

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

JULIANA DA COSTA OLIVEIRA  
MARIA FERREIRA BISPO

Avaliação e mapeamento do potencial de produção de energia a partir do biogás em  
estações de tratamento de esgoto sanitário no Estado de São Paulo

São Carlos

2024

JULIANA DA COSTA OLIVEIRA  
MARIA FERREIRA BISPO

Avaliação e mapeamento do potencial de produção de energia a partir do biogás em  
estações de tratamento de esgoto sanitário no estado de SP

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia  
Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Tadeu Fuess

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos  
2024



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

048a

Oliveira, Juliana da Costa

Avaliação e mapeamento do potencial de produção de energia a partir do biogás em estações de tratamento de esgoto sanitário no estado de SP. / Juliana da Costa Oliveira, Maria Ferreira Bispo; orientador Lucas Tadeu Fuess -- São Carlos, 2024.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2024.

1. Estação de tratamento de esgoto. 2. Reator UASB. 3. Lodos ativados. 4. Aproveitamento energético. 5. Biogás. 6. Sustentabilidade. 7. Digestor de lodo. 8. Digestão anaeróbia. I. Oliveira, Juliana da Costa. II. Bispo, Maria Ferreira. III. Título.

# FOLHA DE JULGAMENTO

---

Candidato(a): **Juliana da Costa Oliveira e Maria Ferreira Bispo**

Data da Defesa: 14/11/2024

Comissão Julgadora:

Resultado:

**Prof. Dr. Lucas Tadeu Fuess (Orientador(a))**

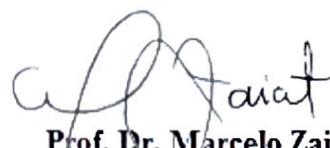
Aprovadas

**M.Sc Renan Coghi Rogeri**

Aprovadas

**Profa. Dra. Cristiane Arruda Oliveira**

Aprovadas



**Prof. Dr. Marcelo Zaiat**  
Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

*Aos familiares, professores e amigos  
pelo apoio e auxílio durante todos  
esses anos.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho de conclusão de curso. Este momento representa o fim de uma etapa muito importante marcada por aprendizados, desafios e crescimento pessoal e profissional.

Nossa eterna gratidão a nossas famílias, pelo apoio e incentivo constantes mesmo nos momentos mais difíceis.

A nossos amigos, que acompanharam e compartilharam tanto as dificuldades quanto as alegrias e trouxeram leveza para atravessarmos essa jornada.

A nossos professores, que compartilharam o conhecimento para nos auxiliar em nosso crescimento profissional e pessoal, seguiremos com empenho o exemplo de profissionalismo que cada um nos forneceu.

Por fim, um agradecimento especial ao nosso orientador, Lucas Tadeu Fuess, pela orientação e dedicação ao longo de todo o processo. Somos eternamente gratas pela oportunidade de aprender com você.

*“A natureza é grande nas coisas grandes, e enorme nas coisas pequenas”*

SANEAMENTO básico, o filme, 2007



## RESUMO

OLIVEIRA, C. J.; BISPO, F. M. SOBRENOME, N. P. **Avaliação e mapeamento do potencial de produção de energia a partir do biogás em estações de tratamento de esgoto sanitário no estado de SP.** 2024. 96 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

O saneamento básico e a energia elétrica são elementos estruturais para o desenvolvimento humano. As Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) têm potencial para unir ambos, ao empregarem tecnologias avançadas que podem converter a matéria orgânica do esgoto em biogás, uma mistura gasosa rica em metano ( $\text{CH}_4$ ), com alto potencial energético. A digestão anaeróbia, processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio, é central nesse contexto, pois sua etapa final consiste na geração do biogás. A digestão ocorre diretamente em reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) e indiretamente em sistemas de lodos ativados, quando o lodo excedente é encaminhado aos digestores para seu tratamento. O biogás gerado pode ser utilizado para a geração de energia elétrica, transformando resíduos em recursos renováveis. Este estudo tem como objetivo avaliar e mapear o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em ETEs no estado de São Paulo, com foco em duas tecnologias principais: reatores anaeróbios UASB e sistemas de lodos ativados. A análise envolveu a identificação das ETEs e a estimativa do potencial energético em três cenários distintos: o atual, que reflete as condições operacionais vigentes; o de cobertura máxima, que considera 100% da população atendida por ETEs; e o de cobertura regional, no qual todas as mesorregiões do estado são plenamente atendidas por essas tecnologias. Para a realização do estudo, foram utilizados dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Os resultados indicaram que a mesorregião Metropolitana de São Paulo apresenta o maior potencial de geração de energia elétrica a partir de biogás, seguida pelas regiões de Campinas, Vale do Paraíba Paulista e Macro Metropolitana Paulista, devido à alta concentração de ETEs e à elevada densidade populacional. As estimativas sugerem que o aproveitamento energético do biogás pode representar uma contribuição significativa para a matriz energética do estado, evidenciando a viabilidade técnica e econômica da ampliação dessas tecnologias no tratamento de esgoto.

Palavras-chave: Estação de Tratamento de Esgoto, Reator UASB, Lodos ativados, Aproveitamento Energético, Biogás, Sustentabilidade, Digestor de lodo, Digestão Anaeróbia

## ABSTRACT

OLIVEIRA, C. J.; BISPO, F.M. **Assessment and mapping of the energy production potential from biogas in sewage treatment plants in the state of São Paulo**. 2024. 96 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Basic sanitation and electricity are structural elements for human development. Sewage Treatment Plants (STPs) have the potential to combine both by employing advanced technologies that can convert the organic matter in sewage into biogas, a gaseous mixture rich in methane (CH<sub>4</sub>) with high energy potential. Anaerobic digestion, a biological process that occurs in the absence of oxygen, is central in this context, as it's final stage results in biogas generation. Digestion occurs directly in UASB reactors (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) and indirectly in activated sludge systems, when excess sludge is sent to digesters for treatment. The biogas produced can be used to generate electricity, transforming waste into renewable resources. This study aims to evaluate and map the potential for electricity generation from biogas produced in STPs in the state of São Paulo, focusing on two main technologies: UASB anaerobic reactors and activated sludge systems. The analysis involved identifying STPs and estimating energy potential in three distinct scenarios: the current scenario, which reflects the prevailing operational conditions; the maximum coverage scenario, which considers 100% of the population served by STPs; and the regional coverage scenario, in which all the state's mesoregions are fully served by these technologies. Data from the National Sanitation Information System (SNIS) and the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA) were used for this study. The results indicated that the São Paulo Metropolitan mesoregion has the highest potential for electricity generation from biogas, followed by the regions of Campinas, Vale do Paraíba Paulista, and Macro Metropolitan Paulista, due to the high concentration of STPs and the high population density. The estimates suggest that the energy use of biogas could make a significant contribution to the state's energy matrix, demonstrating the technical and economic feasibility of expanding these technologies in sewage treatment.

**Keywords:** Wastewater Treatment Plant, UASB Reactor, Activated Sludge, Energy Utilization, Biogas, Sustainability, Sludge Digester, Anaerobic Digestion.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Fluxograma de um sistema de tratamento de esgotos.....	34
Figura 2.2 - Processo da digestão anaeróbia.....	36
Figura 2.3– Desenho esquemático do Biodigestor UASB .....	39
Figura 2.4- Funcionamento do sistema de lodos ativados.....	41
Figura 2.5- Diagrama do tratamento do lodo excedente .....	42
Figura 2.6- Diagrama esquemático do reator anaeróbio de alta taxa em um estágio .....	44
Figura 4.1 - Diagrama ilustrativo dos cenários e alternativas .....	55
Figura 5.1- Localização das ETEs por mesorregião do estado de São Paulo.....	61
Figura 5.2- Densidade populacional por mesorregião do estado de São Paulo.....	63
Figura 5.3 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de Reator UASB para o Cenário 1 - Cenário Atual .....	66
Figura 5.4 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de lodos ativados para o Cenário 1 - Cenário Atual.....	69
Figura 5.5 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando as tecnologias Reator UASB e lodos ativados para o Cenário 1 - Cenário Atual.....	71
Figura 5.6 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de Reator UASB para o Cenário 2 - Cobertura Máxima.....	74
Figura 5.7 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de lodos ativados para o Cenário 2 - Cobertura Máxima .....	76
Figura 5.8 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando as tecnologias Reator UASB e lodos ativados para o Cenário 2 - Cobertura Máxima.....	78
Figura 5.9 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de Reator UASB para o Cenário 3 - Cobertura Regional .....	81
Figura 5.10 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de lodos ativados para o Cenário 3 - Cobertura Regional.....	83
Figura 5.11- Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando as tecnologias Reator UASB e lodos ativados para o Cenário 3 - Cobertura Regional.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Percentual de composição do biogás em relação ao Reator UASB e Digestor de lodo .....	47
Tabela 2.2 - Equivalência dos combustíveis em relação ao biogás .....	47
Tabela 2.3 - Valores da produção de biogás em Reatores UASB .....	49
Tabela 2.4 - Características das ETEs brasileiras geradoras de energia elétrica a partir do biogás.....	50
Tabela 4.1 - Parâmetros de cálculo.....	59
Tabela 5.1 - Potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de Reator UASB para o Cenário 1 - Cenário Atual .....	65
Tabela 5.2 - Potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de lodos ativados para o Cenário 1 - Cenário Atual .....	68
Tabela 5.3 - Potencial de produção de energia elétrica considerando as tecnologias Reator UASB e lodos ativados para o Cenário 1 - Cenário Atual .....	70
Tabela 5.4 - Potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de Reator UASB para o Cenário 2 - Cobertura Máxima .....	73
Tabela 5.5 - Potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de lodos ativados para o Cenário 2 - Cobertura Máxima.....	75
Tabela 5.6 - Potencial de produção de energia elétrica considerando as tecnologias Reator UASB e lodos ativados para o Cenário 2 - Cobertura Máxima.....	77
Tabela 5.7 - Potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de Reator UASB para o Cenário 3 - Cobertura Regional .....	80
Tabela 5.8- Potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de lodos ativados para o Cenário 3 - Cobertura Regional.....	82
Tabela 5.9 - Potencial de produção de energia elétrica considerando as tecnologias Reator UASB e lodos ativados para o Cenário 3 - Cobertura Regional .....	84
Tabela 5.10 - Resumo dos resultados em função dos cenários destacando as três mesorregiões com maior potencial .....	86
Tabela 5.10 - Comparativo de contribuição de energia total e residencial entre os cenários...	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	–	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
DBO	–	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	–	Demanda Química de Oxigênio
ETE	–	Estação de Tratamento de Esgoto
SNIS	–	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UASB	–	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	31
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
2.1    Sistemas de Esgotamento Sanitário .....	33
2.2    Tratamento secundário: Processos anaeróbios e aeróbios .....	35
2.2.1    Processos anaeróbios: Reator UASB .....	35
2.2.2    Processos aeróbios: Lodos ativados .....	40
2.2.2.1    Gerenciamento do lodo excedente .....	41
2.2.2.2    Digestores de lodo.....	44
2.3    Biogás e Recuperação Energética .....	46
3. OBJETIVO.....	52
4. METODOLOGIA .....	53
4.1    Coleta e organização dos dados .....	53
4.2    Cenários de análise .....	54
4.3    Estimativa da população atendida.....	55
4.4    Cálculo da carga orgânica afluenta .....	56
4.5    Remoção de DBO e DQO pela ETE.....	56
4.6    Estimativa da produção de biogás.....	57
4.7    Estimativa do potencial de produção de energia.....	57
4.8    Cenário 3.....	58
4.9    Parâmetros utilizados .....	59
4.10    Visualização dos resultados .....	60
4.11    Viabilidade.....	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	61
5.1    Cenário 1 – Cenário atual .....	64
5.1.1    Cenário 1 para reatores UASB .....	64
5.1.2    Cenário 1 para lodos ativados .....	67
5.1.3    Cenário 1 para lodos ativados e reatores UASB .....	69
5.2    Cenário 2 - Cobertura Máxima .....	72
5.2.1    Cenário 2 para reatores UASB .....	72
5.2.2    Cenário 2 para lodos ativados .....	74
5.2.3    Cenário 2 para lodos ativados e reatores UASB .....	77

5.3	Cenário 3 - Cobertura Regional .....	79
5.3.1	Cenário 3 para reatores UASB .....	79
5.3.2	Cenário 3 para lodos ativados .....	82
5.3.3	Cenário 3 para lodos ativados e reatores UASB .....	84
5.4	Análise da viabilidade.....	87
6.	CONCLUSÃO .....	90
	REFERÊNCIAS .....	91





## 1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico e a energia elétrica são pilares fundamentais para o desenvolvimento sustentável e a qualidade de vida de uma população cada vez mais urbana e numerosa. No Brasil, assim como na maioria dos países, há diversos desafios relacionados à universalização do acesso a serviços de água potável, esgotamento sanitário e manejo dos resíduos sólidos.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) de 2022, apenas 52% da população brasileira tem acesso à coleta e tratamento de esgoto sanitário adequados. Em nível mundial, este número chega a 56% da (UNESCO, 2023). Esses números evidenciam a distância que o país e o mundo estão de atingir o Objetivo 6 de Desenvolvimento Sustentável da ONU, que consiste em “Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos” (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015).

No que diz respeito ao setor elétrico, o Brasil se destaca pela diversificação de suas fontes de energia, com 47,4% de sua matriz proveniente de fontes renováveis, uma porção significativamente maior do que a média global de 15% (EPE, 2023). Essa diversificação não só reforça a segurança energética do país, mas também contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se aos compromissos internacionais de combate às mudanças climáticas. Esses esforços estão alinhados com o Objetivo 7 de Desenvolvimento Sustentável da ONU, que visa "Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos" (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015)

O Estado de São Paulo é o mais populoso e economicamente desenvolvido do Brasil, e, portanto, apresenta uma infraestrutura de saneamento avançada em comparação com outras regiões do país, com um percentual de coleta e tratamento de esgoto igual a 71% (SNIS, 2022). Ao mesmo tempo em que apresenta uma grande demanda em relação ao setor energético.

Nesse contexto, as estações de tratamento de esgoto (ETEs), essenciais para a melhoria dos índices de saneamento, também podem fornecer uma tecnologia estratégica para a geração descentralizada de energia elétrica. Por meio do tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos, essas unidades possibilitam a geração de biogás, uma alternativa promissora para diversificar a matriz energética e reduzir o impacto ambiental associado ao descarte de efluentes não tratados. O reator UASB, amplamente utilizado em ETEs, é uma das tecnologias que viabilizam o tratamento anaeróbio e apresenta uma geração média de biogás de 13,6 NL/hab.dia em condições típicas, podendo atingir 17,1 NL/hab.dia em situações otimizadas. Já nos digestores

de lodo, outra aplicação da digestão anaeróbia, a produção de biogás no Brasil varia entre 12 e 14 L/hab.dia (PROBIOGÁS, 2017).

Este trabalho propõe uma avaliação do potencial de produção de energia em diversas ETEs no Estado de São Paulo, utilizando o biogás como recurso energético. A análise será conduzida por meio do mapeamento e identificação das estações, e de um comparativo dos resultados com o cenário atual de consumo energético no estado. Ao entender melhor as interações entre saneamento, energia e desenvolvimento sustentável, este estudo visa contribuir para a formulação de políticas públicas eficazes e para a implementação de práticas inovadoras no Estado de São Paulo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de fornecer uma base para este estudo, nesta seção são apresentados os princípios da digestão anaeróbia, com destaque para as tecnologias dos reatores UASB e lodos ativados. O foco recai sobre os subprodutos desses processos, especialmente o biogás e o lodo, destacando sua capacidade de recuperação energética.

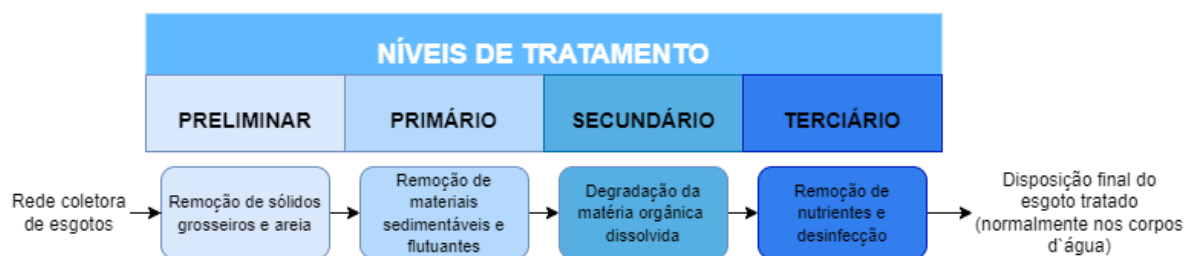
### 2.1 Sistemas de Esgotamento Sanitário

O esgotamento sanitário é um componente do saneamento básico, encarregado de coletar, transportar, tratar e destinar adequadamente os esgotos gerados por residências, indústrias e estabelecimentos comerciais. Seu principal objetivo é proteger a saúde pública ao minimizar o risco de doenças transmitidas por água contaminada e preservar o meio ambiente (CODEVASF, 2015).

As estações de tratamento de esgoto (ETE) são projetadas para receber águas residuárias de origem doméstica e industrial. O principal objetivo dessas estações é, por uma série de etapas de tratamento, reduzir a carga poluidora dos efluentes antes de sua disposição no meio ambiente (CODEVASF, 2015; LOPES, 2018).

Um sistema de esgotamento sanitário envolve várias etapas. A primeira etapa é a coleta, que consiste no transporte do esgoto das residências até a estação de tratamento. Em seguida, o esgoto passa pelo tratamento, um processo de pode ser subdividido em etapas para garantir que a qualidade atenda aos padrões de lançamento (CODEVASF, 2015; TONETTI et al, 2018). A etapa inicial que ocorre dentro da estação é o pré-tratamento, responsável pela remoção de sólidos grosseiros e areia, o que ajuda a proteger as unidades subsequentes do sistema. Esta fase geralmente utiliza unidades de grades, que capturam objetos grandes e resíduos sólidos, e desarenadores, que removem partículas de areia (PESSOA et al, 1982). O tratamento primário vem em seguida, onde acontecem as operações de sedimentação para remover sólidos suspensos e partículas pesadas presentes no esgoto (CAMPOS et al, 1999). A Figura 2.1 ilustra as diferentes etapas do tratamento nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE).

Figura 2.1 - Fluxograma de um sistema de tratamento de esgotos



Fonte: Adaptado de Tonetti et al, 2018

O tratamento secundário é a etapa em que ocorre a remoção da matéria orgânica dissolvida e finamente particulada (não sedimentável) por meio de reações bioquímicas. Esta fase é caracterizada pela ação de microrganismos que decompõem os poluentes orgânicos presentes no esgoto (TONETTI et al, 2018). Nesta etapa destacam-se duas tecnologias principais que se diferenciam pelo processo biológico de tratamento: o reator UASB e o sistema de lodos ativados.

O reator UASB é um processo anaeróbico em que os microrganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na geração de biogás, um subproduto com potencial energético. Este tipo de tratamento apresenta vantagens como baixo consumo energético, menor produção de lodo e custos operacionais reduzidos. No entanto, sua eficiência na remoção de nutrientes (como nitrogênio e fósforo) é limitada, e pode ser necessário um tratamento adicional para atender aos padrões mais rigorosos de qualidade. Por outro lado, o sistema de lodos ativados é um processo aeróbico que utiliza microrganismos para degradar a matéria orgânica em presença de oxigênio, o que exige alto consumo energético para a aeração. Além disso, essa tecnologia é caracterizada por uma alta produção de lodo excedente, que demanda tratamento e disposição adequada. Apesar dessas desvantagens, o sistema de lodos ativados apresenta elevada eficiência na remoção de matéria orgânica e nutrientes (VON SPERLING, 1997 )

Ambas as tecnologias são amplamente utilizadas em regiões de alta densidade demográfica devido à sua capacidade de tratar grandes volumes de esgoto em espaços reduzidos. Em contrapartida, as lagoas de estabilização, mais comuns em áreas de menor densidade populacional, ocupam grandes extensões de terreno e possuem custos de implantação e operação mais baixos, mas com menor eficiência no tratamento de grandes volumes (SANTOS, 2007).

Por fim, o tratamento terciário é responsável por aperfeiçoar a qualidade do esgoto tratado, realizando remoções adicionais de contaminantes, sobretudo nutrientes (nitrogênio e fósforo), para garantir que o efluente atenda aos padrões ambientais antes de sua descarga no corpo receptor (CODEVASF, 2015).

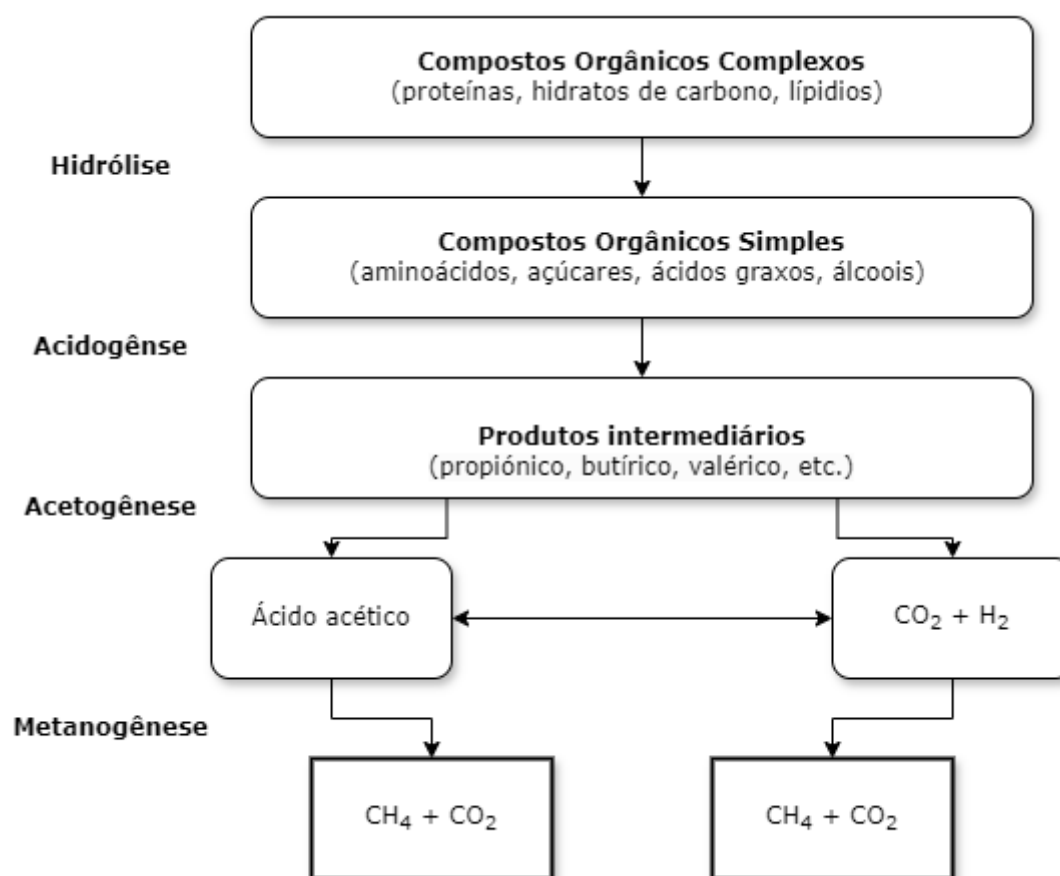
## 2.2 Tratamento secundário: Processos anaeróbios e aeróbios

### 2.2.1 Processos anaeróbios: Reator UASB

Os sistemas anaeróbios são tecnologias que promovem a degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio, utilizando processos biológicos mediados por microrganismos. O processo de digestão anaeróbia envolve quatro etapas interdependentes: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Essas etapas são indispensáveis para a transformação da matéria orgânica em biogás (MIKI et al, 2008; COELHO et al, 2018). A Figura 2.2 descreve o processo de digestão anaeróbia em etapas, e os subprodutos gerados em cada fase.

A hidrólise é a primeira etapa do processo, em que moléculas complexas, como proteínas, lipídios e carboidratos, são quebradas em moléculas menores, como açúcares simples, aminoácidos e ácidos graxos, preparando os compostos orgânicos para as etapas subsequentes (LIMA, 2015). Tal etapa é realizada por bactérias hidrolíticas, as quais excretam enzimas que atuam na quebra das ligações químicas das macromoléculas.

Figura 2.2 - Processo da digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Abad, 2015

Na acidogênese (ou fermentação, de maneira mais ampla), os produtos da hidrólise são fermentados, convertendo os açúcares simples e aminoácidos em ácidos orgânicos, como ácido acético, ácido propiónico e ácido butírico, solventes, além de outros compostos como hidrogênio e dióxido de carbono (KUNZ et al, 2022; LIMA, 2015).

A acetogênese é a etapa em que os subprodutos da fermentação (ácidos orgânicos, como ácido acético, propiónico e butírico, além de hidrogênio e dióxido de carbono) são convertidos principalmente em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Esses compostos atuam como substratos intermediários fundamentais para a próxima etapa do processo anaeróbio, a metanogênese (LIMA, 2015).

Na metanogênese, o carbono presente na biomassa é convertido em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>) pela ação de arqueas metanogênicas. O metano é um composto altamente energético e é o principal componente do biogás, e nesta etapa existem duas rotas possíveis

para sua produção: hidrogenotrófica e acetoclástica. A primeira utiliza hidrogênio ( $H_2$ ) e dióxido de carbono para produzir  $CH_4$  e  $CO_2$ , enquanto que a segunda converte acetato em biogás. (MACHADO, 1997; LIMA, 2015; AMARAL et al, 2019). A proporção média de geração de metano pelas vias metabólicas acetoclástica e hidrogenotrófica é de aproximadamente 70/30%, respectivamente. No entanto, essa relação pode variar conforme as características do efluente. Por exemplo, as arqueas metanogênicas acetoclásticas são mais sensíveis a alterações no pH e a concentrações elevadas de amônia, condições que podem favorecer o predomínio de arqueas hidrogenotróficas, alterando, assim, a relação de produção de metano (SILVA et al, 2014).

Os reatores anaeróbios, como o UASB, destacam-se como uma tecnologia eficiente e sustentável para o tratamento de águas residuárias. Eles apresentam alta eficiência na remoção de matéria orgânica, indicando remoções de DQO na faixa 65% e de DBO na faixa de 70%, sendo que a variação é referente ao tempo de detenção hidráulica, possuem baixo custo operacional e geração de biogás como subproduto energético (JORDÃO et al, 2014). O UASB utiliza grânulos de biomassa para maximizar a degradação orgânica em sistemas de alta carga, permitindo o tratamento de grandes volumes de efluentes com elevada eficiência e em curtos períodos de tempo. Além disso, essa tecnologia é especialmente adequada para países de clima tropical, como o Brasil, onde as temperaturas naturalmente elevadas favorecem a atividade microbiana, eliminando a necessidade de sistemas adicionais de aquecimento (LETTINGA, 1995).

No reator UASB, o tratamento do efluente ocorre por meio da digestão anaeróbia da matéria orgânica. O efluente bruto é introduzido na parte inferior da unidade e flui para cima (fluxo ascendente) passando através de uma manta de lodo suspensa. A manta é composta por microrganismos anaeróbios que formam grânulos capazes de sedimentar, criando uma camada densa e ativa que realiza a digestão da matéria orgânica. Os grânulos são mantidos em suspensão na coluna do reator e a capacidade de sedimentação permite uma separação eficaz do efluente tratado no separador trifásico (FEAM, 2015; COELHO et al, 2018).

A granulação da biomassa é o processo pelo qual os microrganismos anaeróbios no reator se agregam em estruturas densas, esféricas e compactas, conhecidas como grânulos de lodo. Os grânulos são formados de forma espontânea em condições específicas, como a presença de um fluxo ascendente que mantém os microrganismos em suspensão. Os grânulos possuem uma alta densidade de microrganismos, o que aumenta a eficiência da digestão

anaeróbia e, por serem compactos, sedimentam facilmente, garantindo a manutenção da manta de lodo (LETTINGA, 1995).

O separador trifásico é responsável por separar o lodo, o efluente tratado e o biogás e está localizado na parte superior do sistema (COELHO et al, 2018). O efluente tratado segue pela porção externa do separador, fluindo para fora do sistema; o gás é coletado na porção interna do separador e direcionado para armazenamento ou uso; os sólidos sedimentáveis são retornados para a manta de lodo, mantendo sua densidade e atividade microbológica. (MIKI et al, 2008).

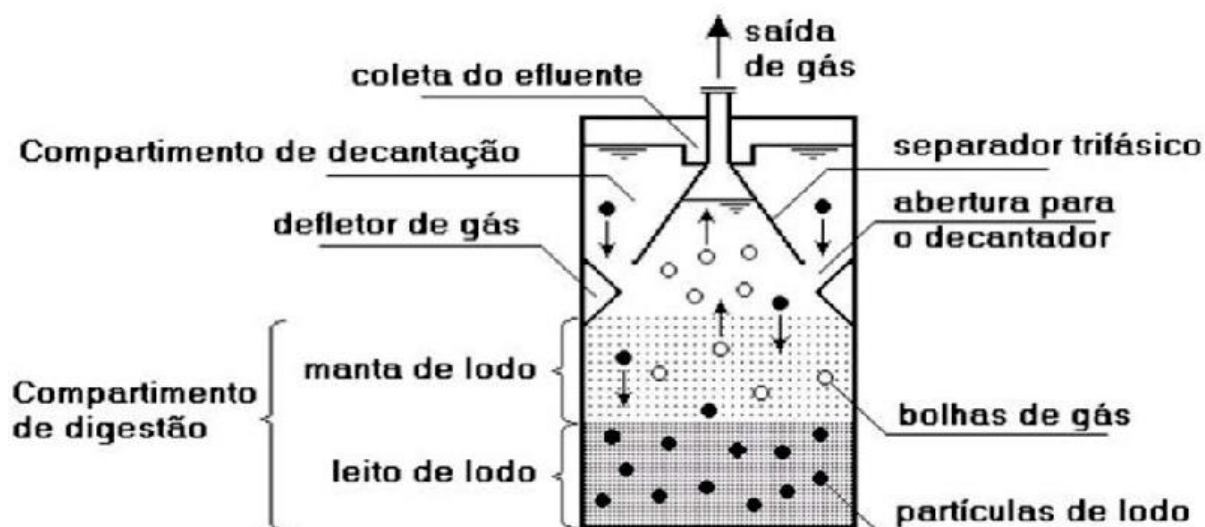
No processo da digestão anaeróbia, ocorre a geração do biogás, um combustível renovável, e reduz significativamente a carga poluidora do efluente, diminuindo a quantidade de matéria orgânica biodegradável (DBO) e de partículas sólidas (SST) (LOPES, 2018; COELHO et al, 2018; MIKI et al, 2008).

Uma característica fundamental do reator UASB é sua capacidade de tratar efluentes com alta carga orgânica ( $DBO > 1000 \text{ mg/L}$ ). O sistema opera com um baixo tempo de retenção hidráulica (TRH), geralmente entre 4 e 12 horas, permitindo o tratamento eficiente de grandes volumes de efluentes (COELHO et al., 2018). Para o bom funcionamento do reator, busca-se uma elevada idade do lodo (tempo de retenção de sólidos biológicos), o que reduz a produção de lodo a ser descartado, enquanto o baixo TRH torna a construção do reator mais econômica. Entretanto, TRHs muito curtos podem causar velocidades ascendentes elevadas no fluxo, resultando no arraste da biomassa com o efluente. Esse arraste reduz o tempo de residência celular, comprometendo a eficiência do tratamento. Assim, é necessário equilibrar o TRH para garantir a eficiência do sistema, mantendo a biomassa no reator e otimizando o processo de degradação da matéria orgânica (JORDÃO et al, 2014).

Para esgotos sanitários, caracterizados por baixos valores de DBO ( $< 1000 \text{ mg/L}$ ), é necessária a adoção de critérios específicos de dimensionamento e operação, buscando-se manter velocidades ascensionais suficientes para manter o lodo (predominantemente floculento) no sistema. Desta forma, utiliza-se o TRH, em função de diferentes temperaturas, como critério principal de dimensionamento (NBR 12.209/2011). A Figura 2.3 ilustra o processo de funcionamento do reator UASB.



Figura 2.3– Desenho esquemático do Biodigestor UASB



Fonte: Santos et al, 2014

O reator UASB apresenta diversas vantagens que o tornam uma tecnologia atrativa para o tratamento de efluentes. Destaca-se pelo baixo consumo de energia, baixa geração de lodo, custos reduzidos de implantação e manutenção, além do aproveitamento energético do biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia renovável (CHERNICHARO, 1997). Outra característica importante é a capacidade de manter a biomassa ativa mesmo sem a adição contínua de nutrientes, o que aumenta sua eficiência e praticidade (LOPES, 2018; COELHO et al., 2018). Adicionalmente, o reator UASB é especialmente adequado para países tropicais devido às altas temperaturas médias, que favorecem as reações bioquímicas anaeróbias sem a necessidade de aquecimento externo do sistema. Essa característica reduz ainda mais os custos operacionais (LETTINGA, 1995).

Apesar de suas vantagens, o reator UASB apresenta algumas limitações que devem ser consideradas. A remoção de matéria orgânica, nutrientes como nitrogênio e fósforo, e patógenos é limitada, tornando necessário o uso de tratamentos complementares para atender aos padrões de qualidade exigidos. Esses tratamentos podem incluir sistemas de lodos ativados, filtros biológicos percoladores, lagoas de polimento, entre outros (CHERNICHARO, 2008). Além disso, o reator exige um tempo de partida (start-up) relativamente longo para o desenvolvimento da biomassa anaeróbia responsável pela degradação da matéria orgânica. Outra questão relevante é a possibilidade de formação de incrustações no interior do reator, que podem prejudicar sua eficiência ao obstruir o fluxo e reduzir o desempenho do sistema (COELHO et al., 2018; MIKI et al., 2008; CHERNICHARO, 2008).

### 2.2.2 Processos aeróbios: Lodos ativados

Os processos aeróbios são amplamente utilizados no tratamento de águas residuárias e baseiam-se na utilização de oxigênio para a degradação da matéria orgânica. Microrganismos aeróbios metabolizam os compostos orgânicos presentes no efluente, convertendo-os em gás carbônico, água e biomassa (lodo biológico). Esses sistemas são particularmente eficazes na remoção de matéria orgânica dissolvida e em suspensão, bem como de nutrientes como nitrogênio e fósforo, dependendo da configuração. A tecnologia de lodos ativados é um processo biológico aeróbio utilizado no tratamento de águas residuárias. Nessa tecnologia, microrganismos presentes no biorreator oxidam a matéria orgânica do efluente em presença de oxigênio. O processo de lodos ativados se divide em duas fases (VON SPERLING, 1997).

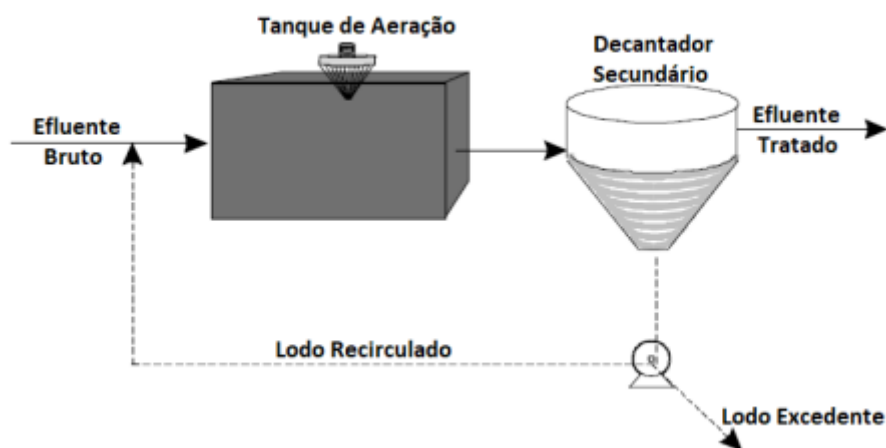
A primeira fase, a bioquímica, ocorre no tanque de aeração, onde o efluente é misturado ao lodo ativo, formando um sistema aeróbio. A introdução de ar garante o fornecimento contínuo de oxigênio, essencial para o metabolismo dos microrganismos. A biomassa utiliza a matéria orgânica presente no efluente como fonte de energia e carbono, convertendo-a em biomassa nova (crescimento celular) e produtos metabólicos, como dióxido de carbono e água (VAN LOOSDRECHT et al, 2008). A biomassa aeróbia característica de lodos ativados apresenta-se na forma de flocos, os quais são formados por bactérias heterotróficas (consumidoras de matéria orgânica), bactérias autotróficas (nitrificantes), protozoários, dentre outros microrganismos (VON SPERLING, 1997)

Após a degradação da matéria orgânica, inicia-se a segunda fase: a física. Nesse estágio, ocorre a sedimentação dos sólidos no decantador secundário, separando o lodo ativado do efluente tratado. Uma parte do lodo sedimentado é retornada ao tanque de aeração, mantendo assim uma alta concentração de microrganismos (“lodo ativado”) e garantindo a eficiência no processo. O excesso de lodo é removido do sistema como lodo excedente (VON SPERLING, 1997).

O sistema de lodos ativados pode ser considerado de alta taxa devido à recirculação do lodo, que mantém uma elevada concentração de biomassa no tanque, independentemente do tempo de retenção hidráulica. Essa recirculação possibilita o controle do tempo de retenção celular, favorecendo a remoção eficiente da matéria orgânica e nutrientes. O TRC é ajustado pela taxa de recirculação e pelo descarte do lodo excedente, garantindo que o sistema opere com biomassa suficiente para atender às cargas orgânicas aplicadas (JORDÃO et al, 2014).

O sistema de lodos ativados é uma tecnologia eficiente e versátil para o tratamento de águas residuárias, especialmente quando se busca alta qualidade do efluente em áreas limitadas. Entre suas principais vantagens estão a alta eficiência na remoção de matéria orgânica e nutrientes, a compactação do sistema que reduz a área necessária para sua instalação, e a possibilidade de recuperação de recursos, como a produção de biogás a partir do lodo excedente, contribuindo para a sustentabilidade do processo (VON SPERLING, 1997). Entretanto, o sistema também apresenta desvantagens importantes, como seu alto consumo energético, devido à necessidade de aeração, que pode elevar significativamente os custos operacionais. Além disso, a geração de grandes volumes de lodo excedente exige infraestrutura adicional para o tratamento e disposição final, o que pode representar desafios ambientais e financeiros (VON SPERLING, 1997). A Figura 2.4 ilustra o funcionamento do tratamento por lodos ativados.

Figura 2.4- Funcionamento do sistema de lodos ativados



Fonte: Von Sperling, 2014

#### 2.2.2.1 Gerenciamento do lodo excedente

O lodo excedente, resultante do crescimento de biomassa microbiana durante o tratamento biológico do esgoto, acumula-se nos sistemas de tratamento e deve ser removido periodicamente (VON SPERLING, 2014). De forma a seguir para a destinação final, o lodo passa por um conjunto de etapas de tratamento, que incluem: adensamento, estabilização, condicionamento, desidratação, higienização e disposição final. Cada etapa visa reduzir o volume e a patogenicidade do lodo, tornando-o adequado para diferentes aplicações ou descarte (LUDOVICE, 2001). A Figura 2.5 apresenta as etapas de estabilização do lodo em diagrama de blocos.

Figura 2.5- Diagrama do tratamento do lodo excedente



Fonte: Autoras, 2024

Antes do tratamento, o lodo, com consistência variável que pode ir de um líquido aquoso a uma pasta espessa, precisa ser transportado para outra área da estação. Para essa tarefa, são utilizadas bombas helicoidais, entre outros equipamentos, que são capazes de lidar com a alta viscosidade e densidade desses materiais. Após o transporte, o lodo passa por um processo de preparação que visa homogeneizá-lo. Essa etapa envolve operações como trituração, remoção de detritos, mistura e armazenamento, com o objetivo de garantir uma alimentação uniforme para os processos subsequentes (METCALF e EDDY, 2016).

O adensamento é a primeira etapa no tratamento de lodos, visando reduzir significativamente o volume do material. Esse processo consiste em aumentar a concentração de sólidos através da remoção da fase líquida. As técnicas mais comuns de adensamento incluem a sedimentação gravitacional, flotação, centrifugação e filtração em equipamentos como prensas desidratadoras e tambores rotativos a vácuo (METCALF e EDDY, 2016).

A etapa de estabilização tem como objetivo diminuir a presença de patógenos, eliminar odores desagradáveis e evitar ou reduzir o risco de putrefação. Isso é alcançado por meio da redução biológica da fração volátil do lodo e pela adição de produtos químicos ao lodo e aos biossólidos, de maneira a inviabilizar a sobrevivência de microorganismos (TSUTIYA et al., 2001). A digestão anaeróbia do lodo é uma das técnicas de estabilização. Outros métodos usados na estabilização são: estabilização alcalina, geralmente com cal; digestão aeróbia e compostagem (VIEIRA, 2017).

O condicionamento do lodo é uma etapa que visa otimizar o processo de desidratação. Consiste na adição de produtos químicos, como compostos inorgânicos (cal, cloreto férrico, sulfato de alumínio) e polímeros orgânicos, que promovem a floculação e a coagulação das partículas sólidas presentes no lodo. Os produtos químicos reduzem as forças coesivas entre o sólido e o líquido, facilitando a separação da fase líquida e a formação de flocos maiores e mais densos. Além disso, alguns condicionadores químicos podem promover a precipitação de substâncias dissolvidas (WEBER, 1972; FERRANTI, 2005).

O desaguamento visa a separação da fase líquida (água) da fase sólida, resultando em um material mais concentrado, denominado torta. Essa operação unitária é fundamental para reduzir o volume e a massa do lodo, facilitando seu transporte e disposição final. Os métodos de desaguamento podem ser classificados em mecânicos e naturais. Os processos mecânicos incluem a utilização de centrífugas, de prensas desaguadoras, prensas rotativas, filtros prensa, eletrodesaguamento, enquanto o processo natural inclui leitos de secagem e de lagoas (ANDREOLI et al., 2003).

A higienização do lodo é uma etapa caso se destine o material à reciclagem agrícola. Esse processo tem como objetivo reduzir significativamente a presença de patógenos e parasitas, garantindo o cumprimento da Resolução CONAMA 375/2006. Uma das técnicas mais comuns para higienização é a calagem, que consiste na adição de cal virgem ao lodo em proporções que variam entre 20% e 50% do peso seco. A compostagem é outra alternativa, onde o lodo é submetido a um processo biológico controlado, resultando em um produto similar ao húmus, estável e livre de odores (COSTA et al., 2011).

A digestão anaeróbia otimiza o tratamento do lodo ao reduzir significativamente a quantidade de lodo excedente, o que diminui a necessidade de descarte e tratamento adicional, além de reduzir os custos operacionais e a infraestrutura necessária. O processo estabiliza o lodo, eliminando a necessidade de tratamentos complementares como aeração e secagem, simplificando o sistema. Além disso, o biogás gerado pode ser utilizado para produzir eletricidade ou calor, tornando o processo autossustentável e, em alguns casos, capaz de cobrir parte ou toda a demanda energética do sistema. A digestão anaeróbia também melhora a qualidade do lodo, tornando-o mais estável, menos odorífero e com menor quantidade de patógenos, o que facilita sua disposição ou reutilização (SANTOS, 2007).

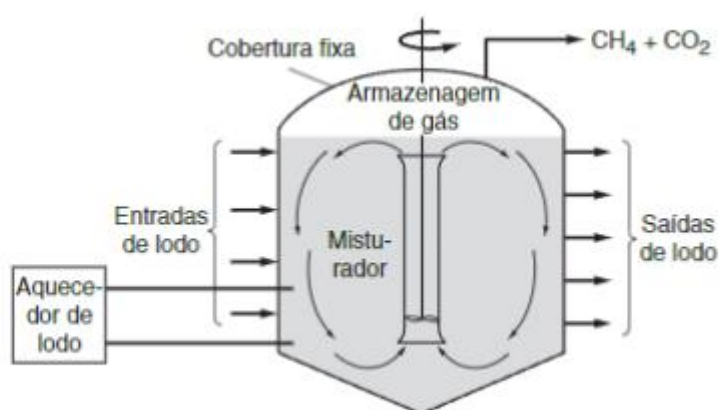
Como disposição final, o lodo tratado pode ser encaminhado para aterros sanitários que possuem especificações estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos de 2010, pode ser encaminhado para incineração, uso agrícola, como forma de substrato para as plantas e condicionador de solo e possui também aplicações na construção civil, na fabricação de tijolos e cimento (IERVOLINO, 2021; HENDGES, 2017). A incineração é uma forma de disposição em que não necessita do tratamento completo, porém apresenta um alto custo (ANDREOLI; VON SPERLING, 2001).

### 2.2.2.2 Digestores de lodo

Os digestores anaeróbios são eficientes no tratamento de lodos, convertendo matéria orgânica em biogás e reduzindo o volume e a patogenicidade do lodo (VIEIRA, 2017). Existem diversos tipos de digestores, dentre eles, os digestores de um estágio, digestores de dois estágios e digestão separada de lodos. A maioria dos digestores anaeróbios possui formato cilíndrico ou oval e necessita de uma mistura adequada para otimizar o processo de digestão. Para garantir essa eficiência, muitos digestores utilizam sistemas de mistura, como injeção de gás, agitação mecânica e bombeamento. (METCALF e EDDY, 2006).

O funcionamento do digestor anaeróbio de um estágio, por exemplo, possui necessidade de aquecimento, mistura uniforme e adensamento do lodo. O lodo é misturado, não ocorre a separação de espuma e é aquecido para obtenção de melhor desempenho do reator. A alimentação deve ser feita de forma uniforme, continuamente, ou em ciclos com intervalo de 30 minutos a 2 horas, para manter constantes as condições no interior do reator (SPEECE, 1988). A cobertura dos digestores deve ser fixas ou flutuantes, sendo que as flutuantes podem ser do tipo que armazenam o gás em excesso (METCALF e EDDY, 2006). A Figura 2.6 apresenta o diagrama esquemático do digestor de lodo em um estágio.

Figura 2.6- Diagrama esquemático do reator anaeróbio de alta taxa em um estágio



Fonte: Adaptado de METCALF e EDDY, 2006

A produção de biogás em um digestor anaeróbio está diretamente ligada à quantidade de matéria orgânica biodegradável (sólidos voláteis) presente no lodo e à atividade metabólica dos microrganismos (CHERNICHARO et al, 2008). O potencial de produção de biogás pode

ser estimado com base na redução da porcentagem de sólidos voláteis no biodigestor. Os valores típicos de produção de biogás variam de 0,75 a 1,12 m<sup>3</sup>/kg de sólidos voláteis destruídos, sendo que a produção específica teórica é de 8,0 m<sup>3</sup>/kg de sólidos voláteis, o que corresponde a uma produção de biogás de cerca de 25 L/hab.dia (ANDREOLI; VON SPERLING & FERNANDES, 2010; METCALF e EDDY, 2006). No Brasil, tem-se verificado, valores de produção de biogás entre 12 e 17 L/hab.dia (BRASIL, 2017).

A coleta do gás é feita sob a cobertura do digestor. Três tipos de coberturas podem ser utilizadas: flutuantes, fixas e membranas. As coberturas flutuantes são instaladas diretamente sobre a superfície do conteúdo do digestor, permitindo variações de volume em função das mudanças no nível de lodo ou na produção de gás. Essa configuração garante que não haja entrada de oxigênio. Essas coberturas podem ser utilizadas em digestores de estágio único ou no segundo estágio de sistemas com dois estágios. Uma vantagem deste tipo de cobertura é que elas funcionam como um sistema temporário de armazenamento de gás, embora sua capacidade seja limitada. No entanto, o movimento constante da sua cobertura pode aumentar a necessidade de manutenção (METCALF e EDDY, 2006). É necessário que o gás produzido não tenha contato com o ar de forma a evitar a geração de atmosferas explosivas (SPEECE, 1988).

As coberturas fixas são estruturas estáticas que mantêm um espaço livre entre a superfície do líquido no digestor e a tampa superior. Esse espaço livre é essencial para armazenar o gás produzido, prevenindo a introdução de ar no sistema quando ocorre variação no volume do líquido. Para evitar perdas de gás por deslocamento, o excesso de gás pode ser armazenado em baixa pressão em tanques externos (geralmente com coberturas flutuantes) ou em tanques pressurizados. Gases excedentes devem ser queimados para evitar emissões indesejadas. Embora sejam duráveis e requerem menos manutenção que coberturas flutuantes, sua capacidade de adaptação às variações de volume é mais limitada (METCALF e EDDY, 2006).

As coberturas de membranas são compostas por uma estrutura de suporte com um pequeno domo central e membranas flexíveis projetadas para conter ar e gás. Um soprador de ar pressuriza o espaço entre as duas membranas, permitindo a variação de volume de ar e gás. Apenas a membrana de gás e o domo central entram em contato direto com o conteúdo do digestor. Geralmente são fabricadas em fibras flexíveis de poliéster, que oferecem leveza e resistência química. Apesar de ser vantajosa por sua flexibilidade e capacidade de se adaptar rapidamente a variações no volume do gás, exige equipamentos auxiliares para pressurização,

além de ter uma durabilidade menor em comparação com materiais rígidos (METCALF e EDDY, 2006).

O gás gerado no processo de digestão, além de metano, pode conter sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, partículas e vapor de água. Para utilizá-lo de forma eficiente, é necessário tratá-lo para remover essas impurezas. Após o tratamento, o biogás pode ser aproveitado de diferentes formas, por exemplo, pode ser direcionado para dispositivos de combustão, responsáveis por gerar energia térmica e elétrica. A energia térmica pode ser utilizada em aplicações como a secagem de lodo, aquecimento de digestores ou outros processos industriais. Já a cogeração de energia elétrica e térmica pode ser realizada por meio de motores de combustão interna ou microturbinas conectadas a geradores elétricos, otimizando o uso do biogás (METCALF e EDDY, 2006).

### 2.3 Biogás e Recuperação Energética

O biogás, um biocombustível versátil, é produzido pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica. Essa conversão biológica resulta em uma mistura gasosa, predominantemente composta por metano e dióxido de carbono, com potencial energético considerável. A composição e volume do biogás são influenciados por diversos fatores, incluindo a carga orgânica do substrato, a temperatura, o pH, o TRH e a comunidade microbiana presente no reator. A eficiência da produção de biogás está diretamente ligada à remoção da demanda química de oxigênio (DQO) (ANDREOLI et al., 2003; CABRAL, 2016; LOPES, 2018).

A composição do biogás é variável, mas tem como principal componente o metano (50-70%), que confere ao biogás seu poder calorífico e capacidade de combustão. O dióxido de carbono, por sua vez, compõe entre 25% e 45% do biogás. Outros componentes minoritários incluem nitrogênio, hidrogênio, oxigênio e gás sulfídrico. O gás sulfídrico, devido a sua corrosividade e odor característico, é indesejável em grandes concentrações, representando uma grande problemática para ETEs anaeróbias (COELHO et al., 2006; FLARE et al., 2009; CASSINI, 2003). Esse gás é um dos principais responsáveis pelo mau odor que pode impactar negativamente a vizinhança das estações de tratamento, gerando desconforto e potenciais reclamações da comunidade local. Além disso, quando se objetiva a exploração energética do biogás, a remoção do gás sulfídrico é obrigatória, pois sua presença pode danificar equipamentos e reduzir a eficiência dos processos de geração de energia. A Tabela 2.1 apresenta uma descrição completa da composição do biogás.



Tabela 2.1 - Percentual de composição do biogás em relação ao Reator UASB e Digestor de lodo

Constituinte	Reator UASB	Digestor de lodo
Metano (CH <sub>4</sub> )	60 a 85%	60 a 70%
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	5 a 15%	20 a 40%
Sulfeto de hidrogênio (H <sub>2</sub> S)	1.000 a 5.000 ppm <sub>v</sub>	500 a 1.500 ppm <sub>v</sub>
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	2 a 25%	0 a 2%
Umidade relativa	-	90 a 100%
Poder calorífico inferior (PCI)	6,0 - 8,5 KWh/Nm <sup>3</sup>	6,0 - 7,0 KWh/Nm <sup>3</sup>

Fonte: Brasil, 2017

O principal responsável pelo elevado poder calorífico do biogás é a presença de metano, que está diretamente relacionado a sua pureza, ou seja, a concentração de metano na mistura gasosa, influencia diretamente no seu potencial energético. O poder calorífico refere-se à quantidade de calor liberada na combustão completa de um combustível, desconsiderando o calor utilizado para vaporizar a água formada na reação (METCALF e EDDY, 2006). O metano puro libera 35,9 MJ/Nm<sup>3</sup> quando queimado completamente, considerando seu poder calorífico inferior (PCI) como referência. No caso do biogás, com uma composição de metano entre 70 e 81%, o PCI varia entre 25,1 e 29,1 MJ/N.m<sup>3</sup> (ROSA et al. 2016). A Tabela 2.2 apresenta uma comparação entre o biogás e outros combustíveis amplamente utilizados, evidenciando suas equivalências em termos de poder calorífico.

Tabela 2.2 - Equivalência dos combustíveis em relação ao biogás

Combustível	Quantidade equivalente a 1 m <sup>3</sup> de biogás
Lenha	1,450 kg
Querosene	0,342 L
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	0,396 L
Óleo diesel	0,358 L
Gasolina	0,312 L

Fonte: Adaptado de Souza et al., 1981

A eficiência dos tratamentos biológicos influencia diretamente a produção de biogás, tanto em termos quantitativos quanto em qualitativos. No aspecto quantitativo, a produção volumétrica de biogás está diretamente relacionada à eficiência de conversão da matéria orgânica presente no substrato. Quanto maior a eficiência do processo biológico em degradar a carga orgânica aplicada, maior será a quantidade de biogás gerado, potencializando a geração de energia renovável. No aspecto qualitativo, a composição do biogás é determinada pelas características do substrato e pelas condições operacionais do digestor anaeróbio. A concentração de metano no biogás, de maior interesse energético, pode variar de acordo com a natureza da carga orgânica aplicada. Substratos ricos em carboidratos, proteínas e lipídios tendem a aumentar a produção de metano, enquanto cargas orgânicas desequilibradas ou contaminadas podem elevar a presença de outros gases, como dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio, que reduzem o valor energético do biogás (LOPES, 2018; CABRAL, 2016).

O processo de conversão do biogás em energia elétrica envolve a coleta do gás produzido em biodigestores. Após a coleta, o biogás deve ser tratado para remoção de impurezas, sobretudo vapor d'água e sulfeto de hidrogênio. O biogás tratado é então queimado em um acionador primário, normalmente um motor de combustão interna, gerando energia mecânica que aciona um gerador. Além da geração de eletricidade, o biogás pode ser utilizado como combustível em veículos (substituindo gás natural mediante remoção complementar de gás carbônico, i.e., purificação do biogás a biometano), para aquecimento de água e ambientes (queima em caldeiras para geração de calor), e em processos industriais (SILVEIRA et al, 2015; LOPES, 2018; ROSA et al., 2016). A energia elétrica gerada a partir do biogás pode ser integrada à rede elétrica, atendendo a diversos consumidores. O biogás encontra também diversas outras aplicações através da produção de calor, como a secagem de lodo em estações de tratamento de água e esgoto (ETAs e ETEs) (LOPES, 2018; GUEST et al., 2009; VALENTE, 2015).

Segundo Zanette (2009), o Brasil possui um potencial teórico para produzir 7,3 milhões de m<sup>3</sup> de metano (CH<sub>4</sub>) por dia a partir do tratamento anaeróbio de esgotos. Esse valor corresponde a uma estimativa máxima caso 100% do esgoto fosse tratado, no entanto, o índice de tratamento pode variar em função de diversos fatores, dependendo de investimentos em infraestrutura e de políticas públicas adequadas (LOPES, 2018; ZANETTE, 2009).

A produção de biogás em reatores UASB é influenciada por diversos fatores, incluindo as características do esgoto e as condições operacionais do reator. Entre os principais fatores

estão: a população contribuinte, contribuição per capita de esgoto, contribuição per capita de DQO, eficiência de remoção de DQO, concentração de sulfato no efluente, temperatura, pH operacional do reator, percentual de metano no biogás e a vazão de infiltração de águas pluviais na rede coletora. A taxa de infiltração de águas pluviais, que varia entre 0,05 a 1,0 L/s.Km, reflete na diluição do esgoto e, conseqüentemente na concentração da matéria orgânica disponível para o processo de digestão anaeróbia (TSUTIYA et al, 1999). Segundo Lopes et al. (2011), a produção de biogás por pessoa em uma ETE pode variar de 5 a 20 litros por dia. Essa variação é observada na Tabela 2.3, que compara a produção de biogás considerando diferentes autores (LOBATO, 2011; LOPES, 2018). Essa variação é observada na Tabela 2.3, que compara a produção de biogás considerando diferentes autores (LOBATO, 2011; LOPES, 2018).

Tabela 2.3 - Valores da produção de biogás em Reatores UASB

Referência	Temperatura (°C)	Produção de biogás (m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> DBO <sub>apl</sub> <sup>-1</sup> )	Metano (%)
Grin et al. (1983)	20	0,12 - 0,16	-
Lettinga et al. (1980)	9,5 - 10	0,17 - 0,24	30 - 55
Bogte et al. (1993)	>12	300 <sup>a</sup>	-
Soto et al. (1995)	20	-	-
Shan (1995)	-	0,15	75 - 80
Lima (2012)	23	0,38	85
Rosa (2013)	25	0,16 - 0,24	78,2
Cabral (2016)	17 - 23	0,179	70-80

<sup>a</sup>: unidade de medida L/d; apl: aplicada

Fonte: Adaptado de Lopes, 2018

No Brasil, onze estações de tratamento de esgoto (ETEs) já realizam o aproveitamento energético do biogás gerado em reatores UASB ou em digestores de lodo em sistemas de lodos ativados (LOPES, 2018). A Tabela 2.4 apresenta uma lista dessas ETEs, incluindo informações sobre sua localização e tipo de tratamento utilizado.

Tabela 2.4 - Características das ETEs brasileiras geradoras de energia elétrica a partir do biogás

Localização	Companhia de Saneamento	ETES	Sistema de Tratamento	Pop. de projeto (hab.)	Vazão da ETE (L/s)	Rota de aproveitamento do biogás	Aplicação
Minas Gerais	COPASA	Arrudas	Lodo ativado	1.343.867	3375	Cogeração (energia elétrica e térmica)	Autoconsumo
		Betim	UASB	266.495	500	Energia térmica	Secagem do lodo
		Ibirité	Lodo ativado	115.604	140	Energia térmica	Secagem do lodo e autoconsumo
		Vieira/Montes Claros	UASB	326.931	500	-	-
São Paulo	SABESP	Barueri	Lodo ativado	4.400.000	8177	Cogeração (energia elétrica e térmica)	Autoconsumo
		Franca	Lodo ativado	4.100.000	1051	Biometano	Combustível veicular
	SEMAE	São José do Rio Preto	UASB	438.000	1050	Energia elétrica	Autoconsumo
	AMBIENT	Ribeirão Preto	Lodo ativado	620.000	1505	Cogeração (energia elétrica e térmica)	Autoconsumo
Paraná	SANEPAR	Belém	Reator Aeróbio	600.000	840	Energia elétrica	Secagem do lodo e autoconsumo
		Ouro Verde	UASB	29.500	70	Energia elétrica	Distribuição de energia elétrica

Fonte: LOPES, 2018; BRASIL, 2017; COPASA; SABESP, 2023; SANEPAR, 2016

O aproveitamento energético do biogás em ETEs oferece inúmeros benefícios ambientais e econômicos. No entanto, a expansão dessa prática ainda enfrenta diversas limitações, como a falta de conhecimento técnico especializado, que impedem o pleno desenvolvimento desse setor. Este estudo tem como objetivo avaliar o potencial energético do biogás produzido em ETEs do Estado de São Paulo que utilizam os processos de lodos ativados

e Reatores UASB. A pesquisa busca quantificar o potencial de produção de energia elétrica a partir do biogás gerado nessas estações e identificar o potencial energético ainda inexplorado. Com base nos resultados, será possível viabilizar a implantação de sistemas de aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica, contribuindo para a diversificação da matriz energética e diminuindo a dependência de fontes fósseis.

### 3. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo principal estimar, de maneira generalizada, o potencial de recuperação energética das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) no Estado de São Paulo a partir da produção de biogás nos reatores anaeróbios (UASB) e no lodo gerado do processo de lodos ativados. Secundariamente, pretendeu-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Estimar o biogás produzido nas ETEs existentes do estado de São Paulo a partir da biodigestão anaeróbia do lodo aeróbio (LA) ou UASB;
- Mapear as ETEs com potencial de recuperação energética a partir do biogás no estado de São Paulo;
- Identificar as mesorregiões do estado de São Paulo com maior potencial de recuperação energética nas ETEs;
- Avaliar a viabilidade da produção de energia por meio do biogás gerado nas ETEs.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Coleta e organização dos dados

Para calcular o potencial energético do tratamento de esgoto no estado de São Paulo, foram levantadas informações de todas as estações de tratamento de esgoto (ETEs) que utilizam as tecnologias de lodos ativados e UASB. Os dados foram obtidos da base de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), especificamente do “Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas” de 2019.

As seguintes informações foram utilizadas na análise.

- “Código IBGE”;
- “Denominação da ETE”;
- “Situação operacional da ETE”;
- “Indica quando a ETE é parte de sistema integrado”;
- “População atendida pela ETE”;
- “Remoção medida, projetada ou adotada de DBO 5 dias, 20° C atribuída à ETE (medida ou projetada ou adotada)”;
- “Grupo de Tipologias de Tratamento”;

A base de dados da ANA, referente ao ano de 2019, foi filtrada para incluir apenas as ETEs que atendem aos seguintes critérios:

- “Código IBGE”: Foram selecionadas as ETEs localizadas no estado de São Paulo, identificadas pelos códigos IBGE que iniciam com o número 35;
- “Situação operacional da ETE”: A análise considerou ETEs em operação, em construção/ampliação e com projetos em andamento;
- “Grupo de Tipologias de Tratamento”: nesta categoria, a ANA separa a principal tecnologia utilizada na ETE, então mesmo se houver uma combinação de duas ou mais tecnologias, estará a tecnologia principal. Portanto, as ETEs foram selecionadas com as categorias “Reatores Anaeróbios” e “Lodos ativados”. Para os sistemas de lodos ativados, assumiu-se a modalidade convencional para todos os casos, tendo em vista geração de lodo secundário que precisa ser estabilizado antes da disposição final.

A informação sobre a população atendida por cada ETE no banco de dados da ANA possui cobertura limitada, sendo informado apenas para algumas estações. Para complementar esses dados, utilizou-se os dados populacionais do Censo Demográfico de 2022, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Além disso, para quantificar a população efetivamente beneficiada com os serviços de coleta e tratamento de esgoto fornecidos por cada estação, foi empregado o índice “Atendimento total de esgoto referido aos municípios atendidos com água (IN056)” do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Esse índice, fornecido pelo SNIS, indica a proporção da população municipal que tem acesso aos serviços de coleta e tratamento de esgoto.

Nos casos em que uma cidade possuía mais de uma ETE, a população foi dividida de forma equitativa entre as estações.

#### 4.2 Cenários de análise

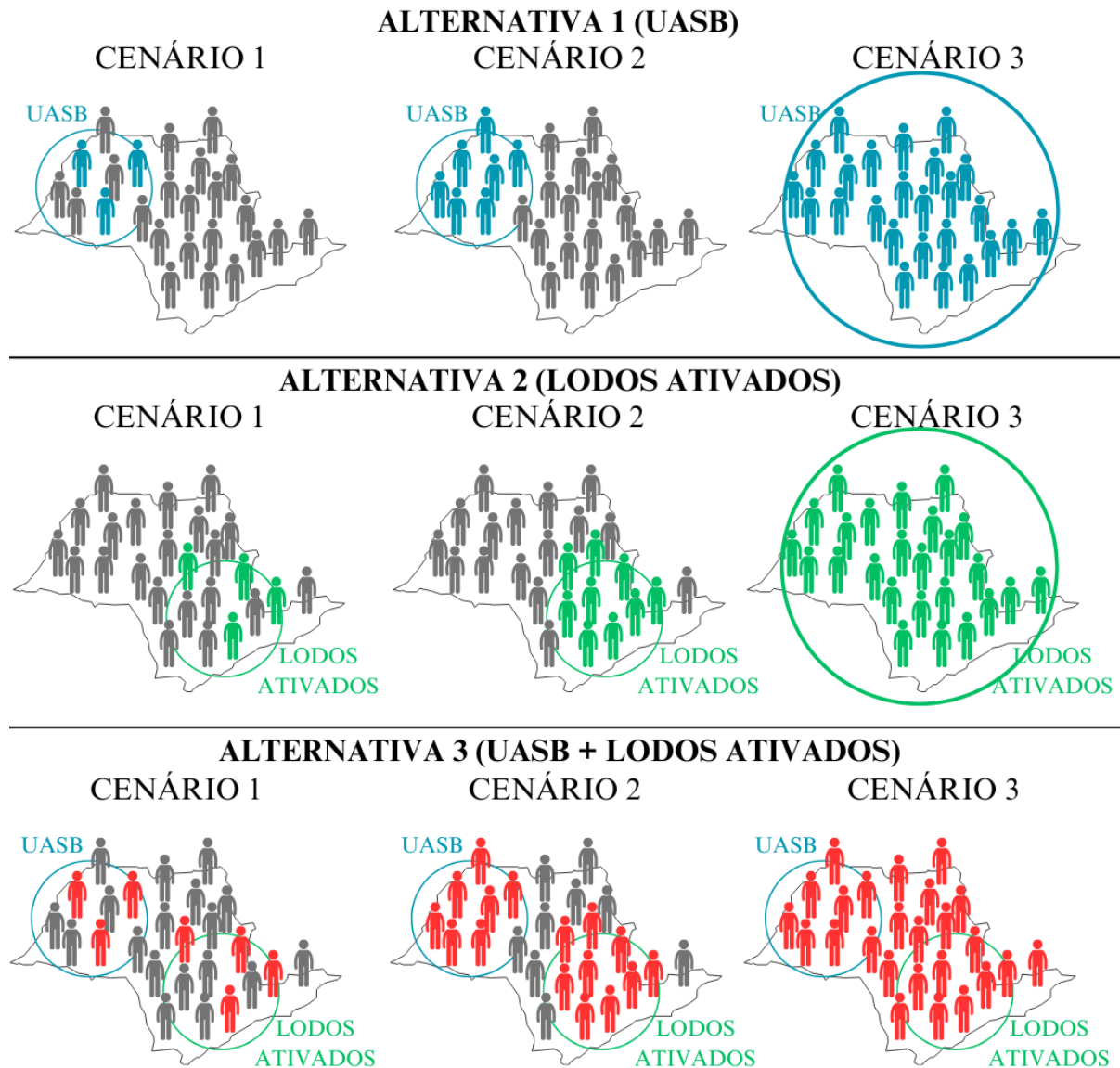
Buscando-se avaliar diferentes cenários de cobertura, foram elaborados três modelos para análise:

- **Cenário 1 - Cenário atual:** Representa a situação atual, considerando o índice de atendimento total fornecido pelo SNIS para cada município;
- **Cenário 2 - Cobertura máxima:** Assume-se que a população total das cidades é atendida pelas tecnologias de interesse, assumindo, portanto, um índice de atendimento de 100% em todas as cidades;
- **Cenário 3 - Cobertura regional:** Supõe que toda a população das mesorregiões é atendida pelas tecnologias em questão.

Cada cenário foi avaliado segundo três alternativas: a primeira considera a população atendida por ETEs cuja tecnologia principal de tratamento são os reatores UASB; a segunda abrange apenas a população atendida pelas ETEs cuja tecnologia principal de tratamento são os lodos ativados; e a terceiro, a população atendida por ambas as concepções de ETEs. No caso do cenário 3, cada alternativa considerou a população total da mesorregião. A Figura 4.1 ilustra cada modelo e alternativa analisados.



Figura 4.1 - Diagrama ilustrativo dos cenários e alternativas



Fonte: Autoras, 2024

#### 4.3 Estimativa da população atendida

Devido à lacuna de dados sobre a população atendida por algumas ETEs no banco de dados da ANA, de 2019, a *Equação 1* foi empregada para estimar essa informação.

$$POP_{atendida} = \frac{POP_{município}}{n_{ETE}} \times IN056 \quad (1)$$

Em que:

$POP_{atendida}$  = População atendida pela ETE

$POP_{município}$  = População do município

$n_{ETE}$  = número de ETEs no município

$IN056$  = “Índice de atendimento total de esgoto referido aos municípios atendidos com água” do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), em porcentagem

#### 4.4 Cálculo da carga orgânica afluyente

A carga orgânica afluyente a cada ETE foi determinada utilizando a *Equação 2*.

$$Carga\ orgânica\ afluyente\ \left[ \frac{kgDBO}{dia} \right] = POP_{atendida} \times Carga\ orgânica\ per\ capita \quad (2)$$

O parâmetro Carga orgânica per capita refere-se a quantidade média de matéria orgânica que uma pessoa gera diariamente, portanto, é expressa em kg DBO/dia/hab.. A produção per capita de DBO normalmente varia entre 40 e 60 g DBO/dia/hab em regiões urbanas. O valor adotado para este estudo é de 0,054 kg DBO/dia/hab (JÚNIOR, 1989).

A Equação 3 foi utilizada para converter a carga afluyente de DBO em DQO.

$$Carga\ orgânica\ afluyente\ \left[ \frac{kgDQO}{dia} \right] = Carga\ orgânica\ afluyente\ \left[ \frac{kgDBO}{dia} \right] \times \frac{DQO}{DBO} \quad (3)$$

A relação DQO/DBO foi estimada como sendo igual a 2 para esgoto bruto (DA SILVA, S. R.; DE AGUIAR, M. M.; MENDONÇA, A. S. F., 2000).

#### 4.5 Remoção de DBO e DQO pela ETE

A carga de DBO removida diariamente por cada ETE (kgDBO/dia) foi calculada a partir dos dados de remoção de DBO do banco de dados da ANA e da carga afluyente calculada pela Equação 3. O item considerado como taxa de remoção pelos dados da ANA é denominado como “Remoção medida, projetada ou adotada de DBO 5 dias, 20°C atribuída à ETE (medida ou projetada ou adotada)”. A Equação 4 é apresentada na sequência.

$$Remoção\ de\ DBO\ \left[ \frac{kgDBO}{dia} \right] = Remoção\ medida \times Carga\ orgânica\ afluyente\ \left[ \frac{kgDBO}{dia} \right] \quad (4)$$

Para obter a remoção de DQO, foram utilizados os mesmos cálculo e parâmetro da Equação 4 (Equação 5).

$$\text{Remoção de DQO} \left[ \frac{\text{kgDQO}}{\text{dia}} \right] = \text{Remoção medida} \times \text{Carga orgânica afluyente} \left[ \frac{\text{kgDQO}}{\text{dia}} \right] \quad (5)$$

#### 4.6 Estimativa da produção de biogás

Os cálculos para estimar a produção de biogás e sua conversão em energia elétrica foram realizados de forma individualizada para cada tipologia. Isso se justifica pela necessidade de considerar parâmetros específicos que variam entre as tecnologias de tratamento.

A estimativa da produção de biogás no reator UASB foi realizada a partir da Equação 6. Para este cálculo considerou-se apenas as ETEs que possuem como tecnologia o Reator UASB.

$$\text{Biogás gerado (UASB)} = \text{Produção de biogás} \times \text{Remoção de DQO} \left[ \frac{\text{kgDQO}}{\text{dia}} \right] \quad (6)$$

O parâmetro Produção de biogás refere-se ao volume de biogás por DQO removida. O valor previsto para este estudo é de 0,21 m<sup>3</sup> biogás/kg DQO (ROSA et al., 2016).

A estimativa da produção de biogás pelo lodo dos lodos ativados pode ser calculada pela Equação 7.

$$\text{Biogás gerado (Lodos Ativados)} = \text{Produção de biogás} \times \frac{POP_{atendida}}{1000} \quad (7)$$

O volume de Produção de biogás utilizado para o lodo gerado em lodos ativados é de 28 m<sup>3</sup>/10<sup>3</sup> pessoas/dia (METCALF, L.; EDDY, H. P., 2016).

#### 4.7 Estimativa do potencial de produção de energia

Utilizou-se a Equação 8 para calcular a geração de energia a partir do biogás.

$$\text{Produção de Energia} \left[ \frac{\text{MJ}}{\text{dia}} \right] = \text{Biogás gerado} \times \text{PCI} \quad (8)$$

O PCI de 28,1 MJ por m<sup>3</sup> de biogás gerado foi considerado para os reatores UASB (ROSA et al., 2016), e foi considerado um PCI de 22,4MJ por m<sup>3</sup> de biogás para o lodo dos lodos ativados (METCALF, L.; EDDY, H. P., 2016). Tais valores de PCI indicam teores de metano na faixa de 75-80% (UASB) e 60-65% (lodo).

Para estimar a produção de eletricidade, utilizou-se um fator de conversão de 40%. Esse valor representa a eficiência média de um motor de combustão interna convencional na conversão de energia química do biogás em energia elétrica. É importante ressaltar que a eficiência real pode variar dependendo de diversos fatores, como o tipo de motor, as condições de operação e a qualidade do biogás. Portanto, o valor encontrado de PCI é multiplicado por 0,4 para estimar o potencial de produção de energia do biogás (Melo et al, 2024).

#### 4.8 Cenário 3

Para o desenvolvimento do Cenário 3, foram assumidas as seguintes premissas:

1. Para cada alternativa foi considerada a população total da mesorregião;
2. Para a primeira alternativa, foi considerada a mesma proporção de volume de esgoto sanitário tratado por lodos ativados e por UASB do cenário atual (Cenário 1), ou seja, se há mais esgoto tratado por lodos ativados no estado de São Paulo, então para o cenário 3, vai ser considerado que o esgoto é tratado, em sua maioria, por lodos ativados;
3. A carga orgânica afluyente foi calculada conforme a Equação 2;
4. Para cada alternativa, foi estimada uma taxa de produção de biogás média obtida dos dados do Cenário 1, conforme Equação 9, para calcular a produção de biogás do Cenário 3, conforme Equação 10.

$$\text{Taxa}_{\text{produção de biogás}} = \frac{\sum(\text{Geração de biogás}/\text{Carga orgânica afluyente})}{n_{\text{mesorregiões}}} \quad (9)$$

Em que  $n_{\text{mesorregiões}}$  é o número de mesorregiões total que contemplam ETEs com a tecnologia em questão. No caso das alternativas 1 e 2, este valor é igual a 15; e para a alternativa 3, é igual a 13.

$$Produção\ de\ biogás = Carga\ orgânica\ afluyente \times Taxa_{produção\ de\ biogás} \quad (10)$$

5. Para cada alternativa, foi estimada uma taxa média de conversão do biogás em energia obtida dos dados do Cenário 1, conforme a Equação 11, para calcular o potencial de produção de energia do Cenário 3, conforme a Equação 12.

$$Taxa_{conversão\ de\ biogás} = \frac{\sum(Potencial\ de\ produção\ de\ energia/Geração\ de\ biogás)}{n_{mesorregiões}} \quad (11)$$

$$Potencial\ de\ produção\ de\ energia = Geração\ de\ biogás \times Taxa_{conversão\ de\ biogás} \quad (10)$$

#### 4.9 Parâmetros utilizados

A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros e suas respectivas fontes, os quais foram utilizados como base para os cálculos apresentados.

Tabela 4.1 - Parâmetros de cálculo

Parâmetros	Valor	Unidade	Referência
Carga orgânica per capita	0,054	kgDBO/hab/dia	JÚNIOR, 1989
DQO/DBO para o esgoto sanitário	2	-	DA SILVA, S. R.; DE AGUIAR, M. M.; MENDONÇA, A. S. F., 2000
Produção de biogás (UASB)	0,21	m <sup>3</sup> biogás/kgDQOremovida	ROSA et al, 2016
Produção de biogás (lodos ativados)	28	m <sup>3</sup> /10 <sup>3</sup> peessoas.dia	METCALF, L.; EDDY, H. P., 2016
Potencial de produção de energia (UASB)	28,1	MJ/m <sup>3</sup> biogás	ROSA et al, 2016
Potencial de produção de energia (lodos ativados)	22,4	MJ/m <sup>3</sup> biogas	METCALF, L.; EDDY, H. P., 2016

#### 4.10 Visualização dos resultados

Os resultados obtidos foram organizados em tabelas e visualizados em mapas, permitindo uma análise espacial detalhada do potencial energético do biogás em cada região do estado.

Para a elaboração dos mapas temáticos, foi empregado o software QGIS. O Estado de São Paulo foi dividido em mesorregiões, utilizando dados geográficos do IBGE. A análise concentrou-se em ETEs que utilizam tecnologias de tratamento biológico, como reatores anaeróbios e sistemas de lodos ativados, as quais são capazes de gerar biogás.

Os dados de localização das ETEs foram obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA) e georreferenciados. As ETEs que foram mapeadas seguem os mesmos filtros especificados anteriormente.

Em seguida, as tabelas com os dados de potencial energético do biogás produzido nessas estações foram associadas aos polígonos das mesorregiões, por meio da extensão Spreadsheet Layers. Essa integração permitiu a criação de mapas que visualizam a distribuição espacial do potencial energético do biogás em cada região, considerando os diferentes cenários de produção.

#### 4.11 Viabilidade

Para possibilitar um entendimento maior da dimensão do potencial da contribuição das ETEs com a matriz energética no Estado de São Paulo, foram utilizados os dados de consumos total e residencial e o número de consumidores do Anuário de Energéticos por Município do Estado de São Paulo 2024. Estes dados foram comparados com o potencial energético do biogás extraído das ETEs com lodos ativados e reatores UASB nos três cenários.

Para obter o percentual de contribuição das ETEs em relação ao consumo total, o potencial de geração de energia total de cada cenário para as duas tecnologias foi dividido pelo valor do consumo total. O mesmo foi feito para o consumo residencial, e multiplicando este percentual com o número de consumidores residenciais, foi obtido o número teórico de consumidores atendidos pela energia gerada do biogás das ETEs.

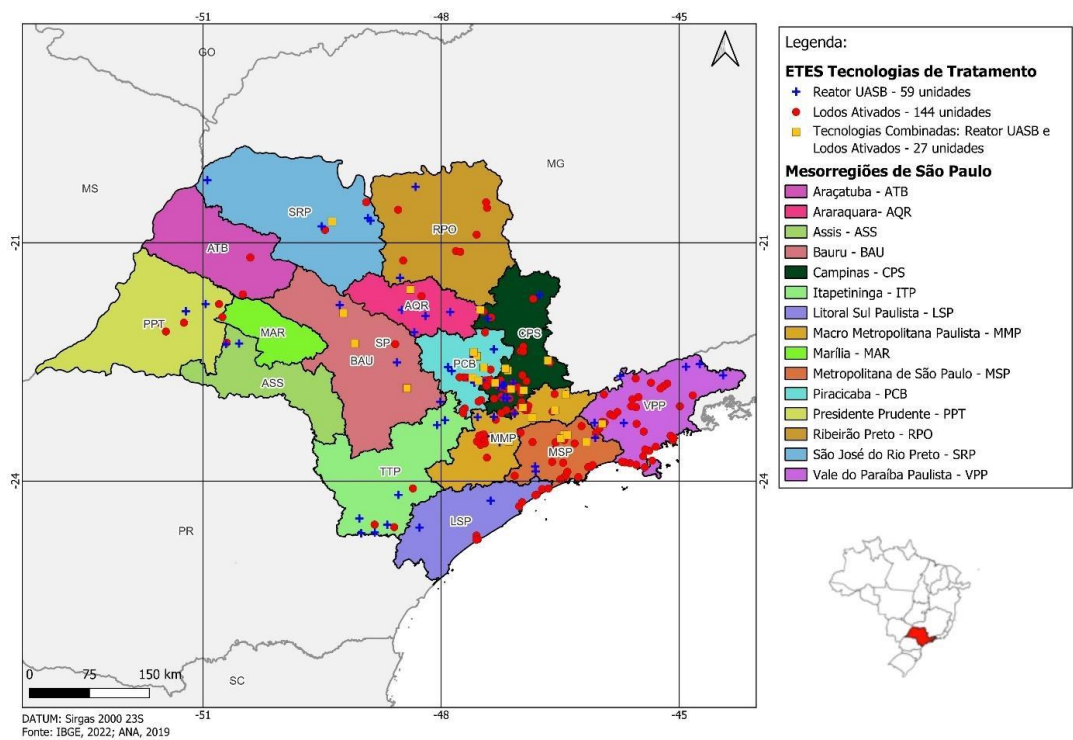
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estado de São Paulo, um dos mais populosos do Brasil, possui uma extensa rede de estações de tratamento de esgoto. A escolha das tecnologias empregadas é estratégica e busca otimizar o processo de tratamento, considerando as características dos efluentes e as exigências legais. O estado conta com uma rede de 230 ETEs, nas quais são empregadas as tecnologias de reatores UASB e sistemas de lodos ativados, tanto de forma isolada quanto combinada. Os reatores UASB, anaeróbios de alta taxa, são eficientes na remoção da matéria orgânica e na produção de biogás, enquanto os sistemas de lodos ativados, aeróbios, são versáteis e amplamente utilizados para tratar diferentes tipos de efluentes.

A partir da contabilização, algumas ETEs recebem efluentes de múltiplos municípios, como é o caso das estações de Barueri, ABC, São Miguel e Suzano, que para evitar duplicidades, foram consideradas apenas uma vez dentro da contagem de 230 unidades. A

Figura 5.1 apresenta um mapa do estado de São Paulo, dividido em mesorregiões, indicando a localização das estações de tratamento de esgoto (ETEs) que utilizam reatores UASB, lodos ativados ou uma combinação de ambos.

Figura 5.1- Localização das ETEs por mesorregião do estado de São Paulo



Fonte: Autoras, 2024

O estado de São Paulo apresenta um cenário diversificado no tratamento de esgoto doméstico. As unidades de tratamento que utilizam o reator UASB somam 59 estações, enquanto as estações que implementam o sistema de lodos ativados somam 144 e, cerca de 27 estações combinam ambas as tecnologias. Essas soluções, mais complexas e com maior capacidade de tratamento, atendem, em geral, a municípios de maior porte e com demandas mais elevadas. Apesar desses números, o sistema de lagoas é o mais usual dentro do estado, contabilizando 497 unidades, principalmente em municípios de menor porte. Essa tecnologia, caracterizada por baixo custo de implantação e operação, menor exigência de mão de obra especializada, era especialmente atrativa em um passado com padrões de lançamento rigorosos e uma maior disponibilidade de áreas. Por fim, os processos simplificados, que referem-se às fossas sépticas, somam 44 unidades, e se voltam a locais descentralizados e rurais, com baixa densidade populacional (ANA, 2020).

A mesorregião do Vale do Paraíba Paulista destaca-se como a líder em estações que utilizam a tecnologia de lodos ativados, com um total de 34 unidades, concentrando 23,6% das ETEs que utilizam esse método. Em seguida, a mesorregião de Campinas possui 32 unidades, representando 22,2%. A Metropolitana de São Paulo conta com 20 unidades (13,8%), enquanto a Macro Metropolitana Paulista abriga 16 estações que utilizam lodos ativados (11,1%). Estas regiões possuem elevada densidade demográfica, o que implica em menos área disponível e um valor mais elevado da unidade de área do terreno e, portanto, implantar tecnologias que exigem muito espaço se torna desinteressante.

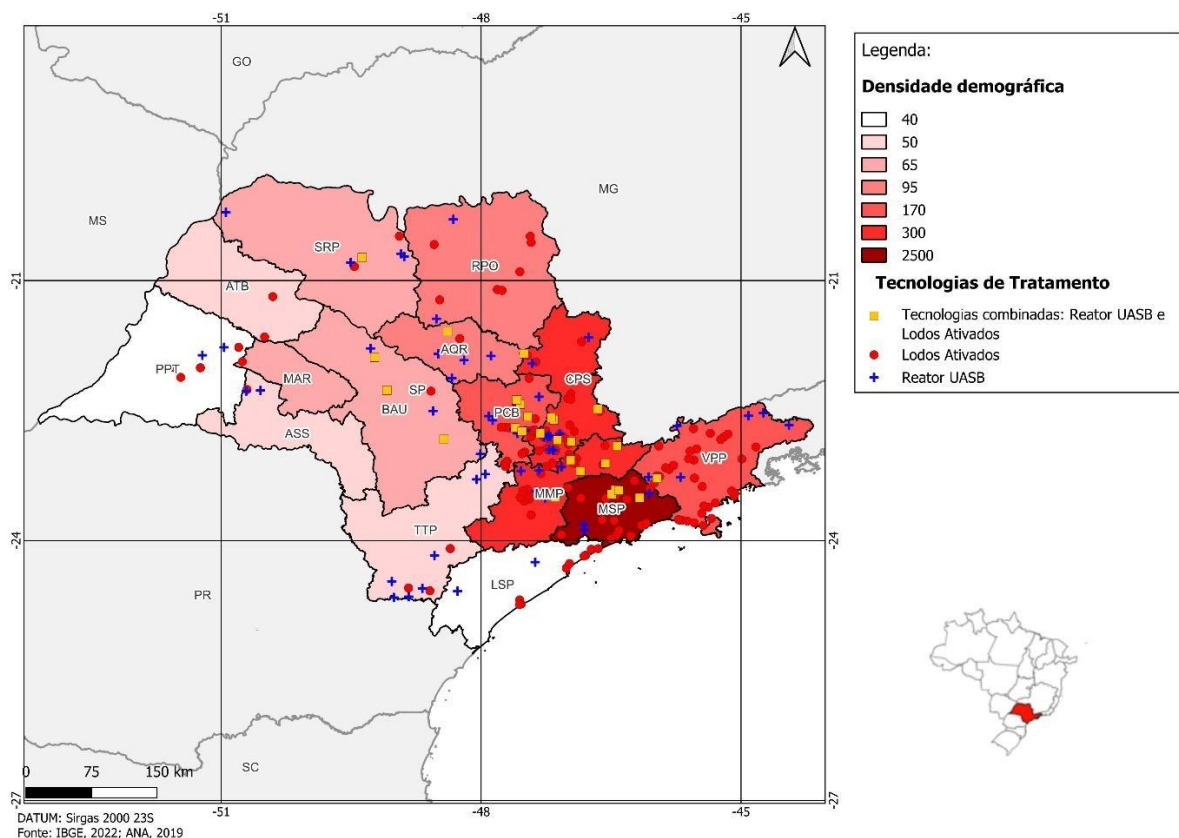
Por outro lado, a maior concentração de estações que utilizam Reatores UASB para tratamento de esgoto encontra-se na mesorregião de Campinas, que possui 12 unidades (representando 20,33% das ETEs que aplicam essa tecnologia), e Itapetininga, com 7 unidades (11,8%). As mesorregiões de Piracicaba, Macro Metropolitana Paulista e Vale do Paraíba Paulista contam com 6 unidades cada (10%), enquanto as mesorregiões de Araraquara e São José do Rio Preto possuem mais 4 unidades cada (6,7%). Vale ressaltar que as mesorregiões de Assis, Marília e Araçatuba apresentam uma quantidade reduzida de estações que utilizam Reatores Anaeróbios e lodos ativados.

A densidade demográfica possui um impacto direto e significativo na geração de efluentes sanitários. Regiões com alta concentração populacional, como as metrópoles e grandes centros urbanos, produzem volumes consideráveis de esgoto devido ao maior número de habitantes e à intensificação das atividades industriais e comerciais. Essa demanda crescente



por serviços de saneamento exige infraestruturas de tratamento de esgoto capazes de atender às necessidades da população. Adicionalmente, a predominância de tecnologias avançadas em áreas densamente povoadas está associada à maior capacidade institucional e financeira das concessionárias responsáveis pela gestão das estações de tratamento. Outro fator relevante é o alto valor das áreas urbanas nessas regiões, o que favorece a adoção de sistemas de tratamento mais compactos, que otimizam o uso do espaço. A Figura 5.2 demonstra a correlação entre as tecnologias de tratamento de esgoto (UASB e lodos ativados) e a densidade populacional nas diferentes mesorregiões.

Figura 5.2- Densidade populacional por mesorregião do estado de São Paulo



Fonte: Autoras, 2024

Os sistemas de lodos ativados e reatores UASB não são amplamente adotados em regiões de baixa densidade populacional devido a uma combinação de fatores técnicos, econômicos e operacionais. Um dos principais desafios é o custo elevado de implantação e operação. O sistema de lodos ativados, por exemplo, exige alto investimento em infraestrutura, como tanques aerados, além de elevados gastos com energia para sustentar o processo de aeração. Já o reator UASB, embora mais econômico em termos de operação, demanda sistemas complementares para atingir padrões de qualidade mais rigorosos. Em áreas de baixa densidade,

a menor quantidade de efluentes gerados e o número reduzido de contribuintes tornam o custo por habitante elevado, comprometendo a viabilidade econômica desses sistemas. Além disso, regiões menos densas geralmente possuem estruturas administrativas e técnicas limitadas, dificultando a gestão e operação de tecnologias mais sofisticadas. Outro aspecto importante é a disponibilidade de espaço: áreas com menor densidade populacional possuem terrenos mais acessíveis, permitindo o uso de sistemas extensivos, como lagoas de estabilização, que são mais simples, econômicas e adequadas à realidade local.

As mesorregiões Metropolitana de São Paulo (2.511,90 hab./km<sup>2</sup>), Macro Metropolitana Paulista (249,10 hab./km<sup>2</sup>), Campinas (303,14 hab./km<sup>2</sup>) e Piracicaba (170,92 hab./km<sup>2</sup>), destacam-se pela alta densidade demográfica e pela maior concentração de estações de tratamento de esgoto que empregam tecnologias de lodos ativados. A ampla adoção dessa tecnologia em regiões densamente povoadas está diretamente relacionada à capacidade de tratar grandes volumes de efluentes.

A correlação entre a densidade demográfica, o volume de esgoto gerado e a produção de biogás torna essas regiões propícias para a implementação de projetos de geração de energia limpa. Os dados quantitativos detalhando o potencial de geração de energia elétrica para cada mesorregião serão apresentados nas Tabelas a seguir, conforme cada cenário é apresentado.

## 5.1 Cenário 1 – Cenário atual

O Cenário 1 reflete o potencial de geração de energia com o esgoto tratado atualmente nas ETEs. Os resultados deste cenário estão apresentados a seguir. Os dados foram apresentados em 3 alternativas: a primeira reúne apenas as ETEs cuja tecnologia principal de tratamento são os reatores UASB; a segunda reúne as ETEs cuja tecnologia principal de tratamento são os lodos ativados; e a terceira reúne ambas.

### 5.1.1 Cenário 1 para reatores UASB

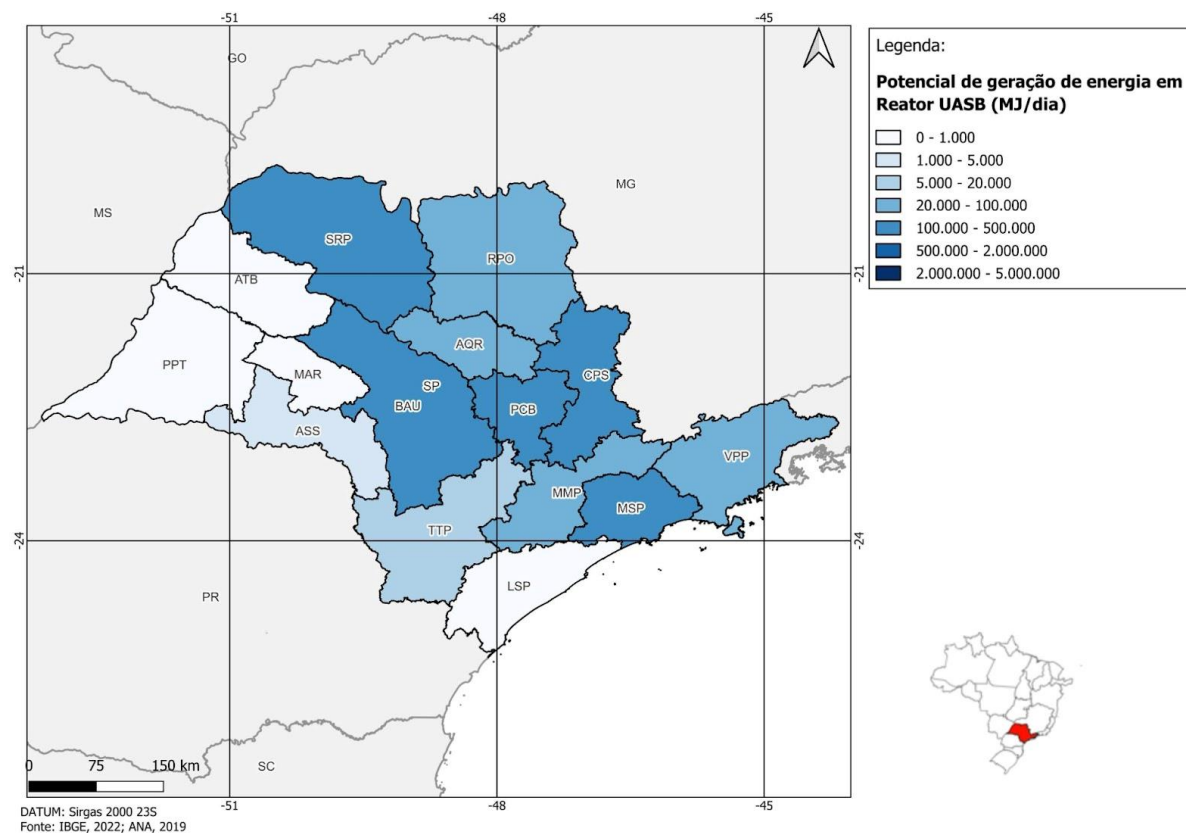
A Tabela 5.1, ilustrada pela Figura 5.3, resume o potencial energético gerado pelo biogás nos reatores UASB.

Tabela 5.1 - Potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de Reator UASB para o Cenário 1 - Cenário Atual

MESORREGIÃO	POPULAÇÃO TOTAL (hab.)	POPULAÇÃO ATENDIDA PELA TECNOLOGIA (hab.)	CARGA ORGÂNICA [kg DBO/dia]	GERAÇÃO DE BIOGÁS [m³/dia]	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA [MJ/dia]
São José do Rio Preto	1.736.252	510.962	27.592	9.591	107.805
Ribeirão Preto	2.667.811	141.324	7.631	2.638	29.650
Araçatuba	765.432	0	0	0	0
Bauru	1.614.574	563.114	30.408	10.716	120.448
Araraquara	909.258	462.336	24.966	8.073	90.745
Piracicaba	1.546.453	666.339	35.982	13.100	147.245
Campinas	4.314.090	817.339	44.136	15.176	170.579
Presidente Prudente	913.631	4.654	251	73	822
Marília	471.094	0	0	0	0
Assis	599.514	6.864	371	145	1.625
Itapetininga	890.535	80.985	4.373	1.446	16.253
Macro					40.825
Metropolitana Paulista	3.065.055	196.582	10.615	3.632	
Vale do Paraíba Paulista	2.552.610	170.266	9.194	3.372	37.903
Litoral Sul-Paulista	507.093	650	35	13	141
Metropolitana de São Paulo	23.373.277	1.109.701	59.924	21.329	239.740
<b>TOTAL</b>	<b>45.926.679</b>	<b>4.731.115</b>	<b>255.480</b>	<b>89.304</b>	<b>1.003.782</b>

Fonte: Autoras, 2024

Figura 5.3 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de Reator UASB para o Cenário 1 - Cenário Atual



Fonte: Autoras, 2024

No estado de São Paulo, as ETES com reatores UASB são menos comuns do que aquelas que utilizam o sistema de lodos ativados. Foram mapeadas cerca de 59 unidades de tratamento com reatores UASB, enquanto aproximadamente 144 utilizam lodos ativados. Essa diferença reflete o menor aproveitamento do potencial energético do biogás gerado pelos reatores UASB em relação ao lodo ativado. Essa preferência pelos lodos ativados em relação ao reator UASB pode ser explicada por diversos fatores.

Primeiramente, a eficiência no tratamento e as exigências ambientais rigorosas de São Paulo fazem com que o sistema de lodos ativados se destaque, pois ele oferece um nível mais elevado de remoção de nutrientes e patógenos. Em contrapartida, a tecnologia UASB apresenta limitações nesses aspectos. Outro aspecto relevante é o fator climático e as limitações técnicas do UASB, sendo que a variação sazonal de temperatura pode comprometer seu desempenho. Por fim, o custo-benefício e a adequação populacional também influenciam essa escolha. Embora o reator UASB seja uma opção econômica e vantajosa para comunidades menores devido ao menor consumo de energia e produção de biogás, o sistema de lodos ativados é mais adaptável para diferentes cargas orgânicas e para populações maiores, o que o torna uma

escolha mais versátil e sustentável em áreas densamente povoadas (BRK, 2022; LEONEL, 2016). Assim, a combinação de requisitos de eficiência, considerações climáticas e abrangência populacional fazem com que o sistema de lodos ativados seja amplamente preferido no estado de São Paulo.

A análise do potencial energético de reatores UASB, sob a ótica do índice de atendimento total de esgoto referido aos municípios atendidos com água (IN056), aponta mudanças significativas. Enquanto as mesorregiões Metropolitana de São Paulo e Campinas continuam dominando a geração por biogás (239.740 MJ/dia e 170.579 MJ/dia, respectivamente), a mesorregião de Piracicaba emerge como novo destaque, com 11 unidades de tratamento de esgoto equipadas com reatores UASB, contribuindo com 147.242 MJ/dia. Em termos comparativos, 24% da geração de biogás por UASB no estado de São Paulo é proveniente da mesorregião Metropolitana de São Paulo, sendo que esta mesorregião concentra cerca de 50% da população paulista. Já Piracicaba, apesar de representar 3,4% da população paulista, concentra 14,7% do volume de biogás proveniente de UASB no Estado.

A ausência de reatores UASB em Marília e Araçatuba, assim como o número limitado dessas unidades no Litoral Sul-Paulista (141 MJ/dia), em Presidente Prudente (822 MJ/dia) e em Assis (1.625 MJ/dia) limita significativamente a capacidade de produção de biogás nessas regiões através dessa tecnologia. Cada uma dessas três mesorregiões conta com apenas duas unidades de reatores UASB em suas estações de tratamento de esgoto.

#### 5.1.2 Cenário 1 para lodos ativados

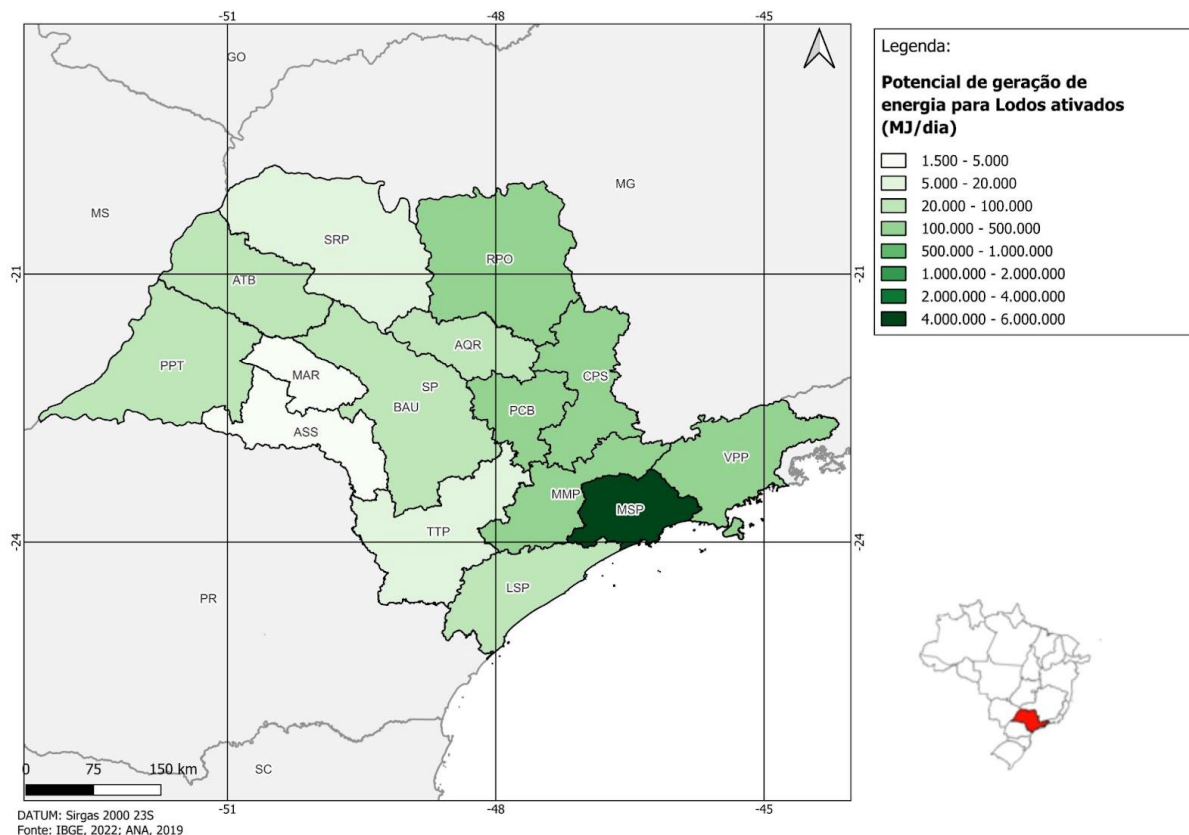
A Tabela 5.2, ilustrada pela Figura 5.4, resume o potencial energético gerado pelo biogás nos digestores de lodo gerado nos sistemas de lodos ativados.

Tabela 5.2 - Potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de lodos ativados para o Cenário 1 - Cenário Atual

MESORREGIÃO	POPULAÇÃO TOTAL (hab.)	POPULAÇÃO ATENDIDA PELA TECNOLOGIA (hab.)	CARGA ORGÂNICA [kg DBO/dia]	GERAÇÃO DE BIOGÁS [m³/dia]	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA [MJ/dia]
São José do Rio Preto	1.736.252	35.547	1.920	995	8.918
Ribeirão Preto	2.667.811	1.252.566	67.639	35.072	314.244
Araçatuba	765.432	197.419	10.661	5.528	49.528
Bauru	1.614.574	129.359	6.985	3.622	32.453
Araraquara	909.258	117.808	6.362	3.299	29.556
Piracicaba	1.546.453	597.289	32.254	16.724	149.848
Campinas	4.314.090	1.767.059	95.421	49.478	443.320
Presidente Prudente	913.631	268.577	14.503	7.520	67.318
Marília	471.094	18.013	973	504	4.519
Assis	599.514	6.135	331	172	1.539
Itapetininga	890.535	59.556	3.216	1.668	14.941
Macro					368.290
Metropolitana Paulista	3.065.055	1.467.991	79.272	41.104	
Vale do Paraíba Paulista	2.552.610	1.212.466	65.473	33.949	304.184
Litoral Sul-Paulista	507.093	182.367	9.848	5.106	45.752
Metropolitana de São Paulo	23.373.277	18.161.539	980.723	508.523	4.556.367
<b>TOTAL</b>	<b>45.926.679</b>	<b>25.473.692</b>	<b>1.375.579</b>	<b>713.263</b>	<b>6.390.840</b>

Fonte: Autoras, 2024

Figura 5.4 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de lodos ativados para o Cenário 1 - Cenário Atual



Fonte: Autoras, 2024

No cenário atual (Cenário 1), considerando o índice de atendimento total de esgoto referido aos municípios atendidos com água (IN056), analisando o potencial energético do lodo proveniente da tecnologia de lodos ativados, revela uma persistência na distribuição espacial: as mesorregiões Metropolitana de São Paulo (4.556.367 MJ/dia), Campinas (443.320 MJ/dia) e Macro Metropolitana Paulista (368.290 MJ/dia) seguem concentrando a maior parte do potencial de geração de energia a partir do biogás. Por outro lado, Marília (4.519 MJ/dia) e Assis (1.519 MJ/dia), mantêm-se como as mesorregiões com menor potencial. Esses dados indicam que a digestão anaeróbia do lodo é um processo eficiente para geração de energia.

### 5.1.3 Cenário 1 para lodos ativados e reatores UASB

A Tabela 5.3, ilustrada pela Figura 5.5, resume o potencial energético total, obtido pela soma da energia gerada pelo biogás nos reatores UASB e nos digestores de lodo.

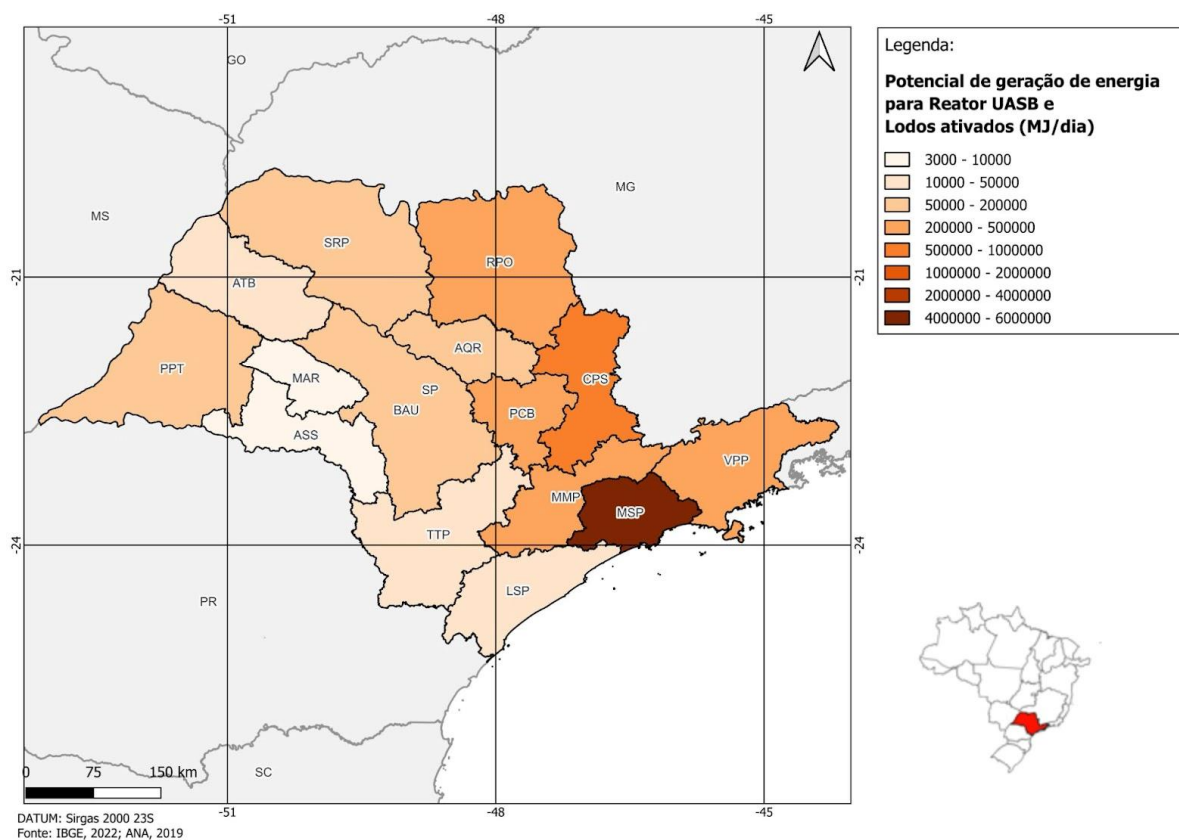
Tabela 5.3 - Potencial de produção de energia elétrica considerando as tecnologias Reator UASB e lodos ativados para o Cenário 1 - Cenário Atual

MESORREGIÃO	POPULAÇÃO TOTAL (hab.)	POPULAÇÃO ATENDIDA PELA TECNOLOGIA (hab.)	CARGA ORGÂNICA [kg DBO/dia]	GERAÇÃO DE BIOGÁS [m³/dia]	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA [MJ/dia]
São José do Rio Preto	1.736.252	546.509	29.511	10.587	116.723
Ribeirão Preto	2.667.811	1.393.890	75.270	37.710	343.894
Araçatuba	765.432	197.419	10.661	5.528	49.528
Bauru	1.614.574	692.472	37.394	14.338	152.902
Araraquara	909.258	580.143	31.328	11.372	120.301
Piracicaba	1.546.453	1.263.627	68.236	29.824	297.092
Campinas	4.314.090	2.584.398	139.558	64.654	613.899
Presidente Prudente	913.631	273.231	14.754	7.593	68.203
Marília	471.094	18.013	973	504	4.519
Assis	599.514	13.000	702	316	3.164
Itapetininga	890.535	140.540	7.589	3.114	31.194
Macro Metropolitana Paulista	3.065.055	1.664.573	89.887	44.736	409.115
Vale do Paraíba Paulista	2.552.610	1.382.733	74.668	37.321	342.086
Litoral Sul-Paulista	507.093	183.017	9.883	5.119	45.893
Metropolitana de São Paulo	23.373.277	19.271.240	1.040.647	529.852	4.796.107
TOTAL	45.926.679	30.204.808	1.631.060	802.568	7.394.622

Fonte: Autoras, 2024



Figura 5.5 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando as tecnologias Reator UASB e lodos ativados para o Cenário 1 - Cenário Atual



Fonte: Autoras, 2024

No cenário atual (Cenário 1), considerando o índice de atendimento total de esgoto referido aos municípios atendidos com água (IN056), as mesorregiões Metropolitana de São Paulo (4.796.107 MJ/dia), Campinas (613.899 MJ/dia) e Macro Metropolitana Paulista (409.115 MJ/dia) demonstram o maior potencial para geração de energia a partir do biogás produzido em reatores UASB e no tratamento de lodos ativados. Essa superioridade se deve à maior concentração de estações de tratamento de esgoto equipadas com essas tecnologias nesses locais.

Além disso, a alta densidade populacional dessas regiões, que concentram mais de 50% da população do estado, gera um volume consideravelmente maior de esgoto (65%). A infraestrutura de tratamento nessas áreas é mais robusta, com estações de tratamento capazes de processar um volume significativamente maior de efluentes, com uma capacidade operacional de tratamento melhor, o que se mostra condizente com a elevada densidade demográfica de tais regiões.

Por outro lado, as mesorregiões de Assis (3.164 MJ/dia) e Marília (4.519 MJ/dia), apresentam o menor potencial para essa geração de energia, uma vez que possuem um número significativamente menor de ETEs com as tecnologias em questão, limitando o potencial de geração de energia a partir do biogás. Este fato se deve à baixa densidade demográfica das regiões, sendo mais interessante para suas cidades adotar sistemas mais baratos como lagoas, não sendo tão relevante a questão da área ocupada pelas ETEs por possuírem mais espaço disponível. A mesorregião de Marília possui 23 ETEs com sistema de lagos e apenas uma com tecnologia de lodos ativados, enquanto que a mesorregião de Assis conta com 35 ETEs com lagos, uma com lodos ativados e outras duas com reatores UASB.

Comparando o potencial de geração de energia das ETEs com UASB com as ETEs com lodos ativados, atualmente, as com lodos ativados somam 6.390.840 MJ/dia, enquanto que as com UASB somam 1.003.782 MJ/dia. Essa diferença é refletida pela parcela da população atendida por cada uma das tecnologias. Considerando apenas a população atendida por lodos ativados e por UASB, 84,3% é atendida pelo sistema aeróbio, enquanto que 15,7% é atendida pelo reator anaeróbio.

No entanto, vale destacar que os lodos ativados necessitam do consumo energético para operar, enquanto que o UASB não. Portanto, mesmo que o lodo tenha maior potencial de geração de energia, é necessário avaliar o processo como um todo, incluindo os gastos energéticos intrínsecos ao processo.

## 5.2 Cenário 2 - Cobertura Máxima

O cenário 2 pressupõe uma cobertura completa das tecnologias, ou seja, toda a população das cidades que possuem tratamento com as tecnologias em análise está plenamente atendida.

### 5.2.1 Cenário 2 para reatores UASB

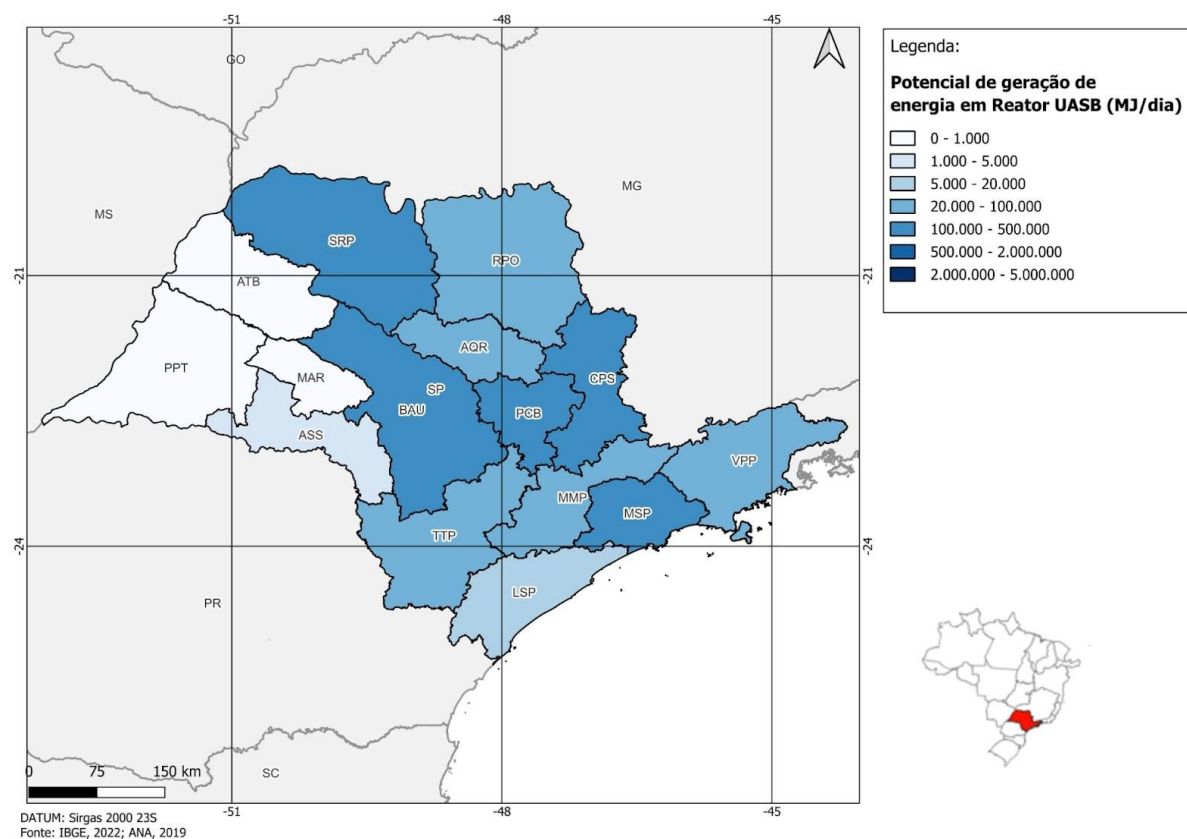
A Tabela 5.4, ilustrada pela Figura 5.6, resume o potencial energético gerado pelo biogás nos reatores UASB no cenário em que as ETEs com reatores anaeróbios têm 100% do esgoto gerado por sua população tratado por essa tecnologia.

Tabela 5.4 - Potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de Reator UASB para o Cenário 2 - Cobertura Máxima

MESORREGIÃO	POPULAÇÃO TOTAL (hab.)	POPULAÇÃO	CARGA	GERAÇÃO DE BIOGÁS [m³/dia]	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA [MJ/dia]
		ATENDIDA	ORGÂNICA		
		PELA TECNOLOGIA A (hab.)	A [kg DBO/dia]		
São José do Rio Preto	1.736.252	546.856	29.530	10.266	115.392
Ribeirão Preto	2.667.811	146.613	7.917	2.736	30.757
Araçatuba	765.432	0	0	0	0
Bauru	1.614.574	571.688	30.871	10.870	122.173
Araraquara	909.258	467.802	25.261	8.170	91.830
Piracicaba	1.546.453	710.799	38.383	13.965	156.969
Campinas	4.314.090	884.081	47.740	16.425	184.617
Presidente Prudente	913.631	5.471	295	86	967
Marília	471.094	0	0	0	0
Assis	599.514	7.489	404	157	1.767
Itapetininga	890.535	109.777	5.928	1.958	22.011
Macro Metropolitana Paulista	3.065.055	285.401	15.412	5.392	60.605
Vale do Paraíba Paulista	2.552.610	132.841	7.173	2.576	28.957
Litoral Sul-Paulista	507.093	31.622	1.708	610	6.852
Metropolitana de São Paulo	23.373.277	1.269.360	68.545	24.325	273.413
<b>TOTAL</b>	<b>45.926.679</b>	<b>5.169.799</b>	<b>279.169</b>	<b>97.537</b>	<b>1.096.311</b>

Fonte: Autoras, 2024

Figura 5.6 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de Reator UASB para o Cenário 2 - Cobertura Máxima



Fonte: Autoras, 2024

O cenário 2 para reatores UASB demonstra que a Mesorregião Metropolitana de São Paulo possui o maior potencial de geração de energia, com 273.413 MJ/dia. Em seguida, destacam-se as mesorregiões de Campinas e Piracicaba, que apresentam potenciais de 184.617 MJ/dia e 156.969 MJ/dia, respectivamente.

Por outro lado, a ausência de unidades UASB nas mesorregiões de Marília e Araçatuba resulta em um potencial energético nulo. Entre as regiões que possuem algum potencial, embora limitado, estão Presidente Prudente, com 967 MJ/dia, e Assis, com 1.767 MJ/dia, que apresentam os menores valores de geração de energia.

### 5.2.2 Cenário 2 para lodos ativados

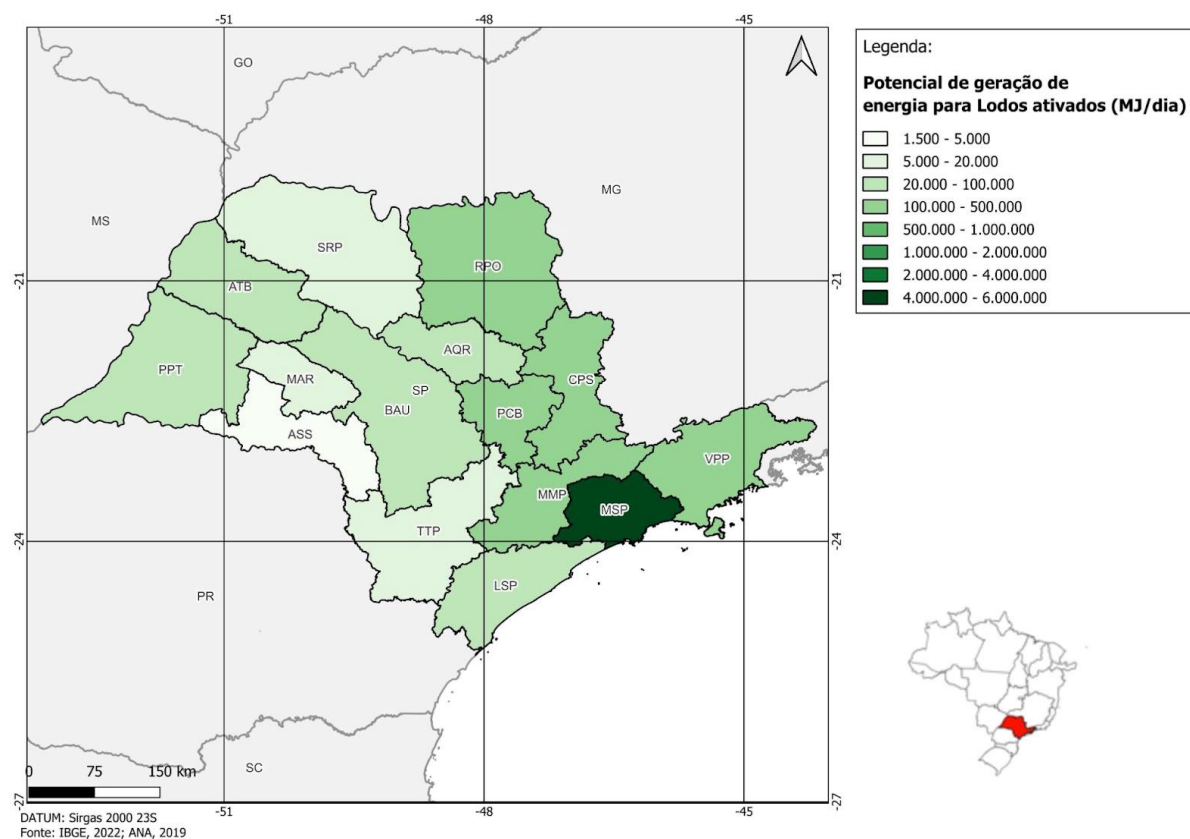
A Tabela 5.5, ilustrada pela Figura 5.7, resume o potencial energético gerado pelo biogás dos digestores de lodo no cenário em que as ETEs com lodos ativados têm 100% do esgoto gerado por sua população tratado por essa tecnologia.

Tabela 5.5 - Potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de lodos ativados para o Cenário 2 - Cobertura Máxima

MESORREGIÃO	POPULAÇÃO TOTAL (hab.)	POPULAÇÃO ATENDIDA PELA TECNOLOGIA (hab.)	CARGA ORGÂNICA [kg DBO/dia]	GERAÇÃO DE BIOGÁS [m³/dia]	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA [MJ/dia]
São José do Rio Preto	1.736.252	36.417	1.966	1.020	9.136
Ribeirão Preto	2.667.811	1.279.639	69.101	35.830	321.036
Araçatuba	765.432	204.023	11.017	5.713	51.185
Bauru	1.614.574	133.497	7.209	3.738	33.492
Araraquara	909.258	121.114	6.540	3.391	30.385
Piracicaba	1.546.453	469.721	25.365	13.152	117.844
Campinas	4.314.090	1.979.921	106.916	55.438	496.722
Presidente Prudente	913.631	279.849	15.112	7.836	70.209
Marília	471.094	21.503	1.161	602	5.395
Assis	599.514	6.582	355	184	1.651
Itapetininga	890.535	78.753	4.253	2.205	19.758
Macro					406.320
Metropolitana Paulista	3.065.055	1.619.578	87.457	45.348	
Vale do Paraíba Paulista	2.552.610	1.985.132	107.197	55.584	498.030
Litoral Sul-Paulista	507.093	285.313	15.407	7.989	71.579
Metropolitana de São Paulo	23.373.277	19.589.142	1.057.814	548.496	4.914.524
<b>TOTAL</b>	<b>45.926.679</b>	<b>28.090.183</b>	<b>1.516.870</b>	<b>786.525</b>	<b>7.047.265</b>

Fonte: Autoras, 2024

Figura 5.7 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de lodos ativados para o Cenário 2 - Cobertura Máxima



Fonte: Autoras, 2024

O segundo cenário indica que as mesorregiões Metropolitana de São Paulo (4.914.524 MJ/dia), Vale do Paraíba Paulista (498.030 MJ/dia) e Campinas (496.722 MJ/dia) possuem as maiores capacidades para gerar energia a partir do biogás produzido nos digestores de lodo dos processos de tratamento por lodos ativados. Em contrapartida, as mesorregiões de Assis (1.651 MJ/dia) e Marília (5.395 MJ/dia) apresentam o menor potencial energético nesse contexto.

A mesorregião Metropolitana de São Paulo concentra 42 unidades de estações de tratamento de esgoto (ETE) que utilizam a tecnologia de lodos ativados, atendendo uma população de 19.589.142 habitantes. Ao analisar as mesorregiões do Vale do Paraíba Paulista e de Campinas, observa-se uma disputa acirrada em termos de quantidade de unidades de tratamento de esgoto que empregam a tecnologia de lodos ativados. Além disso, a população atendida pela tecnologia no Vale do Paraíba é praticamente igual à de Campinas, sendo 1.985.132 habitantes e 1.979.921 habitantes, respectivamente. O Vale do Paraíba lidera ligeiramente com 34 unidades, enquanto Campinas apresenta 32. Faz sentido, portanto, que a

população atendida pelo Vale do Paraíba (1.985.132 habitantes) seja ligeiramente superior à de Campinas (1.979.921 habitantes).

### 5.2.3 Cenário 2 para lodos ativados e reatores UASB

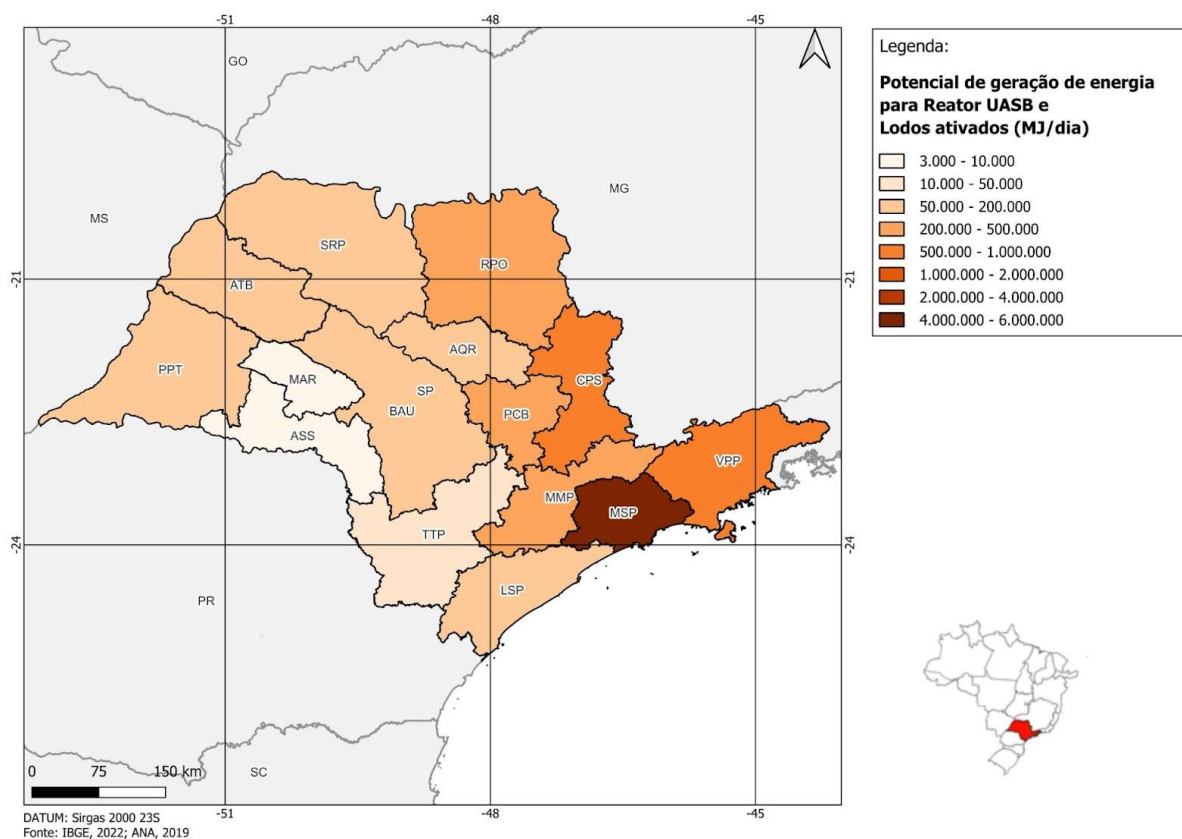
A Tabela 5.6, ilustrada pela Figura 5.8, resume o potencial energético gerado pelo biogás nos reatores UASB e digestores de lodo no cenário em que as cidades com as tecnologias de interesse têm 100% do esgoto gerado por sua população tratado.

Tabela 5.6 - Potencial de produção de energia elétrica considerando as tecnologias Reator UASB e lodos ativados para o Cenário 2 - Cobertura Máxima

MESORREGIÃO	POPULAÇÃO TOTAL (hab.)	POPULAÇÃO ATENDIDA PELA TECNOLOGIA (hab.)	CARGA ORGÂNICA [kg DBO/dia]	GERAÇÃO DE BIOGÁS [m³/dia]	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA [MJ/dia]
São José do Rio Preto	1.736.252	583.272	31.497	11.286	124.528
Ribeirão Preto	2.667.811	1.426.252	77.018	38.566	351.793
Araçatuba	765.432	204.023	11.017	5.713	51.185
Bauru	1.614.574	705.185	38.080	14.607	155.665
Araraquara	909.258	588.916	31.801	11.561	122.216
Piracicaba	1.546.453	1.180.520	63.748	27.117	274.812
Campinas	4.314.090	2.864.002	154.656	71.863	681.339
Presidente Prudente	913.631	285.320	15.407	7.922	71.176
Marília	471.094	21.503	1.161	602	5.395
Assis	599.514	14.070	760	342	3.418
Itapetininga	890.535	188.530	10.181	4.163	41.769
Macro					466.925
Metropolitana Paulista	3.065.055	1.904.979	102.869	50.740	
Vale do Paraíba Paulista	2.552.610	2.117.973	114.371	58.160	526.987
Litoral Sul-Paulista	507.093	316.935	17.114	8.598	78.431
Metropolitana de São Paulo	23.373.277	20.858.502	1.126.359	572.821	5.187.937
<b>TOTAL</b>	<b>45.926.679</b>	<b>33.259.982</b>	<b>1.796.039</b>	<b>884.062</b>	<b>8.143.576</b>

Fonte: Autoras, 2024

Figura 5.8 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando as tecnologias Reator UASB e lodos ativados para o Cenário 2 - Cobertura Máxima



Fonte: Autoras, 2024

O cenário 2 reforça o padrão identificado na análise anterior (cenário 1): as mesorregiões Metropolitana de São Paulo (5.187.576 MJ/dia) e Campinas (681.339 MJ/dia) demonstram o maior potencial para gerar energia a partir do biogás produzido nos reatores UASB e nos lodos ativados. O Vale do Paraíba Paulista (526.987 MJ/dia) se consolida como a terceira maior geradora de energia nesse contexto. Por outro lado, as mesorregiões de Assis (3.418 MJ/dia) e Marília (5.395 MJ/dia), com um número inferior de ETEs equipadas com as tecnologias em questão, apresentam o menor potencial energético.

Ao analisar a distribuição das estações de tratamento de esgoto (ETE) com as tecnologias UASB e lodos ativados, observa-se que o Vale do Paraíba Paulista supera a Macro Metropolitana Paulista, contando com 41 unidades, enquanto esta última possui 30. Esse cenário se reflete na população atendida por essas tecnologias: no Vale do Paraíba Paulista, 2.117.973 habitantes são beneficiados, um número superior aos 1.904.979 habitantes da Macro Metropolitana Paulista. Esses dados demonstram que, apesar da população total da Macro



Metropolitana Paulista ser maior, o Vale do Paraíba Paulista apresenta uma maior cobertura das tecnologias em questão.

### 5.3 Cenário 3 - Cobertura Regional

O cenário 3 pressupõe a implementação total das tecnologias analisadas, com todas as mesorregiões plenamente atendidas pelos sistemas de tratamento propostos, que incluem tanto os reatores UASB quanto os sistemas de lodos ativados. Este cenário maximiza o potencial de aproveitamento energético.

#### 5.3.1 Cenário 3 para reatores UASB

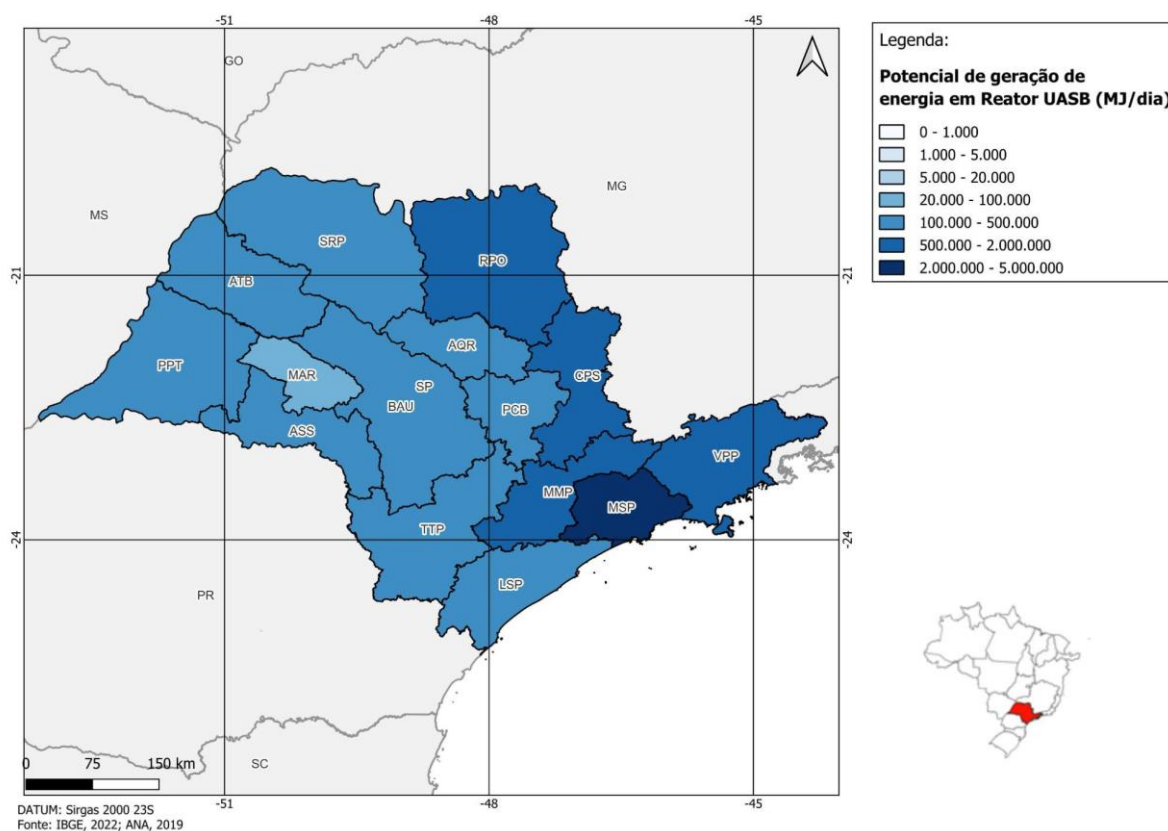
A Tabela 5.7, ilustrada pela Figura 5.9, resume o potencial energético gerado pelo biogás do UASB no cenário em que todas as cidades têm 100% do esgoto gerado por sua população tratado por reatores anaeróbios.

Tabela 5.7 - Potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de Reator UASB para o Cenário 3 - Cobertura Regional

MESORREGIÃO	POPULAÇÃO TOTAL (hab.)	POPULAÇÃO ATENDIDA PELA TECNOLOGIA (hab.)	CARGA ORGÂNICA [kg DBO/dia]	GERAÇÃO DE BIOGÁS [m³/dia]	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA [MJ/dia]
São José do Rio Preto	1.736.252	1.736.252	93.758	32.531	365.651
Ribeirão Preto	2.667.811	2.667.811	144.062	49.985	561.836
Araçatuba	765.432	765.432	41.333	14.341	161.198
Bauru	1.614.574	1.614.574	87.187	30.251	340.026
Araraquara	909.258	909.258	49.100	17.036	191.488
Piracicaba	1.546.453	1.546.453	83.508	28.975	325.680
Campinas	4.314.090	4.314.090	232.961	80.831	908.539
Presidente Prudente	913.631	913.631	49.336	17.118	192.409
Marília	471.094	471.094	25.439	8.827	99.211
Assis	599.514	599.514	32.374	11.233	126.256
Itapetininga	890.535	890.535	48.089	16.685	187.545
Macro					645.494
Metropolitana Paulista	3.065.055	3.065.055	165.513	57.428	
Vale do Paraíba Paulista	2.552.610	2.552.610	137.841	47.827	537.574
Litoral Sul-Paulista	507.093	507.093	27.383	9.501	106.793
Metropolitana de São Paulo	23.373.277	23.373.277	1.262.157	437.933	4.922.365
<b>TOTAL</b>	<b>45.926.679</b>	<b>45.926.679</b>	<b>2.480.041</b>	<b>860.504</b>	<b>9.672.065</b>

Fonte: Autoras, 2024

Figura 5.9 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de Reator UASB para o Cenário 3 - Cobertura Regional



Fonte: Autoras, 2024

O cenário 3, focado na tecnologia UASB, apresenta um potencial de geração de energia similar aos cenários anteriores, embora ligeiramente inferior. Mesmo com o atendimento total da população por reatores UASB, observa-se que a maior produção de biogás e, consequentemente, de energia, está associada ao uso de digestores de lodo, mas, ao mesmo tempo, há um gasto energético muito maior associado ao processo dos lodos ativados do que associado aos reatores UASB.

As mesorregiões da Metropolitana de São Paulo (4.922.365 MJ/dia), Campinas (908.539 MJ/dia) e Macro Metropolitana Paulista (645.494 MJ/dia) apresentam o maior potencial de geração de energia. Essa superioridade é diretamente atribuída à elevada densidade populacional dessas regiões, que gera um volume significativamente maior de efluentes, os quais podem ser convertidos em energia.

Por outro lado, as mesorregiões de Marília (99.211 MJ/dia), Litoral Sul Paulista (106.793 MJ/dia), Assis (126.256 MJ/dia) e Itapetininga (187.545 MJ/dia) apresentam um potencial energético consideravelmente menor. Essa diferença se deve, em grande parte, à

menor densidade populacional dessas regiões, o que resulta em um volume menor de esgoto disponível para tratamento.

### 5.3.2 Cenário 3 para lodos ativados

A Tabela 5.8, ilustrada pela

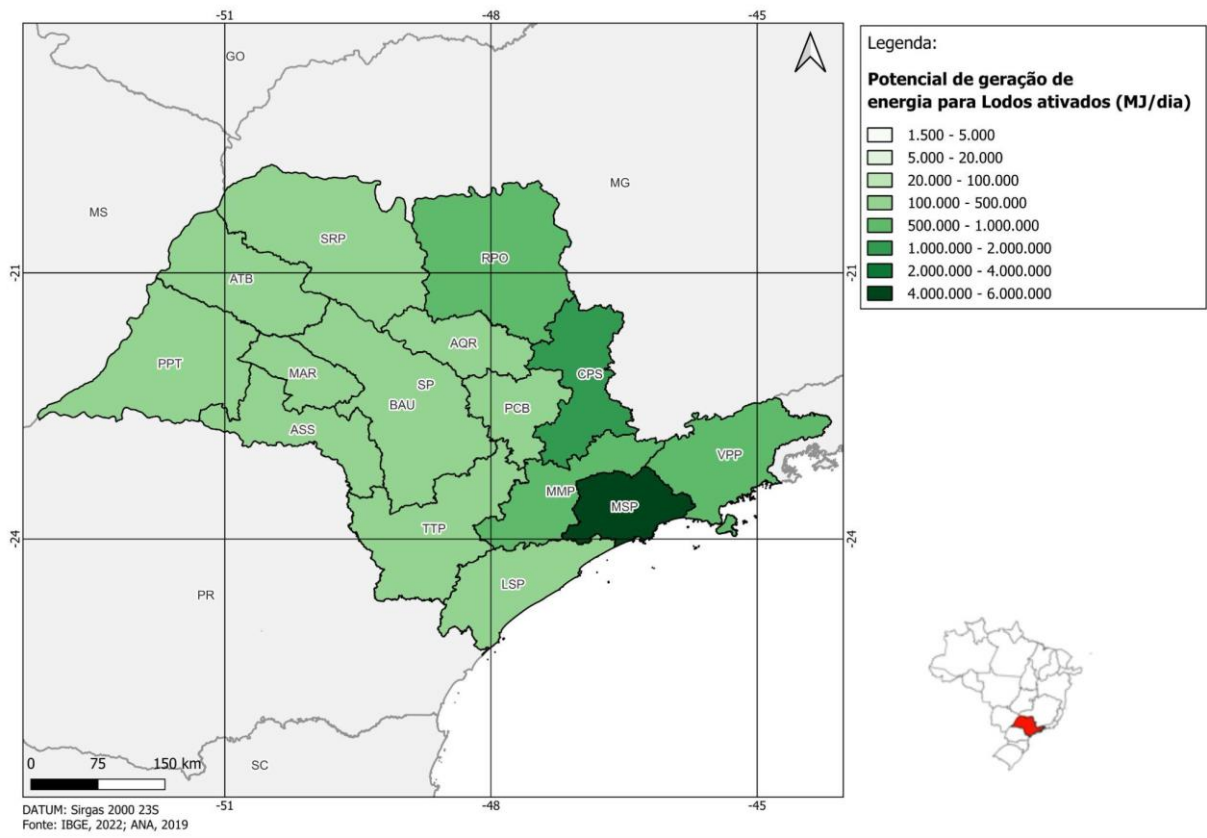
Figura 5.10, resume o potencial energético gerado pelo biogás dos digestores de lodo no cenário em que todas as cidades têm 100% do esgoto gerado por sua população tratado por lodos ativados.

Tabela 5.8- Potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de lodos ativados para o Cenário 3 - Cobertura Regional

MESORREGIÃO	POPULAÇÃO TOTAL (hab.)	POPULAÇÃO ATENDIDA PELA TECNOLOGIA (hab.)	CARGA ORGÂNICA [kg DBO/dia]	GERAÇÃO DE BIOGÁS [m³/dia]	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA [MJ/dia]
São José do Rio Preto	1.736.252	1.736.252	93.758	48.615	435.591
Ribeirão Preto	2.667.811	2.667.811	144.062	74.699	669.300
Araçatuba	765.432	765.432	41.333	21.432	192.032
Bauru	1.614.574	1.614.574	87.187	45.208	405.064
Araraquara	909.258	909.258	49.100	25.459	228.115
Piracicaba	1.546.453	1.546.453	83.508	43.301	387.974
Campinas	4.314.090	4.314.090	232.961	120.795	1.082.319
Presidente Prudente	913.631	913.631	49.336	25.582	229.212
Marília	471.094	471.094	25.439	13.191	118.188
Assis	599.514	599.514	32.374	16.786	150.406
Itapetininga	890.535	890.535	48.089	24.935	223.417
Macro					768.961
Metropolitana Paulista	3.065.055	3.065.055	165.513	85.822	
Vale do Paraíba Paulista	2.552.610	2.552.610	137.841	71.473	640.399
Litoral Sul-Paulista	507.093	507.093	27.383	14.199	127.219
Metropolitana de São Paulo	23.373.277	23.373.277	1.262.157	654.452	5.863.888
<b>TOTAL</b>	<b>45.926.679</b>	<b>45.926.679</b>	<b>2.480.041</b>	<b>1.285.947</b>	<b>11.522.085</b>

Fonte: Autoras, 2024

Figura 5.10 - Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando a tecnologia de lodos ativados para o Cenário 3 - Cobertura Regional



Fonte: Autoras, 2024

O cenário 3, focado na tecnologia de lodos ativados, apresenta um potencial de geração de energia similar ao cenário anterior, com destaque para as mesorregiões mais densamente povoadas. A Metropolitana de São Paulo lidera o ranking com um potencial energético de 5.863.888 MJ/dia, seguida por Campinas (1.082.319 MJ/dia) e a Macro Metropolitana Paulista (768.961 MJ/dia).

A alta densidade populacional dessas áreas, combinada com a grande produção de esgoto, justifica o significativo potencial energético observado. Essa concentração de pessoas assegura um fornecimento contínuo de matéria orgânica para as estações de tratamento, possibilitando sua conversão em biogás e, consequentemente, em energia elétrica. No entanto, o processo implica em gastos energéticos para a aeração, sendo vantajoso um sistema composto por reator UASB seguido de lodos ativados, para que parte da matéria orgânica já seja removida pelo UASB e a demanda por oxigênio nos lodos ativados seja reduzida.

### 5.3.3 Cenário 3 para lodos ativados e reatores UASB

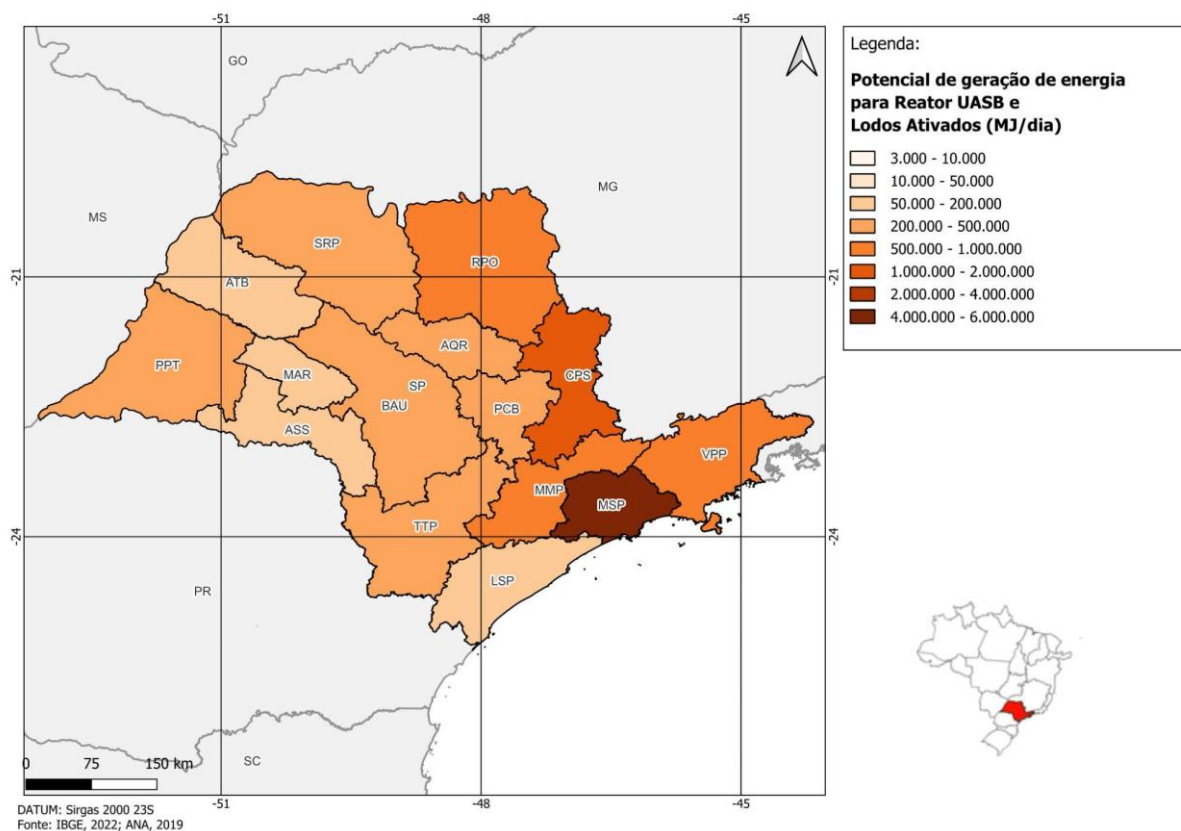
A Tabela 5.9, ilustrada pela Figura 5.11, resume o potencial energético gerado pelo biogás nos reatores UASB e digestores de lodo no cenário em que todas as cidades têm 100% do esgoto gerado por sua população tratado por estas tecnologias. Nesta alternativa, foi considerada a mesma proporção de volume de esgoto sanitário tratado por lodos ativados e por UASB do Cenário 1.

Tabela 5.9 - Potencial de produção de energia elétrica considerando as tecnologias Reator UASB e lodos ativados para o Cenário 3 - Cobertura Regional

MESORREGIÃO	POPULAÇÃO TOTAL (hab.)	POPULAÇÃO ATENDIDA PELA TECNOLOGIA (hab.)	CARGA ORGÂNICA [kg DBO/dia]	GERAÇÃO DE BIOGÁS [m³/dia]	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA [MJ/dia]
São José do Rio Preto	1.736.252	1.736.252	93.758	43.030	415.347
Ribeirão Preto	2.667.811	2.667.811	144.062	66.117	638.195
Araçatuba	765.432	765.432	41.333	18.970	183.107
Bauru	1.614.574	1.614.574	87.187	40.014	386.239
Araraquara	909.258	909.258	49.100	22.534	217.513
Piracicaba	1.546.453	1.546.453	83.508	38.326	369.943
Campinas	4.314.090	4.314.090	232.961	106.917	1.032.019
Presidente Prudente	913.631	913.631	49.336	22.643	218.559
Marília	471.094	471.094	25.439	11.675	112.695
Assis	599.514	599.514	32.374	14.858	143.416
Itapetininga	890.535	890.535	48.089	22.070	213.034
Macro					
Metropolitana	3.065.055	3.065.055	165.513		733.224
Paulista				75.962	
Vale do Paraíba	2.552.610	2.552.610	137.841	63.262	610.637
Paulista					
Litoral Sul-Paulista	507.093	507.093	27.383	12.567	121.307
Metropolitana de	23.373.277	23.373.277	1.262.157	579.263	5.591.369
São Paulo					
<b>TOTAL</b>	<b>45.926.679</b>	<b>45.926.679</b>	<b>2.480.041</b>	<b>1.138.207</b>	<b>10.986.607</b>

Fonte: Autores, 2024

Figura 5.11- Mapa do potencial de produção de energia elétrica considerando as tecnologias Reator UASB e lodos ativados para o Cenário 3 - Cobertura Regional



Fonte: Autores, 2024

O cenário 3 está diretamente relacionado com a população das mesorregiões e apresenta o potencial teórico de geração de energia a partir das ETEs caso haja investimento em tecnologias de lodos ativados e reatores UASB com tal finalidade. As mesorregiões Metropolitana de São Paulo (5.591.369 MJ/dia), Campinas (1.032.019 MJ/dia) e Macro Metropolitana Paulista (733.224 MJ/dia) são as com maior potencial de geração de energia a partir do biogás gerado nas ETEs.

A alta capacidade energética dessas regiões está diretamente relacionada à elevada densidade populacional, que resulta na geração de grandes volumes de esgoto e, consequentemente, em um maior potencial para a produção de biogás. Apesar do significativo potencial energético proporcionado pela digestão do lodo em sistemas de lodos ativados, esses sistemas apresentam um elevado consumo de energia devido à necessidade de aeração intensiva. Nesse contexto, a combinação de um reator UASB seguido por um sistema de lodos ativados pode representar uma alternativa mais vantajosa, já que o UASB remove grande parte da matéria orgânica previamente, reduzindo a demanda por oxigênio e, consequentemente, o

consumo energético do sistema aeróbio subsequente. A Tabela 5.10 apresenta o resumo dos resultados apresentados.

Tabela 5.10 - Resumo dos resultados em função dos cenários destacando as três mesorregiões com maior potencial

<b>Cenários</b>	<b>Tecnologia</b>	<b>Mesorregiões com maior potencial</b>	<b>Geração de energia (MJ/dia)</b>	<b>Porcentagem (referente ao total por cenário)</b>
Cenário 1	Reator UASB	Metropolitana de São Paulo	239.740	23,8%
		Campinas	170.579	17,0%
		Piracicaba	147.242	14,7%
Cenário 1	Lodos ativados	Metropolitana de São Paulo	4.556.367	71,3%
		Campinas	443.320	7,0%
		Macro Metropolitana Paulista	368.290	6,0%
Cenário 1	Reator UASB + Lodos ativados	Metropolitana de São Paulo	4.796.107	64,8%
		Campinas	613.899	8,30%
		Macro Metropolitana Paulista	409.115	5,53%
Cenário 2	Reator UASB	Metropolitana de São Paulo	273.413	25,0%
		Campinas	184.617,0	17%
		Piracicaba	156.969,0	14%
Cenário 2	Lodos ativados	Metropolitana de São Paulo	4.914.524	69,7%
		Vale do Paraíba Paulista	498.030	7%
		Campinas	496.722	7%



Cenário 2	Reator UASB + Lodos ativados	Metropolitana de São Paulo	5.187.937	63,7%
		Campinas	681.339	8%
		Vale do Paraíba Paulista	526.987	6%
Cenário 3	Reator UASB	Metropolitana de São Paulo	4.922.365	50,0%
		Campinas	908.539	9,0%
		Macro Metropolitana de São	645.494	7%
Cenário 3	Lodos ativados	Metropolitana de São Paulo	5.863.888	50,8%
		Campinas	1.082.319	9,0%
		Macro Metropolitana de São	768.961	7,0%
Cenário 3	Reator UASB + Lodos ativados	Metropolitana de São Paulo	5.399.646	51,0%
		Campinas	996.632	9%
		Macro Metropolitana de São	708.083	7,0%

Fonte: Autores, 2024

#### 5.4 Análise da viabilidade

O Estado de São Paulo tem um consumo total de energia elétrica de 137.937.930.515 KWh, equivalente a 20.690.689.577 MJ/dia. Desse total, o setor residencial é responsável por 44.396.811.155 KWh, ou 659.521.673 MJ/dia, com 19.176.108 consumidores residenciais registrados.

Os três cenários apresentados demonstram o potencial da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) no Estado de São Paulo.

O cenário atual (cenário 1), o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) representa 0,04% do consumo total do Estado e 0,11% do consumo residencial. Esse potencial seria suficiente para abastecer 21,3 mil consumidores diariamente.

A energia gerada no cenário 1 seria capaz de atender, por exemplo, toda a demanda residencial de cidades como Engenheiro Coelho (20.139 habitantes), localizada na mesorregião de Campinas; Pompeia (20.512 habitantes), na mesorregião de Marília; e Junqueirópolis (20.878 habitantes), na região de Presidente Prudente. Em relação à capital paulista, a energia gerada atenderia cerca de 0,18% da população da cidade. As populações dos municípios citados correspondem a projeção referente ao ano de 2024 feita pelo IBGE (BRASIL, 2024).

No cenário 2, o potencial de energia aumenta ligeiramente, atingindo 0,04% do consumo total no Estado e 0,12% do consumo residencial, o equivalente a atender cerca de 23,45 mil consumidores por dia. Essa população equivale à população de municípios como Igarapu do Tietê (23.430 habitantes), localizado na mesorregião de Bauru; Cunha (22.456 habitantes), na mesorregião do Vale do Paraíba Paulista; e Teodoro Sampaio (22.559 habitantes), na mesorregião de Presidente Prudente. Em termos comparativos, essa geração de energia seria capaz de atender cerca de 0,20% da população da capital paulista. As populações dos municípios citados são estimadas projetadas pelo IBGE para o ano de 2024 (BRASIL, 2024).

Por fim, o cenário 3, que explora ao máximo o potencial de geração de energia a partir das ETes no Estado, poderia suprir 0,06% do consumo total e 0,18% do consumo residencial. Nesse cenário, seria possível atender cerca de 34,4 mil consumidores diariamente, o equivalente à população de municípios como Cravinhos (34.252 habitantes), Aparecida (33.223 habitantes) e Ibaté (33.110 habitantes), localizados nas mesorregiões de Ribeirão Pretovale do Paraíba Paulista e Araraquara, respectivamente. Comparativamente, essa geração seria suficiente para atender cerca de 0,29% da população da capital de São Paulo. As populações dos municípios citados são estimadas projetadas pelo IBGE para o ano de 2024 (BRASIL, 2024).

A Tabela 5.11 apresenta o comparativo entre os cenários e sua contribuição para o consumo total e residencial.

Tabela 5.11 - Comparativo de contribuição de energia total e residencial entre os cenários

Cenário	Contribuição para o consumo total	Contribuição para o consumo residencial	Número de consumidores atendidos/dia
Cenário 1 - Cenário Atual	0,04%	0,11%	21.300
Cenário 2 - Cenário Máximo	0,04%	0,12%	23.450
Cenário 3 - Cenário Regional	0,06%	0,18%	34.400

Fonte: Autoras, 2024

Embora a geração de energia a partir do biogás nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) apresente um potencial considerável para diversificar a matriz energética, sua contribuição é limitada em relação ao consumo total do Estado. No entanto, uma aplicação interessante desta energia seria nas próprias ETEs, que se utilizam da eletricidade para operar suas unidades de tratamento, como os aeradores e sistemas de secagem de lodo, ambos processos de alto consumo energético. Essa estratégia reduz a dependência da rede elétrica e torna as ETEs mais autossuficientes. Outra possibilidade é a purificação do biogás para produção de biometano, que pode ser utilizado como combustível veicular e a aplicação de processos de co-digestão envolvendo resíduos orgânicos, prática que aumenta a produção de biogás e auxilia na gestão integrada de resíduos sólidos urbanos (RSU). Além disso, é de suma importância uma análise econômica para o complemento da avaliação da viabilidade da utilização do esgoto sanitário como matéria prima para a geração de energia elétrica.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou analisar o potencial energético do biogás gerado pelas ETEs no Estado de São Paulo, avaliando três cenários de aproveitamento energético e seu impacto no consumo de energia residencial. A análise revela uma disparidade significativa no potencial de geração de energia elétrica entre as diferentes mesorregiões do Estado. Um dos fatores que explicam essa desigualdade é a distribuição desigual das estações de tratamento de esgoto e das diferentes tecnologias entre as mesorregiões. As regiões mais adensadas possuem maior infraestrutura e mais estações de tratamento equipadas com tecnologias como os reatores UASB e Lodos ativados, o que eleva ainda mais seu potencial energético. Além disso, é importante destacar que a capacidade de tratamento de cada estação exerce uma influência direta sobre o potencial de geração de energia elétrica, assim como a densidade populacional e os hábitos de consumo dessa população. Essas variáveis combinadas determinam a eficiência no aproveitamento do biogás e a capacidade de conversão em energia.

As regiões com maior potencial, como a Região Metropolitana de São Paulo e Campinas, têm a capacidade de se tornarem importantes produtoras de energia renovável, contribuindo para a diversificação da matriz energética do Estado. Essas áreas, além de serem polos tecnológicos e industriais, têm um ambiente propício para atrair investimentos no setor de saneamento. Com mais recursos, seria possível melhorar o aproveitamento do biogás gerado nas estações de tratamento de esgoto e transformá-lo em energia elétrica. Isso aumentaria o valor do biogás e contribuiria para o desenvolvimento sustentável dessas regiões.

Por fim, é importante destacar que o presente trabalho apresentou limitações que podem ser contornados em pesquisas futuras, como a utilização de dados generalizados das ETEs, a falta de uma análise econômica das alternativas propostas. Para um estudo mais completo seria interessante a busca por dados mais específicos, com análise da vazão de esgoto e a remoção de carga orgânica real de cada ETE, e não apenas estimados com cálculos utilizando parâmetros presentes na literatura. Além disso, uma análise econômica detalhada poderia incluir a avaliação dos custos com relação ao tratamento do lodo e do biogás, bem como os gastos energéticos das ETEs.

## REFERÊNCIAS

ABAD, P. M. **Valorização de resíduos agro-industriais por processos de digestão anaeróbia**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Química) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10316/98912>. Acesso em: 10 set. 2024.

AMARAL, A. C. do; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. **Capítulo 1: O processo de biodigestão**. In: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do (Ed.). Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. p. 13-26. DOI: DOI - [https://dx.doi.org/10.21452/978-85-93823-01-5.2019.01\\_1](https://dx.doi.org/10.21452/978-85-93823-01-5.2019.01_1).

ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 6).

BRASIL. Instituto brasileiro de Geografia e Estatística. Portaria IBGE-1.041, de 28 de agosto de 2024. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 ago. 2024. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-ibge-1.041-de-28-de-agosto-de-2024-581181581>. Acesso em: 27 out. 2024.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades/Probiogás. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. 2a ed. Brasília, D F. 2017. 183 p.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades/Probiogás. **Exemplos de usinas de aproveitamento de biogás no Brasil**. Brasília. Fevereiro de 2017. 13 p. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/FolhetoprojetosdereferenciaPROBIOGAS.pdf>

BRK. Saneamento em pauta. **Os 5 principais tipos de tratamento de esgoto e suas particularidades**. 2022. Disponível em: <https://blog.brkambiental.com.br/tipos-de-tratamento-de-esgoto/>. Acesso em: 26 out. 2024.

CABRAL, C. B. G. **Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário**. 139 f. Dissertação (Mestrado em Comunicação) -Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/169074/342216.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 set. 2024.

CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Projeto PROSAB. 1.ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Projeto PROSAB. Vitória: ABES, 2003.

CHERNICHARO, C. A. L. **Limitações e possíveis melhorias futuras no projeto, na construção e na operação de reatores UASB tratando esgotos domésticos**. Relatório final de atividades referente ao pós-doutorado. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, Belo Horizonte, 2009.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias** – Vol. 5 – Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: Segrac, 1997. 246 p.

CHERNICHARO, C. A. L.; STUETZ, R. M. **Energy recovery from biogas in anaerobic wastewater treatment plants**. In: CHERNICHARO, C. A. L. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2009.

CHERNICHARO, C. A. L.; VAN LIER, J. B.; NOYOLA, A.; BRESSANI RIBEIRO, T. **Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges**. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 14, n. 4, p. 649-679, 2015.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VÁLEIS DO SÃO FRANCISCO E PARNAÍBA - CODEVASF. **Manual de comunicação e organização social: esgotamento sanitário**. Brasília: Codevasf, 2015. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/acesso-a-informacao/institucional/biblioteca-geral-rocha/publicacoes/manuais/manual-de-comunicacao-e-organizacao-social-esgotamento-sanitario.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

COELHO, *et al.* **Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano**. São Paulo: IEE Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo, 2018.

COPASA. **ETE Sustentável**. Disponível em: <https://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/esgotamento-sanitario/valorizacao-do-esgoto/conteudos/ete-sustentavel>.

DA SILVA, S.; AGUIAR, M.; MENDONÇA, A. **Correlação entre DBO e DQO em esgotos domésticos para a região da grande vitória – ES – Brasil**. IN: Congresso da Água, 2000, Vitória. Vitória: Associação portuguesa dos Recursos Hídricos, 2000. Disponível em: <https://www.aprh.pt/congressoagua2000/COMUNIC/21.pdf>. Acesso em: 23 out. 2024.

DE MELO, L.R.; Demasi, B.Z.; de Araujo, M.N.; Rogeri, R.C.; Grangeiro, L.C.; Fuess, L.T. **Methane Production from Sugarcane Vinasse Biodigestion: An Efficient Bioenergy and Environmental Solution for the State of São Paulo, Brazil**. *Methane* 2024, 3, 314-330. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/methane3020017>. Acesso em: 26 out. 2024.

DIAS, Alexandre Pessoa; ROSSO, Thereza Christina de Almeida; GIORDANO, Gandhi. **Os sistemas de saneamento na cidade do Rio de Janeiro**. Coletânea em Saneamento Ambiental (COAMB). Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. Série temática: Recursos hídricos e saneamento. Volume 2. ISBN 978-85-64386-09-9.

EPE. **Matriz energética e elétrica**. Empresa de Pesquisa Energética, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em 22 out. 2024.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR). **Guia prático do Biogás: geração e utilização**. Projeto PROBIOGÁS. 5 ed. Gülzow, 2010.

FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente. **Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria**. Fundação Estadual do Meio Ambiente, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ). Belo Horizonte: FEAM, 2015.

FELCA, A. T. A. **Análise do potencial energético proveniente do lodo de esgoto produzido pelas estações de tratamento do sul de Minas Gerais**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

FERRANTI, Eliana M. **Desidratação de lodos de estação de tratamento de água**. 2005. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS. 2005.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. **Manual de saneamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: FIOCRUZ, 2013. Disponível em: <https://fiocruz.br/biosseguranca/Bis/manuais/ambiente/Manual%20de%20Saneamento.pdf>. Acesso em: 22 out. 2024.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. **Anuário de energéticos do Estado de São Paulo: 2024**. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística, 2024.

GUEST, Jeremy S., SKERLOS, Steven J., BARNARD, James L., BECK, M. Bruce, HILL, C. H. M., JACKSON, Steven J., MACPHERSON, Linda. **A new planning and design paradigm to achieve sustainable resource recovery from wastewater**. *Environmental Science & Technology*, v. 43, n. 16, 6126-6130, 2009.

HEBERLE, A. N. A. **Biogás gerado a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes suplementado com óleo vegetal residual**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2013.

HENDGES, L. T.; REINHER, R.C.R.; LEICHTWEIS, J.; FERNANDES, E.J.; TONES, A.R.M. **Disposição final de lodo de estações de tratamento de água e de esgoto: Uma revisão**. Anais do 9º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão - SIEPE. Universidade Federal do Pampa. Sant'Ana do Livramento - RS. 2017.

IERVOLINO, L. F. **Aproveitamento e destinação do lodo**. Portal Tratamento de Água. 30 de abril. 2021. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/aproveitamentodestinacaolodo/#:~:text=De%20forma%20geral%2C%20o%20lodo,de%20disposi%C3%A7%C3%A3o%20final%20do%20lodo>. Acesso em: 22 out. 2024.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Japão: IPCC, 2006.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 7ª ed. Rio de Janeiro: SEGRAC, 2014.

JÚNIOR, B. A. **DBO per capita**. *Revista DAE*, v. 49, n. 156, jul – set, 1989.

KARLSSON, et al. **Manual Básico de Biogás**. 1 ed. Lajeado: Editora Univates, 2014. Disponível em: [https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf\\_71.pdf](https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf). Acesso em: 22 out. 2024.

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; DO AMARAL, André Cestonaro. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 2 ed. Concórdia: Sbera Embrapa Suínos e Aves, 2022. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1141618>. Acesso em: 19 out. 2024.

LEONEL, L. F. **Desempenho de Estações de Tratamento de Esgoto - Uma análise de Sistemas de Lagoas de Estabilização de Pequeno e Médio Porte Integrada à Avaliação**

**da Qualidade dos Corpos Hídricos na UGRHI 12 - Baixo Pardo/Grande.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Hidráulica e Saneamento. São Carlos - SP. 2016.

LETTINGA, G. **Anaerobic digestion and wastewater treatment systems.** *Antonie van Leeuwenhoek*, v. 67, n. 1, p. 3-28, 1995. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Anaerobic-digestion-and-wastewater-treatment-Lettinga/8e943f0cba3b514de9530fced79c9111c45783cb>.

LIMA, M. F. **Produção de biogás a partir de lodo de esgoto em condições mesofílicas e termofílicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico.** Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LOPES, L. S. **Avaliação do potencial de recuperação energética de lodo e biogás Provenientes de reatores UASB tratando esgoto doméstico no estado do Paraná.** Dissertação (Magister Scientiae em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. **Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, p. 2566-2582, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.074>. Acesso em: 20 out. 2024.

MELO, D. F. **Estudo da influência da quantidade de lodo na produção de biogás em reator UASB tratando esgoto doméstico.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos.** 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MIKI, *et al.* **Tratamento biológico de esgoto: princípios, modelagem e projeto.** 2 ed. Londres: IWA Publishing, 2020.

OLIVEIRA, C. M. R. **Aplicabilidade de sistemas simplificados para estações de tratamento de esgoto de cidades de pequeno porte.** Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2014/02/Vers%C3%A3o-Final-corrigidaV02.pdf>. Acesso em: 21 out. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.** Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>. Acesso em: 26 out. 2024.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; DE SOUSA, J. F.; PICKLER, A. de C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. da C. **Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão.** *Revista Liberato, [S. l.]*, v. 11, n. 16, p. 147–158, 2013. Disponível em: <https://revista.liberato.com.br/index.php/revista/article/view/160>. Acesso em: 22 out. 2024.



POSSETTI, G. R. C. **Probiogás: resumo técnico do 4º Workshop Internacional sobre aproveitamento energético de biogás de ETEs**. Probiogás. Brasília: Ministério das Cidades, 2016.

RISSOLI, C. A. **Estudo de parâmetros operacionais do reator UASB tratando esgoto doméstico e avaliação da biodegradabilidade do seu efluente**. Dissertação (Mestrado em tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

ROSA, A. P. *et al.* **Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira)**. Eng Sanit Ambient, v. 21, n. 21, p 315-328, 2016.

SABESP. **Relatório de sustentabilidade 2023**. São Paulo. SABESP. 2023. Disponível em:  
[https://www.sabesp.com.br/site/uploads/file/relatorios\\_sustentabilidade/relatorio\\_sustentabilidade\\_2023.pdf](https://www.sabesp.com.br/site/uploads/file/relatorios_sustentabilidade/relatorio_sustentabilidade_2023.pdf).

SANEAMENTO básico, o filme. Direção: Jorge Furtado. Produção de Zu Escobar. Roteiro: Jorge Furtado. Bento Gonçalves: Casa de Cinema de Porto Alegre, 2007. 1 vídeo (111 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=CuPjODnuQ7Y>. Acesso em 24 out. 2024.

SANEPAR. **Resumo técnico: 4º Workshop Internacional - Aproveitamento energético de biogás de ETEs**. Curitiba. SANEPAR. 2016. Disponível em: [https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/publicacoes/GIZ\\_ResumoTecnico-4WorkshopInternacional.pdf](https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/publicacoes/GIZ_ResumoTecnico-4WorkshopInternacional.pdf).

SANTOS, F. I.; LEITE, M. D. P.; BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.. **Um estudo dos custos de implantação de empreendimentos de aproveitamento energético do biogás de estações de tratamento de esgoto**. Revista Brasileira de Energia. 20. 145-155. 2014. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/301642947\\_Um\\_Estudo\\_dos\\_Custos\\_de\\_Implantacao\\_de\\_Empreendimentos\\_de\\_Aproveitamento\\_Energeticodo\\_Biogas\\_de\\_Estacoes\\_de\\_Tratamento\\_de\\_Esgoto/references](https://www.researchgate.net/publication/301642947_Um_Estudo_dos_Custos_de_Implantacao_de_Empreendimentos_de_Aproveitamento_Energeticodo_Biogas_de_Estacoes_de_Tratamento_de_Esgoto/references). Acesso em: 22 out. 2024.

SILVA, M. L. B. da; CANTAO, M. E.; MEZZARI, M. P.; MA, J.; NOSSA, C. W. **Assessment of Bacterial and Archaeal Community Structure in Swine Wastewater Treatment Processes**. Microbial Ecology, Netherlands, v. 86, p. 106-112, 2014.

SOUZA, A. M. T.; VELLOSO, C. H. V.; ARAÚJO, M. E. A. **Manual para construção e operação de biodigestores**. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Belo Horizonte: CETEC, 1981.

TONETTI, *et al.* **Tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas**. Disponível em: <https://www.fecfau.unicamp.br/~saneamentorural/wp-content/uploads/2018/11/Livro-Tratamento-de-Esgotos-Dom%C3%A9sticos-em-Comunidades-Isoladas-ilovepdf-compressed.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki e ALÉM SOBRINHO, Pedro. **Coleta de transporte de esgoto sanitário**. São Paulo: Epusp/PHD. 1999.

UNESCO. *United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water*. Paris: UNESCO, 2023. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384655>. Acesso em: 12 dez. 2024.

VIEIRA, Gabriel Campos. **Inibição e toxicidade no processo de digestão anaeróbia dos lodos gerados na ETE Brasília Sul: estudo em escala laboratorial**. 2017. xi, 78 f., il. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

VON SPERLING, M. **Lodos ativados**. In: VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. 4. p. 428. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 1997.

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. Tese (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.