



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

ÉVERTON BEZERRA GADELHA FILHO

**ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E REDUÇÃO DA EMISSÃO
DE GASES DE EFEITO ESTUFA A PARTIR DO USO DO BIOGÁS GERADO NAS
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO ESTADO DO CEARÁ.**

FORTALEZA

2025

ÉVERTON BEZERRA GADELHA FILHO

ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E REDUÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA A PARTIR DO USO DO BIOGÁS GERADO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO ESTADO DO CEARÁ.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Castelo Guimarães Albuquerque

Coorientador: Thiago Martins Dantas

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G12e Gadelha Filho, Éverton Bezerra.

Estimativa da geração de energia elétrica e redução da emissão de gases de efeito estufa a partir do uso do biogás gerado nas estações de tratamento de esgoto do estado do Ceará. / Éverton Bezerra Gadelha Filho. – 2025.

64 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Mônica Castelo Guimarães Albuquerque.

Coorientação: Prof. Thiago Martins Dantas.

1. Tratamento de esgoto. 2. Saneamento. 3. Biogás. 4. Energias renováveis. I. Título.

CDD 621.042

ÉVERTON BEZERRA GADELHA FILHO

ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E REDUÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA A PARTIR DO USO DO BIOGÁS GERADO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO ESTADO DO CEARÁ.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Mônica Castelo Guimarães
Albuquerque (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Thiago Martins Dantas (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Fernanda Leite Lobo
Universidade do Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. André Valente Bueno
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A todos que acreditaram em mim, me acolheram,
me acompanharam e me fizeram feliz durante o
caminho.

AGRADECIMENTOS

Aos caros professores que me auxiliaram nessa jornada e fizeram-me enxergar a beleza na vida, na ciência e na matemática, em especial aos queridos Luís Gonzaga Rodrigues Filho, Natália Cordeiro Barroso, Carlos Estêvão Rolim Fernandes e William Magalhães Barcellos. A inteligência não é a reside na habilidade de guardar conhecimento, e sim na de passá-lo adiante, e com vocês pude confirmar isso.

Aos que me forneceram o apoio e o conhecimento técnico na construção deste trabalho, em especial à minha querida orientadora, Mônica Albuquerque – que me guiou e me mostrou os caminhos necessários para sua conclusão, mostrando compreensão mesmo nos momentos em que eu mesmo não acreditava merecer –, e aos meus queridos co-orientadores, Thiago Dantas e Jorge Medeiros – que, além de amigos com os quais a Cagece me presenteou, foram mestres na transmissão de seu vasto conhecimento.

A todos os meu colegas da Cagece e da GEPED, cujos nomes e momentos ficarão eternizados na minha história pelo companheirismo, amizade, e profissionalismo. Trabalhar com vocês me permitiu crescer e me conhecer melhor como indivíduo e profissional.

À toda minha família, em especial à minha vó materna, Elis, que tanto me encorajou e acreditou no meu potencial, fazendo-me sempre acreditar no que eu poderia alcançar e sendo luz em meio à escuridão. Obrigado por me ensinar o que é amor.

À querida Elenita Saboya, uma segunda mãe com a qual a vida me presenteou, por tantas oportunidades a mim dadas, e por sempre acreditar em mim, independente de tudo. Por mais que por vezes não percebamos, esta vida sempre trará anjos de outras para nos acompanharem, e nunca poderei ser grato o suficiente pelo nosso encontro.

Aos meus colegas de curso, Pedro Vitor, Gislany Queiroz, Sâmia Dantas, Breno Andrade, Lara Feitosa, Teresa Caldas, Isabele Oliveira, Hariel Abreu, Carol Magalhães e Felipe Braga, que, apesar de por muito ter acreditado que minhas caminhadas deveriam ser feitas sozinhas, me mostraram que o caminho é sempre mais bonito quando se está bem acompanhado. A vida realmente mora nos intervalos em que se pode dar boas risadas ao lado de quem se ama.

Ao autor deste trabalho, que aqui escreve, por ter se mostrado paciente para com suas dificuldades e se acolheu nos momentos em que ninguém mais pôde. Obrigado por ser resistente às turbulências e ao impulso de abrir mão de seus maiores sonhos, mesmo não conseguindo enxergar por detrás da neblina em alguns momentos.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

“O sonho é que leva a gente para frente. Se a gente for seguir a razão, fica aquietado, acomodado.”

(Ariano Suassuna)

RESUMO

As emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs) e o consumo de energia são dois dos principais problemas enfrentados pelo setor de saneamento na atualidade. Devido a isso, este trabalho buscou realizar um levantamento acerca da potencialidade de produção de biogás nas do Estado do Ceará, bem como buscou avaliar a geração de energia elétrica e a emissão evitada de gases de efeito estufa (GEEs) devido à implementação de sistemas compactos (UASB) de recuperação e aproveitamento do biogás nas estações de tratamento de esgoto. Dentre as 289 ETEs do Estado, 97 delas apresentaram dados de vazão, dentre as quais 41 possuíam sistemas compactos com reatores anaeróbios de fluxo ascendente; além da estação de pré-condicionamento (EPC). O trabalho avaliou a quantidade de biogás produzida nas ETEs que já possuíam esse tipo de tratamento e estimou o potencial de biogás associado à implementação desse tipo de sistema nas outras ETEs do Estado. Como resultado, foi estimada uma produção diária de 8,809.96 Nm³/dia de biogás associada à geração de 21,958.82 kWh/dia na utilização deste produto em motores de combustão interna (MCIs). Num cenário em que ocorre plena implementação de sistemas compactos nas ETEs com disponibilidade de dados, estima-se uma produção diária de 34.228,59 Nm³/dia e uma geração de 85,315.26 kWh/dia na mesma implementação. Com isso, essa geração seria capaz não somente de gerar uma economia de R\$ 5,4 milhões por ano para a Companhia nas faturas de energia elétrica, como também proporcionariam uma redução de 81,2% da emissão de gases de efeito estufa devido à captura e aproveitamento do biogás gerado nas estações. Essa implementação, portanto, seria capaz de promover não somente a redução de custos por parte da Companhia como também contribuiria para o desenvolvimento sustentável no setor de saneamento.

Palavras-chave: Tratamento de esgoto. Saneamento. Biogás. Energias renováveis

ABSTRACT

Greenhouse gas (GHG) emissions and energy consumption are two of the main challenges currently faced by the sanitation sector. Due to this, this study aimed to assess the potential for biogas production in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in the state of Ceará, as well as to evaluate electricity generation and the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions through the implementation of Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor for biogas recovery and utilization in WWTPs. Among the 289 WWTPs in the state, 97 had available flow data, of which 41 operate with compact systems using UASB technology, apart from a pre-conditioning station (PCS). The study evaluated the amount of biogas produced in WWTPs with this type of treatment and estimated the biogas potential associated with the implementation of such systems in other WWTPs in the state. As a result, a daily production of 8,809.96 Nm³/day of biogas was estimated, associated with 21,958.82 kWh/day of electricity generation by using the biogas produced in internal combustion engines (ICEs). In a scenario where compact systems are fully disseminated in WWTPs with available data, a daily production of 34,228.59 Nm³/day and a generation of 85,315.26 kWh/day are projected. This generation would not only result in an annual energy bill savings of R\$ 5.4 million for the company but also contribute to an 81.2% reduction in greenhouse gas emissions due to the capture and utilization of the biogas generated at the WWTPs. This implementation, therefore, would not only reduce costs for the Company but also contribute to sustainable development in the sanitation sector.

Keywords: Wastewater treatment. Sanitation. Biogas. Renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Fluxograma simplificado do tratamento de esgoto nas Estações de Tratamento. | 26 |
| Figura 2 – Esquema simplificado de um reator UASB. | 28 |
| Figura 3 – Etapas do processo de digestão anaeróbia. | 30 |
| Figura 4 – Disponibilidade de dados de geolocalização por tipologia. | 35 |
| Figura 5 – Disponibilidade de dados de geolocalização por localidade. | 35 |
| Figura 6 – Disponibilidade de dados de vazão por tipologia. | 36 |
| Figura 7 – Disponibilidade de dados de vazão por localidade. | 36 |
| Figura 8 – Disponibilidade de dados de consumo de energia elétrica por tipologia | 37 |
| Figura 9 – Disponibilidade de dados de consumo de energia elétrica por localidade. | 37 |
| Figura 10 – Diagrama de Venn para a disponibilidade de dados nas três classes. | 38 |
| Figura 11 – Mapa de distribuição das ETES no CE. | 45 |
| Figura 12 – Mapa de densidade de ETES no CE por município. | 46 |
| Figura 13 – Mapa da distribuição das ETES no CE por tipologia. | 47 |
| Figura 14 – Mapa do consumo de energia elétrica nas ETES por município. | 48 |
| Figura 15 – Mapa do potencial de Produção de biogás no CE. | 49 |
| Figura 16 – Mapa do potencial de produção de biogás na RMF. | 50 |
| Figura 17 – Mapa do potencial instalado de produção de biogás na RMF. | 51 |
| Figura 18 – Mapa do potencial de geração elétrica total no CE. | 52 |
| Figura 19 – Mapa do potencial de geração de energia elétrica total na RMF. | 53 |
| Figura 20 – Mapa do potencial de geração de energia elétrica instalado na RMF. | 54 |
| Figura 21 – Mapa da emissão total de gases de efeito estufa no CE. | 55 |
| Figura 22 – Mapa da emissão total de gases de efeito estufa na RMF. | 56 |
| Figura 23 – Mapa da emissão instalada de gases de efeito estufa na RMF. | 57 |
| Figura 24 – Gráfico da estimativa da taxa de produção de biogás nas ETES do CE. | 58 |
| Figura 25 – Gráfico da estimativa da taxa de produção de metano nas ETES do CE. | 59 |
| Figura 26 – Gráfico da estimativa da geração de energia elétrica nas ETES do CE. | 59 |
| Figura 27 – Gráfico de emissão de GEEs no Cenário 1. | 60 |
| Figura 28 – Gráfico comparativo das emissões totais nos dois cenários. | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Composição típica da matéria sólida no esgoto doméstico. | 22 |
| Tabela 2 – Concentrações típicas de matéria orgânica e inorgânica em esgotos domésticos. | 24 |
| Tabela 3 – Disponibilidade de dados por classe. | 37 |
| Tabela 4 – Parâmetros e valores utilizados para estimativa de produção de biogás. . . . | 39 |
| Tabela 5 – Parâmetros utilizados para a estimativa da emissão equivalente de GEEs. . . | 44 |
| Tabela 6 – Consumo e custo total associado à energia elétrica nas ETEs do CE. | 47 |
| Tabela 7 – Potencial de produção de biogás e metano no CE por região e tipologia. . . | 49 |
| Tabela 8 – Potencial de geração de energia elétrica no CE por região e tipologia. . . . | 50 |
| Tabela 9 – Emissão de GEEs nas ETEs do CE (Cenário 1). | 52 |
| Tabela 10 – Emissão de GEEs nas ETEs do CE (Cenário 2). | 53 |
| Tabela 11 – Emissões evitadas de GEEs nas ETEs do CE | 54 |
| Tabela 12 – Economia de energia elétrica devido ao potencial instalado no CE. | 55 |
| Tabela 13 – Economia de energia elétrica devido ao potencial disponível no CE. | 57 |
| Tabela 14 – Resumo das estimativas do potencial instalado. | 58 |
| Tabela 15 – Resumo das estimativas do potencial disponível. | 58 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| BRS | Bactérias Redutoras de Sulfato |
| CAPEX | Investimento em Capital (<i>Capital Expenditure</i>) |
| CHP | Cogeração (<i>Combined Heat and Power</i>) |
| CNTP | Condições Normais de Temperatura e Pressão |
| DBO | Demanda Bioquímica de Oxigênio |
| DBO ₅ | Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias |
| DBO _{última} | Demanda Bioquímica de Oxigênio Última |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio |
| ETEs | Estações de Tratamento de Esgoto |
| GEEs | Gases de Efeito Estufa |
| GLP | Gás Liquefeito do Petróleo |
| GNV | Gás Natural Veicular |
| GWP | Potencial de Aquecimento Global (<i>Global Warming Potential</i>) |
| MCI | motor de combustão interna |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| OPEX | Custo Operacional (<i>Operational Expenditure</i>) |
| PCI | Poder calorífico inferior |
| PLANSAB | Plano Nacional de Saneamento Básico |
| SNIS | Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento |
| ST | Sólidos totais |
| STV | Sólidos totais voláteis |
| UASB | <i>Upflow Anaerobic Sluge Blanket</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------------------------|--|
| CH ₄ | Metano |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| H ₂ O | Água |
| H ₂ S | Sulfeto de Hidrogênio |
| kWh | Quilowatt-hora |
| kg | Quilograma |
| N ₂ | Nitrogênio |
| N ₂ O | Óxido Nitroso |
| NH ₃ | Amônia |
| Nm ³ | Normal metro cúbico |
| O ₂ | Oxigênio |
| SO ₄ ²⁻ | Íon Sulfato |
| t | Tonelada |
| tCO ₂ eq | Toneladas de CO ₂ equivalente |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 | OBJETIVOS | 18 |
| 2.1 | Objetivos Específicos | 18 |
| 3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 19 |
| 3.1 | Emissão de gases de efeito estufa e consumo de energia elétrica | 19 |
| 3.2 | Caracterização do esgoto sanitário | 20 |
| 3.3 | Processos de tratamento do esgoto sanitário | 25 |
| 3.4 | Aproveitamento energético do biogás nas ETEs | 31 |
| 4 | METODOLOGIA | 34 |
| 4.1 | Análise de dados | 34 |
| 4.1.1 | <i>Dados de georreferenciamento</i> | 34 |
| 4.1.2 | <i>Dados de vazão</i> | 35 |
| 4.1.3 | <i>Dados de consumo de energia elétrica</i> | 36 |
| 4.1.4 | <i>Visão geral da disponibilidade de dados</i> | 37 |
| 4.2 | Mapeamento e georreferenciamento | 38 |
| 4.3 | Implementação de dados e obtenção de parâmetros de interesse | 39 |
| 4.3.1 | <i>Estimativa da produção de biogás e metano</i> | 39 |
| 4.3.2 | <i>Estimativa da geração de energia elétrica</i> | 42 |
| 4.3.3 | <i>Estimativa da emissão de gases de efeito estufa</i> | 42 |
| 5 | RESULTADOS | 45 |
| 5.1 | Mapeamento e Georreferenciamento das Estações | 45 |
| 5.2 | Consumo de Energia Elétrica | 46 |
| 5.3 | Produção de biogás | 48 |
| 5.4 | Geração de energia elétrica | 50 |
| 5.5 | Emissão de Gases de Efeito Estufa | 51 |
| 5.6 | Economia de energia elétrica | 55 |
| 5.6.1 | <i>Visão geral dos resultados</i> | 56 |
| 6 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 61 |
| | REFERÊNCIAS | 64 |

1 INTRODUÇÃO

Diante do crescimento da população mundial e do aumento das demandas de recursos e energia, a expansão do conhecimento relativo ao uso de energias renováveis desponta como uma possível solução para o suprimento de energia elétrica e para a redução da emissão de gases de efeito estufa nas sociedades modernas. Uma dessas formas de energia, proveniente da matéria orgânica, é o biogás, produto valioso obtido a partir da digestão da matéria orgânica.

Não obstante, o setor de saneamento também desempenha um papel crucial nas sociedades modernas, em particular no Brasil, onde ainda enfrenta grandes desafios na universalização de seus serviços (SPERLING, 1996). Apesar da sua constante expansão, dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) indicam que apenas 52,2% do esgoto doméstico gerado no país é tratado (BRASIL, 2022b). Quando não tratado devidamente, esse esgoto viabiliza a proliferação de patógenos por veiculação hídrica, causando impactos à saúde pública e a contaminação de ecossistemas aquáticos (SPERLING, 1996)

Tendo em vista a evidente insuficiência desses serviços e seus impactos associados, a busca pela universalização tem sido tópico de discussão e de criação de metas por parte de órgãos governamentais, como a criação do Marco Legal do Saneamento e do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), que estabelecem como objetivo o atendimento de 99% da população para o abastecimento de água e 90% de atendimento para o esgotamento sanitário (BRASIL, 2022a).

Com as metas associadas à expansão desses serviços, outros desafios surgem frente ao aumento da demanda do setor, como o alto consumo de energia elétrica e as altas emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), estima-se um aumento de 30% no consumo global de energia por parte do segmento até o final da década, com 20% desse aumento associado ao tratamento de esgoto doméstico (IEA, 2020). Este consumo representa uma parcela significativa da despesa operacional, especialmente nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), ficando atrás apenas dos custos com recursos humanos (METCALF, 2003).

Não obstante, outro desafio do segmento é sua emissão de GEEs e o impacto ambiental associado, embora apresente menor contribuição para essas emissões do que setores como transporte e pecuária (SEEG, 2023). Em 2023, o Brasil emitiu 2,3 bilhões de toneladas de dióxido de carbono, das quais 24,3 milhões de toneladas (1,05%) foram provenientes do saneamento. Estas emissões correspondem àquelas diretas e indiretas associadas a toda a cadeia

de tratamento de esgoto, mas sobretudo à etapa de redução da carga orgânica do efluente propriamente dito (LAMBIASI *et al.*, 2024; SEEG, 2023). Nas ETEs, esta etapa pode ocorrer através de tecnologias aeróbias e anaeróbias, como em lagoas de estabilização, decantos digestores ou em reatores biológicos – como os de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB – *Upflow anaerobic sludge blanket*). Especificamente nas tecnologias anaeróbias, além do lodo, outro subproduto do tratamento desses efluentes é o biogás, que possui alto poder calorífico mas alto potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential*).

No Ceará, a Companhia de Água e Esgoto do Estado (Cagece) utiliza-se de algumas dessas tecnologias, sejam elas utilizadas isoladamente ou associadas para aumento da eficiência de redução da carga orgânica do efluente. Dentre as tecnologias utilizadas pela Companhia, os reatores UASB são utilizados por apresentarem alta taxa de remoção de carga orgânica e possibilitarem a captura e o aproveitamento dos gases emitidos no processo de digestão (SILVEIRA *et al.*, 2015). Justamente por apresentarem sistema compacto de baixo custo de implementação (CAPEX – *Capital Expenditure*), de operação (OPEX – *Operational Expenditure*) e baixo requisito de área e energia, o uso de reatores UASB tem sido estudado não somente pela companhia, como também por uma grande variedade de Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs).

Apesar de se utilizar deste tipo de tecnologia, em 2021 a Cagece emitiu 633,688.72 toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂eq), dentre os quais 99,1% correspondem às emissões de metano resultantes do processo de digestão anaeróbia do esgoto urbano (Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece), 2023). Isso deve-se principalmente ao fato de que, mesmo nas estações em que há este tipo de sistema, não ocorre a efetiva captura e aproveitamento do subproduto gasoso do processo de digestão.

Tendo isso em vista, e com o crescimento populacional previsto para as próximas décadas, a não-introdução de novas tecnologias e o uso ineficiente dos sistemas implementados resultaria em um aumento cada vez mais significativo no consumo de energia elétrica e na emissão de GEEs por parte da Companhia e do setor de saneamento como um todo. Com isso, surge a necessidade da implementação de novas tecnologias que sejam capazes de incorporar eficiência operacional e eficiência energética no Sistema de Esgotamento Sanitário (SES). Nesse sentido, a implementação e uso de reatores de digestão anaeróbia se mostra como uma possível alternativa no que se refere tratamento de efluentes, suprimento da demanda elétrica e ao aproveitamento de resíduos orgânicos nas ETEs; incrementando maior eficiência operacional e melhor aproveitando

os subprodutos gerados no processo (LAMBIASI *et al.*, 2024).

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estimar e avaliar os benefícios associados à implementação de sistemas de captura e aproveitamento energético do biogás nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) que utilizam reatores UASB compactos no Estado do Ceará, considerando simultaneamente as unidades que já possuem esses sistemas instalados e aquelas com potencial para sua instalação.

2.1 Objetivos Específicos

1. Identificar e mapear as ETEs do Estado do Ceará que já possuem reatores UASB compactos e aquelas com potencial para instalação desses sistemas;
2. Analisar o consumo de energia elétrica das ETEs a partir das faturas da Companhia;
3. Determinar o potencial de produção de biogás e a geração de energia elétrica nas ETEs de potencial instalado e nas ETEs com potencialidade de instalação;
4. Estimar a economia nas faturas de energia elétrica decorrente do uso do biogás;
5. Estimar as emissões de GEEs nas ETEs do estudo e quantificar a redução proporcionada pela captura e aproveitamento do biogás gerado.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Emissão de gases de efeito estufa e consumo de energia elétrica

Gases de efeito estufa são aqueles que absorvem e emitem radiação no espectro infravermelho, contribuindo para o agravamento do efeito estufa e para a elevação da temperatura terrestre (IPCC, 2018). Esses gases, de forma geral, incluem vapor de água, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e gases fluorados, como hidrofluorcarbonetos (HFCs), que, ao serem emitidos na atmosfera, alteram sua composição e intensificam sua capacidade de absorção de radiação no espectro infravermelho (LOBATO, 2011). A relevância destes gases está diretamente ligada ao impacto ambiental das atividades humanas, especialmente no contexto das mudanças climáticas globais.

Cada um desses gases, entretanto, absorve diferentes intensidades de radiação e influi de forma distinta no agravamento desse efeito. Nesse sentido, com o objetivo de estabelecer parâmetros comparativos no que se refere ao impacto da emissão desses gases, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*) desenvolveu o Potencial de Aquecimento Global (GWP, do inglês *Global Warming Potential*), uma métrica que quantifica o impacto radiativo cumulativo de um gás em determinado período de tempo, utilizando o dióxido de carbono como gás de referência. Gases como óxido nitroso (N₂O), por exemplo, apresentam GWP até 298 vezes maior que o dióxido de carbono, apesar de serem emitidos em menor quantidade na atmosfera. Por outro lado, gases como CO₂ e o CH₄ apresentam menor impacto relativo, mas acabam por apresentar maior risco a longo prazo devido a emissões bem mais significativas, sobretudo nos setores de energia, industrial, agropecuário e de tratamento de resíduos (ECO, 2025; WRI Brasil, 2025).

No que se refere ao gás metano, em particular, a maior parte de suas emissões ocorre no setor agropecuário e no setor de saneamento, sendo essas emissões decorrentes de processos de fermentação entérica – associada a animais ruminantes – e da decomposição da matéria orgânica presente no esgoto sanitário. No setor de saneamento, a perspectiva é que haja um aumento significativo não somente das emissões de GEEs como também do consumo de energia elétrica por sua parte, sobretudo com as metas estabelecidas pelo Marco Legal do Saneamento e pelo Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB). Esse cenário se agrava ainda mais na ausência de tecnologias que incorporem maior eficiência e sustentabilidade às estações de tratamento de esgoto, como sistemas de captura, aproveitamento e uso desses gases.

O tratamento de esgoto é um processo multifacetado e de várias etapas, caracterizado por emissão significativa de GEEs, sobretudo óxido nitroso (N_2O), gás carbônico (CO_2) e metano (CH_4). Essas emissões se dão não somente no tratamento do esgoto sanitário por si só, como também estão distribuídas por toda a cadeia de tratamento, incluindo as emissões indiretas por consumo de energia elétrica, transporte, entre outros (LAMBIASI *et al.*, 2024). Esses gases, quando não capturados ou reaproveitados, podem gerar impactos ambientais expressivos, evidenciando a necessidade de estratégias de mitigação, como a conversão do biogás em energia ou sua utilização em processos industriais.

Conforme supracitado, o setor de saneamento também apresenta perspectiva de aumento no consumo de energia elétrica nos próximos anos, a qual já representa uma parcela significativa das despesas operacionais, em especial nas Estações de Tratamento de Esgoto. No Brasil, este consumo é o segundo maior custo operacional das empresas prestadoras de serviços de água e esgoto, ficando atrás apenas das despesas com recursos humanos (METCALF, 2003). Não diferente das emissões de GEEs, a expansão dos serviços do setor de saneamento nas próximas décadas também acarretará no aumento significativo desse consumo de energia elétrica nas ETEs (METCALF, 2003).

Nesse cenário, a geração de eletricidade para autoconsumo tem se mostrado como uma solução eficiente e sustentável, especialmente nas ETEs com ampla área de atendimento e alta demanda energética. Dentre as alternativas possíveis, a recuperação e o aproveitamento energético do biogás produzido nos processos anaeróbios se destacam como uma solução estratégica, permitindo não apenas a redução dos custos operacionais com o consumo de energia elétrica, como também a redução da emissão de seus gases de efeito estufa (METCALF, 2003).

Dessa forma, no contexto das ETEs, o conhecimento das características e dos processos utilizados no tratamento de esgoto é de fundamental importância para o estabelecimento de rotas tecnológicas que sejam capazes de promover o aproveitamento energético dos gases gerados e contribuir para maior eficiência e sustentabilidade no setor de saneamento; motivo pelo qual essas características serão abordadas na seção a seguir.

3.2 Caracterização do esgoto sanitário

O esgoto sanitário é definido como o resíduo líquido constituído de esgoto doméstico e industrial, água de infiltração e contribuição pluvial parasitária em que está presente uma grande variedade de sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, metais pesados, óleos, graxas e

micro-organismos patogênicos, conforme NBR 9469 – ABNT (SILVEIRA *et al.*, 2015). Ao ser despejado nos corpos hídricos de forma indevida, esse esgoto pode causar sérios problemas ambientais, como a eutrofização desses corpos, aumento da mortalidade de peixes, disseminação de doenças, dentre outros (SILVEIRA *et al.*, 2015). O tratamento desse tipo de resíduo, portanto, é de fundamental importância para a garantia da saúde pública da população e da sustentabilidade ambiental e econômica das sociedades.

As características do esgoto sanitário exercem influência direta sobre a determinação dos processos unitários e a delimitação dos parâmetros operacionais do sistema de tratamento. A variação dessas características, a depender da sua origem (doméstica, industrial ou agrícola) e da sua composição, exige uma análise detalhada que garanta a eficiência e sustentabilidade do tratamento de forma geral. O conhecimento prévio desses parâmetros, portanto, permite um melhor dimensionamento das unidades de tratamento, bem como a escolha das tecnologias mais adequadas, resultando em um processo mais eficiente e economicamente viável (JORDÃO; PESSOA, 2011).

A concentração de matéria sólida é uma das características físicas de maior destaque em termos de projeto nas Estações de Tratamento de Esgoto. Por definição, trata-se da fração que permanece como resíduo sólido após a evaporação de toda a água presente no efluente, podendo ser classificada em detrimento da dimensão de suas partículas, da sua sedimentabilidade e de sua volatilidade (JORDÃO; PESSOA, 2011; WEF, 1999). A depender do tipo de esgoto que se esteja tratando, essas concentrações podem variar significativamente, afetando a determinação das tecnologias utilizadas no tratamento do efluente. Valores típicos para as concentrações de cada uma dessas frações em diferentes tipos de esgotos domésticos estão expressos na Tabela 1.

As concentrações destas diferentes frações, bem como a presença de sólidos flutuantes no efluente, são de caráter decisivo no projeto dos equipamentos e componentes do sistema de tratamento, como gradeamentos, caixas de gordura, tanques de sedimentação, decantadores, reatores biológicos e outros. Alguns desses parâmetros, como a concentração de sólidos voláteis, apresenta caráter decisivo no que se refere à produção de biogás e a estabilidade dos lodos biológicos gerados no processo de digestão, foco deste trabalho (JORDÃO; PESSOA, 2011). Outros parâmetros, como temperatura, pH e alcalinidade, devem ser rigorosamente controlados a fim de garantir melhor eficiência em ambos o tratamento do efluente e a produção do biogás (SILVEIRA *et al.*, 2015).

Não obstante, o conhecimento das características químicas do esgoto, como presença

Tabela 1 – Composição típica da matéria sólida no esgoto doméstico.

| Matéria Sólida | Esgoto Forte ----- | Esgoto Médio (mg/L) | Esgoto Fraco ----- |
|---------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Sólidos Totais | 1.160 | 730 | 370 |
| Sól. Susp. Totais | 360 | 230 | 120 |
| Sól. Susp. Vol. | 280 | 175 | 90 |
| Sól. Susp. Fixos | 80 | 55 | 30 |
| Sól. Diss. Totais | 800 | 500 | 250 |
| Sól. Diss. Voláteis | 300 | 200 | 105 |
| Sól. Diss. Fixos | 500 | 300 | 145 |
| Sól. Sedimentáveis | 20 | 10 | 5 |

Fonte: Silveira *et al.* (2015).

de matéria orgânica e inorgânica, desempenha papel ainda mais crucial na eficiência dos reatores. No esgoto sanitário, essa matéria orgânica compõe 70% dos sólidos presentes, dentre os quais destacam-se as proteínas (40 a 60%), os carboidratos (25 a 50%), e as gorduras e os óleos (10%). Estas classes de compostos, por sua vez, são caracterizadas por grupos de macromoléculas ou biopolímeros presentes na maior parte dos organismos vivos que, devido à sua natureza, são dificilmente degradáveis, e necessitam da atuação de micro-organismos auxiliares para sua decomposição (JORDÃO; PESSOA, 2011).

Acerca disso, é importante destacar que ambos os carboidratos e as proteínas são grupos complexos de substâncias orgânicas que podem ser reduzidos à açúcares e aminoácidos, respectivamente, os quais são responsáveis pelo fornecimento de energia e manutenção da estrutura celular necessárias para o crescimento das células microbianas. Devido a essas características, a presença e o conhecimento das concentrações destes componentes são de fundamental importância nos processos de degradação biológica. Por outro lado, a gordura que chega ao esgoto sanitário é altamente indesejável nos reatores devido ao prejuízo causado à equipamentos pela sua aderência a paredes de tubulações, produção de odores, formação de espuma e outros problemas associados (JORDÃO; PESSOA, 2011).

Ainda no que se refere à matéria orgânica presente no efluente, outro parâmetro útil para sua análise é a demanda bioquímica de oxigênio (DBO). A DBO é um parâmetro vastamente utilizado para determinação da quantidade de matéria orgânica presente no esgoto sanitário,

tratando-se de um parâmetro quantitativo associado a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar biologicamente a matéria orgânica presente em uma amostra de efluente após um determinado período de retenção, seja ele de cinco dias (DBO_5), ou até estabilização completa ($DBO_{última}$) conforme definido pela NBR 9548 (ABNT, 1986). Em termos práticos, no contexto de tratamento de esgoto, a DBO é utilizada para que se possa conhecer o grau de poluição de um efluente, interferindo no dimensionamento e determinação dos métodos utilizados no seu tratamento. Em geral, nos esgotos domésticos, esse parâmetro varia em uma faixa de 100 a 400 mg/L, desejando-se atingir valores que variem de 20 a 30 mg/L após o tratamento (JORDÃO; PESSOA, 2011; SILVEIRA *et al.*, 2015).

Além da DBO, outra terminologia também muito utilizada no controle operacional de ETEs é a Demanda Química de Oxigênio (DQO). Apesar de sua semelhança com a DBO, esta refere-se a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar quimicamente, por oxidação, a matéria orgânica presente em uma amostra de efluente. Devido ao aparelhamento e à instrumentação associados a ela, o tempo de resposta de uma análise de DQO é muito inferior às análises de DBO, podendo ser obtida em um período de até 2h, motivo pelo qual o uso deste parâmetro tem sido muito mais disseminado nas estações de tratamento do que a DBO. Diferentemente da DBO, a DQO varia tipicamente entre 200 a 800 mg/L (JORDÃO; PESSOA, 2011; SPERLING, 1996).

A DBO e a DQO são parâmetros úteis para determinação dos processos de tratamento biológico do esgoto sanitário nas ETEs, sobretudo no dimensionamento de reatores biológicos, justamente devido a sua associação com a concentração e a carga de matéria orgânica dissolvida no efluente. Apesar de existirem outras terminologias associadas à presença de carga orgânica no efluente – como a demanda total de oxigênio (DTO) e a demanda teórica de oxigênio (DTeO)–, neste trabalho serão levadas em consideração somente aquelas que apresentam disseminação mais ampla no dimensionamento dos reatores – isto é, a DBO e a DQO.

Por sua vez, presença e a quantidade de matéria inorgânica presente no efluente também é importante para seu tratamento, podendo esta se apresentar na forma de micronutrientes (como nitrogênio e fósforo) e alguns metais pesados. Tratando-se do esgoto doméstico, entretanto, a concentração desses componentes torna-se não tão relevante do ponto de vista operacional, frequentemente não havendo a inclusão de um processo para sua efetiva remoção. Elementos como nitrogênio e fósforo, por exemplo, apresentam maior concentração nos esgotos domésticos devido à sua presença em excreções humanas, como urina e fezes. Outros componentes, como

zinco (Zn), ferro (Fe), cobre (Cu) e manganês (Mn) também estão presentes, mas em menores proporções. Outros compostos inorgânicos, como areia e alguns sólidos inertes, são altamente indesejáveis para a produção de biogás e eficiência do processo de tratamento em reatores anaeróbios, causando obstrução de tubulações, acúmulo nos reatores, e inibição do processo de digestão (SILVEIRA *et al.*, 2015).

Na Tabela 2 estão mostrados alguns valores típicos relativos à concentração de matéria orgânica e inorgânica no esgoto doméstico.

Tabela 2 – Concentrações típicas de matéria orgânica e inorgânica em esgotos domésticos.

| Parâmetro | Faixa | Típico | Faixa | Típico |
|--|--------------|---------------|--------------|---------------|
| Matéria orgânica ----- mg/L ----- | | | | |
| DBO ₅ | 40 – 60 | 50 | 250 – 400 | 300 |
| DQO | 80 – 120 | 100 | 450 – 800 | 600 |
| DBO _{última} | 60 – 90 | 75 | 350 – 600 | 450 |
| Nitrogênio total | | | | |
| Nitrogênio total | 6,0 – 10,0 | 8,0 | 35 – 60 | 45 |
| Nitrogênio orgânico | 2,5 – 4,0 | 3,5 | 15 – 25 | 20 |
| Amônia | 3,5 – 6,0 | 4,5 | 20 – 35 | 25 |
| Nitrito | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 |
| Nitrato | 0,0 – 0,2 | ~0 | 0 – 1 | ~0 |
| Fósforo | | | | |
| Fósforo total | 0,7 – 2,5 | 1,0 | 4 – 15 | 7 |
| Fósforo orgânico | 0,2 – 1,0 | 0,3 | 1 – 6 | 2 |
| Fósforo inorgânico | 0,5 – 1,5 | 0,7 | 3 – 6 | 5 |

Fonte: Silveira *et al.* (2015).

Além disso, outro parâmetro que desempenha papel fundamental no tratamento de esgoto é a presença de sulfatos (SO_4^{-2}) e outros compostos orgânicos sulfonados, uma vez que a presença desses compostos compete diretamente com a produção de metano e gera produtos indesejáveis. Alguns valores típicos para a concentração de sulfato no esgoto doméstico se enquadram na faixa de 50 a 100 mg/L ou entre 20 e 50mg/L (SINGH; VIRARAGHAVAN, 1998; METCALF, 2003). A remoção de DQO devido à conversão desses compostos, portanto, também deve ser levada em consideração nas estimativas de produção de gases nos tratamentos

anaeróbios.

Por fim, as características biológicas do esgoto sanitário também desempenham papel importante em termos de projeto e dimensionamento das estações. Essas características dizem respeito principalmente à presença de bactérias, protozoários e outros organismos patogênicos e seus possíveis riscos ao corpo afluente receptor desse esgoto tratado. Apesar disso, no caso de esgotos domésticos, em particular, essas características não apresentam riscos significativos, motivo pelo qual os sistemas de tratamento mais comumente utilizados priorizaram a remoção de matéria orgânica e matéria sólida presente no efluente, não priorizando etapas de desinfecção e remoção desses patógenos (METCALF, 2003).

3.3 Processos de tratamento do esgoto sanitário

Considerando as diversas caracterizações pelas quais o esgoto sanitário é submetido, o processo de tratamento nas ETEs ocorre, de forma geral, em quatro etapas sucessivas e interdependentes, projetadas cada qual com a finalidade de remover cada uma das frações indesejáveis presentes no efluente, bem como reduzir a carga orgânica dissolvida no mesmo. Os tratamentos preliminar, primário, secundário e terciário, escalam em grau de complexidade e exigência de equipamentos, partindo de processos físicos simples até processos bioquímicos multifacetados. Embora operem de forma independente, a eficiência de cada etapa afeta diretamente o desempenho das subsequentes, demandando um projeto meticuloso e integrado para garantir a eficácia do tratamento (JORDÃO; PESSOA, 2011). Na Figura 1 está apresentado um esquema resumido do tratamento de esgotos domésticos, destacando as quatro etapas principais, seus subprodutos e as rotas tecnológicas mais comumente adotadas.

O tratamento secundário, que tem papel de destaque no aproveitamento energético do biogás, representa a última etapa do processo na maior parte das ETEs brasileiras, visto que a remoção de micronutrientes e metais pesados torna-se dispensável no caso dos esgotos domésticos, especificamente. Esta etapa é responsável pela remoção da maioria da matéria orgânica dissolvida ou em suspensão no efluente, gerando subprodutos de grande relevância econômica e ambiental. No Brasil, os tipos de tecnologias mais utilizadas para esta etapa de tratamento são lagoas de estabilização – facultativas, de maturação ou anaeróbias –, decantos-digestores e reatores biológicos, sejam eles aeróbios ou anaeróbios (SILVEIRA *et al.*, 2015; SPERLING, 1996). Por ter mais relevância no contexto do aproveitamento energético, retomaremos à discussão do tratamento secundário mais a frente.

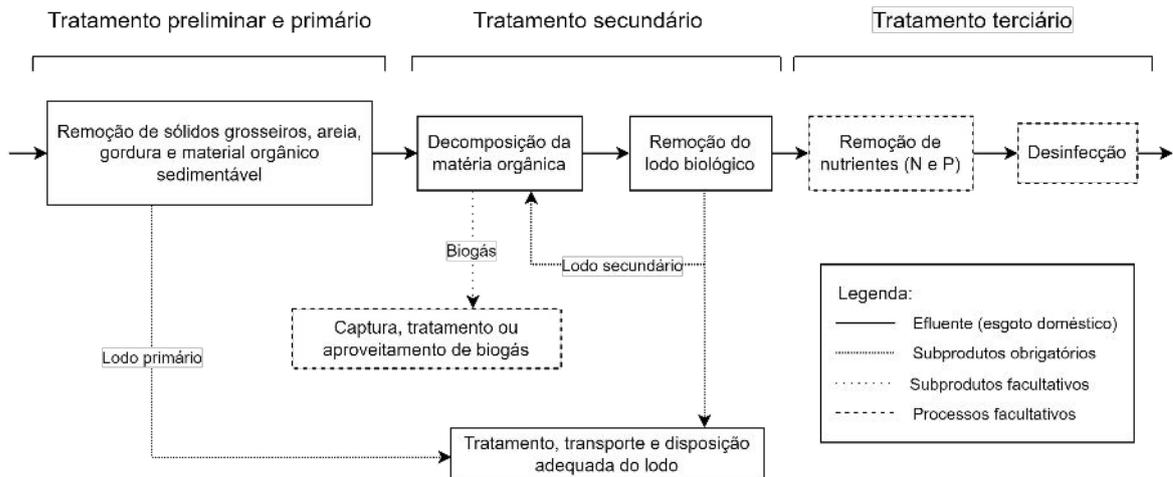


Figura 1 – Fluxograma simplificado do tratamento de esgoto nas Estações de Tratamento.

Cada um desses tipos de tratamento apresentam peculiaridades em relação às suas características, seja em termos de eficiência de remoção de carga orgânica, presença de subprodutos característicos ou demanda de área e tecnologia na sua instalação. Apesar disso, as estações de tratamento mais modernas têm priorizado a utilização de reatores biológicos nos processos de decomposição da matéria orgânica. Esses sistemas, além de apresentarem menor custo operacional, demandam menor área em comparação aos métodos tradicionais, como as lagoas de estabilização, e apresentam maior eficiência na redução da carga orgânica (CHERNICHARO, 2007). Apesar dessas vantagens, o uso desses reatores requer maior complexidade em seu projeto e operação, exigindo estudos criteriosos acerca da sua viabilidade técnica e econômica.

Entre os tipos de reatores, os anaeróbios têm sido mais amplamente utilizados que os aeróbios por apresentarem características mais vantajosas do ponto de vista econômico e operacional, como maior eficiência na remoção de carga orgânica, menor produção de sólidos, produção de biogás e produção de lodo já estabilizado no processo, o que dispensa etapas adicionais de tratamento (JORDÃO; PESSOA, 2011; SILVEIRA *et al.*, 2015). Esse tipo de tecnologia, que tem como principal característica a ausência ou escassez de oxigênio na sua operação, é capaz de remover de 60 a 70% da carga orgânica dissolvida no efluente, convertendo-a em biogás, subproduto de alto valor energético que pode ser aproveitado nas Estações de Tratamento (LOBATO, 2011; CHERNICHARO, 2007). Em contrapartida, reatores aeróbios convertem apenas 40% a 50% da matéria orgânica em dióxido de carbono, sem o benefício da produção do biogás.

Além disso, a utilização dos reatores anaeróbios é particularmente vantajosa em regiões de clima tropical e subtropical. Diversos autores, como Segezzo *et al.* (1998), Haandel

e Lettinga (1994) e Chernicaró (2007), sugerem que a microbiologia e a cinética do processo anaeróbio são favorecidas em temperaturas superiores a 20 °C, dispensando a necessidade de sistemas de aquecimento adicionais e representando uma economia significativa de energia e custos operacionais em regiões onde essas condições são atendidas. No Brasil, essas condições climáticas tornam o tratamento anaeróbio especialmente atrativo, reforçando sua viabilidade de implementação (SEGHEZZO *et al.*, 1998; HAANDEL; LETTINGA, 1994; CHERNICHARO, 2007).

Entre as tecnologias anaeróbias disponíveis no mercado, os reatores de fluxo ascendente com manta de lodo, ou UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), são amplamente utilizados por sua eficiência e compacidade. Esses sistemas operam com um fluxo ascendente de esgoto que atravessa um leito de lodo, composto por flocos ou grânulos em suspensão de alta sedimentabilidade, cuja interação com o efluente promove a degradação da matéria orgânica e uma alta eficiência na remoção de carga orgânica (JORDÃO; PESSOA, 2011; CHERNICHARO, 2007).

Estruturalmente, esse tipo de reator pode ser dividido em dois compartimentos principais, de digestão e de decantação, cujas funções desempenham papel fundamental na eficiência de remoção de carga orgânica e produção de biogás. No compartimento de digestão, as bolhas de biogás geradas durante o processo criam um fluxo ascendente até a interface gás-líquido, localizada na parte superior do reator, onde há um separador trifásico que garante a retenção do lodo e recirculação de biomassa no interior do reator, permitindo também o desprendimento e recuperação da fase gasosa. Por outro lado, no compartimento de decantação, ocorre o separação e sedimentação das partículas de lodo arrastadas junto ao fluxo ascendente, garantindo seu retorno ao compartimento de digestão (SILVEIRA *et al.*, 2015). Outros componentes, como defletores de gás, reduzem as turbulências que podem ocorrer na entrada do compartimento de decantação, garantindo a estabilidade do sistema e a eficiência do tratamento, bem como a recuperação do gás gerado no processo. Além disso, os defletores de gás reduzem turbulências no compartimento de decantação, evitando a perda de eficiência no processo. Na Figura 2 está mostrado um esquema de um reator UASB simples, bem como a síntese das funções de cada um de seus trechos e componentes.

A produção desse biogás, portanto, pode chegar a taxas de até até 0,35 Nm³ de CH₄ por kg de DQO removida (SILVEIRA *et al.*, 2015). As características desse biogás, bem como sua composição típica e parâmetros de estimativa serão discutidas na seção 3.4. Tal característica

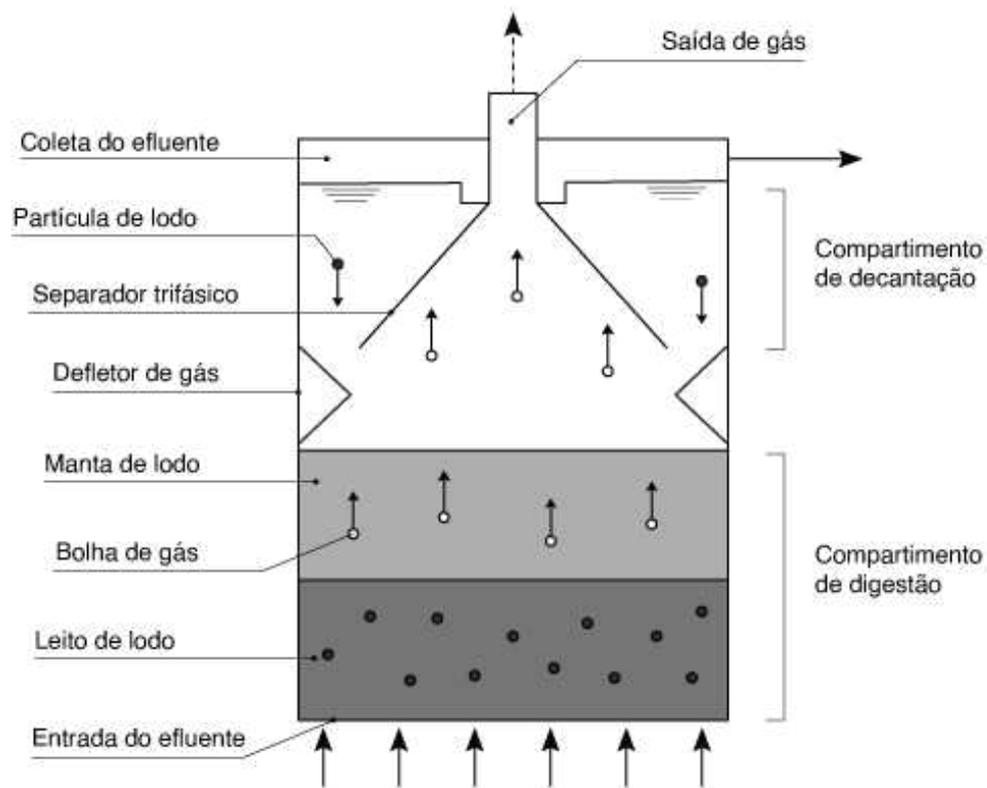


Figura 2 – Esquema simplificado de um reator UASB.

os diferencia de gerações anteriores de reatores anaeróbios, consolidando-os como uma solução eficaz e sustentável para o tratamento de esgoto sanitário.

Embora os reatores UASB apresentem inúmeras vantagens, o conhecimento das dificuldades associadas à sua operação é essencial para garantir a eficiência desse tipo de sistema. Dentre elas, pode-se destacar a sua sensibilidade à presença de sólidos e gorduras, que podem causar obstrução das tubulações e formação de espuma e comprometer a eficiência do processo. Não somente isso, os reatores UASB também são sensíveis a variações de carga e temperatura, as quais podem afetar a estabilidade da digestão e exige um controle rigoroso das condições operacionais. Outras características, como dificuldades em relação a operação e manutenção também estão presentes nesse tipo de sistema, o que requer monitoramento contínuo e ajustes frequentes para a manutenção de seu desempenho (CHERNICHARO, 2007; SILVEIRA *et al.*, 2015).

Além disso, cuidados relativos à inflamabilidade do biogás gerado também devem ser levado em consideração, sobretudo no que se refere à presença de queimadores (*flares*) nas proximidades do reator. Embora não haja uma única norma acerca desses cuidados, algumas delas estabelecem critérios acerca do uso de incineradores e outros sistemas de aproveitamento,

como a NBR 12209 (ABNT), a serem discutidos na próxima seção.

Outro desafio significativo está relacionado à gestão do lodo gerado. Apesar de o lodo excedente nos reatores UASB já estar estabilizado, este ainda necessita de secagem e desinfecção para sua disposição adequada, seja em aterros sanitários ou para reaproveitamento para produção de biofertilizantes e bio-óleos. O acúmulo excessivo de lodo dentro do reator pode impactar negativamente a eficiência do processo, reduzindo tanto a produção de biogás quanto a remoção de carga orgânica (CHERNICHARO, 2007; SILVEIRA *et al.*, 2015). Apesar disso, estudos recentes têm explorado alternativas para agregar valor ao lodo, como sua utilização em processos de geração de energia ou na fabricação de produtos de maior valor agregado.

Por fim, a eficiência do tratamento anaeróbico está diretamente ligada ao planejamento e dimensionamento adequados do sistema. Além do projeto técnico, é fundamental realizar estudos detalhados sobre as condições do efluente e os requisitos operacionais, garantindo que o sistema funcione de forma otimizada e sustentável. A adoção de reatores UASB, quando realizada com planejamento adequado, oferece uma solução eficiente para o tratamento de esgoto, promovendo a redução de impactos ambientais e o aproveitamento energético do biogás gerado.

O processo de digestão anaeróbia, que ocorre no interior nesse tipo de tratamento, é marcado por quatro etapas simultâneas e interdependentes, cada qual conduzida por grupos de micro-organismos específicos responsáveis pela metabolização dos produtos necessários para a continuidade do processo, convertendo estruturas orgânicas complexas em uma mistura de gases composta majoritariamente por metano (CH_4), CO_2 , e alguns gases residuais, como sulfeto de hidrogênio (H_2S), hidrogênio molecular (H_2), e outros. Estas quatro etapas – hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese – são responsáveis cada qual pela metabolização de compostos orgânicos intermediários que têm como fim a produção da mistura dos gases citados (SILVEIRA *et al.*, 2015).

De forma simplificada, as etapas anteriores à metanogênese tem como principal função a quebra de compostos orgânicos de maior complexidade em compostos mais simples, posteriormente convertendo-os em ácidos voláteis (AGVs – Ácidos Graxos Voláteis) e outros gases de menor massa molecular. A partir dos AGVs gerados no processo, há a formação de ácidos orgânicos de cadeia simples, como o ácido acético, que serão efetivamente convertidos em gás metano na metanogênese (CHERNICHARO, 2007; SILVEIRA *et al.*, 2015; JORDÃO; PESSOA, 2011). A descrição dessas etapas, bem como seus respectivos produtos intermediários, estão esquematizados na Figura 3.

A metanogênese, etapa final e mais importante do processo, é caracterizada pela produção de gás metano, responsável pela maior parte do poder calorífico do biogás. Nela, arqueias metanogênicas convertem o acetato e o hidrogênio obtidos nas etapas anteriores em gás metano pelas vias acetoclástica e hidrogenotrófica, respectivamente. Em ambas as vias, é obtido também CO_2 como coproduto do processo metabólico. De forma geral, sobretudo na aplicação da digestão anaeróbia em reatores biológicos, a maior parte do metano produzido é obtido pela via de conversão do acetato (SILVEIRA *et al.*, 2015).

Outro processo que também ocorre paralelamente é a sulfetogênese, que, embora indesejável, ocorre devido à presença de sulfatos dissolvidos no efluente, competindo com a metanogênese e reduzindo a concentração de metano nos produtos. Esse processo é particularmente indesejável nos processos de digestão anaeróbia por competir pelo hidrogênio disponível com a metanogênese e formar gás sulfídrico (H_2S) no processo, o que acaba por produzir forte característico odor e alta corrosividade, causando danos a equipamentos e tubulações (CHERNICHARO, 2007; SILVEIRA *et al.*, 2015).

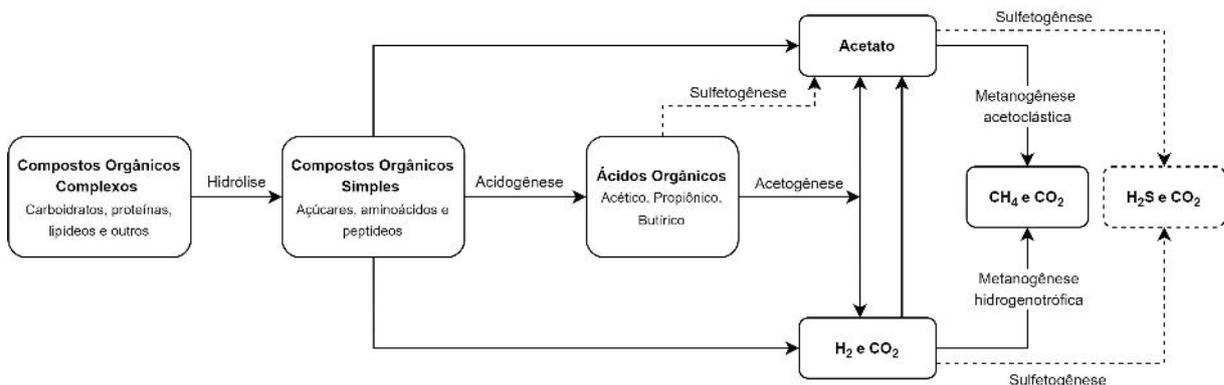


Figura 3 – Etapas do processo de digestão anaeróbia.

Na implementação desse processo em reatores biológicos, diversos fatores influenciam na sua eficiência e no processo de digestão efetivamente. Por este motivo, a determinação de parâmetros operacionais como temperatura, pH, alcalinidade, concentração e carga orgânica do efluente se torna importante no dimensionamento desses equipamentos. Nos reatores UASB em particular, esta temperatura de operação deve estar entre 30 e 35°C (faixa mesofílica) para maior produção de biogás, embora também seja utilizada a digestão termofílica, que ocorre entre 50 e 60°C (METCALF, 2003; SILVEIRA *et al.*, 2015). Outros parâmetros, como a presença de quantidades elevadas de oxigênio dissolvido (OD), amônia, compostos sulfurados e ácidos orgânicos podem influenciar negativamente no processo, atuando como inibidores da metanogênese. Os parâmetros operacionais, bem como o dimensionamento e modelos utilizados serão tratados

em uma seção posterior.

É importante ressaltar que no contexto do tratamento de esgotos sanitários, algumas etapas, em especial a hidrólise, podem ser limitadas pela presença de sólidos suspensos e material particulado no substrato a ser submetido à degradação biológica, motivo pelo qual torna-se essencial a existência de um tratamento preliminar eficiente e a remoção de sólidos sedimentáveis no primário. A implementação de reatores UASB, portanto, utiliza-se da determinação de parâmetros operacionais que devem levar em consideração as características físicas, químicas e biológicas do efluente, além do controle operacional do processo de digestão anaeróbia ao qual o substrato é submetido.

3.4 Aproveitamento energético do biogás nas ETEs

Nas ETEs, o biogás é um subproduto do tratamento secundário do esgoto obtido por meio da digestão anaeróbia da matéria orgânica e definido como a mistura gasosa constituída majoritariamente de gás metano (CH_4) e gás carbônico CO_2 . Essa mistura, entretanto, é caracterizada por sua baixa solubilidade em água, alto poder calorífico e alto potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential*). O metano, principal constituinte do biogás, é um gás altamente inflamável e de alto poder calorífico (50MJ/kg), sendo também um agravador do efeito estufa, já que possui GWP 21 vezes maior que o dióxido de carbono. Devido a isso, a maior parte das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) no Brasil, quando recupera o biogás, simplesmente o queima antes de lançá-lo para a atmosfera, reduzindo suas emissões, mas desperdiçando o alto poder calorífico do combustível (LOBATO, 2011; IPCC, 2018).

No que se refere à sua composição, esta varia de acordo com o tipo de efluente utilizado e das condições operacionais no processo de tratamento, variando tipicamente com teores de 60 a 85% de CH_4 , 5 a 15% de CO_2 e traços de outros gases, como gás hidrogênio (H_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), nitrogênio (N_2), entre outros (SILVEIRA *et al.*, 2015; BILOTTA; ROSS, 2016). Esse biogás, por apresentar em sua composição substâncias que reduzem seu poder calorífico, ainda pode passar por processos de purificação para aumentar seu teor de CH_4 e assim ser utilizado para aproveitamento energético (SILVEIRA *et al.*, 2015).

Após ser submetido a este pré-tratamento para remoção de suas principais impurezas, como umidade, siloxanos e gases corrosivos, o biogás pode então ser destinado para aplicações de geração de energia elétrica (CHP) e/ou energia térmica, como sistemas de aquecimento, resfriamento, secagem, entre outros. Nesse tipo de implementação, é necessário conhecer as

propriedades do biogás que se deseja utilizar, como composição, poder calorífico, umidade, presença de contaminantes, presença de compostos corrosivos, entre outros. Os métodos e as tecnologias implementadas no aproveitamento desse biogás, portanto, são de fundamental importância para a estimativa de suas potencialidades, seja ela na forma de obtenção de subproduto de valor agregado, geração de energia elétrica, geração de energia térmica, ou outros. Outras aplicações, como uso veicular e injeção na rede de gás natural também são alternativas de uso desse combustível, apesar de apresentarem obstáculos na legislação brasileira, que restringe a injeção do biometano obtido nas ETEs na rede de gás natural (Resolução ANP N°8, de 30.01.2015). (SILVEIRA *et al.*, 2015; LOBATO, 2011)

Apesar disso, o aproveitamento desse combustível ainda apresenta alguns fatores limitantes do ponto de vista técnico e operacional. Dentre eles, a escassez de tecnologias nacionais de aproveitamento, ausência ou escassez de investimento por parte do governo, dependência de fatores geográficos e dificuldades no armazenamento e na distribuição do gás produzido (LOBATO, 2011; SALOMON; LORA, 2009).

Além disso, conforme já descrito anteriormente, a maioria das ETEs do Brasil opta por utilizar a combustão direta desse biogás a fim de mitigar riscos de explosão, devido à sua inflamabilidade, bem como reduzir o impacto ambiental relativo ao alto potencial de aquecimento global do gás metano, convertendo-o em óxidos de carbono (CO e CO₂) e outros produtos de menor GWP. Esse tipo de tratamento do biogás é comumente aparelhado por queimadores, ou *flares*, que devem ser dimensionados minuciosamente para seu uso nas unidades de tratamento a fim de evitar explosões e outros riscos. Nesse tipo de implementação, entretanto, não ocorre o efetivo aproveitamento da energia química contida no combustível, desperdiçando-a (SILVEIRA *et al.*, 2015).

Outro método de tratamento, também utilizando-se de combustão direta, é a implementação do combustível em fornos e caldeiras, possibilitando a conversão do combustível em energia térmica e seu uso em sistemas de aquecimento ou até mesmo de cogeração. Neste segundo, pode-se utilizar a energia térmica obtida a partir da combustão direta do biogás para vaporizar um fluido de trabalho que deverá passar por uma turbina e gerar energia elétrica. Esses sistemas podem utilizar-se de caldeiras que admitem diversos tipos de combustível, sejam eles líquidos, sólidos ou gasosos, tornando o biogás uma alternativa viável. Apesar disso, a maior parte do calor gerado em processos de combustão em ciclos térmicos é perdido na forma de calor, motivo pelo qual a cogeração é uma alternativa relevante para o aumento da eficiência

térmica desse tipo de sistema, considerando e aprimorando o uso do calor rejeitado no processo (LOBATO, 2011).

Ainda, outro uso viável do biogás gerado nas ETEs é sua implementação em motores de combustão interna (MCIs) à gás. Dentre as vantagens dessa utilização, pode-se destacar a rápida inicialização, operação estável, elevado potencial de recuperação de calor e confiabilidade na operação. Além disso, devido à sua maior disseminação, também apresenta baixo custo e maior catálogo de tamanhos e capacidades. Apesar disso, alguns fatores operacionais são determinantes para otimização do processo, como temperatura e concentração do biogás utilizado. Para a maior eficiência e redução de custos desse tipo de implementação, bem como de outros, é altamente desejável que o biogás passe por processo de purificação, no qual terá seu teor de metano acrescido e serão reduzidas as frações de gases que apresentem baixo poder calorífico e alta corrosividade (SILVEIRA *et al.*, 2015).

De forma geral, O uso e aproveitamento do biogás gerado nas estações de tratamento de esgoto possibilitaria, do ponto de vista econômico, a geração descentralizada de energia, a redução dos custos associados à energia elétrica e a venda do excedente à concessionária. Do ponto de vista ambiental, possibilitaria a redução da emissão de gases de efeito estufa e geração de créditos de carbono (SALOMON; LORA, 2009). Tendo em vista os desafios e as oportunidades associados a esse tipo de implementação, a viabilidade e a análise quantitativa deste aproveitamento serão tópicos de discussão das seções seguintes.

4 METODOLOGIA

4.1 Análise de dados

Para a análise do potencial de produção de biogás e de outros parâmetros de interesse nas ETEs do Estado do Ceará, foram utilizados dados de geolocalização, vazão e consumo de energia elétrica na base de dados da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece). A classificação do grupo amostral seguiu o critério de tipo de tratamento – sistema compacto (UASB), lagoas de estabilização ou decantos digestores –, e localidade – Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) ou interior.

O Estado do Ceará possui ao todo 290 estações de tratamento de esgoto que pertenciam à Cagece em 2021. Entretanto, recentemente, a Companhia passou por processo de Parceria Público-Privada (PPP), com terceirização de serviços e operacionalização das suas ETEs, motivo pelo qual todos os dados coletados são relativos ao período imediatamente anterior à criação da PPP a fim de garantir a coleta do máximo de dados o possível. Dentre as 290 ETEs, duas delas apresentaram ausência de informações básicas necessárias para o desenvolvimento deste trabalho, como região metropolitana e tipologia de tratamento, sendo descartadas antes mesmo do tratamento de dados.

Para maior clareza na análise e tratamento, os dados utilizados nesse estudo foram divididos em três classes: Classe I – geolocalização, Classe II – vazão e Classe III – consumo de energia elétrica. É importante destacar que esses dados não necessariamente são mutualmente interdependentes ou mutualmente exclusivos, havendo estações que tinham disponíveis as três classes de dados simultaneamente e outras que não apresentavam nenhum deles.

Nas seções a seguir, serão discutidos os métodos para a obtenção e tratamento de cada uma dessas classes de dados, bem como um síntese e visão geral da disponibilidade desses dados nas Estações.

4.1.1 *Dados de georreferenciamento*

Os dados de georreferenciamento foram obtidos com base nas coordenadas geográficas correspondentes a cada uma das estações de tratamento. Esse conjunto de dados, entretanto, não correspondeu à totalidade de ETEs presentes no Estado no ano de referência. As Figuras mostram a disponibilidade desses dados por tipologia (Figura 4) e por região (Figura 5).

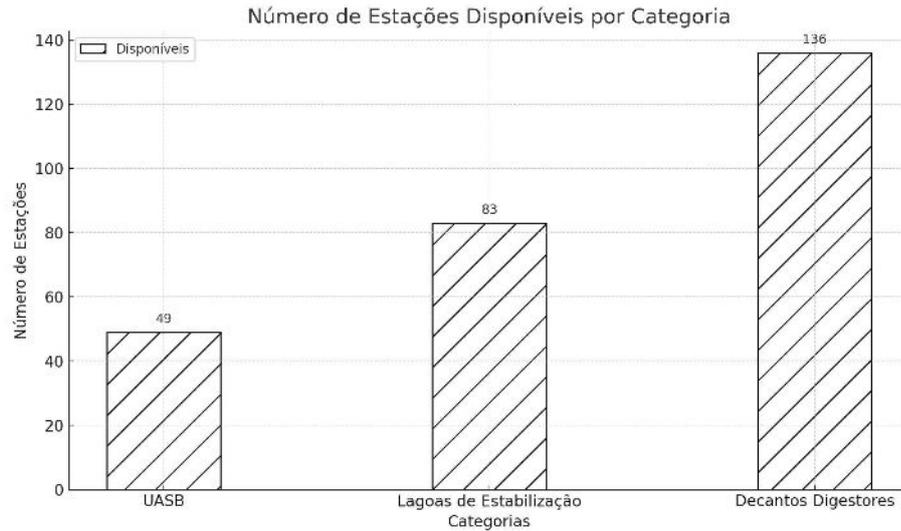


Figura 4 – Disponibilidade de dados de geolocalização por tipologia.

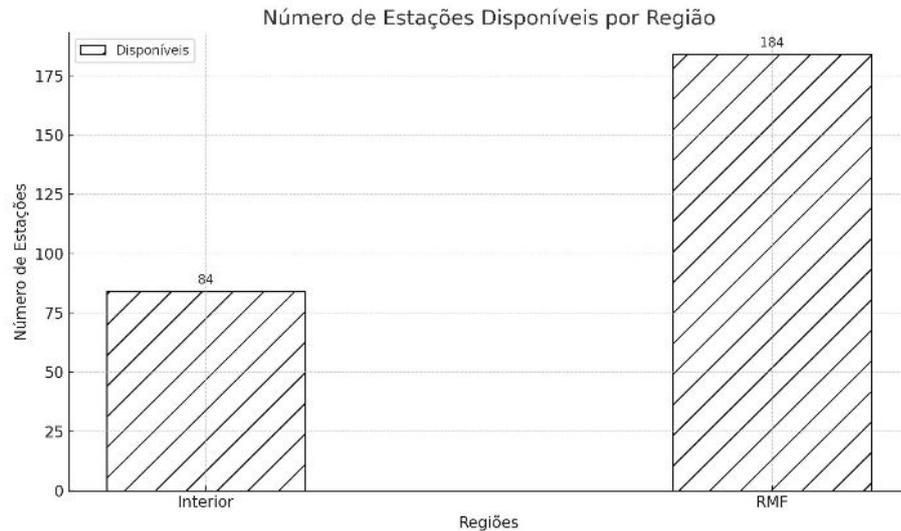


Figura 5 – Disponibilidade de dados de geolocalização por localidade.

4.1.2 Dados de vazão

A obtenção de dados de vazão das ETEs foi feita a partir das médias anuais de cada uma das estações no ano de referência. Na ausência destes dados, recorreu-se às vazões máximas e mínimas de projeto, calculando-se a média aritmética entre elas. As ETEs que não se enquadraram em nenhum desses grupos de dados foram descartadas dos cálculos de estimativa pretendidos por este trabalho. Na figura 6 está representada a disponibilidade de dados por tipo de tratamento, enquanto na Figura 7 está mostrada esta mesma disponibilidade no interior do Estado e na Região Metropolitana de Fortaleza. Vale destacar que, conforme supracitado, o conjunto de ETEs que apresentassem decantos digestores e lagoas de estabilização passariam a ser referenciados como "ETEs de sistema compacto não-instalado" nas próximas

seções deste trabalho.

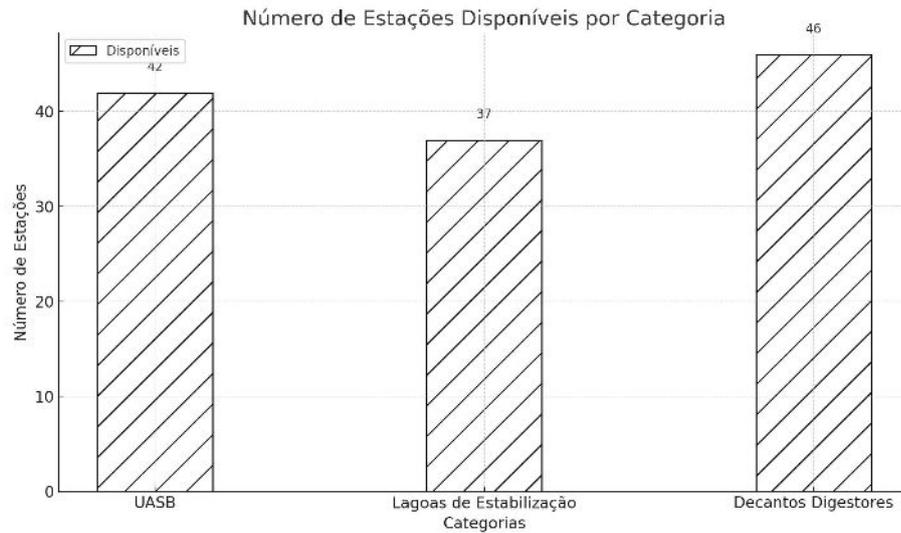


Figura 6 – Disponibilidade de dados de vazão por tipologia.

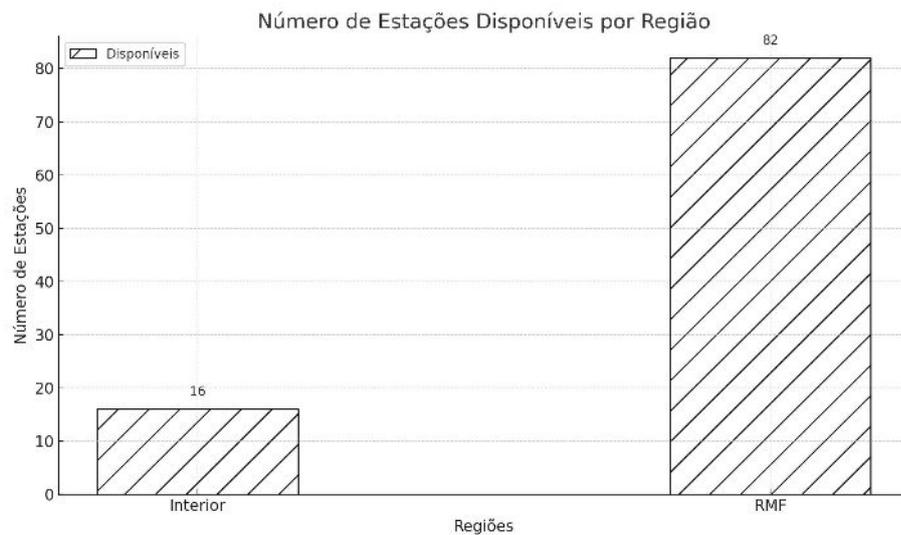


Figura 7 – Disponibilidade de dados de vazão por localidade.

4.1.3 Dados de consumo de energia elétrica

Com relação ao consumo de energia elétrica, esse conjunto de dados foi obtido a partir do somatório das faturas mensais de energia das ETEs no período de um ano, visto que o interesse deste trabalho nesta Classe de dados refere-se somente ao seu consumo anual, dispensando médias e outras operações que buscassem estimar o consumo médio mensal das ETEs. As figuras 8 e 9 mostram a disponibilidade de dados da Classe III para as ETEs do Estado por tipologia (Figura 8) e por localidade (Figura 9).

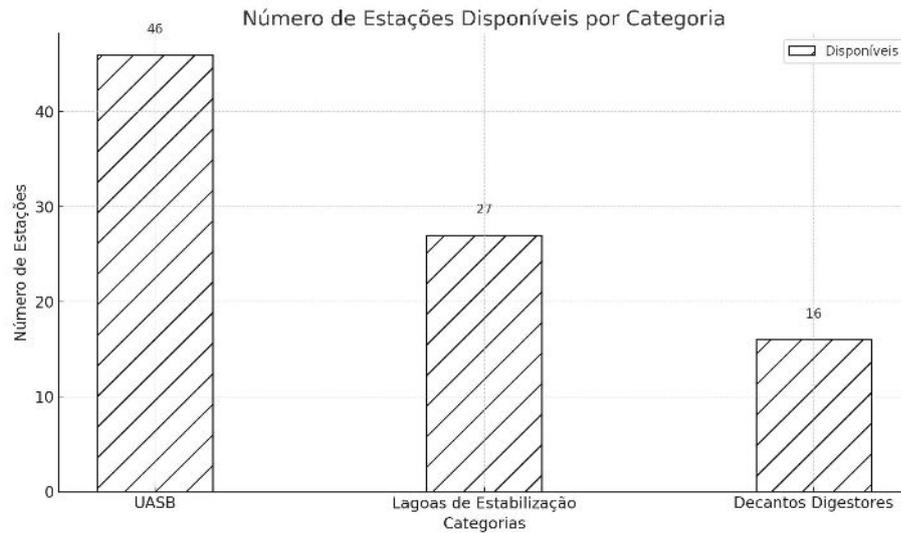


Figura 8 – Disponibilidade de dados de consumo de energia elétrica por tipologia

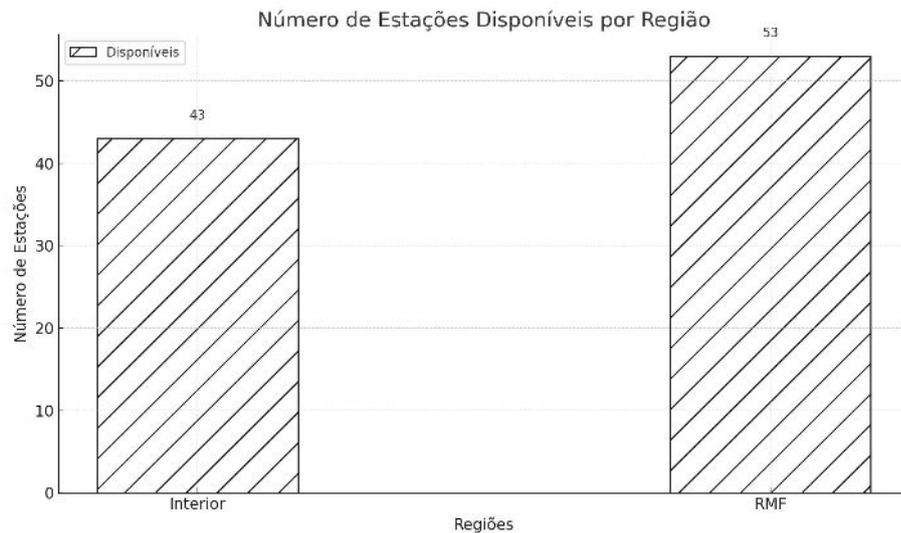


Figura 9 – Disponibilidade de dados de consumo de energia elétrica por localidade.

4.1.4 Visão geral da disponibilidade de dados

A Tabela 3 sintetiza a disponibilidade das três classes de dados utilizados na realização deste trabalho.

Tabela 3 – Disponibilidade de dados por classe.

| Classe | Qtde. de dados disponíveis |
|-----------------------------------|----------------------------|
| I - Geolocalização | 269 |
| II - Vazão | 98 |
| III - Consumo de energia elétrica | 89 |
| Total | 456 |

Conforme citado anteriormente, os dados em questão não apresentam mutualidade ou exclusividade obrigatória. Portanto, com o objetivo de evidenciar a relação entre esses conjuntos de dados em cada uma das Estações, a Figura 10 mostra essa disponibilidade e a interação dos três conjuntos entre si.

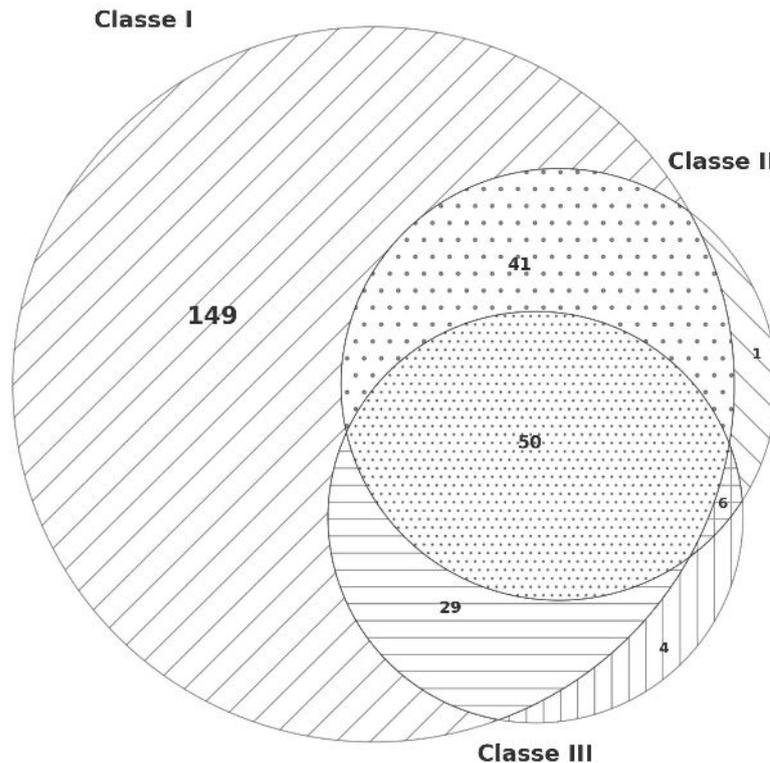


Figura 10 – Diagrama de Venn para a disponibilidade de dados nas três classes.

4.2 Mapeamento e georreferenciamento

O software QGIS foi utilizado como ferramenta de geoprocessamento para a análise espacial das estações de tratamento de esgoto da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece). A base de dados foi georreferenciada no sistema de coordenadas SIRGAS 2000 (EPSG: 4674), abrangendo 280 registros (incluindo a EPC) disponíveis de um total de 290 estações, conforme Tabela 3. O QGIS permitiu a criação de mapas temáticos para a localização das ETEs, bem como a análise da distribuição geográfica e da proximidade com áreas urbanas, facilitando a avaliação do potencial de aproveitamento energético do biogás.

4.3 Implementação de dados e obtenção de parâmetros de interesse

A estimativa de produção de biogás nos reatores foi calculada seguindo modelos utilizados na literatura, sobretudo os propostos por Lobato (2011). Em seu trabalho, em particular, foi estabelecida uma metodologia sólida e prática acerca da estimativa de produção de biogás nas Estações de Tratamento. Algumas dessas equações, entretanto, foram adaptadas para melhor adequação aos parâmetros operacionais disponíveis. Todos os parâmetros operacionais utilizados estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros e valores utilizados para estimativa de produção de biogás.

| Descrição | Símbolo | Unidade | Valor |
|---|----------------------|---------------------|--------|
| Carga orgânica do Afluente | DQO _a | mg/L | 600.0 |
| Eficiência de remoção de carga orgânica | E _{DQO} | - | 0.650 |
| Fator de metabolismo celular | Y | - | 0.150 |
| Fator de correção | K _{solid} | - | 1.420 |
| Constante de Yobs | K _{Yobs} | - | 0.213 |
| Concentração de sulfato | C _{SO4} | kg/m ³ | 0.015 |
| Eficiência de remoção de sulfato | E _{SO4} | - | 0.750 |
| Fator de conversão de sulfato | K _{DQO-SO4} | - | 0.667 |
| Fator de conversão de metano | K _{DQO} | kgDQO/mol | 0.0640 |
| Concentração de metano | C _{CH4} | % v/v | 0.650 |
| Eficiência do motogerado | E _{MCI} | - | 0.250 |
| PCI do metano | PCI _{CH4} | kWh/Nm ³ | 9.97 |

4.3.1 Estimativa da produção de biogás e metano

Para a estimativa da produção de metano devido ao tratamento anaeróbio em reatores UASB, deve-se obter um conjunto de variáveis intermediárias a fim de obter os valores pretendidos neste trabalho. A equação que estabelece a relação entre a carga orgânica do esgoto afluente ao reator e as frações nas quais ela é dividida está mostrada abaixo:

$$DQO_a = DQO_e + DQO_{\text{lodo}} + DQO_{\text{CH}_4} + DQO_{\text{SO}_4} \quad (4.1)$$

Além disso, a diferença entre a carga orgânica efluente e afluente é equivalente à

quantidade de DQO removida pelo reator, conforme equação 4.2.

$$DQO_{\text{remov}} = DQO_a - DQO_e \quad (4.2)$$

em que

DQO_a : carga orgânica do esgoto afluyente ao reator ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$);

DQO_e : carga orgânica do esgoto efluente ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$);

DQO_{lodo} : carga orgânica do esgoto afluyente convertida em lodo ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$);

DQO_{SO_4} : carga orgânica do esgoto usada para conversão de sulfato ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$).

Essa, por sua vez, pode ser calculada também pela equação abaixo:

$$DQO_{\text{remov}} = E_{DQO} \times Q_{\text{méd}} \times DQO_{\text{ent}} \quad (4.3)$$

em que

E_{DQO} : Eficiência de remoção de carga orgânica;

$Q_{\text{méd}}$: Vazão volumétrica de efluente na ETE ($\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$);

DQO_{ent} : Carga orgânica de entrada do efluente (kg/m^3).

Para o termo de conversão em lodo:

$$DQO_{\text{lodo}} = Y_{DQO} \times DQO_{\text{remov}} \quad (4.4)$$

$$Y_{DQO} = Y \times K_{\text{STV-DQO}}$$

em que

Y_{DQO} : coeficiente aplicado de produção de sólidos ($\text{kgDQO}_{\text{lodo}}/\text{kgDQO}_{\text{remov}}$);

$K_{\text{STV-DQO}}$: fator de conversão de sólidos totais voláteis ($\text{kgDQO}_{\text{lodo}} \cdot \text{kgSTV}^{-1}$);

Y : coeficiente de produção de sólidos ($\text{kgSTV} \cdot \text{kgDQO}_{\text{remov}}^{-1}$).

Além disso, para a determinação da quantidade de carga orgânica associada à produção de metano, é importante também levar em consideração a fração da DQO afluyente associada às bactérias redutoras de sulfato (BRS), fornecida pela equação:

$$DQO_{\text{SO}_4} = C_{\text{SO}_4 \text{ conv}} \times K_{DQO-\text{SO}_4} \quad (4.5)$$

onde:

DQO_{SO_4} : Carga orgânica utilizada pelas BRS na redução ($kgDQO_{SO_4} \cdot dia^{-1}$);

K_{DQO-SO_4} : DQO consumida na redução de sulfato ($kgDQO_{SO_4} \cdot kgSO_4^{-1}$).

Esta equação, entretanto, utiliza um parâmetro de conversão do sulfato presente no efluente, levando em consideração sua eficiência de remoção. Este outro pode ser calculado conforme a equação a seguir:

$$CO_{SO_4,conv} = Q_{méd} \times C_{SO_4} \times E_{SO_4} \quad (4.6)$$

na qual

$CO_{SO_4,conv}$: carga de SO_4 convertida em sulfeto ($kgSO_4 \cdot dia^{-1}$);

$Q_{méd,a}$: vazão média de esgoto afluente ao reator ($m^3 \cdot dia^{-1}$);

C_{SO_4} : concentração média de SO_4 no afluente ($kgSO_4/m^3$);

E_{SO_4} : eficiência de redução de sulfato (%).

A porção de carga orgânica associada à conversão em metano foi calculada por diferença utilizando a Equação 4.1.

Para o cálculo do volume de metano produzido na estação, utiliza-se o modelo de gás ideal, levando-se em consideração os devidos fatores de conversão associados à eficiência dos micro-organismos metanogênicos, conforme abaixo:

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4} \cdot R \cdot (273,15 + T)}{P \cdot K_{DQO} \cdot 1.000} \quad (4.7)$$

em que

Q_{CH_4} : produção volumétrica teórica máxima de metano ($Nm^3 \cdot dia^{-1}$);

DQO_{CH_4} : quantidade de carga orgânica convertida em metano ($kgDQO \cdot dia^{-1}$);

P: pressão atmosférica (1 atm);

K_{DQO} : DQO consumida para a conversão de um mol de CH_4 ($kgDQO_{CH_4} \cdot mol^{-1}$);

R: constante dos gases ($0,08206 atm \cdot L \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$);

T: temperatura operacional do reator ($25 \text{ }^\circ\text{C}$).

Para a estimativa do volume de metano obtido a partir do biogás produzido, utilizou-se a composição típica de metano no biogás, conforme Tabela 4, devido ao caráter complexo e multifatorial da composição desse gás na saída do reator, conforme exposto na seção 3.

A partir da quantidade teórica de conversão de carga orgânica em gás metano, foi possível calcular o volume total de biogás produzido, tendo como base a composição do biogás, conforme abaixo:

$$Q_{\text{biogás}} = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{C_{\text{CH}_4}} \quad (4.8)$$

em que $Q_{\text{biogás}}$ é a taxa de produção de biogás por dia, em $\text{Nm}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, e C_{CH_4} é a fração volumétrica de metano no biogás.

4.3.2 Estimativa da geração de energia elétrica

Para a estimativa da geração de energia elétrica, utilizou-se como base a composição média de metano, seu poder calorífico, e à eficiência térmica associada ao tipo de equipamento utilizado (MCI). Portanto, o potencial de energia elétrica gerado a partir dessa implementação pôde ser calculado a partir da equação:

$$\text{EEG} = E_{\text{MCI}} \times Q_{\text{CH}_4} \times \text{PCI}_{\text{CH}_4}$$

em que

EEG: energia elétrica gerada no motor de combustão interna ($\text{kWh} \cdot \text{dia}^{-1}$);

E_{MCI} : Eficiência do motor de combustão interna;

Q_{CH_4} : Volume produzido de biogás ($\text{Nm}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$);

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior do gás metano (kWh/Nm^3).

4.3.3 Estimativa da emissão de gases de efeito estufa

Para a estimativa das emissões de GEEs no processo de digestão anaeróbia do efluente, considerou-se dois cenários, nos quais o biogás é emitido para atmosfera sem qualquer tipo de tratamento (Cenário 1) e outro no qual o biogás é capturado, sofrendo combustão completa e sendo convertido completamente em dióxido de carbono (Cenário 2), conforme equação:



Para calcular a emissão e o impacto dos GEEs em (1) levando-se em consideração o GWP de cada fração do combustível, foi utilizada a seguinte expressão:

$$\text{GEE} = \sum_i \text{GWP}_i \times m_i \quad (4.10)$$

em que

GWP_i : potencial de aquecimento global (GWP) do gás (tCO₂eq/ton);

m_i : taxa mássica de produção do gás (t/dia).

Para o cálculo da massa de cada componente i do biogás, pode-se utilizar a expressão

$$m_i = \frac{d_i \times C_i \times Q_{\text{biogás}}}{1000} \quad (4.11)$$

em que

d_i : densidade do GEE nas CNTP (kg/Nm³);

C_i : fração volumétrica do GEE no biogás.

Para fins de simplificação dos cálculos, considerou-se o biogás composto somente por CH₄ e CO₂, reduzindo a expressão a

$$\text{GEE}_1 = \text{GWP}_{\text{CO}_2} \times m_{\text{CO}_2} + \text{GWP}_{\text{CH}_4} \times m_{\text{CH}_4} \quad (4.12)$$

em que

GEE_1 : quantidade equivalente de emissão de GEEs no Cenário 1 (tCO₂eq);

m_{CO_2} : quantidade de CO₂ presente no biogás e emitido para a atmosfera (t);

m_{CH_4} : quantidade de CH₄ presente no biogás e emitido para a atmosfera (t).

As massas de CO₂ e CH₄ foram calculadas de acordo com os parâmetros operacionais da Tabela 5.

No segundo cenário, entretanto, deve ser considerada a conversão do metano em CO₂, segundo a relação estequiométrica da combustão completa do combustível (Equação 4.9). A relação abaixo expressa a relação de equivalência de emissão para o segundo caso:

Tabela 5 – Parâmetros utilizados para a estimativa da emissão equivalente de GEEs.

| Parâmetro | Símbolo | Unidade | CH ₄ | CO ₂ |
|---------------------------------|---------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| Potencial de aquecimento global | GWP | tCO ₂ eq/t | 21,00 | 1,00 |
| Densidade | d | kg/Nm ³ | 0,717 | 1,975 |
| Composição volumétrica | C | % v/v | 65 | 35 |

$$GEE_2 = m_{CO_2} + 2.75m_{CH_4} \quad (4.13)$$

em que GEE_2 é a emissão equivalente de GEEs no Cenário 2 (tCO₂eq)

A emissão evitada de GEEs foi calculada segunda a expressão:

$$GEE_e = GEE_1 - GEE_2 \quad (4.14)$$

5 RESULTADOS

5.1 Mapeamento e Georreferenciamento das Estações

Como primeiro passo do estudo, realizou um levantamento acerca da distribuição geográfica das Estações de Tratamento no Estado, conforme dados disponíveis (Tabela 3). Na Figura 11 está mostrada essa distribuição para cada uma das ETEs no Estado do Ceará, como também evidenciada a grande concentração dessas Estações na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF).

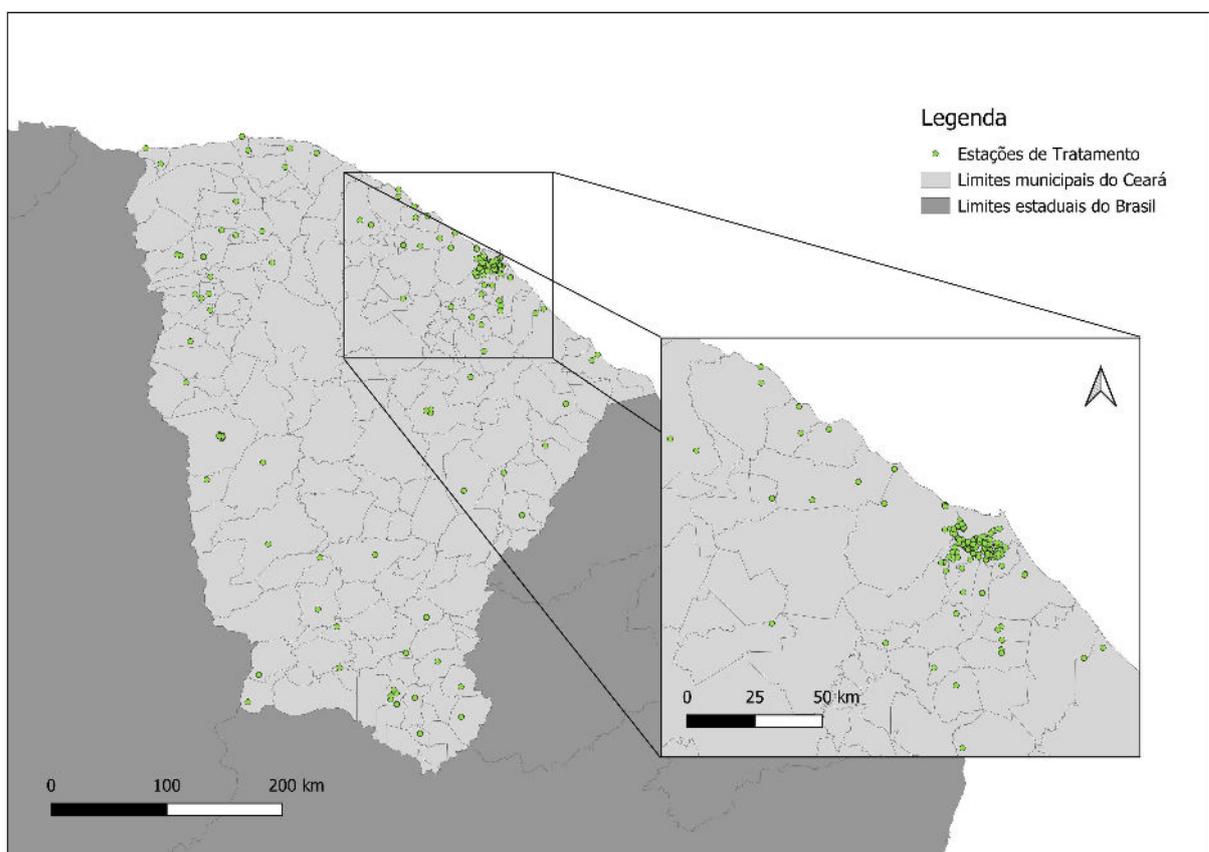


Figura 11 – Mapa de distribuição das ETEs no CE.

A grande concentração de Estações na RMF e na cidade de Fortaleza se justifica na maior densidade populacional oferecida pela região, fazendo-se necessário um maior número de estações para atender a população.

A fim de apresentar maior clareza na visualização e interpretação dessa distribuição, a Figura 12 mostra essa mesma distribuição levando em consideração a densidade das ETEs para cada um dos municípios do Estado. Fica evidente, portanto, na Figura 12, a discrepância entre o número de ETEs nos município, tendo o município de Fortaleza concentrado 47,7% das ETEs

georreferenciadas.

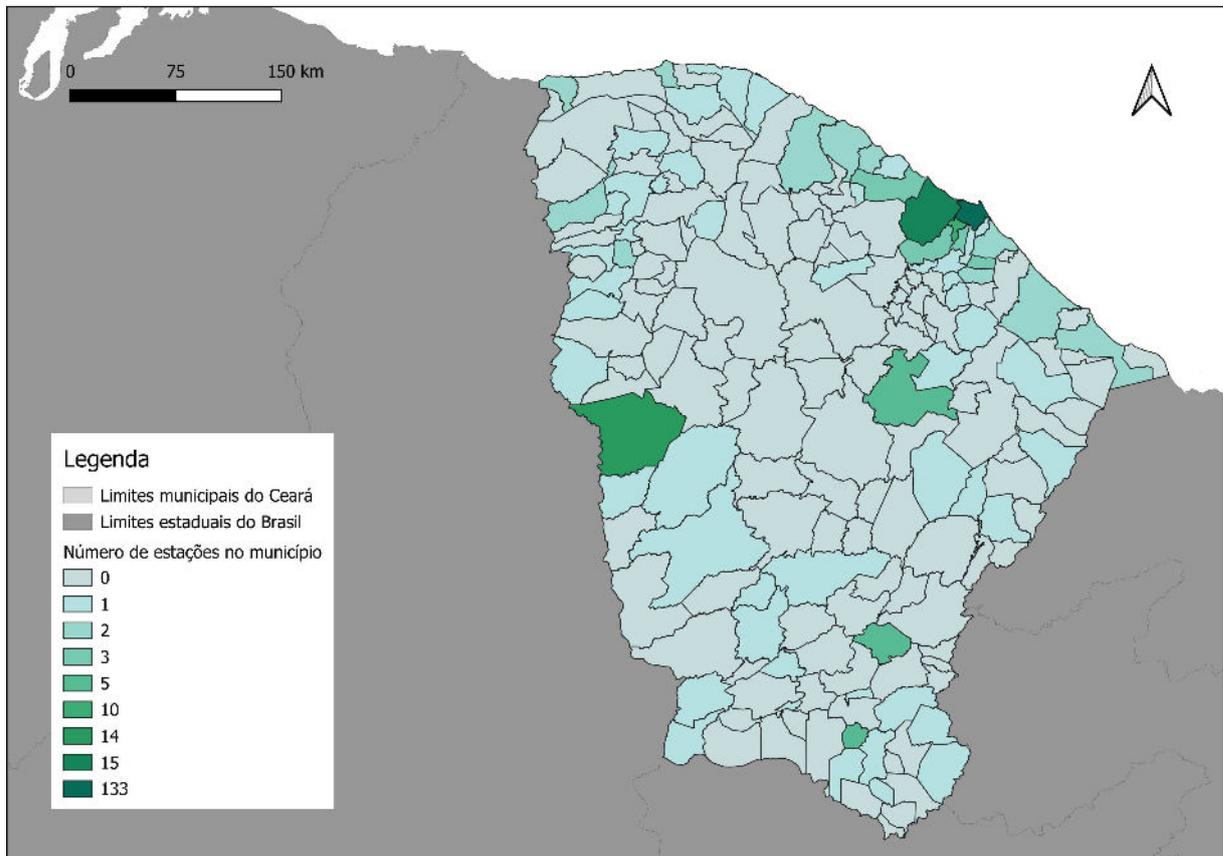


Figura 12 – Mapa de densidade de ETEs no CE por município.

A seguir, na Figura 13, está mostrada a distribuição das ETEs por tipo de tratamento, mostrando a relativa baixa disseminação das ETEs com Sistemas Compactos no interior do Estado, estando concentrada a maioria delas também na RMF, e principalmente na cidade de Fortaleza. Essas estações, entretanto, estando concentradas próximas à grandes centros urbanos, fornece benefícios do pontos de vista operacional, sobretudo no que se refere à transporte e manutenção.

5.2 Consumo de Energia Elétrica

De forma semelhante, foi também realizado o mapeamento do consumo de energia elétrica nas ETEs do estudo, conforme mostrado na Figura 14, que evidencia esse consumo por município.

Além disso, o consumo total, em kWh, e o valor pago, em R\$, associado ao consumo de energia elétrica da Companhia nas Estações de Tratamento de Esgoto estão mostrados na

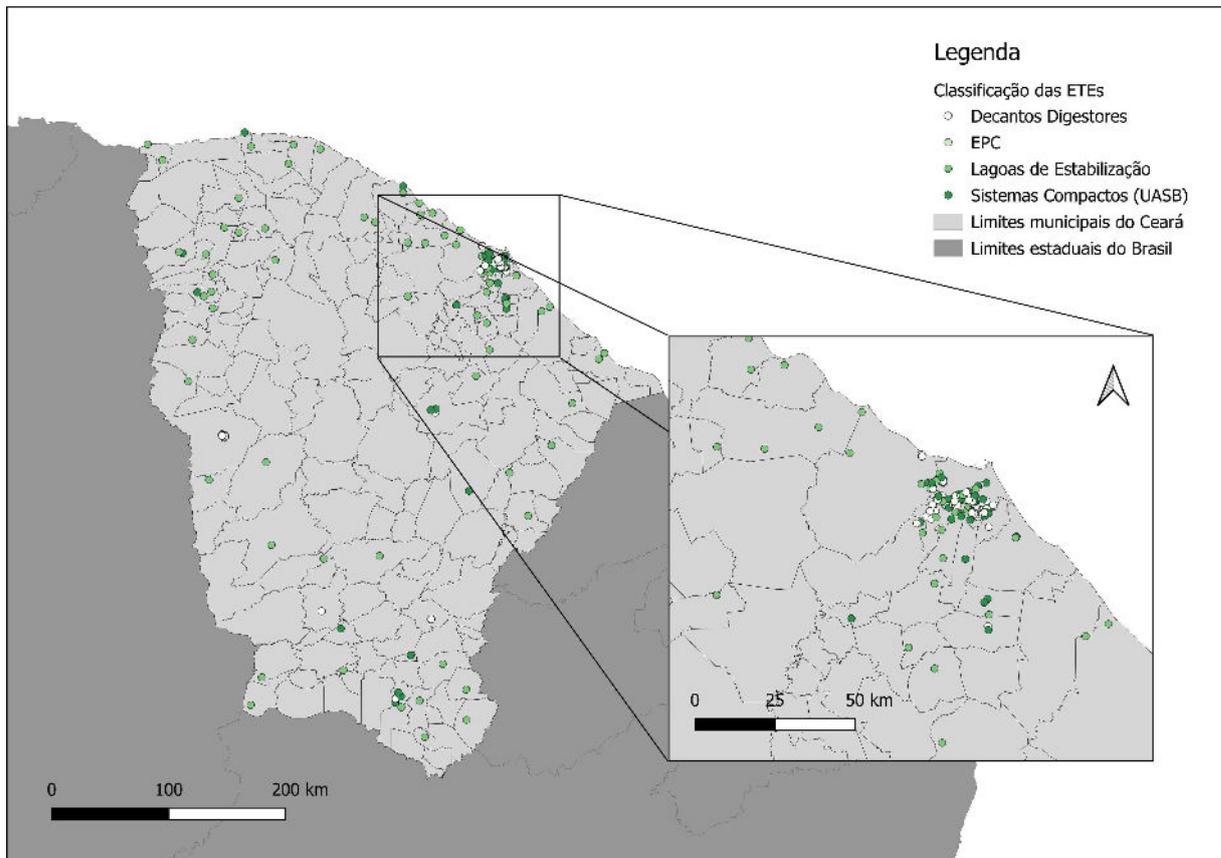


Figura 13 – Mapa da distribuição das ETEs no CE por tipologia.

Tabela 6. Para a determinação da economia percentual devido ao aproveitamento do biogás, foi calculado o valor da tarifa média com base nos valores pagos nas faturas de energia elétrica por parte da Companhia, valor esse adotado como R\$ 0.67 /kWh. Na Tabela 6 está mostrado o consumo de energia por região.

Tabela 6 – Consumo e custo total associado à energia elétrica nas ETEs do CE.

| | Consumo total de Energia (kWh) |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Interior do Estado | 1,106,498.63 |
| Região Metropolitana de Fortaleza | 8,206,472.08 |
| Não-informado | 189,821.50 |
| Total Geral | 9,502,792.21 |

Pode-se notar, portanto, que de forma semelhante à distribuição geográfica das Estações, grande parte do consumo elétrico da Companhia se concentra na Região Metropolitana de Fortaleza, sobretudo em Fortaleza, a qual apresenta consumo superior a 10GWh de energia em 2021, corroborando com a quantidade de estações concentradas na região.

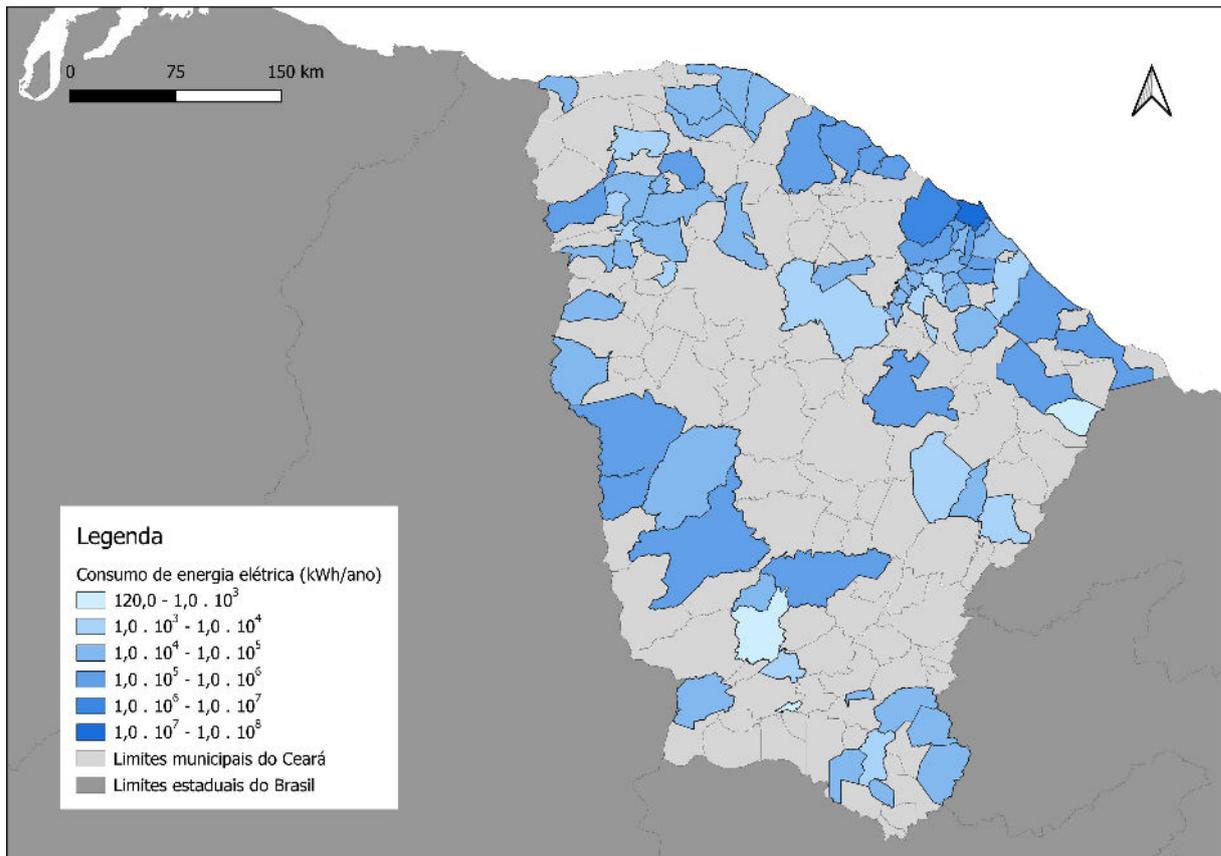


Figura 14 – Mapa do consumo de energia elétrica nas ETEs por município.

Vale destacar também que, conforme Figura 10, esses valores não correspondem às mesmas ETEs do estudo de produção de biogás em sua totalidade, e sim somente às mesmas regiões do Estado, o que supõe uma integração desse rede de consumo para a redução de custos proposta na última seção.

5.3 Produção de biogás

Após a implementação dos modelos e equações estabelecidas, pôde-se realizar uma análise de dados acerca dos parâmetros de interesse. Como primeira etapa deste levantamento, foi realizado o cálculo do potencial de produção de biogás em todas as ETEs de interesse, bem como o volume de metano a ele associado. Na Tabela 7 estão expressos os resultados obtidos a partir desse levantamento. Vale destacar que são necessários somente dados de vazão para a realização dessa estimativa, utilizando-se o terceiro conjunto de dados, com 98 ETEs.

Não apenas isso, a fim de entender a distribuição desse potencial de geração, nas Figuras 15 e 16 está mostrada a produção de biogás em cada uma das ETEs do estudo, bem como os municípios de maior produção associada.

Tabela 7 – Potencial de produção de biogás e metano no CE por região e tipologia.

| | Biogás (Nm ³ /dia) | Metano (Nm ³ /dia) |
|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Interior do Estado | 3,633.72 | 2,361.92 |
| Instalado | 1,225.92 | 796.85 |
| Não-instalado | 2,407.80 | 1,565.07 |
| Região Metropolitana de Fortaleza | 30,595.08 | 19,886.80 |
| Instalado | 7,584.04 | 4,929.63 |
| Não-instalado | 23,011.03 | 14,957.17 |
| Total Geral | 34,228.79 | 22,248.71 |

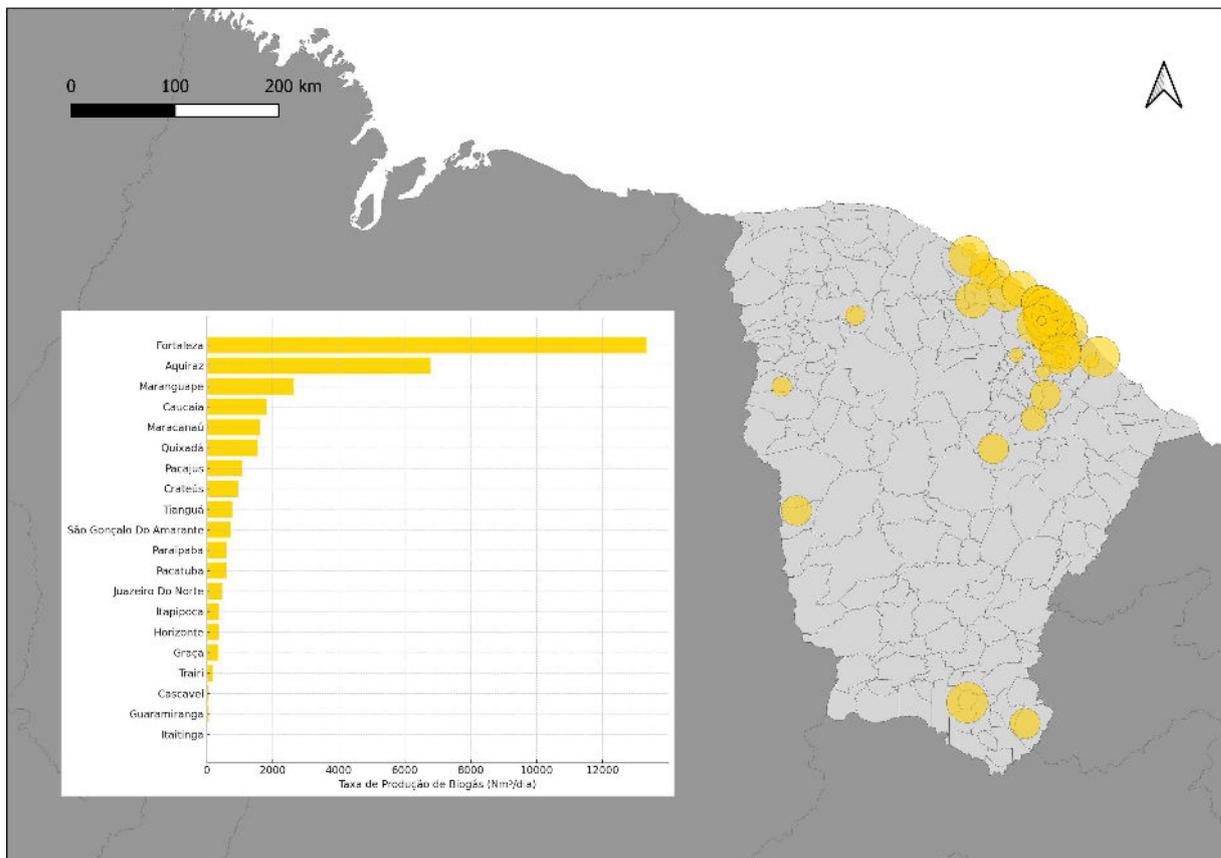


Figura 15 – Mapa do potencial de Produção de biogás no CE.

Pode-se perceber que a maior parte da produção de biogás e metano se concentra também na Região Metropolitana de Fortaleza, sobretudo nas redondezas da capital, justamente devido à maior concentração das ETEs e maior vazão de efluente na região. Esse padrão se perpetuará não somente na produção de biogás e metano, como também na estimativa de todos os outros parâmetros abordados na metodologia.

Na Figura 17 também estão mostrados dados acerca da produção de biogás, mas

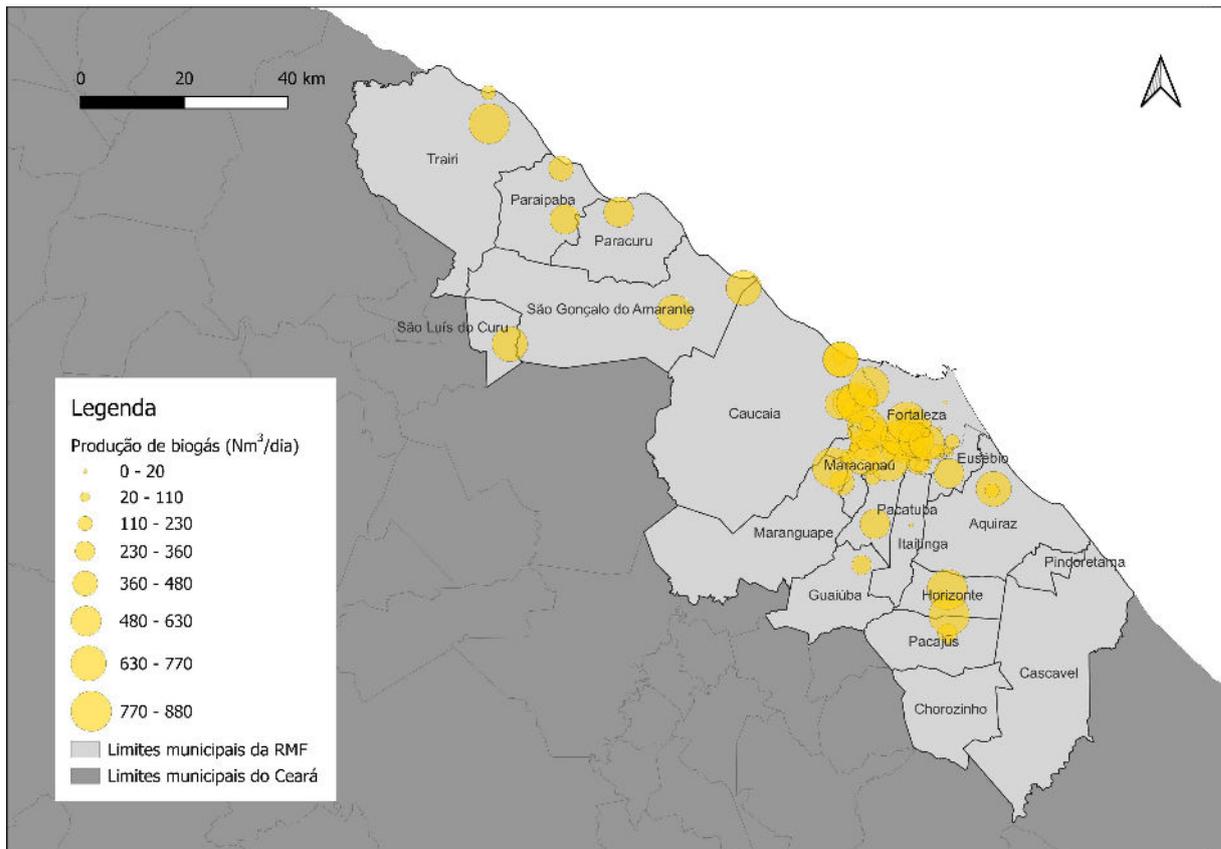


Figura 16 – Mapa do potencial de produção de biogás na RMF.

relativos somente ao potencial já instalado; isto é, mostrando as estações que já possuíam sistemas compactos UASB nas suas instalações.

5.4 Geração de energia elétrica

Após a implementação dos modelos propostos, obteve-se os resultados para geração de energia elétrica, conforme região e tipo, expressos na Tabela 8.

Tabela 8 – Potencial de geração de energia elétrica no CE por região e tipologia.

| Geração de energia elétrica (kWh/dia) | |
|--|-----------|
| Interior do Estado | 9,057.04 |
| Instalado | 3,055.60 |
| Não-instalado | 6,001.44 |
| Região Metropolitana de Fortaleza | 76,258.23 |
| Instalado | 18,903.23 |
| Não-instalado | 57,355.00 |
| Total Geral | 85,315.26 |

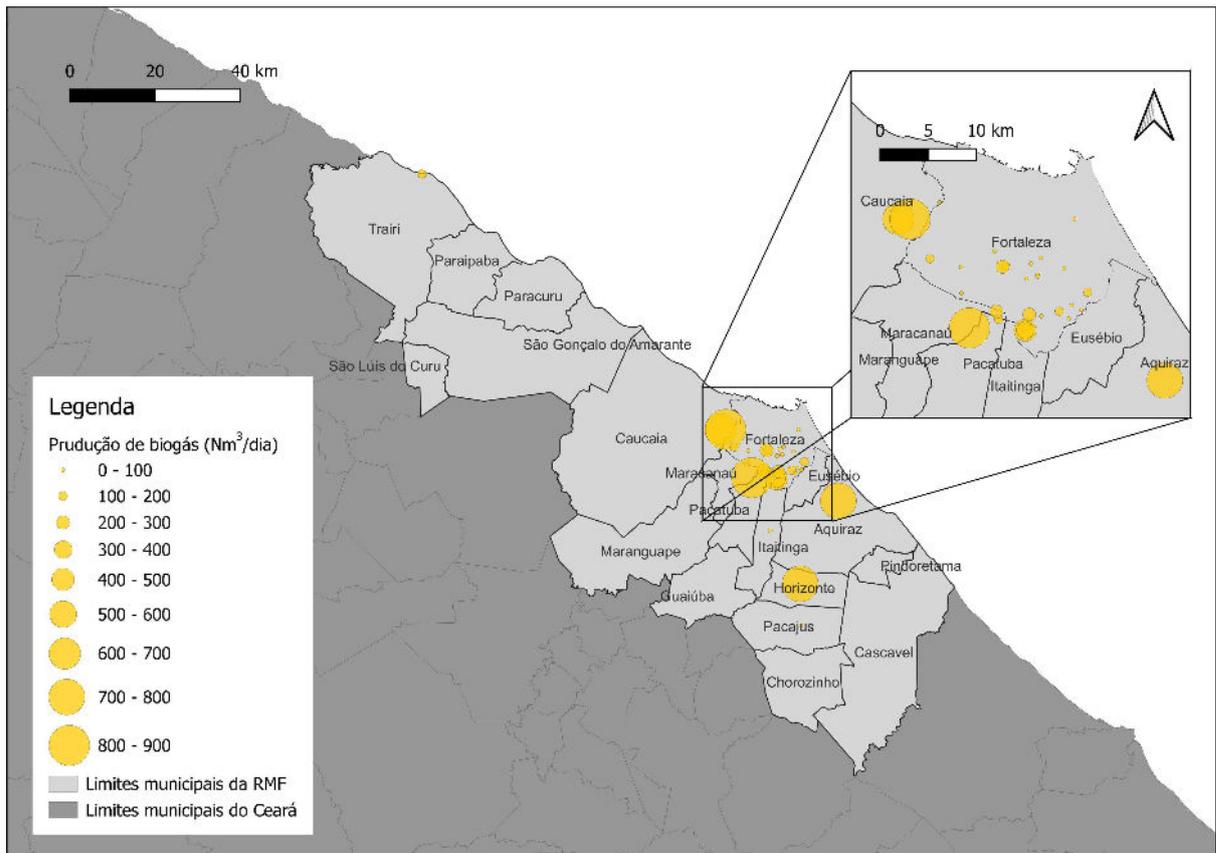


Figura 17 – Mapa do potencial instalado de produção de biogás na RMF.

Após o levantamento, também foi realizado o georreferenciamento acerca dessa geração no Estado como um todo e na Região Metropolitana, conforme Figuras 18 a 20.

Novamente, grande parte da geração de energia elétrica devido a esse aproveitamento se concentra na RMF e nas redondezas de Fortaleza.

5.5 Emissão de Gases de Efeito Estufa

Conforme discutido, foram considerados dois cenários para a estimativa da emissão de gases de efeito estufa nas estações, bem como para a estimativa da emissão evitada. Para o Cenário 1, em que não há recuperação ou aproveitamento do biogás gerado, os resultados estão representados na Tabela 9, que mostra estes, em tCO₂eq, para cada uma das regiões propostas, bem como para cada tipo de instalação.

Nas Figuras de 21 a 23 está mostrada a distribuição dessas emissões nas ETEs do Estado no Cenário 1, bem como os valores associados aos municípios e à RMF.

No Cenário 2, o perfil de distribuição e o georreferenciamento são idênticos ao anterior devido à proporcionalidade desses valores, motivo pelo qual não foram gerados mapas para este

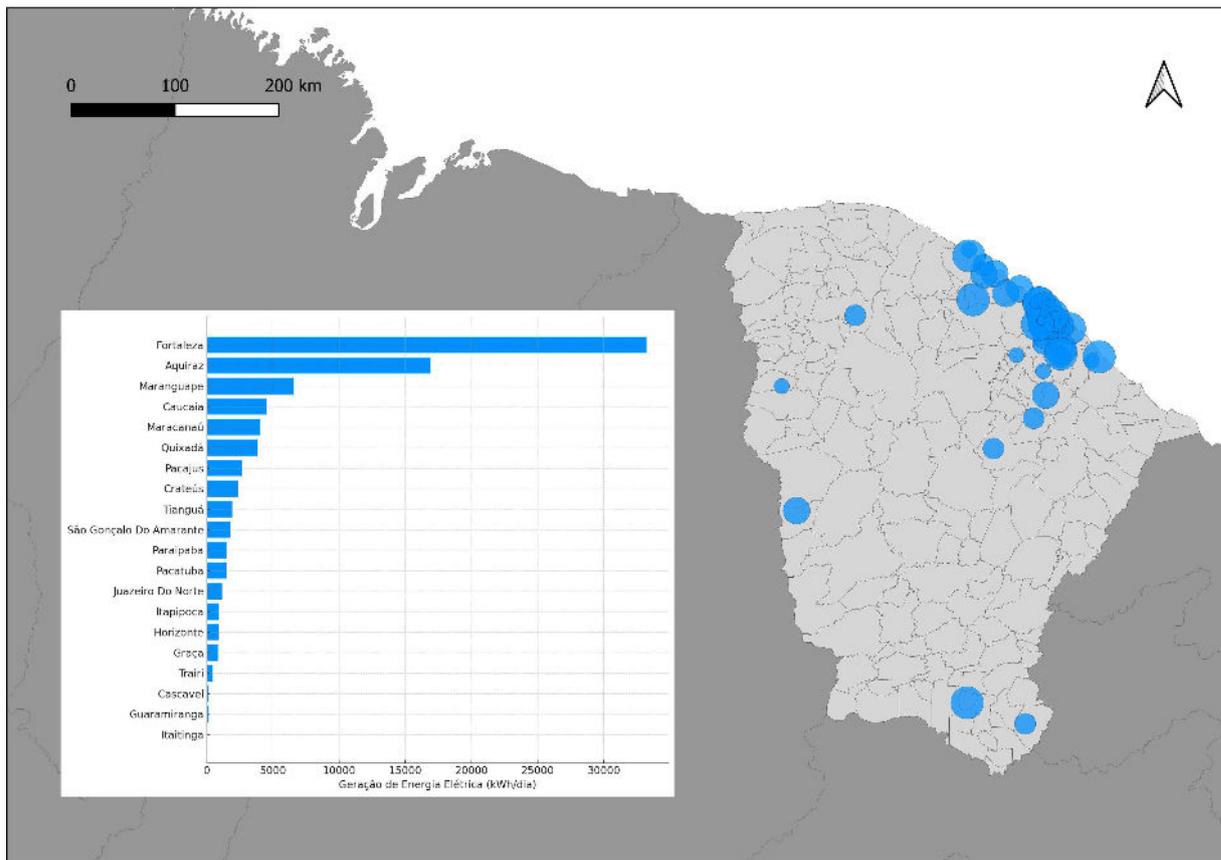


Figura 18 – Mapa do potencial de geração elétrica total no CE.

Tabela 9 – Emissão de GEEs nas ETEs do CE (Cenário 1).

| Emissão de gases de efeito estufa (tCO ₂ eq/ano) | |
|---|------------|
| Interior do Estado | 13,899.24 |
| Instalado | 4,689.22 |
| Não-instalado | 9,210.02 |
| Região Metropolitana de Fortaleza | 117,028.54 |
| Instalado | 29,009.56 |
| Não-instalado | 88,018.99 |
| Total Geral | 130,927.79 |

cenário. Apesar disso, na Tabela 10 estão mostrados os dados da emissão de GEEs para o cenário 2.

Novamente, essas emissões seriam decorrentes da implementação de reatores UASB em todas as 98 UASB do estudo, o que não representa a realidade atual. A emissão de GEEs devido ao potencial já instalado corresponde uma fração do total, correspondente a 6,344.66 tCO₂eq.

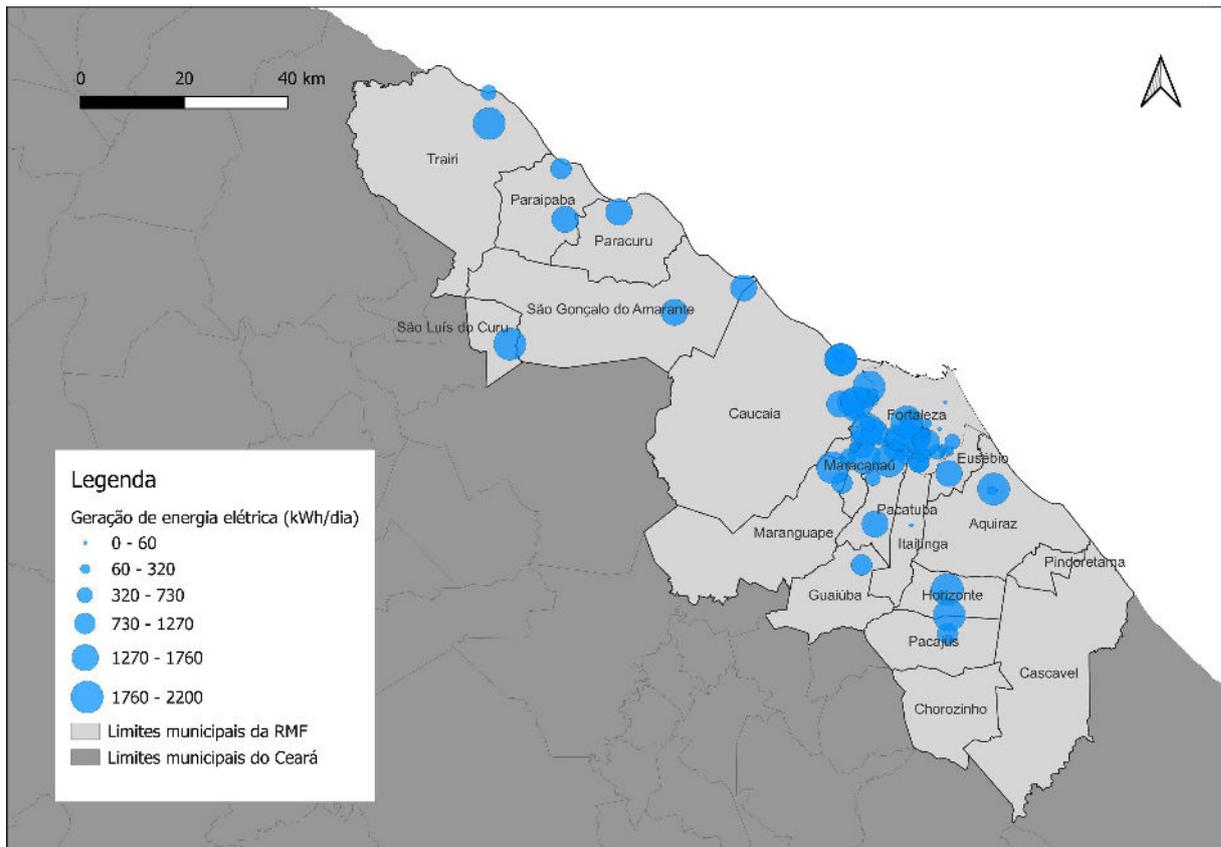


Figura 19 – Mapa do potencial de geração de energia elétrica total na RMF.

Tabela 10 – Emissão de GEEs nas ETEs do CE (Cenário 2).

| Emissão de gases de efeito estufa (tCO ₂ eq/ano) | |
|---|-----------|
| Interior do Estado | 2,616.89 |
| Instalado | 882.87 |
| Não-instalado | 1,734.02 |
| Região Metropolitana de Fortaleza | 22,033.63 |
| Instalado | 5,461.79 |
| Não-instalado | 16,571.84 |
| Total Geral | 24,650.52 |

Na Tabela 11 estão expressos dados acerca da emissão evitada de GEEs decorrentes da recuperação e combustão completa do biogás:

Vale destacar que tanto no Cenário 1 quanto no Cenário 2, os dados apresentados representam a emissão total de gases de efeito estufa caso as 98 ETEs apresentassem sistemas compactos nas suas instalações. Entretanto, somente 42 das ETEs possuem esse tipo de instalação. Portanto, o resumo das emissões reais de GEEs correspondente somente ao potencial já instalado são mostrados na Tabela 11.

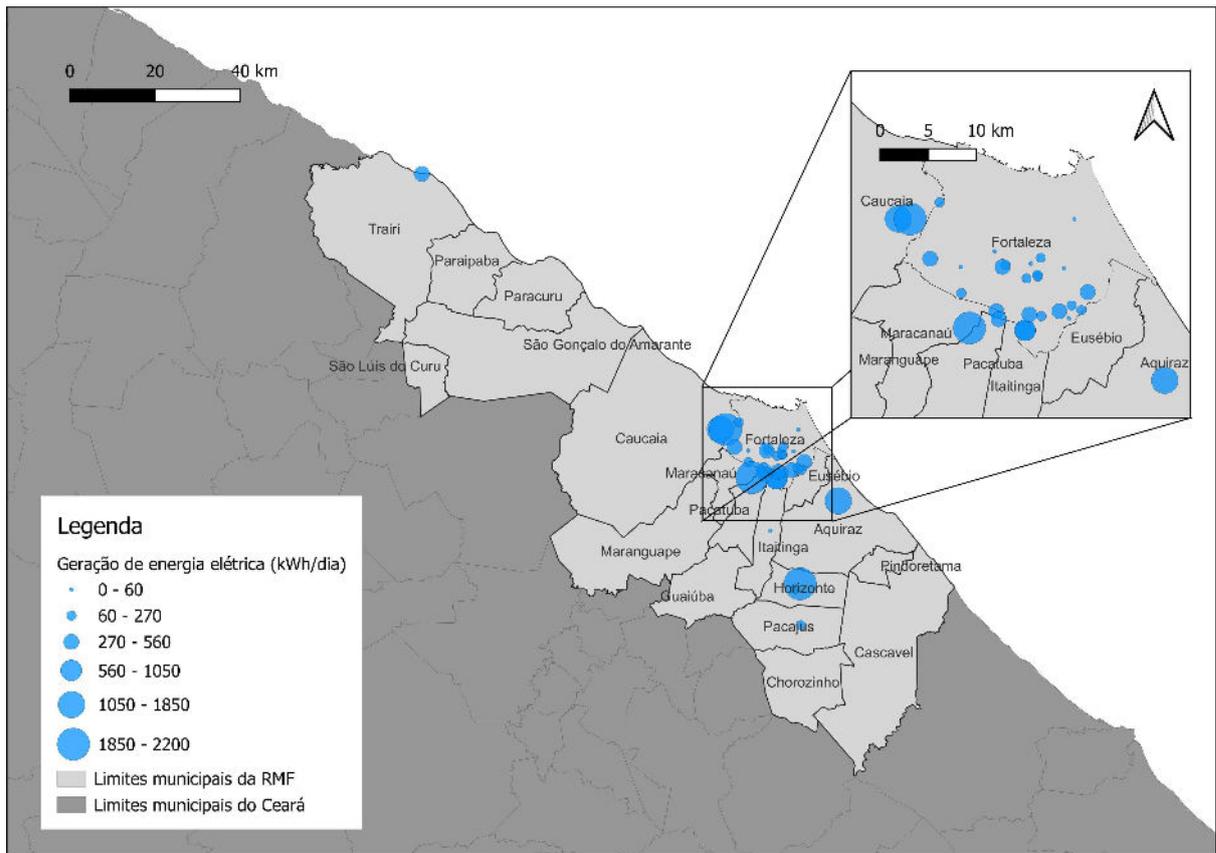


Figura 20 – Mapa do potencial de geração de energia elétrica instalada na RMF.

Tabela 11 – Emissões evitadas de GEEs nas ETEs do CE .

| | Emissão de gases de efeito estufa (tCO ₂ eq/ano) |
|--|---|
| Interior do Estado | 11,282.35 |
| Instalado | 3,806.36 |
| Não-instalado | 7,476.00 |
| Região Metropolitana de Fortaleza | 94,994.91 |
| Instalado | 23,547.76 |
| Não-instalado | 71,447.15 |
| Total Geral | 106,277.27 |

Em todos os casos, pode-se perceber uma redução significativa na emissão desses gases entre esses dois cenários, o que leva a uma redução de 81,2% na emissão de gases de efeito estufa por parte da Companhia.

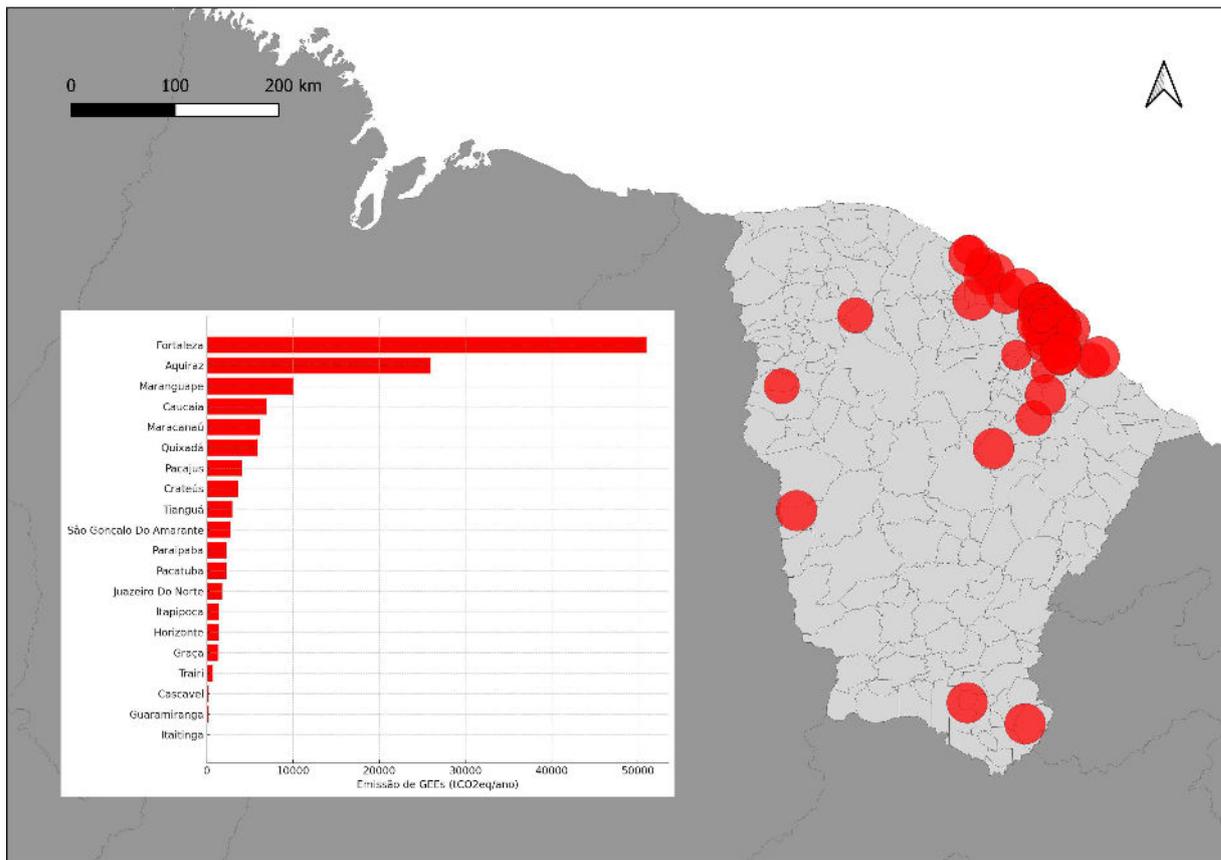


Figura 21 – Mapa da emissão total de gases de efeito estufa no CE.

5.6 Economia de energia elétrica

Na Tabela 13 estão mostrados dados acerca da economia de energia elétrica propiciada pelo uso do biogás como combustível nas Estações de potencial já instalado: Os valores

Tabela 12 – Economia de energia elétrica devido ao potencial instalado no CE.

| | Consumo (kWh/ano) | Geração (kWh/ano) | Economia (kWh/ano) |
|--|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Interior do Estado | 1,106,498.63 | 1,115,294.00 | + 8,795.37 |
| Região Metropolitana de Fortaleza | 8,206,472.08 | 6,899,678.95 | - 1,306,793.13 |
| Não-informado | 189,821.50 | | - 189,821.50 |
| Total Geral | 9,502,792.21 | 8,014,972.95 | - 1,487,819.26 |

negativos representam déficits no consumo de energia elétrica, representando uma geração ainda inferior ao consumo das ETEs na região. Em contrapartida, os valores positivos representam saldos nas faturas de energia elétrica, representando energia que pode ser armazenada, redistribuída ou até mesmo negociada com a concessionária de energia local.

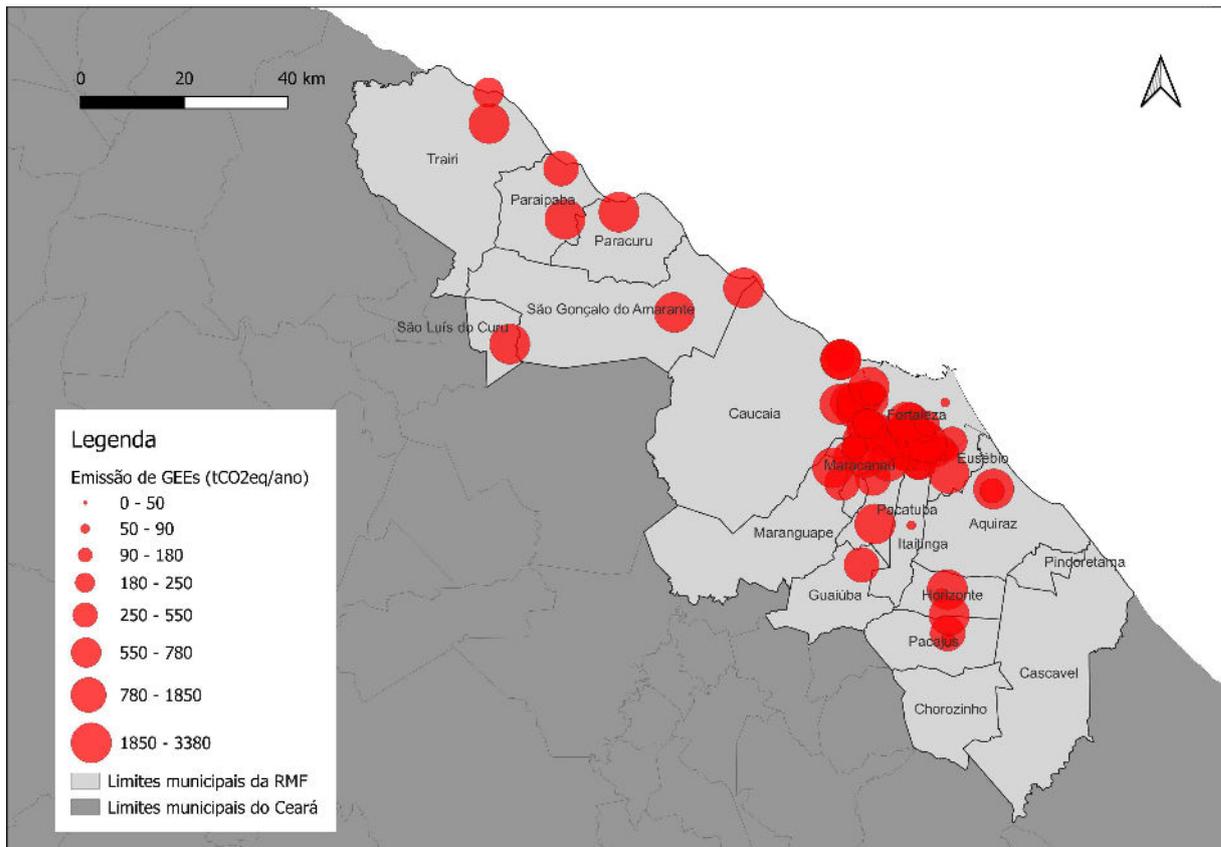


Figura 22 – Mapa da emissão total de gases de efeito estufa na RMF.

Pode-se notar, entretanto, que o interior apresentou bônus em relação ao consumo de energia elétrica total, tornando o autoconsumo uma opção viável. Entretanto, a RMF apresentou déficit no que se refere a esse consumo, possivelmente devido à presença de estações mais onerosas, como a Estação de Pré-Condicionamento (EPC) e também à maior concentração de ETes na capital do Estado e nas suas redondezas.

Os valores não informados referem-se às faturas de energia elétrica associadas às ETes que não apresentavam referência às ETes especificadas no estudo, sendo levadas em consideração somente na estimativa da economia total no consumo de energia elétrica por parte da Companhia.

5.6.1 Visão geral dos resultados

A partir dos resultados obtidos, nas Tabelas 14 e 15 estão sintetizados os resultados para o potencial já instalado e o potencial disponível no Estado do Ceará, respectivamente. Nas Figuras de 24 a 27 estão mostrados gráficos comparativos entre os potenciais instalado e disponível nas ETes do estudo. Na Figura 28 está mostrado um comparativo entre os dois

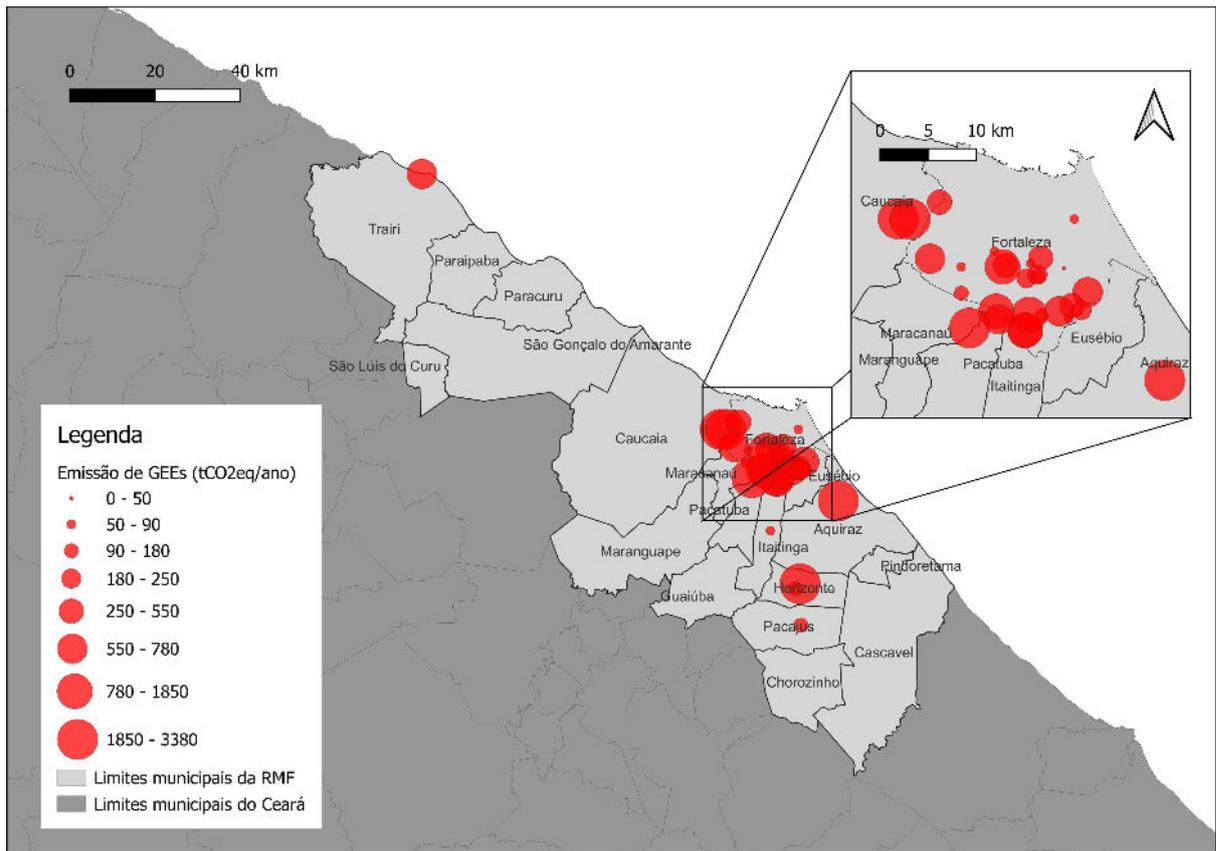


Figura 23 – Mapa da emissão instalada de gases de efeito estufa na RMF.

Tabela 13 – Economia de energia elétrica devido ao potencial disponível no CE.

| | Consumo (kWh/ano) | Geração (kWh/ano) | Economia (kWh/ano) |
|--|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Interior do Estado | 1,106,498.63 | 3,305,818.24 | + 2,199,319.61 |
| Região Metropolitana de Fortaleza | 8,206,472.08 | 27,834,252.64 | + 19,627,780.56 |
| Não-informado | 189,821.50 | | - 189,821.50 |
| Total Geral | 9,502,792.21 | 31,140,070.88 | + 21,637,278.67 |

cenários de aproveitamento.

A partir disso, é possível realizar uma análise quantitativa e qualitativa acerca da viabilidade da implementação desses sistemas nas ETEs do estudo, conforme discutido a seguir.

Tabela 14 – Resumo das estimativas do potencial instalado.

| Estimativa | Unidade | Interior | RMF | Total |
|-----------------------------|----------------------|----------|-----------|-----------|
| Produção de biogás | Nm ³ /dia | 1,225.92 | 7,584.04 | 8,809.96 |
| Produção de metano | Nm ³ /dia | 796.85 | 4,929.63 | 5,726.47 |
| Geração de energia elétrica | kWh/dia | 3,055.60 | 18,903.23 | 21,958.82 |
| Emissão de GEEs (Cenário 1) | tCO ₂ eq | 4,689.22 | 29,009.56 | 33,698.78 |
| Emissão de GEEs (Cenário 2) | tCO ₂ eq | 882.87 | 5,461.79 | 6,344.66 |

Tabela 15 – Resumo das estimativas do potencial disponível.

| Estimativa | Unidade | Interior | RMF | Total |
|-----------------------------|----------------------|-----------|------------|------------|
| Produção de biogás | Nm ³ /dia | 3,633.72 | 30,595.08 | 34,228.79 |
| Produção de metano | Nm ³ /dia | 2,361.92 | 19,886.80 | 22,248.71 |
| Geração de energia elétrica | kWh/dia | 9,057.04 | 76,258.23 | 85,315.26 |
| Emissão de GEEs (Cenário 1) | tCO ₂ eq | 13,899.24 | 117,028.54 | 130,927.79 |
| Emissão de GEEs (Cenário 2) | tCO ₂ eq | 2,616.89 | 22,033.63 | 24,650.52 |

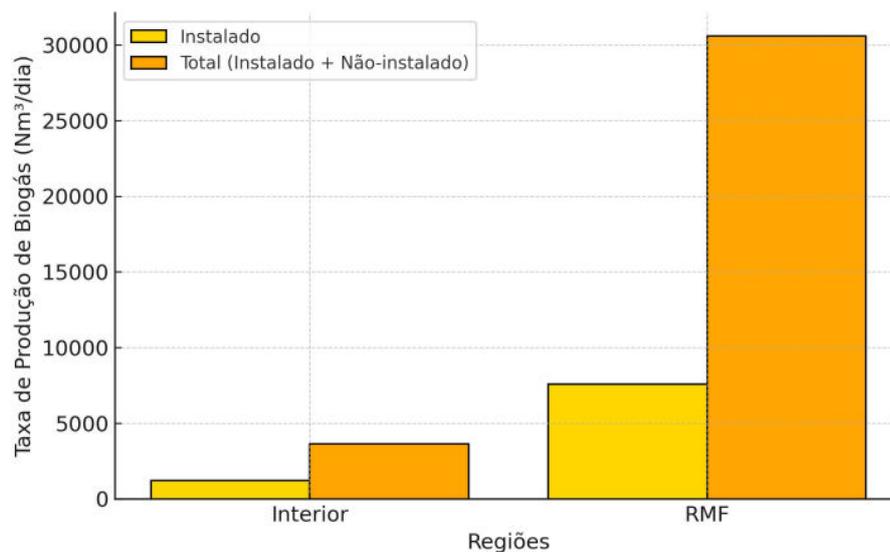


Figura 24 – Gráfico da estimativa da taxa de produção de biogás nas ETEs do CE.

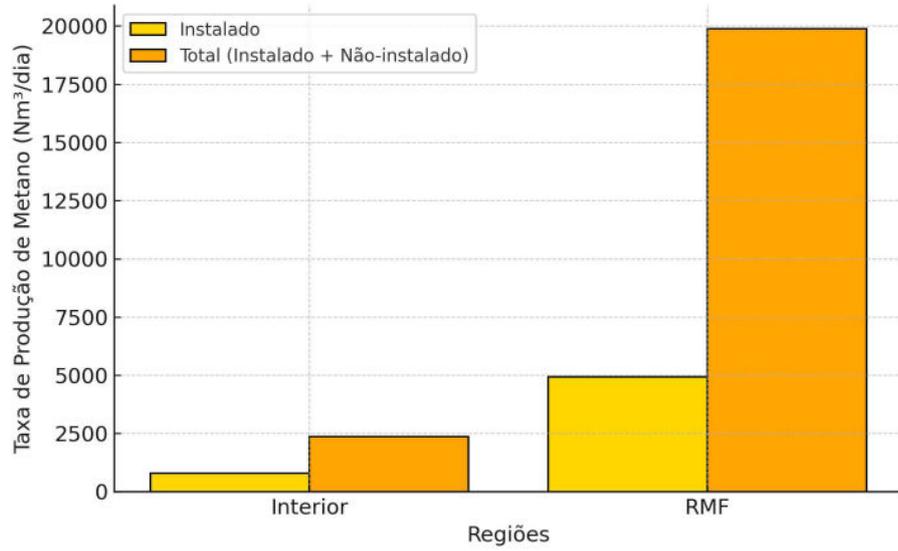


Figura 25 – Gráfico da estimativa da taxa de produção de metano nas ETEs do CE.

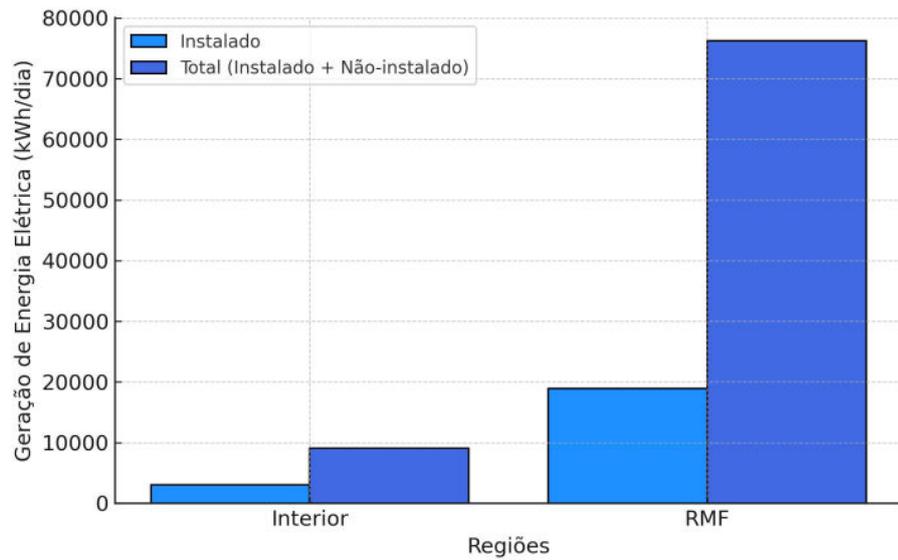


Figura 26 – Gráfico da estimativa da geração de energia elétrica nas ETEs do CE.

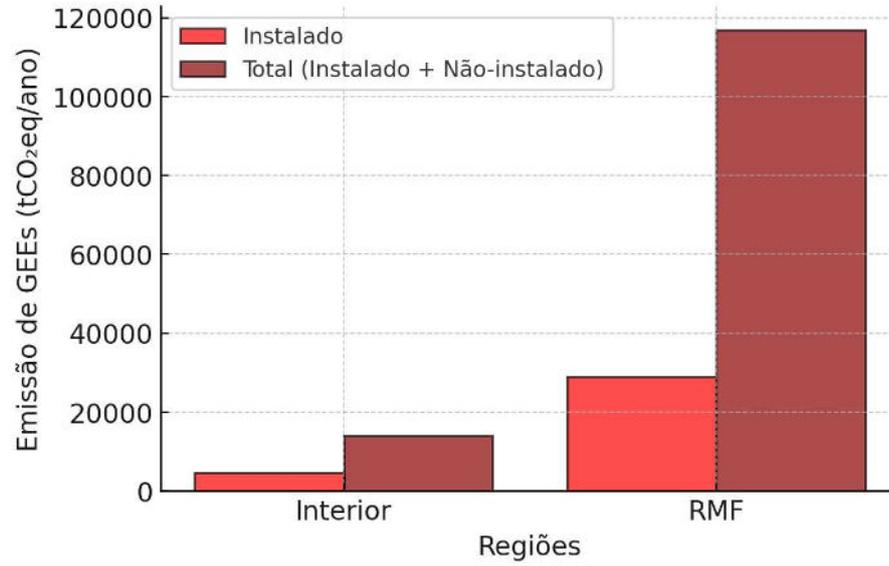


Figura 27 – Gráfico de emissão de GEEs no Cenário 1.

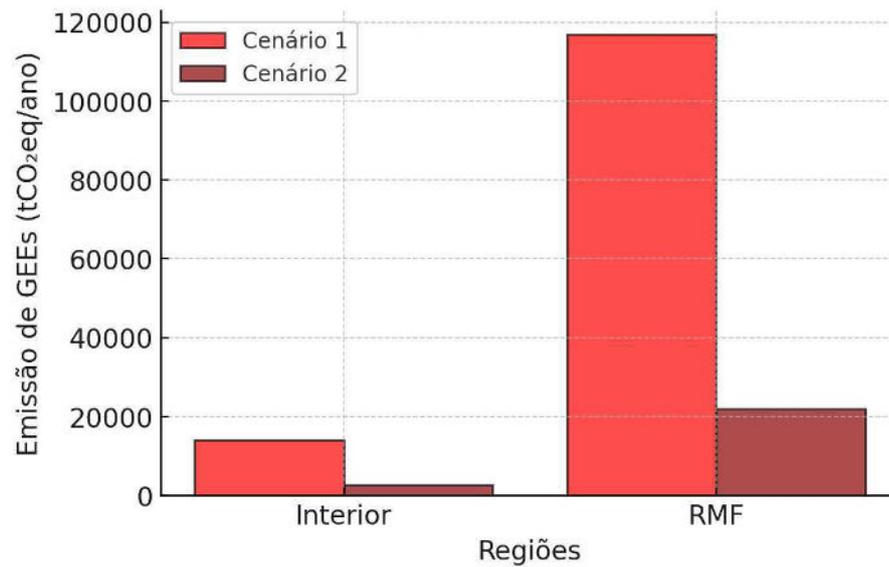


Figura 28 – Gráfico comparativo das emissões totais nos dois cenários.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A aplicação da metodologia estabelecida e das estimativas apresentadas neste trabalho evidenciaram o grande potencial da instalação de sistemas compactos do tipo UASB nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do Estado do Ceará. Do ponto de vista econômico, a geração de energia elétrica nas ETEs seria capaz de fornecer uma redução significativa no consumo de eletricidade nas Estações de Tratamento, reduzindo as faturas de energia e consequentemente aumentando seu faturamento. Não somente isso, o uso e aproveitamento do biogás também é capaz de promover grande redução dos gases de efeito estufa emitidos pela instituição, contribuindo para maior redução de impactos ambientais e a adesão à políticas de desenvolvimento sustentável pelo setor.

Ao analisar o balanço energético do potencial de biogás nas instalações já existentes, a Companhia seria capaz de gerar energia suficiente para suprir 84,3% da demanda elétrica das ETEs, resultando na mesma redução percentual nas faturas de eletricidade. Considerando a tarifa média no período de estudo, conforme Tabela 6, essa redução representaria uma economia de aproximadamente R\$ 5,4 milhões por ano. Em um cenário de plena utilização de sistemas compactos nas ETEs do estudo, a geração de biogás não apenas supriria o autoconsumo das estações, como também geraria um excedente de 21.637.278,67 kWh no ano.

Não somente para o autoconsumo, a Companhia também poderia explorar o excedente dessa geração de diferentes formas, incluindo a venda à concessionária local, a contratação de créditos de energia, ou até mesmo a destinação para programas de universalização do acesso à eletricidade em comunidades do interior do Estado. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2023), o consumo médio de eletricidade no Brasil é de 150 kWh/mês por residência, fazendo que esse excedente fosse o suficiente para atender mais de 12 mil famílias por mês. Caso fosse utilizado todo o potencial gerado e não somente o excedente, esse número cresceria para 17,3 mil.

Além da geração de eletricidade, o biogás produzido nas ETEs pode ser empregado para diversas finalidades, como combustão em sistemas de aquecimento, geração de vapor e substituição do gás natural veicular (GNV) e do gás liquefeito de petróleo (GLP). Para fins comparativos, estima-se que um botijão de 13 kg de GLP equivale a aproximadamente 8,7 Nm³ de metano, fazendo com que o volume de gás produzido nos cenários analisados correspondesse a 2.557 botijões de GLP por dia (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 2023).

No que se refere à mitigação de impactos ambientais, a recuperação do biogás nos reatores UASB permitiria uma redução significativa na emissão de gases de efeito estufa, conforme exposto. Comparando os dois cenários analisados, a Companhia poderia evitar a emissão de 106.277,27 tCO₂eq nas ETEs estudadas, representando uma redução de 81,2% em relação ao cenário de não aproveitamento. Considerando o total estimado de 633.688,72 tCO₂eq emitidos pela Companhia em 2021, essa redução corresponderia a 16,7% do total de GEEs emitidos no período, possibilitando a geração de créditos de carbono e contribuindo para a descarbonização do setor de saneamento.

Apesar disso e das inúmeras vantagens associadas à produção e ao aproveitamento do biogás, também é importante considerar os desafios e as limitações desse tipo de implementação. Do ponto de vista operacional, é importante destacar que sistemas que utilizam reatores UASB apresentam a peculiaridade de requerem um projeto minucioso no seu dimensionamento e no maior aparelhamento instrumental para garantia da sua eficácia e uma produção aceitável de biogás, aumentando os custos de CAPEX e OPEX das estações. Do ponto de vista administrativo, a recente implementação da Parceria Público-Privada (PPP) trouxe desafios burocráticos e operacionais à incorporação de novas tecnologias nas unidades de tratamento. Como a supervisão e operação das ETEs não estão diretamente sob o controle do Governo do Estado, há maior dificuldade na obtenção de dados e na formulação de planos de implementação em larga escala.

Além disso, outro obstáculo está relacionado à legislação brasileira, que ainda impõe restrições à utilização do biogás gerado nas ETEs, especialmente no que se refere à sua injeção na rede de gás natural, licenciamento ambiental, geração distribuída e normas de segurança, conforme a NBR 6023. Essas barreiras regulatórias precisam ser consideradas na elaboração de projetos, a fim de garantir o uso mais eficiente do biogás gerado.

Não obstante, ao longo deste estudo também foi identificada a escassez de dados operacionais necessários para a realização das estimativas, particularmente no que se refere a dados de vazão de efluente e ao consumo de energia elétrica das ETEs. Essa limitação pode comprometer a precisão das estimativas apresentadas, trazendo baixa confiabilidade das estimativas e um subdimensionamento do potencial total disponível, visto que menos 40% das ETEs foram consideradas no estudo (Tabela 3). Além disso, a ausência de medições periódicas e detalhadas de parâmetros físico-químicos e operacionais das estações, como os presentes na Tabela 4, restringe a previsibilidade da produção de biogás e a confiabilidade dos resultados obtidos. A alternativa utilizada neste trabalho à essa ausência de dados foi a utilização de cenários

conservadores e intermediários, considerando eficiências moderadas de produção e operação, enquanto perdas potenciais de metano no efluente e tubulações foram desconsideradas.

De forma geral, a implementação de sistemas de captura e aproveitamento de biogás exigiria investimentos iniciais por parte da Companhia, incluindo custos relacionados à instalação e manutenção dos equipamentos, treinamento de pessoal, transporte e armazenamento do biogás. No entanto, uma análise detalhada da viabilidade econômica do projeto permitiria quantificar os custos e benefícios dessa estratégia de forma criteriosa. Apesar disso, os resultados deste trabalho demonstram de forma clara o grande potencial dos sistemas UASB para a produção e aproveitamento de biogás nas ETEs do Ceará. Sua implementação não apenas reduziria os custos operacionais da Companhia, mas também contribuiria para o desenvolvimento sustentável do setor de saneamento, promovendo ganhos ambientais, sociais e econômicos a longo prazo.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Relatório Anual de Consumo Residencial 2023**. 2023. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>>.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Dados técnicos sobre GLP**. 2023. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 9648: Determinação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) – Método de incubação**. Rio de Janeiro, 1986. 12 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 9649: Sistemas de esgoto sanitário – Terminologia**. Rio de Janeiro, 1986. 16 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 12209: Projeto de estação de tratamento de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro, 2011. 47 p.
- BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. L. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 21, n. 2, p. 275–282, 2016.
- BRASIL. **Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB: revisão 2022-2040**. MDR, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab>>.
- BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS: Painel de Informações de 2022**. Ministério das Cidades, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/es>>.
- CHERNICHARO, C. A. d. L. **Reatores Anaeróbios: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte, Brasil: Editora UFMG, 2007. v. 5. ISBN 9788570415308.
- Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece). **Relatório de Sustentabilidade 2023**. Fortaleza, CE: [s.n.], 2023. Relatório Institucional. Disponível em: www.cagece.com.br/governanca-corporativa/documentos/.
- ECO, O. **Gases do efeito estufa: dióxido de carbono (CO) e metano (CH)**. 2025. <<https://oeco.org.br/dicionario-ambiental/28261-gases-do-efeito-estufa-dioxido-de-carbono-co2-e-metano-ch4>>. Acesso em: 7 jan. 2025.
- HAANDEL, A. C. van; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgoto: Um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande, Brasil: Universidade Federal da Paraíba, 1994.
- International Energy Agency (IEA). **Electricity consumption in the water sector by process, 2014-2040**. IEA, Paris, 2020. Licence: CC BY 4.0. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-consumption-in-the-water-sector-by-process-2014-2040>>.
- IPCC. **Special Report: Global Warming of 1.5°C - Glossary**. 2018. Accessed: January 7, 2025. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/glossary/>>.
- JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 6ª. ed. Rio de Janeiro, Brasil: ABES, 2011. 969 p. ISBN 9788570221698.

LAMBIASI, L.; DDIBA, D.; ANDERSSON, K.; PARVAGE, M.; DICKIN, S. Greenhouse gas emissions from sanitation and wastewater management systems: a review. **Journal of Water and Climate Change**, IWA Publishing, v. 15, n. 4, p. 1797–1819, 2024.

LOBATO, L. C. d. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ENGD-8KYNF3/1/tese_n_57___1_via_lobato.pdf>.

METCALF, S. B. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. New York: McGraw-Hill Education, 2003.

SALOMON, K.; LORA, E. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, 2009.

SEEG. **Relatório Analítico 12: Emissões totais do Brasil em 2023**. 2023. Acesso em: 4 dez. 2024. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>>.

SEGHEZZO, L. **Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater in Subtropical Regions**. 133 p. Tese (Doutorado) — Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 2004.

SEGHEZZO, L.; ZEEMAN, G.; LIER, J. B. van; HAMELERS, H. V. M.; LETTINGA, G. A review: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. **Bioresource Technology**, v. 65, p. 190–215, 1998.

SILVEIRA, B.; CHERNICHARO, C.; CABRAL, C.; SUIDEDOS, C.; PLATZER, C.; SILVA, G.; POSSETTI, G.; HOFFMANN, H.; MOREIRA, H.; ADAMATTI, H. *et al.* Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. **Brasília, DF. Ministério das Cidades**, 2015.

SINGH, G.; VIRARAGHAVAN, T. Treatment of wastewater with high sulfate concentration using anaerobic reactors: A review. **Bioresource Technology**, Elsevier, v. 65, n. 2, p. 123–139, 1998.

SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. [S.l.]: Editora UFMG, 1996. v. 1.

United Nations Environment Programme (UNEP); World Resources Institute (WRI). **Equivalências ambientais: árvores plantadas por tonelada de CO mitigada**. 2023. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.unep.org>>.

WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Alexandria, VA, USA: WEF, 1999.

WRI Brasil. **4 gráficos para entender emissões de gases de efeito estufa por país e por setor**. 2025. <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/4-graficos-para-entender-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor>>. Acesso em: 7 jan. 2025.