
A menor produção de sólidos no sistema UASB + Lodos Ativados ocorre, pois, uma parcela considerável da carga orgânica (60%) é degradada no reator UASB antes do encaminhamento para o sistema de Lodos Ativados. A produção de sólidos no sistema de lodos ativados é cerca de 30% superior a produção de sólidos no sistema de MBBR, o que pode ser explicado pelo fato de que parte da biomassa fica retida no interior das biomédias, diminuindo assim a produção de lodo excedente.

Gráfico 3.1. Comparação da produção diária de sólidos suspensos (SS) e sólidos suspensos voláteis (SSV) para o processo de tratamento UASB + Lodos Ativados.



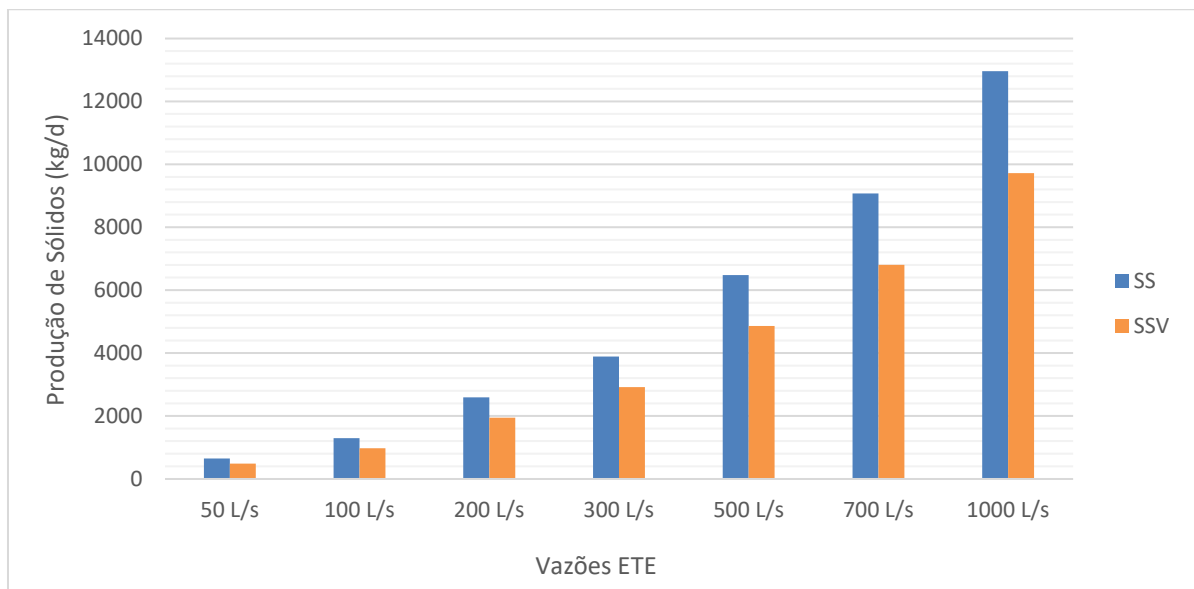
Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 3.2. Comparação da produção diária de sólidos suspensos (SS) e sólidos suspensos voláteis (SSV) para o processo de tratamento de Lodos Ativados.



Fonte: Autoria própria (2023).

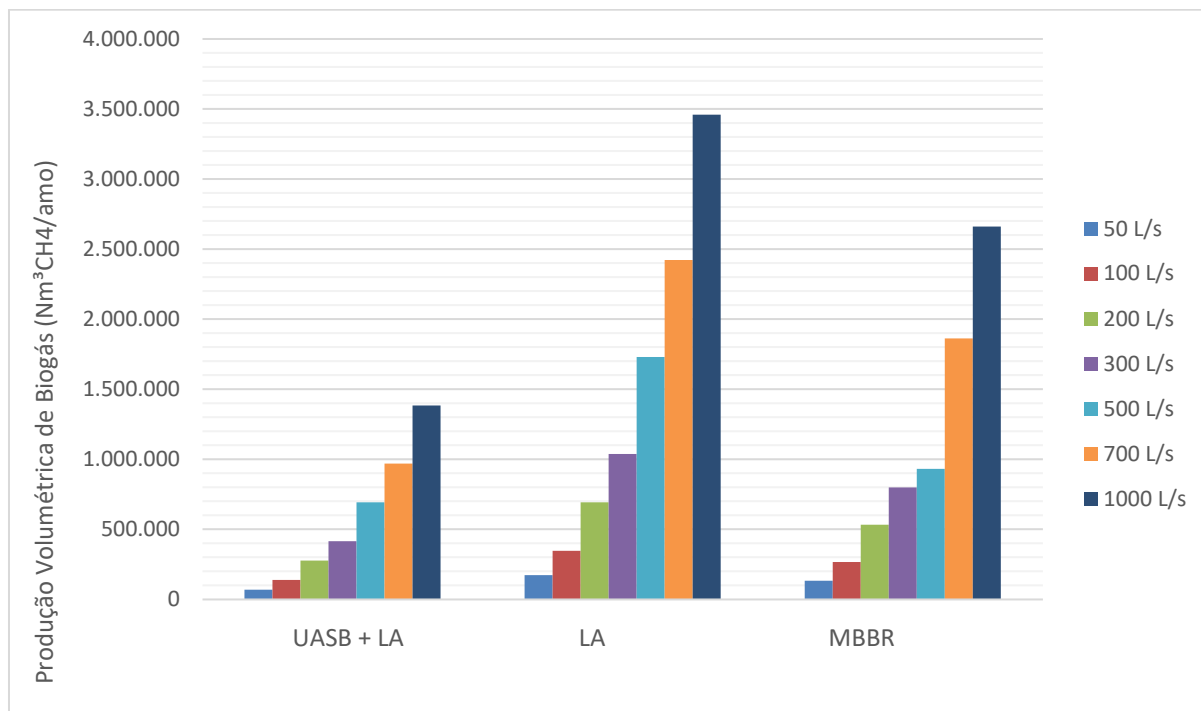
Gráfico 3.3. Comparação da produção diária de sólidos suspensos (SS) e sólidos suspensos voláteis (SSV) para o processo de tratamento MBBR.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para os três sistemas a razão de sólidos suspensos voláteis (SSV) e sólidos suspensos (SS) foi de 0,75, elucidando que a maior fração do lodo produzido é formada por matéria orgânica.

Gráfico 3.4. Comparação da produção anual volumétrica de biogás ($\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{ano}$) para os diferentes processos e vazões (l/s) estudados.



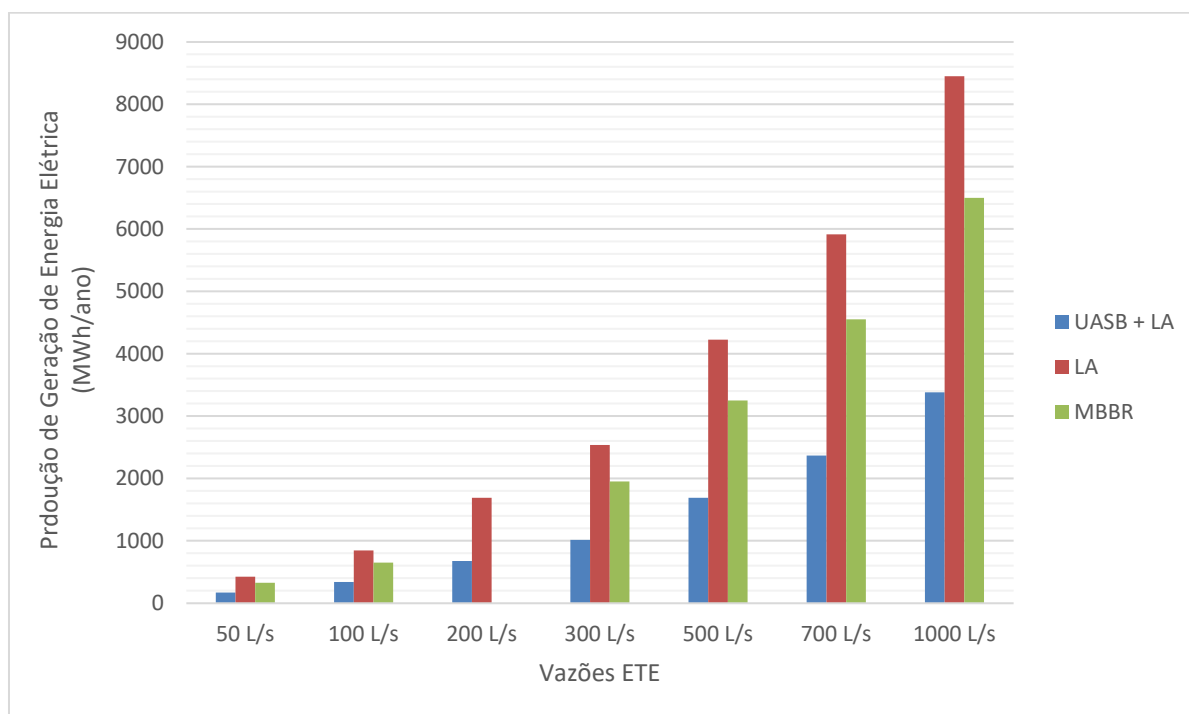
Fonte: Autoria própria (2023).

A produção de biogás está relacionada com a DQO (demanda bioquímica de oxigênio) de alimentação do biodigestor, portanto, biodigestores alimentados com uma menor concentração de SSV possuem uma menor produção volumétrica de biogás.

Devido a menor produção de lodo e, conseqüente redução na produção de SSV, o sistema UASB + Lodos Ativados apresentou a menor produção volumétrica de biogás, cerca de 60% menor do que a produção obtida a partir do lodo proveniente do sistema de Lodos Ativados e 48% menor do que a produção de biogás a partir do lodo oriundo do processo de MBBR (Gráfico 3.4).

Como o potencial de geração de energia elétrica está associado ao volume e concentração de metano do biogás encaminhado para o motogerador, o potencial de geração de energia elétrica para o sistema UASB + Lodos Ativados também foi menor do que para os sistemas de Lodos Ativados e MBBR (Gráfico 3.5). E, a produção de energia a partir do lodo do sistema de MBBR foi cerca de 23% menor do que para o sistema de LA.

Gráfico 3.5. Comparação do potencial geração de energia elétrica por ano a partir do biogás a partir da biodigestão do lodo de ETE.

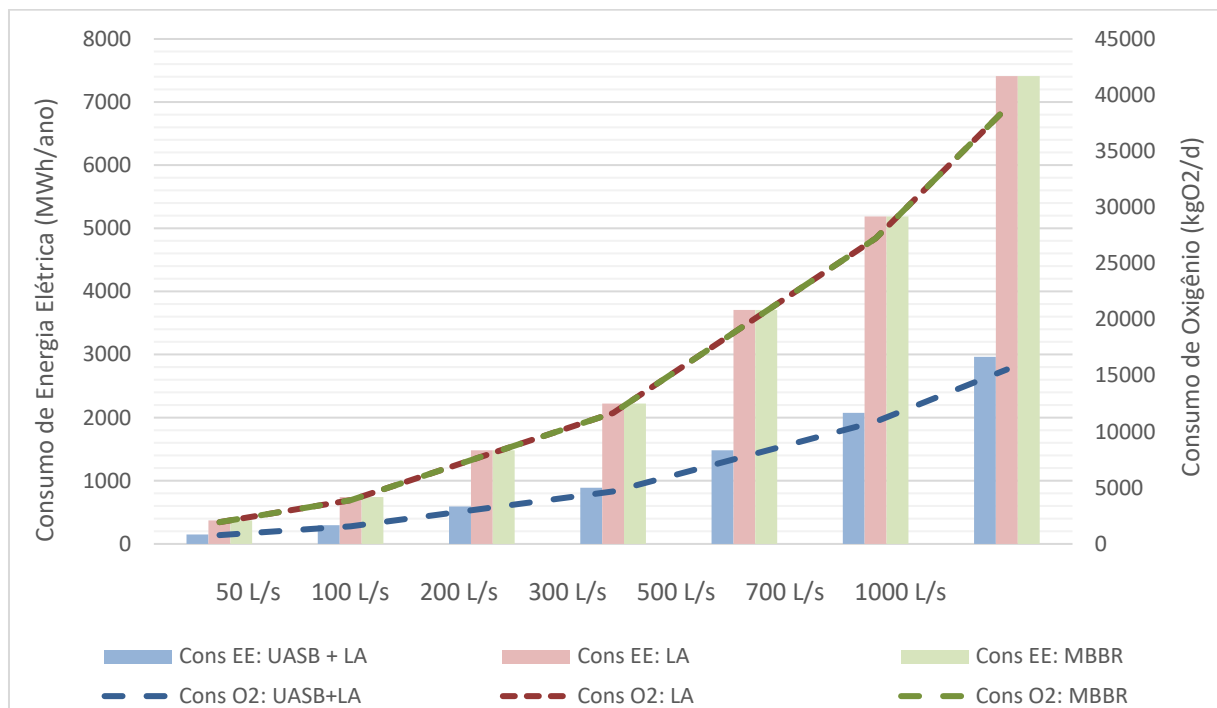


Fonte: Autoria própria (2023).

O Gráfico 3.6 compara o consumo anual de energia elétrica e o consumo de oxigênio diário para as configurações de processo estudadas. Nota-se que à medida que o fornecimento de oxigênio para o sistema aumenta, o consumo de energia elétrica também aumenta, fenômeno justificado pelo fato de que o oxigênio é injetado nos sistemas através do uso de sopradores de ar, equipamentos eletromecânicos que possuem potências elevadas e um alto consumo de energia elétrica (Tabela 3.10).

Os sistemas de LA e MBBR são processos aeróbios, portanto, o consumo de oxigênio é necessário para que ocorra a oxidação da matéria orgânica. Desta forma, quanto maior a carga orgânica dos reatores aeróbios, maior será o consumo de oxigênio e consequentemente, o consumo de energia elétrica. Como a carga orgânica inserida no processo de LA e de MBBR foram as mesmas, os resultados obtidos para o consumo de O₂ e EE foram iguais (Gráfico 3.6).

Gráfico 3.6. Comparação do consumo anual de energia elétrica (MWh/ano) e do consumo diário de oxigênio (kgO₂/d) para os sistemas estudados.

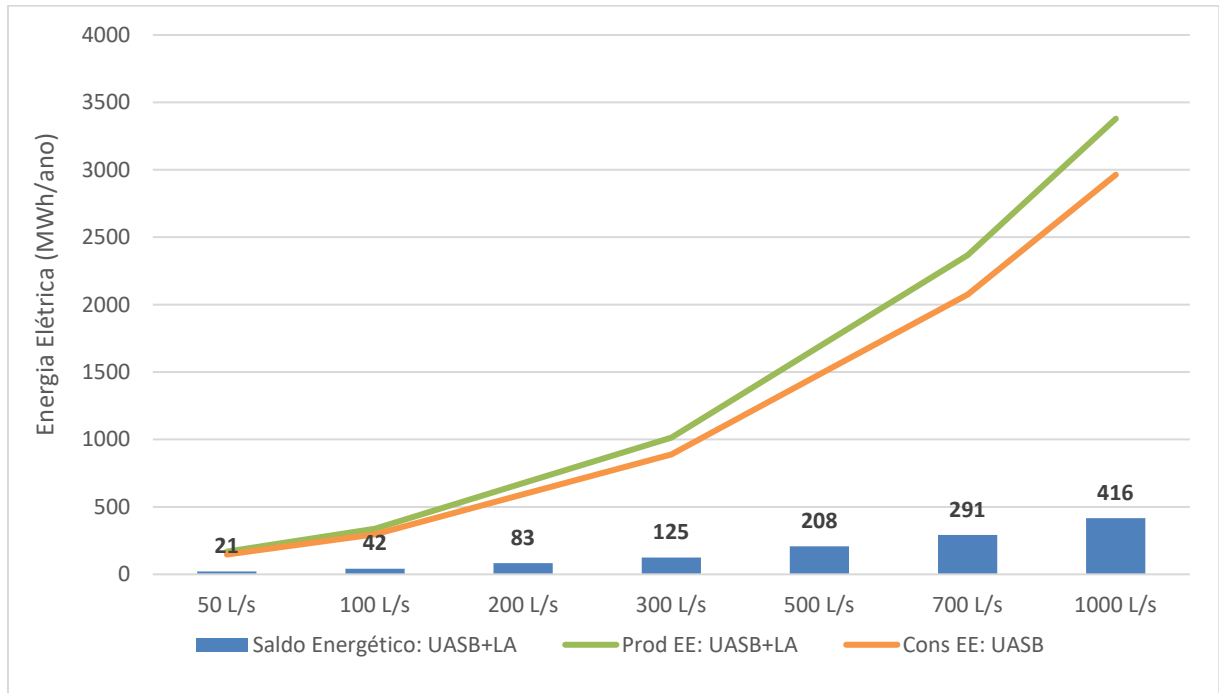


Fonte: Autoria própria (2023).

O sistema combinado UASB + Lodos Ativos apresentou o menor consumo de O₂ e energia elétrica, cerca de 60% menor do que nos outros sistemas, resultado que pode ser justificado devido a remoção de carga orgânica prévia que ocorre no reator UASB, antes do efluente ser encaminhado para o reator de Lodos Ativos (reator aeróbio). Nesta configuração uma menor quantidade de O₂ é requerida para a oxidação da matéria orgânica no reator aeróbio, resultando em uma redução da potência dos sopradores de ar.

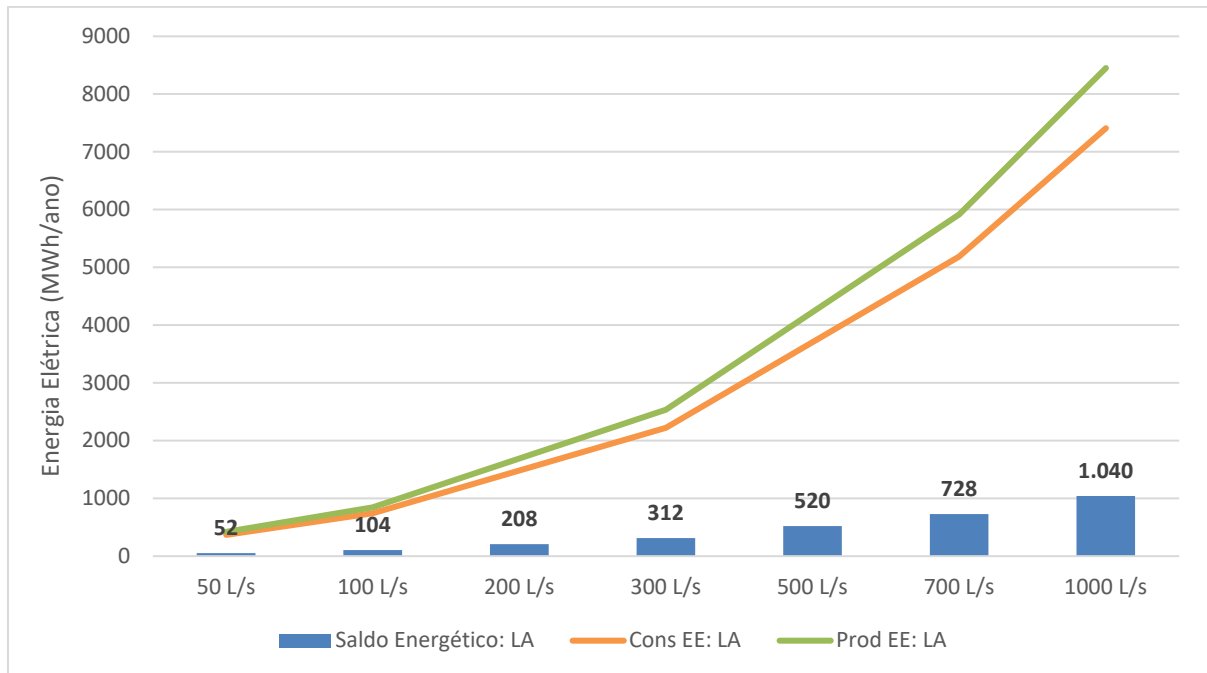
Para o processo UASB + LA e LA cerca de 87,7% da energia elétrica produzida é consumida para o funcionamento do sistema de aeração, obtendo-se um saldo de 12,3% de energia elétrica remanescente (Gráfico 3.7 e Gráfico 3.8). Ou seja, para os dois casos, ocorre uma amortização dos custos operacionais (OPEX) com energia elétrica. No caso do sistema MBBR, o consumo de energia elétrica excede a sua produção, apresentando um déficit de cerca de 14% (Gráfico 3.9).

Gráfico 3.7. Comparação da produção e consumo de energia elétrica e saldo energético para o sistema UASB + Lodos Ativados.



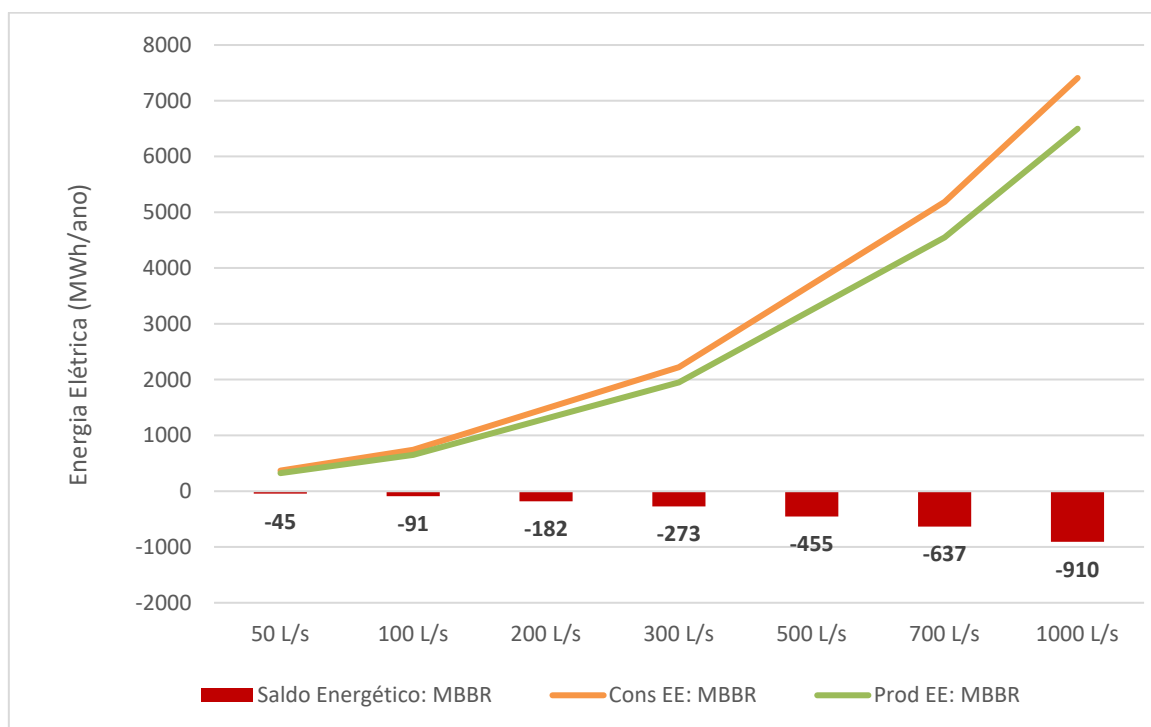
Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 3.8. Comparação da produção e consumo de energia elétrica e saldo energético para o sistema de Lodos Ativados.



Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 3.9. Comparação da produção e consumo de energia elétrica e saldo energético para o sistema de MBBR.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Tabela 3.11. apresenta a receita aproximada com a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido e a economia com custos operacionais de energia elétrica (OPEX) referentes ao sistema de aeração. Para o cálculo considerou-se a tarifa de energia de 0,45 R\$/kWh.

Tabela 3.11. Receita com a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido e economia com os custos operacionais de energia elétrica (R\$/ano).

Vazão	UASB + Lodos Ativados		Lodos Ativados		MBBR	
	Receita (R\$/ano)	OPEX Energia (R\$/ano)	Receita (R\$/ano)	OPEX Energia (R\$/ano)	Receita (R\$/ano)	OPEX Energia (R\$/ano)
50 L/s	R\$ 76.045	R\$ 66.681	R\$ 190.112	R\$ 166.707	R\$ 146.241	R\$ 166.707
100 L/s	R\$ 152.091	R\$ 133.367	R\$ 380.223	R\$ 333.410	R\$ 292.478	R\$ 333.410
200 L/s	R\$ 304.177	R\$ 266.729	R\$ 760.446	R\$ 666.824	R\$ 584.960	R\$ 666.824
300 L/s	R\$ 456.268	R\$ 400.095	R\$ 1.140.665	R\$ 1.000.233	R\$ 877.437	R\$ 1.000.233
500 L/s	R\$ 760.446	R\$ 666.824	R\$ 1.901.111	R\$ 1.667.057	R\$ 1.462.392	R\$ 1.667.057
700 L/s	R\$ 1.064.623	R\$ 933.552	R\$ 2.661.557	R\$ 2.333.880	R\$ 2.047.352	R\$ 2.333.880
1000 L/s	R\$ 1.520.887	R\$ 1.333.647	R\$ 3.802.221	R\$ 3.334.113	R\$ 2.924.789	R\$ 3.334.113

Fonte: Autoria própria (2023).

Nota-se que para os três sistemas as receitas foram promissoras permitindo uma economia dos custos operacionais com energia elétrica integral para os processos de LA e UASB + LA e parcial para o processo de MBBR. No caso do sistema de MBBR, a receita obtida supri cerca de 87,7% do OPEX de energia do sistema de aeração, sendo necessário realizar uma complementação utilizando a eletricidade proveniente da concessionária local.

4 Conclusão

O presente trabalho demonstrou por meio de cálculos teóricos embasados em literaturas de referência que o lodo remanescente do processo de tratamento de esgotos domésticos é uma biomassa rica energeticamente, capaz de produzir considerável volume de biogás por meio da sua digestão anaeróbia.

A análise comparativa da produção e do consumo de energia elétrica pelos sistemas estudados demonstrou que os lodos provenientes dos processos de tratamento de Lodos Ativados e UASB + Lodos Ativados possuem um alto potencial para o aproveitamento energético à medida que além de gerar uma quantidade de energia elétrica suficiente para alimentar os equipamentos que compõe o sistema aeróbio, é possível ainda utilizar a energia elétrica remanescente para suprir a demanda energética de outros processos que compõem as ETEs como os sistemas de bombeamento e os pré-tratamentos mecanizados. No caso do sistema de MBBR, ainda seria necessário um complemento energético para suprir a demanda de energia elétrica do sistema aeróbio e ainda seria necessário utilizar a eletricidade proveniente da rede da concessionária local.

O estudo em questão desconsiderou a produção de biogás diretamente no reator UASB para o potencial de geração de energia elétrica, à medida que o objetivo era comparar o potencial de geração a partir do lodo remanescente dos processos de tratamento de esgoto doméstico. Entretanto, em situação real o biogás gerado no UASB poderia ser aproveitado e o sistema UASB + Lodos Ativados certamente apresentaria o maior saldo energético dentre os processos estudados.

Para os três sistemas avaliados o reaproveitamento energético do biogás gerado a partir do lodo remanescente apresenta-se como uma alternativa interessante para a redução dos custos operacionais da ETE, à medida que além da redução do OPEX

de energia, ainda haveria uma redução dos custos operacionais referentes à disposição do lodo em aterros sanitários. Além disso, a energia elétrica gerada é renovável e pode ser comercializada para a rede de eletricidade.

O presente estudo não considerou os custos referentes a implantação dos biodigestores e motogeradores, entretanto, para o estudo da viabilidade de implementação destes sistemas nas ETEs, a análise dos custos de implantação (CAPEX) se faz necessária para avaliar a viabilidade econômica e o payback do projeto.

No setor de saneamento básico brasileiro a conversão energética do biogás não é uma prioridade e enfrenta diversas barreiras políticas à medida que não existe legislação de incentivo e programas de financiamento para a implantação destes sistemas e fomentação do mercado nacional de biogás. Portanto, se faz necessária a adoção de políticas públicas que integrem o saneamento básico com o setor de energia, incentivando assim o aproveitamento energético da biomassa remanescente dos processos de tratamento de esgotos.

Referências Bibliográficas

ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. *Lodos Ativados*. 3 ed. Belo Horizonte, Editora UFMG: 2012. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. V.4).

BRASIL. [Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007]. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. (Redação pela Lei nº 14.026, de 2020).

BRASIL. [Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010]. Política Nacional de Resíduos Sólidos. – 3. ed., reimpr. – Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2017.

Cacique Sioux Ts'ial-la-kum. [Correspondência]. Destinatário: Franklin Pierce, 1855.

CHEN, G. (ORG). *Biological Wastewater Treatment - Principles, Modelling and Design*. 2 ed. London, UK: IWA Publishing, 2020.

COELHO, S. T., GARCILASSO, V. P., SANTOS, M. M., ESCOBAR, J. F.. *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo*. São Paulo: IEE-USP, 2020.

COELHO, S. T., GARCILASSO, V. P., SANTOS, M. M., JUNIOR, D. N. F., JOPPERT, C. L. *Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano: Part. I Biogás; Part. II Biometano*. São Paulo: IEE-USP, 2018.

CHERNICHARO, C. A. L., *Reatores anaeróbios*. 2 ed. Belo Horizonte, Editora UFMG: 2016. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. V.5).

INSTITUTO TRATA BRASIL. Disponível em: < <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/09/manual-imprensa.pdf> >. Acesso em 21 de outubro de 2023.

METCALF & EDDY, INC. *Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos*. 5ª Edição / Tradução: Hespanhol, I.; Mierzwa, J. C. Porto Alegre: 2016.

SIMÕES MOREIRA, J. R. (ORG). *Energia renováveis, geração distribuída e eficiência energética*. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

SNIS. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (2022). *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2020*. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Publicado de Março de 2022, Brasília. Disponível em: <http://antigo.snis.gov.br/diagnosticos>. Acesso em agosto de 2023.

SNSA. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. *Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás*; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Bruno Silveira ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. V.1).

VON SPERLING, M., *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 2 ed. Belo Horizonte, Editora UFMG: 2014. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. V.6).

APÊNDICE A – Planilhas de Cálculo

CÁLCULOS UASB + LODOS ATIVADOS						
Vazão de Operação:						
Q _{méd} : Vazão média de operação	=	50,00	L/s	180,00	m³/h	4320,00 m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Efluente Bruto						
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30	kg/m³	1296,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60	kg/m³	2592,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35	kg/m³	1512,00 kg/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Pós UASB						
EDBO: Eficiência de remoção de DBO	=	60,00	%	120,00	mg/l	518,40 kg/d
EDQO: Eficiência de remoção de DQO	=	65,00	%	210,00	mg/l	907,20 kg/d
ESST: Eficiência de remoção de SST	=	70,00	%	105,00	mg/l	453,60 kg/d
Geração de Lodo - Lodos Ativos						
X _v : Sólidos em Suspensão Voláteis no reator	=	1800,00	mg/l			
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,65	KgSS/kgDBOaplicada			*Entre 0,55 e 0,70
CoDBO: Carga de DBO afluente	=	518,40	KgDBO/d			(ANDREOLI, C. V. et al, 2012)
Plodo: Produção de lodo total	=	336,96	kg SS/d			
X _v /X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³			
P _{ssv} Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	252,72	KgSSV/d			
P _{ssf} Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	84,24	kgSSF/d			
Geração Total de Lodo						
Plodo: Produção Total de Lodo	=	336,96	Kg/d			
γ: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³			
C _{sol} : Concentração de Sólidos	=	4,00%				
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	8,18	m³/d			
Geração de biogás a partir da biodigestão de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)						
f _{cv} : Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV			
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH ₄			
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH ₄ /Kg SSV			
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)						
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol			
V _m : Volume molar gás metano	=	22,40	litros			
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH ₄ /kg SSV			
PdCH ₄ : Produção volumétrica diária de gás metano	=	132,68	Nm³CH ₄ /dia			
PaCH ₄ : Produção volumétrica anual de gás metano	=	48427,47	Nm³CH ₄ /ano			
Con.CH ₄ : Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)			
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	69182,10	Nm³ biogás produzido/ano			
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)						
PCI CH ₄ : Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH ₄			
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35				
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	168,99	MWh/ano			
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico						
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>						
Relação kgO ₂ /kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO ₂ /kgDBOaplicada			
Con _{O2} : Demanda de Oxigênio total	=	777,60	kgO ₂ /d			
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>						
Ef: Eficiência de Transferência de O ₂ no efluente	=	15,00	%			
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>						
ConO ₂ : Consumo médio total de O ₂	=	777,60	kgO ₂ /d			
ρ _{ar} : Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³			
RO ₂ /ar: Relação de O ₂ / ar	=	0,23	gO ₂ / gAr			
Ef: Eficiência de transferência de O ₂	=	15,00	%			
Q _{ar} : Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	18782,61	m³/dia	13,04	m³/min	782,61 m³/h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>						
M _{ar} : Vazão mássica de ar	=	0,26	kg/s			
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K			
T _o : Temperatura absoluta de entrada (T _{máxméd} = 26°C)	=	299,00	K			
P _e : Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm			
P _s : Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm			

E: Eficiência do soprador	=	75,00	%		
Pw Potência do soprador	=	16,9	kW	22,7	cv
<u>Consumo Energético</u>					
Hop: Horas de operação diária	=	24	h		
Econs: Energia consumida diária	=	405,98	kWh/dia		
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	148,18	MWh/ano		
Balanco energia elétrica produzido x consumida					
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	168,99	MWh/ano		
Saldo energético sistema biológico	=	20,80	MWh/ano		

Vazão de Operação:					
Qméd: Vazão média de operação	=	100,00	L/s	360,00	m³/h 8640,00 m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Efluente Bruto					
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30	kg/m³ 2592,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60	kg/m³ 5184,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35	kg/m³ 3024,00 kg/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Pós UASB					
EDBO: Eficiência de remoção de DBO	=	60,00	%	120,00	mg/l 1036,80 kg/d
EDQO: Eficiência de remoção de DQO	=	65,00	%	210,00	mg/l 1814,40 kg/d
ESST: Eficiência de remoção de SST	=	70,00	%	105,00	mg/l 907,20 kg/d
Geração de Lodo - Lodos Ativados					
Xv: Sólidos em Suspensão Voláteis no reator	=	1800,00	mg/l		
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,65	KgSS/kgDBOaplicada		*Entre 0,55 e 0,70
CoDBO: Carga de DBO afluente	=	1036,80	KgDBO/d		(ANDREOLI, C. V. et al, 2012)
Plodo: Produção de lodo total	=	673,92	kg SS/d		
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³		
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	505,44	KgSSV/d		
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	168,48	kgSSF/d		
Geração Total de Lodo					
Plodo: Produção Total de Lodo	=	673,92	Kg/d		
y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³		
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%			
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	16,36	m³/d		
Geração de biogás a partir da biodigestão de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)					
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV		
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4		
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV		
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)					
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol		
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros		
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV		
PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	265,36	Nm³CH4/dia		
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	96854,94	Nm³CH4/ano		
Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)		
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	138364,20	Nm³ biogás produzido/ano		
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)					
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4		
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35			
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	337,98	MWh/ano		
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico					
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>					
Relação kgO₂/kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO₂/kgDBOaplicada		
ConO₂: Demanda de Oxigênio total	=	1555,20	kgO₂/d		
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>					
Ef: Eficiência de Transferência de O2 no efluente	=	15,00	%		
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>					
ConO2: Consumo médio total de O2	=	1555,20	kgO2/d		

par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³		
RO2/ar: Relação de O2 / ar	=	0,23	gO2 / gAr		
Ef: Eficiência de transferência de O2	=	15,00	%		
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	37565,22	m³/dia	26,09 m³/min	1565,22 m³/h
Potência Estimada - Sopradores					
Mar: Vazão mássica de ar	=	0,52	kg/s		
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K		
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K		
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm		
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm		
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%		
Pw Potência do soprador	=	33,8	kW	45,4	cv
Consumo Energético					
Hop: Horas de operação diária	=	24	h		
Econs: Energia consumida diária	=	811,96	kWh/dia		
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	296,37	MWh/ano		
Balanco energia elétrica produzido x consumida					
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	337,98	MWh/ano		
Saldo energético sistema biológico	=	41,61	MWh/ano		

Vazão de Operação:					
Qméd: Vazão média de operação	=	200,00	L/s	720,00 m³/h	17280,00 m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Efluente Bruto					
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30 kg/m³	5184,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60 kg/m³	10368,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35 kg/m³	6048,00 kg/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Pós UASB					
EDBO: Eficiência de remoção de DBO	=	60,00	%	120,00 mg/l	2073,60 kg/d
EDQO: Eficiência de remoção de DQO	=	65,00	%	210,00 mg/l	3628,80 kg/d
ESST: Eficiência de remoção de SST	=	70,00	%	105,00 mg/l	1814,40 kg/d
Geração de Lodo - Lodos Ativados					
Xv: Sólidos em Suspensão Voláteis no reator	=	1800,00	mg/l		
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,65	KgSS/kgDBOaplicada		*Entre 0,55 e 0,70
CoDBO: Carga de DBO afluente	=	2073,60	KgDBO/d		(ANDREOLI, C. V. et al, 2012)
Plodo: Produção de lodo total	=	1347,84	kg SS/d		
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³		
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	1010,88	KgSSV/d		
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	336,96	kgSSF/d		
Geração Total de Lodo					
Plodo: Produção Total de Lodo	=	1347,84	Kg/d		
y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³		
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%			
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	32,71	m³/d		
Geração de biogás a partir da biodigestão de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)					
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV		
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4		
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV		
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)					
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol		
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros		
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV		
PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	530,71	Nm³CH4/dia		
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	193709,88	Nm³CH4/ano		
Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)		
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	276728,40	Nm³ biogás produzido/ano		
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)					
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4		
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35			
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	675,95	MWh/ano		
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico					

<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>					
Relação kgO ₂ /kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO ₂ /kgDBOaplicada		
ConO₂: Demanda de Oxigênio total	=	3110,40	kgO₂/d		
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>					
Ef: Eficiência de Transferência de O ₂ no efluente	=	15,00	%		
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>					
ConO ₂ : Consumo médio total de O ₂	=	3110,40	kgO ₂ /d		
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m ³		
RO ₂ /ar: Relação de O ₂ / ar	=	0,23	gO ₂ / gAr		
Ef: Eficiência de transferência de O ₂	=	15,00	%		
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	75130,43	m³/dia	52,17 m ³ /min	3130,43 m ³ /h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>					
Mar: Vazão mássica de ar	=	1,04	kg/s		
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K		
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K		
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm		
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm		
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%		
Pw Potência do soprador	=	67,7	kW	90,7	cv
<u>Consumo Energético</u>					
Hop: Horas de operação diária	=	24	h		
Econs: Energia consumida diária	=	1623,92	kWh/dia		
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	592,73	MWh/ano		
<u>Balanco energia elétrica produzido x consumida</u>					
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	675,95	MWh/ano		
Saldo energético sistema biológico	=	83,22	MWh/ano		

<u>Vazão de Operação:</u>					
Qméd: Vazão média de operação	=	300,00	L/s	1080,00 m ³ /h	25920,00 m ³ /d
<u>Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Efluente Bruto</u>					
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30 kg/m ³	7776,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60 kg/m ³	15552,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35 kg/m ³	9072,00 kg/d
<u>Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Pós UASB</u>					
EDBO: Eficiência de remoção de DBO	=	60,00	%	120,00 mg/l	3110,40 kg/d
EDQO: Eficiência de remoção de DQO	=	65,00	%	210,00 mg/l	5443,20 kg/d
ESST: Eficiência de remoção de SST	=	70,00	%	105,00 mg/l	2721,60 kg/d
<u>Geração de Lodo - Lodos Ativados</u>					
Xv: Sólidos em Suspensão Voláteis no reator	=	1800,00	mg/l		
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,65	KgSS/kgDBOaplicada		*Entre 0,55 e 0,70
CoDBO: Carga de DBO afluente	=	3110,40	KgDBO/d		(ANDREOLI, C. V. et al, 2012)
Plodo: Produção de lodo total	=	2021,76	kg SS/d		
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m ³		
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	1516,32	KgSSV/d		
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	505,44	kgSSF/d		
<u>Geração Total de Lodo</u>					
Plodo: Produção Total de Lodo	=	2021,76	Kg/d		
y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m ³		
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%			
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	49,07	m³/d		
<u>Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)</u>					
f _{cv} : Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV		
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH ₄		
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH ₄ /Kg SSV		
<u>Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)</u>					
Mt: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol		
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros		
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm ³ CH ₄ /kg SSV		
PdCH₄: Produção volumétrica diária de gás metano	=	796,07	Nm³CH₄/dia		
PaCH₄: Produção volumétrica anual de gás metano	=	290564,82	Nm³CH₄/ano		

fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV		
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH ₄		
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH ₄ /Kg SSV		
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)					
Mt: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol		
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros		
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm ³ CH ₄ /kg SSV		
PdCH ₄ : Produção volumétrica diária de gás metano	=	1326,78	Nm ³ CH ₄ /dia		
PaCH ₄ : Produção volumétrica anual de gás metano	=	484274,70	Nm ³ CH ₄ /ano		
Con.CH ₄ : Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)		
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	691821,00	Nm ³ biogás produzido/ano		
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)					
PCI CH ₄ : Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m ³ CH ₄		
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35			
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	1689,88	MWh/ano		
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico					
<u><i>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</i></u>					
Relação kgO ₂ /kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO ₂ /kgDBOaplicada		
ConO ₂ : Demanda de Oxigênio total	=	7776,00	kgO ₂ /d		
<u><i>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</i></u>					
Ef: Eficiência de Transferência de O ₂ no efluente	=	15,00	%		
<u><i>Consumo de Ar - Processos Biológicos</i></u>					
ConO ₂ : Consumo médio total de O ₂	=	7776,00	kgO ₂ /d		
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m ³		
RO ₂ /ar: Relação de O ₂ / ar	=	0,23	gO ₂ / gAr		
Ef: Eficiência de transferência de O ₂	=	15,00	%		
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	187826,09	m ³ /dia	130,43 m ³ /min	7826,09 m ³ /h
<u><i>Potência Estimada - Sopradores</i></u>					
Mar: Vazão mássica de ar	=	2,61	kg/s		
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K		
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K		
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm		
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm		
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%		
Pw Potência do soprador	=	169,2	kW	226,8	cv
<u><i>Consumo Energético</i></u>					
Hop: Horas de operação diária	=	24	h		
Econs: Energia consumida diária	=	4059,80	kWh/dia		
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	1481,83	MWh/ano		
Balanco energia elétrica produzido x consumida					
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	1689,88	MWh/ano		
Saldo energético sistema biológico	=	208,05	MWh/ano		

Vazão de Operação:					
Qméd: Vazão média de operação	=	700,00	L/s	2520,00 m ³ /h	60480,00 m ³ /d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Efluente Bruto					
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30 kg/m ³	18144,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60 kg/m ³	36288,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35 kg/m ³	21168,00 kg/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Pós UASB					
EDBO: Eficiência de remoção de DBO	=	60,00	%	120,00 mg/l	7257,60 kg/d
EDQO: Eficiência de remoção de DQO	=	65,00	%	210,00 mg/l	12700,80 kg/d
ESST: Eficiência de remoção de SST	=	70,00	%	105,00 mg/l	6350,40 kg/d
Geração de Lodo - Lodos Ativados					
Xv: Sólidos em Suspensão Voláteis no reator	=	1800,00	mg/l		
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,65	KgSS/kgDBOaplicada		*Entre 0,55 e 0,70
CoDBO: Carga de DBO afluente	=	7257,60	KgDBO/d		(ANDREOLI, C. V. et al, 2012)
Plodo: Produção de lodo total	=	4717,44	kg SS/d		

Xv/X: Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³		
Pssv: Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	3538,08	KgSSV/d		
Pssf: Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	1179,36	kgSSF/d		
Geração Total de Lodo					
Plodo: Produção Total de Lodo	=	4717,44	Kg/d		
y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³		
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%			
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	114,50	m³/d		
Geração de biogás a partir da biodigestão de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)					
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV		
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4		
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV		
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)					
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol		
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros		
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV		
PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	1857,49	Nm³CH4/dia		
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	677984,58	Nm³CH4/ano		
Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)		
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	968549,40	Nm³ biogás produzido/ano		
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)					
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4		
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35			
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	2365,83	MWh/ano		
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico					
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>					
Relação kgO₂/kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO₂/kgDBOaplicada		
ConO₂: Demanda de Oxigênio total	=	10886,40	kgO₂/d		
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>					
Ef: Eficiência de Transferência de O₂ no efluente	=	15,00	%		
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>					
ConO₂: Consumo médio total de O₂	=	10886,40	kgO₂/d		
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³		
RO₂/ar: Relação de O₂ / ar	=	0,23	gO₂ / gAr		
Ef: Eficiência de transferência de O₂	=	15,00	%		
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	262956,52	m³/dia	182,61 m³/min	10956,52 m³/h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>					
Mar: Vazão mássica de ar	=	3,65	kg/s		
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K		
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K		
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm		
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm		
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%		
Pw: Potência do soprador	=	236,8	kW	317,6	cv
<u>Consumo Energético</u>					
Hop: Horas de operação diária	=	24	h		
Econs: Energia consumida diária	=	5683,72	kWh/dia		
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	2074,56	MWh/ano		
Balanco energia elétrica produzido x consumida					
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	2365,83	MWh/ano		
Saldo energético sistema biológico	=	291,27	MWh/ano		
Vazão de Operação:					
Qméd: Vazão média de operação	=	1000,00	L/s	3600,00 m³/h	86400,00 m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Efluente Bruto					
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30 kg/m³	25920,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60 kg/m³	51840,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35 kg/m³	30240,00 kg/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Pós UASB					

EDBO: Eficiência de remoção de DBO	=	60,00	%	120,00	mg/l	10368,00	kg/d
EDQO: Eficiência de remoção de DQO	=	65,00	%	210,00	mg/l	18144,00	kg/d
ESST: Eficiência de remoção de SST	=	70,00	%	105,00	mg/l	9072,00	kg/d
Geração de Lodo - Lodos Ativos							
Xv: Sólidos em Suspensão Voláteis no reator	=	1800,00	mg/l				
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,65	KgSS/kgDBOaplicada			*Entre 0,55 e 0,70	
CoDBO: Carga de DBO afluente	=	10368,00	KgDBO/d			(ANDREOLI, C. V. et al,	
Plodo: Produção de lodo total	=	6739,20	kg SS/d			2012)	
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³				
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	5054,40	KgSSV/d				
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	1684,80	kgSSF/d				
Geração Total de Lodo							
Plodo: Produção Total de Lodo	=	6739,20	Kg/d				
y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³				
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%					
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	163,57	m³/d				
Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)							
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV				
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4				
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV				
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)							
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol				
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros				
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV				
PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	2653,56	Nm³CH4/dia				
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	968549,40	Nm³CH4/ano				
Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)				
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	1383642,00	Nm³ biogás produzido/ano				
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)							
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4				
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35					
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	3379,75	MWh/ano				
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico							
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>							
Relação kgO₂/kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO₂/kgDBOaplicada				
ConO₂: Demanda de Oxigênio total	=	15552,00	kgO₂/d				
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>							
Ef: Eficiência de Transferência de O₂ no efluente	=	15,00	%				
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>							
ConO₂: Consumo médio total de O₂	=	15552,00	kgO₂/d				
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³				
RO₂/ar: Relação de O₂ / ar	=	0,23	gO₂ / gAr				
Ef: Eficiência de transferência de O₂	=	15,00	%				
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	375652,17	m³/dia	260,87	m³/min	15652,17	m³/h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>							
Mar: Vazão mássica de ar	=	5,22	kg/s				
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K				
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K				
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm				
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm				
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%				
Pw Potência do soprador	=	338,3	kW	453,7	cv		
<u>Consumo Energético</u>							
Hop: Horas de operação diária	=	24	h				
Econs: Energia consumida diária	=	8119,60	kWh/dia				
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	2963,66	MWh/ano				
Balanço energia elétrica produzido x consumida							
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	3379,75	MWh/ano				
Saldo energético sistema biológico	=	416,10	MWh/ano				

CÁLCULOS LODOS ATIVADOS						
Vazão de Operação						
Qméd: Vazão média de operação	=	50,00	L/s	180,00	m³/h	4320,00 m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Efluente Bruto						
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30	kg/m³	1296,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60	kg/m³	2592,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35	kg/m³	1512,00 kg/d
Geração de Lodo - Lodos Ativados						
Xv: Sólidos em Suspensão Voláteis no reator	=	1800,00	mg/l			
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,65	KgSS/kgDBOaplicada			*Entre 0,55 e 0,70
Plodo: Produção de lodo total	=	842,40	kg SS/d			(ANDREOLI, C. V. et al, 2012)
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³			
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	631,80	KgSSV/d			
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	210,60	kgSSF/d			
Excesso de lodo						
O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor						
Plodo: Produção Total de Lodo	=	842,40	Kg/d			
y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³			
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%				
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	20,45	m³/d			
Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)						
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV			
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4			
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV			
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)						
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol			
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros			
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV			
PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	331,70	Nm³CH4/dia			
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	121068,68	Nm³CH4/ano			
Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)			
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	172955,25	Nm³ biogás produzido/ano			
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)						
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4			
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35				
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	422,47	MW/h/ano			
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico						
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>						
Relação kgO2/kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO2/kgDBOaplicada			
ConO2: Demanda de Oxigênio total	=	1944,00	kgO2/d			
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>						
EF: Eficiência de Transferência de O2 no efluente	=	15,00	%			
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>						
ConO2: Consumo médio total de O2	=	1944,00	kgO2/d			
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³			
RO2/ar: Relação de O2 / ar	=	0,23	gO2 / gAr			
EF: Eficiência de transferência de O2	=	15,00	%			
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	46956,52	m³/dia	32,61	m³/min	1956,52 m³/h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>						
Mar: Vazão mássica de ar	=	0,65	kg/s			
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K			
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K			
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm			
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm			
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%			
Pw Potência do soprador	=	42,3	kW	56,7	cv	
<u>Consumo Energético</u>						
Hop: Horas de operação diária	=	24	h			
Econs: Energia consumida diária	=	1014,95	kWh/dia			
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	370,46	MW/h/ano			
Balanco energia elétrica produzido x consumida						
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	422,47	MW/h/ano			
Saldo energético sistema biológico	=	52,01	MW/h/ano			

Vazão de Operação:						
Qméd: Vazão média de operação	=	100,00	L/s	360,00	m³/h	8640,00 m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Efluente Bruto						
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30	kg/m³	2592,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60	kg/m³	5184,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35	kg/m³	3024,00 kg/d
Geração de Lodo - Lodos Ativados						
Xv: Sólidos em Suspensão Voláteis no reator	=	1800,00	mg/l			
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,65	KgSS/kgDBOaplicada			*Entre 0,55 e 0,70 (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)
Plodo: Produção de lodo total	=	1684,80	kg SS/d			
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³			
Pssv: Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	1263,60	KgSSV/d			
Pssf: Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	421,20	kgSSF/d			
Excesso de lodo						
O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor						
Plodo: Produção Total de Lodo	=	1684,80	Kg/d			
y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³			
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%				
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	40,89	m³/d			
Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)						
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV			
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4			
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV			
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)						
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol			
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros			
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV			
PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	663,39	Nm³CH4/dia			
PvCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	242137,35	Nm³CH4/ano			
Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)			
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	345910,50	Nm³ biogás produzido/ano			
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)						
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4			
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35				
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	844,94	MWh/ano			
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico						
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>						
Relação kgO₂/kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO₂/kgDBOaplicada			
ConO₂: Demanda de Oxigênio total	=	3888,00	kgO₂/d			
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>						
Ef: Eficiência de Transferência de O₂ no efluente	=	15,00	%			
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>						
ConO₂: Consumo médio total de O₂	=	3888,00	kgO₂/d			
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³			
RO₂/ar: Relação de O₂ / ar	=	0,23	gO₂ / gAr			
Ef: Eficiência de transferência de O₂	=	15,00	%			
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	93913,04	m³/dia	65,22	m³/min	3913,04 m³/h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>						
Mar: Vazão mássica de ar	=	1,30	kg/s			
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K			
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K			
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm			
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm			
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%			
Pw: Potência do soprador	=	84,6	kW	113,4	cv	
<u>Consumo Energético</u>						
Hop: Horas de operação diária	=	24	h			
Econs: Energia consumida diária	=	2029,90	kWh/dia			
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	740,91	MWh/ano			
Balanco energia elétrica produzido x consumida						
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	844,94	MWh/ano			
Saldo energético sistema biológico	=	104,02	MWh/ano			

Vazão de Operação:						
Qméd: Vazão média de operação	=	200,00	L/s	720,00	m³/h	17280,00 m³/d

Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Efluente Bruto

CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30	kg/m³	5184,00	kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60	kg/m³	10368,00	kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35	kg/m³	6048,00	kg/d

Geração de Lodo - Lodos Ativados

Xv: Sólidos em Suspensão Voláteis no reator	=	1800,00	mg/l				
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,65	KgSS/kgDBOaplicada			*Entre 0,55 e 0,70	
Plodo: Produção de lodo total	=	3369,60	kg SS/d			(ANDREOLI, C. V. et al, 2012)	
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³				
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	2527,20	KgSSV/d				
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	842,40	kgSSF/d				

Excesso de lodo

O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor

Plodo: Produção Total de Lodo	=	3369,60	Kg/d
y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%	
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	81,79	m³/d

Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)

fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV

Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)

M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV

PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	1326,78	Nm³CH4/dia
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	484274,70	Nm³CH4/ano

Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	691821,00	Nm³ biogás produzido/ano

Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)

PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35	

EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	1689,88	MWh/ano
---	---	---------	---------

Consumo de energia elétrica Sistema BiológicoDemanda total de Oxigênio - Processos Biológicos

Relação kgO₂/kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO₂/kgDBOaplicada
Conoz: Demanda de Oxigênio total	=	7776,00	kgO₂/d

Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado

Ef: Eficiência de Transferência de O₂ no efluente	=	15,00	%
---	---	-------	---

Consumo de Ar - Processos Biológicos

ConO₂: Consumo médio total de O₂	=	7776,00	kgO₂/d
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³
RO₂/ar: Relação de O₂ / ar	=	0,23	gO₂ / gAr
Ef: Eficiência de transferência de O₂	=	15,00	%
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	187826,09	m³/dia
		130,43	m³/min
		7826,09	m³/h

Potência Estimada - Sopradores

Mar: Vazão mássica de ar	=	2,61	kg/s
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%
Pw Potência do soprador	=	169,2	kW
		226,8	cv

Consumo Energético

Hop: Horas de operação diária	=	24	h
Econs: Energia consumida diária	=	4059,80	kWh/dia
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	1481,83	MWh/ano

Balanco energia elétrica produzido x consumida

EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	1689,88	MWh/ano
Saldo energético sistema biológico	=	208,05	MWh/ano

Vazão de Operação:

Qméd: Vazão média de operação	=	300,00	L/s
		1080,00	m³/h
		25920,00	m³/d

Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Efluente Bruto

CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30	kg/m³	12960,00	kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60	kg/m³	25920,00	kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35	kg/m³	15120,00	kg/d
Geração de Lodo - Lodos Ativados							
Xv: Sólidos em Suspensão Voláteis no reator	=	1800,00	mg/l				
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,65	KgSS/kgDBOaplicada			*Entre 0,55 e 0,70	
Plodo: Produção de lodo total	=	8424,00	kg SS/d			(ANDREOLI, C. V. et al, 2012)	
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³				
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	6318,00	KgSSV/d				
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	2106,00	kgSSF/d				
Excesso de lodo							
O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor							
Plodo: Produção Total de Lodo	=	8424,00	Kg/d				
y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³				
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%					
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	204,47	m³/d				
Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)							
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV				
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4				
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV				
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)							
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol				
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros				
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV				
PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	3316,95	Nm³CH4/dia				
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	1210686,75	Nm³CH4/ano				
Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)				
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	1729552,50	Nm³ biogás produzido/ano				
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)							
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4				
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35					
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	4224,69	MWh/ano				
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico							
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>							
Relação kgO₂/kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO₂/kgDBOaplicada				
Cono₂: Demanda de Oxigênio total	=	19440,00	kgO₂/d				
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>							
Ef: Eficiência de Transferência de O₂ no efluente	=	15,00	%				
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>							
$Q_{ar} = \frac{Con_{O_2}}{\rho_{ar} \cdot R_{O_2/ar} \cdot Ef}$							
ConO₂: Consumo médio total de O₂	=	19440,00	kgO₂/d				
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³				
RO₂/ar: Relação de O₂ / ar	=	0,23	gO₂ / gAr				
Ef: Eficiência de transferência de O₂	=	15,00	%				
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	469565,22	m³/dia	326,09	m³/min	19565,22	m³/h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>							
Mar: Vazão mássica de ar	=	6,52	kg/s				
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K				
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K				
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm				
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm				
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%				
Pw Potência do soprador	=	422,9	kW	567,1	cv		
<u>Consumo Energético</u>							
Hop: Horas de operação diária	=	24	h				
Econs: Energia consumida diária	=	10149,50	kWh/dia				
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	3704,57	MWh/ano				
Balanco energia elétrica produzido x consumida							
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	4224,69	MWh/ano				
Saldo energético sistema biológico	=	520,12	MWh/ano				

Vazão de Operação:							
Qméd: Vazão média de operação	=	700,00	L/s	2520,00	m³/h	60480,00	m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Efluente Bruto							
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30	kg/m³	18144,00	kg/d

CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60	kg/m³	36288,00	kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35	kg/m³	21168,00	kg/d
Geração de Lodo - Lodos Ativados							
Xv: Sólidos em Suspensão Voláteis no reator	=	1800,00	mg/l				
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,65	KgSS/kgDBOaplicada			*Entre 0,55 e 0,70	
Plodo: Produção de lodo total	=	11793,60	kg SS/d			(ANDREOLI, C. V. et al, 2012)	
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³				
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	8845,20	KgSSV/d				
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	2948,40	kgSSF/d				
Excesso de lodo							
O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor							
Plodo: Produção Total de Lodo	=	11793,60	Kg/d				
y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³				
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%					
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	286,25	m³/d				
Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)							
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV				
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4				
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV				
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)							
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol				
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros				
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV				
PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	4643,73	Nm³CH4/dia				
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	1694961,45	Nm³CH4/ano				
Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)				
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	2421373,50	Nm³ biogás produzido/ano				
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)							
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4				
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35					
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	5914,57	MWh/ano				
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico							
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>							
Relação kgO₂/kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO₂/kgDBOaplicada				
Cono₂: Demanda de Oxigênio total	=	27216,00	kgO₂/d				
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>							
Ef: Eficiência de Transferência de O₂ no efluente	=	15,00	%				
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>							
ConO₂: Consumo médio total de O₂	=	27216,00	kgO₂/d				
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³				
RO₂/ar: Relação de O₂ / ar	=	0,23	gO₂ / gAr				
Ef: Eficiência de transferência de O₂	=	15,00	%				
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	657391,30	m³/dia	456,52	m³/min	27391,30	m³/h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>							
Mar: Vazão mássica de ar	=	9,13	kg/s				
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K				
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K				
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm				
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm				
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%				
Pw Potência do soprador	=	592,1	kW	793,9	cv		
<u>Consumo Energético</u>							
Hop: Horas de operação diária	=	24	h				
Econs: Energia consumida diária	=	14209,31	kWh/dia				
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	5186,40	MWh/ano				
Balanco energia elétrica produzido x consumida							
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	5914,57	MWh/ano				
Saldo energético sistema biológico	=	728,17	MWh/ano				
Vazão de Operação:							
Qméd: Vazão média de operação	=	1000,00	L/s	3600,00	m³/h	86400,00	m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais - Efluente Bruto							
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30	kg/m³	25920,00	kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60	kg/m³	51840,00	kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35	kg/m³	30240,00	kg/d

Geração de Lodo - Lodos Ativados

Xv: Sólidos em Suspensão Voláteis no reator	=	1800,00	mg/l	
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,65	KgSS/kgDBOaplicada	*Entre 0,55 e 0,70 (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)
Plodo: Produção de lodo total	=	16848,00	kg SS/d	
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³	
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	12636,00	KgSSV/d	
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	4212,00	kgSSF/d	

Excesso de lodo

O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor

Plodo: Produção Total de Lodo	=	16848,00	Kg/d
γ: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%	
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	408,93	m³/d

Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)

fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV

Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)

M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV

PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	6633,90	Nm³CH4/dia
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	2421373,50	Nm³CH4/ano

Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	3459105,00	Nm³ biogás produzido/ano

Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)

PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35	

EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	8449,38	MWh/ano
---	---	---------	---------

Consumo de energia elétrica Sistema BiológicoDemanda total de Oxigênio - Processos Biológicos

Relação kgO₂/kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO₂/kgDBOaplicada
ConO₂: Demanda de Oxigênio total	=	38880,00	kgO₂/d

Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado

Ef: Eficiência de Transferência de O₂ no efluente	=	15,00	%
---	---	-------	---

Consumo de Ar - Processos Biológicos

ConO₂: Consumo médio total de O₂	=	38880,00	kgO₂/d
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³
RO₂/ar: Relação de O₂ / ar	=	0,23	gO₂ / gAr
Ef: Eficiência de transferência de O₂	=	15,00	%
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	939130,43	m³/dia 652,17 m³/min 39130,43 m³/h

Potência Estimada - Sopradores

Mar: Vazão mássica de ar	=	13,04	kg/s
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%
Pw Potência do soprador	=	845,8	kW 1134,2 cv

Consumo Energético

Hop: Horas de operação diária	=	24	h
Econs: Energia consumida diária	=	20299,01	kWh/dia
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	7409,14	MWh/ano

Balanco energia elétrica produzido x consumida

EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	8449,38	MWh/ano
Saldo energético sistema biológico	=	1040,24	MWh/ano

CÁLCULOS MBBR						
Vazão de Operação:						
Qméd: Vazão média de operação	=	50,00	L/s	180,00	m³/h	4320,00 m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais						
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30	kg/m³	1296,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35	kg/m³	1512,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60	kg/m³	2592,00 kg/d
Produção de Lodo no Processo Biológico						
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,50	kgSS/kgDBO aplicada	*Entre 0,50 e 0,55 (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)		
Plodo: Produção de lodo total	=	648,00	kgSS/d			
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³			
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	486,00	KgSSV/d			
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	162,00	kgSSF/d			
Excesso de lodo						
O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor						
Plodo: Produção Total de Lodo	=	648,00	Kg/d			
y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³			
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%				
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	15,73	m³/d			
Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)						
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV			
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4			
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV			
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)						
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol			
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros			
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV			
PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	255,15	Nm³CH4/dia			
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	93129,75	Nm³CH4/ano			
Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)			
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	133042,50	Nm³ biogás produzido/ano			
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)						
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4			
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35				
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	324,98	MWh/ano			
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico						
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>						
Relação kgO2/kgDBO para remoção de DBO e nitrificação	=	1,50	kgO2/kgDBOaplicada			
Conox: Demanda de Oxigênio total	=	1944,00	kgO2/d			
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>						
Ef: Eficiência de Transferência de O2 no efluente	=	15,00	%			
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>						
$Q_{ar} = \frac{Con_{O_2}}{\rho_{ar} \cdot R_{O_2/ar} \cdot Ef}$						
ConO2: Consumo médio total de O2	=	1944,00	kgO2/d			
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³			
RO2/ar: Relação de O2 / ar	=	0,23	gO2 / gAr			
Ef: Eficiência de transferência de O2	=	15,00	%			
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	46956,52	m³/dia	32,61	m³/min	1956,52 m³/h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>						
Mar: Vazão mássica de ar	=	0,65	kg/s			
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K			
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K			
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm			
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm			
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%			
Pw: Potência do soprador	=	42,3	kW	56,7	cv	
<u>Consumo Energético</u>						
Hop: Horas de operação diária	=	24	h			
Econs: Energia consumida diária	=	1014,95	kWh/dia			
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	370,46	MWh/ano			
Balanco energia elétrica produzido x consumida						
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	324,98	MWh/ano			
Saldo energético sistema biológico	=	-45,48	MWh/ano			

Vazão de Operação:					
Qméd: Vazão média de operação	=	100,00	L/s	360,00	m³/h 8640,00 m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais					
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30	kg/m³ 2592,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35	kg/m³ 3024,00 kg/d

CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60	kg/m³	5184,00	kg/d
Produção de Lodo no Processo Biológico							
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,50	kgSS/kgDBO aplicada	*Entre 0,50 e 0,55 (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)			
Plodo: Produção de lodo total	=	1296,00	kgSS/d				
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³				
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	972,00	KgSSV/d				
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	324,00	kgSSF/d				
Excesso de lodo							
O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor							
Plodo: Produção Total de Lodo	=	1296,00	Kg/d				
γ: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³				
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%					
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	31,46	m³/d				
Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)							
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV				
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4				
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV				
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)							
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol				
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros				
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV				
PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	510,30	Nm³CH4/dia				
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	186259,50	Nm³CH4/ano				
Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)				
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	266085,00	Nm³ biogás produzido/ano				
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)							
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4				
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35					
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	649,95	MWh/ano				
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico							
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>							
Relação kgO₂/kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO₂/kgDBOaplicada				
Conoz: Demanda de Oxigênio total	=	3888,00	kgO₂/d				
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>							
Ef: Eficiência de Transferência de O2 no efluente	=	15,00	%				
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>							
$Q_{ar} = \frac{Con_{O_2}}{\rho_{ar} \cdot R_{O_2/ar} \cdot Ef}$							
ConO2: Consumo médio total de O2	=	3888,00	kgO2/d				
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³				
RO2/ar: Relação de O2 / ar	=	0,23	gO2 / gAr				
Ef: Eficiência de transferência de O2	=	15,00	%				
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	93913,04	m³/dia	65,22	m³/min	3913,04	m³/h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>							
Mar: Vazão mássica de ar	=	1,30	kg/s				
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K				
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K				
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm				
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm				
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%				
Pw Potência do soprador	=	84,6	kW	113,4	cv		
<u>Consumo Energético</u>							
Hop: Horas de operação diária	=	24	h				
Econs: Energia consumida diária	=	2029,90	kWh/dia				
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	740,91	MWh/ano				
Balanco energia elétrica produzido x consumida							
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	649,95	MWh/ano				
Saldo energético sistema biológico	=	-90,96	MWh/ano				

Vazão de Operação:							
Qméd: Vazão média de operação	=	200,00	L/s	720,00	m³/h	17280,00	m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais							
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30	kg/m³	5184,00	kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35	kg/m³	6048,00	kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60	kg/m³	10368,00	kg/d
Produção de Lodo no Processo Biológico							
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,50	kgSS/kgDBO aplicada	*Entre 0,50 e 0,55 (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)			
Plodo: Produção de lodo total	=	2592,00	kgSS/d				
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³				
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	1944,00	KgSSV/d				
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	648,00	kgSSF/d				

Excesso de lodo				
O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor				
Pldo: Produção Total de Lodo	=	2592,00	Kg/d	
γ: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³	
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%		
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	62,91	m³/d	
Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)				
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV	
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4	
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV	
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)				
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol	
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros	
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV	
PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	1020,60	Nm³CH4/dia	
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	372519,00	Nm³CH4/ano	
Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)	
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	532170,00	Nm³ biogás produzido/ano	
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)				
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4	
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35		
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	1299,91	MWh/ano	
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico				
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>				
Relação kgO₂/kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO₂/kgDBOaplicada	
Conce: Demanda de Oxigênio total	=	7776,00	kgO₂/d	
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>				
Ef: Eficiência de Transferência de O₂ no efluente	=	15,00	%	
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>				
$Q_{ar} = \frac{Con_{O_2}}{\rho_{ar} \cdot R_{O_2/ar} \cdot Ef}$				
ConO₂: Consumo médio total de O₂	=	7776,00	kgO₂/d	
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³	
RO₂/ar: Relação de O₂ / ar	=	0,23	gO₂ / gAr	
Ef: Eficiência de transferência de O₂	=	15,00	%	
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	187826,09	m³/dia	130,43 m³/min 7826,09 m³/h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>				
Mar: Vazão mássica de ar	=	2,61	kg/s	
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K	
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K	
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm	
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm	
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%	
Pw Potência do soprador	=	169,2	kW	226,8 cv
<u>Consumo Energético</u>				
Hop: Horas de operação diária	=	24	h	
Econs: Energia consumida diária	=	4059,80	kWh/dia	
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	1481,83	MWh/ano	
Balanco energia elétrica produzido x consumida				
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	1299,91	MWh/ano	
Saldo energético sistema biológico	=	-181,92	MWh/ano	

Vazão de Operação:				
Qméd: Vazão média de operação	=	300,00	L/s	1080,00 m³/h 25920,00 m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais				
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30 kg/m³ 7776,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35 kg/m³ 9072,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60 kg/m³ 15552,00 kg/d
Produção de Lodo no Processo Biológico				
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,50	kgSS/kgDBO aplicada	*Entre 0,50 e 0,55 (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)
Pldo: Produção de lodo total	=	3888,00	kgSS/d	
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³	
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	2916,00	KgSSV/d	
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	972,00	kgSSF/d	
Excesso de lodo				
O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor				
Pldo: Produção Total de Lodo	=	3888,00	Kg/d	
γ: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³	
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%		
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	94,37	m³/d	
Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)				
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV	
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4	

Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH ₄ /Kg SSV		
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)	=				
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol		
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros		
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm ³ CH ₄ /kg SSV		
PdCH ₄ : Produção volumétrica diária de gás metano	=	1530,90	Nm ³ CH ₄ /dia		
PaCH ₄ : Produção volumétrica anual de gás metano	=	558778,50	Nm ³ CH ₄ /ano		
Con.CH ₄ : Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)		
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	798255,00	Nm ³ biogás produzido/ano		
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)					
PCI CH ₄ : Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m ³ CH ₄		
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35			
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	1949,86	MWh/ano		
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico					
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>					
Relação kgO ₂ /kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO ₂ /kgDBOaplicada		
Conce: Demanda de Oxigênio total	=	11664,00	kgO ₂ /d		
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>					
Ef: Eficiência de Transferência de O ₂ no efluente	=	15,00	%		
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>					
$Q_{ar} = \frac{Con_{O_2}}{\rho_{ar} \cdot R_{O_2/ar} \cdot Ef}$					
ConO ₂ : Consumo médio total de O ₂	=	11664,00	kgO ₂ /d		
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m ³		
RO ₂ /ar: Relação de O ₂ / ar	=	0,23	gO ₂ / gAr		
Ef: Eficiência de transferência de O ₂	=	15,00	%		
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	281739,13	m ³ /dia	195,65 m ³ /min	11739,13 m ³ /h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>					
Mar: Vazão mássica de ar	=	3,91	kg/s		
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K		
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K		
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm		
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm		
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%		
Pw Potência do soprador	=	253,7	kW	340,3	cv
<u>Consumo Energético</u>					
Hop: Horas de operação diária	=	24	h		
Econs: Energia consumida diária	=	6089,70	kWh/dia		
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	2222,74	MWh/ano		
Balanco energia elétrica produzido x consumida					
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	1949,86	MWh/ano		
Saldo energético sistema biológico	=	-272,88	MWh/ano		

Vazão de Operação:					
Qméd: Vazão média de operação	=	500,00	L/s	1800,00 m ³ /h	43200,00 m ³ /d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais					
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30 kg/m ³	12960,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35 kg/m ³	15120,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60 kg/m ³	25920,00 kg/d
Produção de Lodo no Processo Biológico					
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,50	kgSS/kgDBO aplicada		*Entre 0,50 e 0,55 (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)
Plodo: Produção de lodo total	=	6480,00	kgSS/d		
XvX Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m ³		
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	4860,00	KgSSV/d		
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	1620,00	kgSSF/d		
Excesso de lodo					
O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor					
Plodo: Produção Total de Lodo	=	6480,00	Kg/d		
y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m ³		
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%			
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	157,28	m ³ /d		
Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)					
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV		
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH ₄		
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH ₄ /Kg SSV		
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)	=				
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol		
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros		
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm ³ CH ₄ /kg SSV		
PdCH ₄ : Produção volumétrica diária de gás metano	=	2551,50	Nm ³ CH ₄ /dia		
PaCH ₄ : Produção volumétrica anual de gás metano	=	931297,50	Nm ³ CH ₄ /ano		
Con.CH ₄ : Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)		

Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	1330425,00	Nm³ biogás produzido/ano		
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)					
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4		
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35			
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	3249,76	MWh/ano		
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico					
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>					
Relação kgO₂/kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO₂/kgDBOaplicada		
Conco2: Demanda de Oxigênio total	=	19440,00	kgO₂/d		
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>					
Ef: Eficiência de Transferência de O2 no efluente	=	15,00	%		
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>					
$Q_{ar} = \frac{Con_{O_2}}{\rho_{ar} \cdot R_{O_2/ar} \cdot Ef}$					
ConO2: Consumo médio total de O2	=	19440,00	kgO₂/d		
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m³		
RO2/ar: Relação de O2 / ar	=	0,23	gO₂ / gAr		
Ef: Eficiência de transferência de O2	=	15,00	%		
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	469565,22	m³/dia	326,09 m³/min	19565,22 m³/h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>					
Mar: Vazão mássica de ar	=	6,52	kg/s		
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K		
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K		
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm		
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm		
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%		
Pw Potência do soprador	=	422,9	kW	567,1	cv
<u>Consumo Energético</u>					
Hop: Horas de operação diária	=	24	h		
Econs: Energia consumida diária	=	10149,50	kWh/dia		
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	3704,57	MWh/ano		
Balanco energia elétrica produzido x consumida					
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	3249,76	MWh/ano		
Saldo energético sistema biológico	=	-454,81	MWh/ano		

Vazão de Operação:					
Qméd: Vazão média de operação	=	700,00	L/s	2520,00 m³/h	60480,00 m³/d
Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais					
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30 kg/m³	18144,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35 kg/m³	21168,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60 kg/m³	36288,00 kg/d
Produção de Lodo no Processo Biológico					
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,50	kgSS/kgDBO aplicada		*Entre 0,50 e 0,55 (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)
Plodo: Produção de lodo total	=	9072,00	kgSS/d		
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m³		
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	6804,00	kgSSV/d		
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	2268,00	kgSSF/d		
Excesso de lodo					
O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor					
Plodo: Produção Total de Lodo	=	9072,00	Kg/d		
Y: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m³		
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%			
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	220,19	m³/d		
Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)					
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV		
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH4		
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH4/Kg SSV		
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)					
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol		
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros		
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm³CH4/kg SSV		
PdCH4: Produção volumétrica diária de gás metano	=	3572,10	Nm³CH4/dia		
PaCH4: Produção volumétrica anual de gás metano	=	1303816,50	Nm³CH4/ano		
Con.CH4: Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)		
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	1862595,00	Nm³ biogás produzido/ano		
Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)					
PCI CH4: Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m³CH4		
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35			
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	4549,67	MWh/ano		
Consumo de energia elétrica Sistema Biológico					

<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>					
Relação kgO ₂ /kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO ₂ /kgDBOaplicada		
Conoz: Demanda de Oxigênio total	=	27216,00	kgO ₂ /d		
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>					
Ef: Eficiência de Transferência de O ₂ no efluente	=	15,00	%		
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>					
ConO ₂ : Consumo médio total de O ₂	=	27216,00	kgO ₂ /d		
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m ³		
RO ₂ /ar: Relação de O ₂ / ar	=	0,23	gO ₂ / gAr		
Ef: Eficiência de transferência de O ₂	=	15,00	%		
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	657391,30	m ³ /dia	456,52 m ³ /min	27391,30 m ³ /h
<u>Potência Estimada - Sopradores</u>					
Mar: Vazão mássica de ar	=	9,13	kg/s		
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K		
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K		
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm		
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm		
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%		
Pw Potência do soprador	=	592,1	kW	793,9	cv
<u>Consumo Energético</u>					
Hop: Horas de operação diária	=	24	h		
Econs: Energia consumida diária	=	14209,31	kWh/dia		
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	5186,40	MWh/ano		
<u>Balanco energia elétrica produzido x consumida</u>					
EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	4549,67	MWh/ano		
Saldo energético sistema biológico	=	-636,73	MWh/ano		

<u>Vazão de Operação:</u>					
Qméd: Vazão média de operação	=	1000,00	L/s	3600,00 m ³ /h	86400,00 m ³ /d
<u>Concentrações e Cargas Orgânicas Sólidos Suspensos Totais</u>					
CoDBO: Concentração DBO	=	300,00	mg/L	0,30 kg/m ³	25920,00 kg/d
CoSST: Concentração SST	=	350,00	mg/L	0,35 kg/m ³	30240,00 kg/d
CoDQO: Concentração de DQO	=	600,00	mg/L	0,60 kg/m ³	51840,00 kg/d
<u>Produção de Lodo no Processo Biológico</u>					
Y: *Coeficiente de Produção de Lodo	=	0,50	kgSS/kgDBO aplicada		*Entre 0,50 e 0,55 (ANDREOLI, C. V. et al, 2012)
Plodo: Produção de lodo total	=	12960,00	kgSS/d		
Xv/X Relação Sólidos Voláteis/Suspensos	=	0,75	g/m ³		
Pssv Produção de Sólidos Suspensos Voláteis	=	9720,00	KgSSV/d		
Pssf Produção de Sólidos Suspensos Fixos	=	3240,00	kgSSF/d		
<u>Excesso de lodo</u>					
O excesso de lodo sedimentado no decantador secundário, resultado do processo aeróbio será destinado ao biodigestor					
Plodo: Produção Total de Lodo	=	12960,00	Kg/d		
γ: Massa específica do lodo	=	1030,00	Kg/m ³		
Csol: Concentração de Sólidos	=	4,00%			
Vlodo: Volume total produzido de lodo	=	314,56	m ³ /d		
<u>Geração de biogás a partir da biodigestação de lodo (Referência A.C van Haandel e J.G.M van der Lubbe, 2012)</u>					
fcv: Razão média entre DQO/SSV no excesso de lodo	=	1,50	KgDQO/Kg SSV		
Relação da produção de metano por DQO aplicada	=	4,00	kgDQO/kg CH ₄		
Relação da produção de metano por kgSSV aplicado	=	0,375	KgCH ₄ /Kg SSV		
Considerando condições normais (0°C ou 173K e 1 atm)					
M: Massa molar do gás metano	=	16,00	g/mol		
Vm: Volume molar gás metano	=	22,40	litros		
Volume de metano produzido por kg de lodo digerido	=	0,525	Nm ³ CH ₄ /kg SSV		
PdCH ₄ : Produção volumétrica diária de gás metano	=	5103,00	Nm ³ CH ₄ /dia		
PaCH ₄ : Produção volumétrica anual de gás metano	=	1862595,00	Nm ³ CH ₄ /ano		
Con CH ₄ : Concentração de metano presente no biogás	=	70%	Araújo e Van Haandel (1998)		
Vbiogás: Volume anual de biogás produzido	=	2660850,00	Nm ³ biogás produzido/ano		
<u>Potencial geração de energia elétrica (Referência Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, 2020)</u>					
PCI CH ₄ : Poder Calorífico Inferior do metano	=	9,97	kWh/m ³ CH ₄		
EF.ele: Eficiência de conversão energética motor ciclo Otto a biogás	=	0,35			
EE: Potencial geração de energia elétrica por ano	=	6499,53	MWh/ano		
<u>Consumo de energia elétrica Sistema Biológico</u>					
<u>Demanda total de Oxigênio - Processos Biológicos</u>					
Relação kgO ₂ /kgDBO para remoção de DBO	=	1,50	kgO ₂ /kgDBOaplicada		
Conoz: Demanda de Oxigênio total	=	38880,00	kgO ₂ /d		
<u>Eficiência de transferência oxigênio em campo - Processos Biológicos - Valor teórico considerado</u>					
Ef: Eficiência de Transferência de O ₂ no efluente	=	15,00	%		
<u>Consumo de Ar - Processos Biológicos</u>					
ConO ₂ : Consumo médio total de O ₂	=	38880,00	kgO ₂ /d		
par: Massa específica ar (20°C, alt. 0 m)	=	1,20	kg/m ³		
RO ₂ /ar: Relação de O ₂ / ar	=	0,23	gO ₂ / gAr		
Ef: Eficiência de transferência de O ₂	=	15,00	%		
Qar: Vazão de Ar requerida (condição padrão: 20°C e 1 atm)	=	939130,43	m ³ /dia	652,17 m ³ /min	39130,43 m ³ /h

Potência Estimada - Sopradores

Mar: Vazão mássica de ar	=	13,04	kg/s		
R: Constante universal dos gases	=	8,31	J/mol.K		
To: Temperatura absoluta de entrada (Tmáxméd = 26°C)	=	299,00	K		
Pe: Pressão absoluta de entrada	=	1,00	atm		
Ps: Pressão absoluta de saída (Profundidade de imersão 5,5 m)	=	1,69	atm		
E: Eficiência do soprador	=	75,00	%		
Pw Potência do soprador	=	845,8	kW	1134,2	cv

Consumo Energético

Hop: Horas de operação diária	=	24	h		
Econs: Energia consumida diária	=	20299,01	kWh/dia		
C.Ele: Consumo anual de energia elétrica	=	7409,14	MWh/ano		

Balanco energia elétrica produzido x consumida

EE: Energia elétrica produzida anual a partir do biogás	=	6499,53	MWh/ano		
Saldo energético sistema biológico	=	-909,61	MWh/ano		