



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



JADE NOBREGA DE OLIVEIRA

**GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO NO ESTADO DE SERGIPE**

SÃO CRISTÓVÃO - SE

2022

JADE NOBREGA DE OLIVEIRA

**GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO NO ESTADO DE SERGIPE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Sergipe – UFS, para
encerramento do componente curricular e
conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientador Prof. Daniel Moureira Fontes Lima

SÃO CRISTÓVÃO - SE

2022

É concedida à Universidade Federal de Sergipe permissão para reproduzir cópias deste trabalho de conclusão de curso e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Assinatura

OLIVEIRA, Jade Nobrega de.

GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO NO ESTADO DE SERGIPE

Jade Nobrega de Oliveira

São Cristóvão, 2022

71 p.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia,
Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

I. Universidade Federal de Sergipe / Sergipe. CCET

II. Geração de Créditos de Carbono em Estações de Tratamento de Esgoto no
Estado de Sergipe.

GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO ESTADO DE SERGIPE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Sergipe como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora:

_____ Prof. Dr. Daniel Moureira Fontes Lima Universidade Federal de Sergipe (Orientador)	_____ Nota
_____ Prof. Dr. Rafael Brito de Moura Universidade Federal de Alfenas (Examinador 1)	_____ Nota
_____ Prof. Msc. Taisa Andrade Barbosa Centro Universitário AGES (Examinador 2)	_____ Nota

São Cristóvão – SE
2022

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar eu agradeço a Deus por sempre estar presente e por toda a força que me deu ao longo desses anos.

Agradeço também aos meus pais, Iata Anderson e Simone, e aos meus avós paternos, Armênio e Nirlene, por toda a ajuda, por sempre acreditarem em mim e por sempre me apoiarem.

Agradeço ao meu namorado, Ícaro, pelo apoio em tudo e por estar ao meu lado na maior parte dessa graduação, nos momentos bons e também nos mais difíceis.

Agradeço aos meus amigos, antigos e novos, por me motivarem a correr atrás dos meus sonhos e por tornarem o processo mais leve e divertido.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Daniel Moureira Fontes Lima, pela compreensão, ajuda e enorme sabedoria demonstrada.

Ademais, agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram a chegar onde estou hoje e a concluir a realização desse sonho, que é a formação em engenharia civil.

RESUMO

Nos últimos anos, a preocupação com as mudanças climáticas se intensificou ao redor do mundo, pois o lançamento contínuo de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera causa impactos socioambientais enormes. Desse modo, foi criado o Protocolo de Quioto, que é um acordo internacional no qual os países industrializados se comprometeram a diminuir suas emissões de GEE. Ademais, dentro do Protocolo, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) foi elaborado como forma de auxiliar os países em desenvolvimento a reduzirem suas emissões, ao mesmo tempo em que facilita que os países desenvolvidos cumpram sua meta através da aquisição de créditos de carbono. Neste cenário, as estações de tratamento de esgoto contribuem de modo significativo com a emissão de GEE, pois o processo de decomposição da matéria orgânica em tratamentos anaeróbios emite grandes quantidades de gás metano, que tem um potencial de aquecimento global 21 vezes maior que o gás carbônico. O objetivo do presente trabalho foi identificar as emissões de GEE em seis estações de tratamento de esgoto do estado de Sergipe, bem como estimar o biogás formado e os créditos de carbono que podem ser gerados, através do software ProBio 1.0, a partir de três cenários: com a introdução de queimadores flare; com o aproveitamento energético do biogás para gerar energia elétrica; e com a substituição de combustíveis como gasolina e etanol pelo biogás. Os resultados encontrados apontam que a introdução de queimadores flare nas ETE's pode reduzir uma grande parte das emissões e proporcionar um maior retorno em créditos de carbono. Todavia, o aproveitamento energético do biogás para gerar eletricidade para rede, além de trazer um bom retorno com a venda de créditos de carbono, também auxilia na economia de energia. Por outro lado, usar o biogás para substituir combustíveis como gasolina e etanol não gera créditos de carbono tão significativos, por fim, todas as soluções propostas trazem grandes ganhos ambientais.

Palavras-chave: Créditos de carbono; Estações de tratamento de esgoto; Gases do efeito estufa; Protocolo de Quioto.

ABSTRACT

In recent years, concern about climate change has intensified around the world, as the continuous release of greenhouse gases into the atmosphere causes enormous socio-environmental impacts. Therefore, the Kyoto Protocol was created, an international agreement in which industrialized countries pledged to reduce their GHG emissions. Beyond That, within the Protocol, the Clean Development Mechanism (CDM) was designed to help developing countries reduce their emissions, while facilitating developed countries to meet their target through the acquisition of carbon credits. In this scenario, sewage treatment stations contribute significantly to the emission of GHGs, as the process of decomposition of organic matter in anaerobic treatments emits large amounts of methane gas, which has a global warming potential 21 times greater than carbon gas. The objective of the present work is to find the GHG emissions in six sewage treatment stations in the Brazilian Sergipe State, as well as the biogas formed, through the ProBio 1.0 software, and estimate the carbon credits that can be generated with the introduction of flare burners, the energy use of biogas to generate electricity and its efficiency in replacing fuels such as gasoline and ethanol. The results found indicate that the introduction of flare burners in STS's can reduce a large part of emissions and provide a greater return in carbon credits. Likewise, the energy use of biogas to generate electricity for the grid, in addition to bringing a good return with the sale of carbon credits, also helps in energy savings. On the other hand, using biogas to replace fuels such as gasoline and ethanol does not generate such significant carbon credits, however, all the proposed solutions bring great environmental gains.

Keywords: Carbon credits; Sewage treatment stations; Greenhouse gases; Kyoto Protocol.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AND – Autoridade Nacional Designada;
CIE – Comércio Internacional de Emissões;
COP – Conferência das Partes;
DAFA – Digestor Aeróbico de Fluxo Ascendente;
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio;
DCP – Documento de Concepção de Projeto;
DQO – Demanda Química de Oxigênio;
EOD – Entidade Operacional Designada;
ERQ – Estação Recuperadora de Qualidade;
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto;
GEE – Gases do Efeito Estufa;
GWP – Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potencial*);
IC – Implementação Conjunta;
IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*;
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo;
NBR – Norma Brasileira;
RCE – Redução Certificada de Emissão;
SE – Sergipe;
UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desenho esquemático do efeito estufa na Terra.....	15
Figura 2: Gases do efeito estufa (GEE).....	16
Figura 3: Contribuição dos gases do efeito estufa mais importantes desde a era pré-industrial até o ano de 2020.	17
Figura 4: Contribuição de algumas fontes de emissão de CH ₄ no Brasil no ano de 2007.....	18
Figura 5: Ciclo de Projeto do MDL.....	24
Figura 6: Redução líquida de emissões de GEE.....	27
Figura 7: Mecanismos de digestão anaeróbia.....	35
Figura 8: Desenho esquemático do reator UASB.....	38
Figura 9: Queimador aberto.....	42
Figura 10: Queimador flare fechado.....	42
Figura 11: Estação Recuperadora de Qualidade (ERQ) Sul.....	44
Figura 12: Estação Recuperadora de Qualidade (ERQ) Oeste.	45
Figura 13 Estação de Tratamento de Esgoto de Itabaiana/SE.	45
Figura 14: Estação de Tratamento de Esgoto da Barra dos Coqueiros/SE.....	46
Figura 15: Estação de Tratamento de Esgoto Rosa Elze.	46
Figura 16: Estação de Tratamento de Esgoto Dores.....	47
Figura 17: Rotas de conversão de DQO e fluxos de metano em reatores UASB.....	48
Figura 18: Tela inicial do software ProBio.	49
Figura 19: Constantes e equivalências adotadas pelo ProBio.	49
Figura 20: Emissões de CO ₂ encontradas pelo ProBio.....	51
Figura 21: Distribuição de DQO de entrada de casa ETE em 2020.	54
Figura 22: Distribuição da vazão média mensal de cada ETE em 2020.	54
Figura 23: Box Plot de DQO de entrada em cada ETE.	55
Figura 24: Box Plot de vazão média mensal efluente em cada ETE.....	55
Figura 25: Comparativo entre as emissões de gás carbônico evitadas nas três metodologias no cenário pior.....	64
Figura 26: Comparativo entre missões de gás carbônico evitadas nas três metodologias no cenário típico.	65
Figura 27: Comparativo entre missões de gás carbônico evitadas nas três metodologias no cenário melhor.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Gases do efeito estufa e seu respectivo GWP.....	22
Tabela 2: Contribuição dos GEE para o aquecimento global.....	22
Tabela 3: Composição do biogás gerado em reatores anaeróbios no tratamento de esgoto sanitário, em aterros sanitários e em digestores de lodo.....	39
Tabela 4: Poder calorífico inferior do biogás e de outros combustíveis e sua equivalência com o metano.	39
Tabela 5: Valores adotados pelo ProBio para a estimativa de produção de biogás em cada cenário.	50
Tabela 6: Fator de Emissão médio ($\text{CO}_2.\text{MWh}^{-1}$) mensal.	52
Tabela 7: Equivalência energética entre o biogás e outros combustíveis.....	52
Tabela 8: Fatores de emissão de CO_2 para queima direta de combustíveis convertida em energia térmica (kWh) – Brasil.	53
Tabela 9: DQO de entrada e vazão média mensal das estações de tratamento de esgoto analisadas.....	53
Tabela 10: Concentrações médias de DQO de entrada e da vazão média afluyente das ETE's, desconsiderando os Outliers.	56
Tabela 11: Dados obtidos através do ProBio para cada ETE.	57
Tabela 12: Créditos de carbono e a receita gerada.	58
Tabela 13: Dados obtidos através do ProBio para a geração de energia elétrica em cada ETE.	59
Tabela 14: Dados obtidos através do ProBio para a geração de energia elétrica em cada ETE (continuação).....	60
Tabela 15: Emissões anuais de gás carbônico e receita gerada.	61
Tabela 16: Equivalência energética do biogás em comparação a gasolina e ao etanol.....	62
Tabela 17: Equivalência energética do biogás em comparação a gasolina, emissões de CO_2 e receita.....	63
Tabela 18: Equivalência energética do biogás em comparação ao etanol, emissões de CO_2 e receita.....	63
Tabela 19: Emissões de gás carbônico evitadas em cada uma das três metodologias	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	Os gases do efeito estufa e as alterações climáticas	15
3.1.1	Classificação dos gases do efeito estufa	16
3.1.2	Dióxido de carbono (CO ₂)	17
3.1.3	Metano (CH ₄).....	18
3.2	O Protocolo de Quioto	19
3.3	O Acordo de Paris e o Acordo Climático de Glasgow	20
3.4	O Potencial de Aquecimento Global	21
3.5	O Mercado de Carbono.....	22
3.5.1	Mercado de carbono regulado pelo Protocolo de Quioto	23
3.6	Ciclo de Projeto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)	23
3.6.1	Elaboração do documento de Concepção de Projeto.....	25
3.6.2	Validação por uma Entidade Operacional Designada (EOD)	27
3.6.3	Aprovação por uma Autoridade Nacional Designada (AND)	28
3.6.4	Registro pelo Conselho Executivo do MDL.....	28
3.6.5	Monitoramento.....	29
3.6.6	Verificação e Certificação	30
3.6.7	Emissão das RCEs	30
3.7	Tratamento de Esgoto.....	30
3.7.1	Tratamento preliminar	31
3.7.2	Tratamento primário	31
3.7.3	Tratamento secundário.....	32
3.7.4	Tratamento terciário.....	32
3.7.5	Processos biológicos do tratamento de esgoto.....	33
3.7.6	Rotas de decomposição da matéria orgânica	33
3.7.7	Digestão anaeróbia.....	34
3.7.8	Reatores anaeróbios UASB	37
3.8	Produção de Biogás	38

3.9	Recuperação e utilização do Biogás	39
3.10	Viabilidade de ETE'S como atividade de projeto de MDL.....	41
3.10.1	Combustão direta do biogás sem recuperação de energia	41
3.10.2	Potencial do biogás para geração de energia	43
4	METODOLOGIA.....	44
4.1	Unidades de tratamento com reatores UASB em Sergipe.....	44
4.2	Tratamento estatístico dos dados.....	47
4.3	Cálculo da estimativa de produção do biogás.	48
4.4	Geração de créditos de carbono com o uso de flares.....	50
4.5	Geração de créditos de carbono através do aproveitamento energético do biogás	51
4.6	Geração de créditos de carbono ao substituir alguns combustíveis por biogás.....	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1	Análise estatística dos dados	53
5.2	Créditos de carbono através da inclusão de flares nas ETE's	56
5.3	Créditos de carbono através do aproveitamento energético do biogás.....	58
5.4	Créditos de carbono ao substituir combustíveis fósseis por biogás.....	61
5.5	Comparativo entre as três metodologias estudadas	63
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Com o início da Revolução Industrial no século XVIII, o uso de combustíveis fósseis como o carvão, o gás natural e os derivados do petróleo aumentou significativamente. A queima desses combustíveis aliada a queima da biomassa que acontece nos grandes desmatamentos, faz com que altos índices de gases do efeito estufa (GEE) sejam lançados na atmosfera todos os dias. Desse modo, no decorrer dos últimos anos, discussões sobre o aquecimento global e efeito estufa se tornam cada vez mais frequentes (JUNGES, et al., 2018).

Os gases do efeito estufa são divididos entre diretos e indiretos. Os gases indiretos normalmente resultam de atividades humanas e dentre eles, tem-se o metano gerado no tratamento do esgoto sanitário. O gás metano é 21 vezes mais poluente que o gás carbônico, todavia, o gás carbônico é o gás que mais intensifica o efeito estufa devido a sua grande utilização. Por isso, o IPCC criou um parâmetro para comparar os outros seis gases do efeito estufa com o dióxido de carbono, denominado de Potencial de Aquecimento Global (GWP), que compara as suas intensidades e o período que permanecem na atmosfera. Por outro lado, os gases diretos são constituintes gasosos da atmosfera, que podem ser de ocorrência natural ou antrópica (IPCC, 2006).

Como forma de tentar mitigar as mudanças climáticas, os países desenvolvidos elaboraram e assinaram o Protocolo de Quioto, no qual ficou definido que os países industrializados deveriam reduzir as suas emissões de GEE em pelo menos 5% em relação as emissões de 1990 até o período entre 2008 e 2012. Essas metas foram estendidas até o ano de 2020, todavia, na última Conferência das Partes (COP 26), os países diversos países firmaram novas metas mais otimistas, dentre eles o Brasil, que se comprometeu a diminuir suas emissões de GEE em 50% até o ano de 2030 (DEWAN e CASSIY, 2021). De acordo com Brasil (1998), o Protocolo de Quioto desenvolveu três mecanismos de flexibilização. O primeiro é o Comércio Internacional de Emissões, que é utilizado por países industrializados que alcançaram suas metas de redução de emissões e querem vender suas reduções excedentes para aqueles países que ainda não alcançaram o seu objetivo.

O segundo mecanismo é o de Implementação Conjunta, o qual possibilita que os países industrializados desenvolvam projetos de redução de emissões em países ainda em desenvolvimento. E por fim, tem-se o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, que proporciona oportunidades e investimentos para os países em desenvolvimento, visto que eles não têm

obrigação de reduzir suas emissões de GEE, mas querem de forma voluntária fazê-lo, a fim de contribuir com o desenvolvimento sustentável (BRASIL,1998).

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo funciona com base no princípio da Adicionalidade, ou seja, as emissões antrópicas precisam ser inferiores às que ocorreriam na ausência do projeto. Além disso, é necessário comprovar que o projeto MDL não é alternativa mais viável economicamente (BRASIL,1998).

Uma grande oportunidade de desenvolver projetos de MDL e gerar créditos de carbono está na redução de emissões em estações de tratamento de esgoto (ETEs), através do aproveitamento energético do biogás gerado ou de sua queima.

O tratamento biológico do esgoto sanitário, principalmente o anaeróbio, feito através da atividade de microrganismos que se alimentam da matéria orgânica presente nos resíduos, contribui com a intensificação do efeito estufa. Todavia, uma grande parcela do tratamento anaeróbio envolve a tecnologia de reatores UASB, que além de remover a matéria orgânica do afluente, também gera subprodutos utilizáveis como o biogás (LOBATO, 2011; CHERNICHARO, 1997).

Sabe-se que a maior parte da demanda energética do mundo é suprida por combustíveis fósseis, os quais além de serem altamente poluidores também são recursos limitados. Por isso, se torna cada vez mais urgente o investimento em fontes de energias renováveis que causem pouco ou nenhum impacto ambiental. Dito isso, o biogás gerado nas estações de tratamento de esgoto oferece benefícios econômicos, sociais e ambientais, visto que pode ser utilizado para a geração de energia elétrica, para substituir combustíveis fósseis, e ainda, gerar créditos de carbono. De acordo com Zannete (2009), o Brasil tem alta capacidade para produzir biogás, pois a maior parte da população está concentrada em grandes centros urbanos.

Desse modo, o presente trabalho objetiva avaliar o potencial para gerar créditos de carbono de seis estações de tratamento de esgoto sanitário no estado de Sergipe. Para isso, foram analisados três diferentes cenários. No primeiro, o biogás gerado é recuperado e passa por um queimador fechado (flare), sendo convertido quase completamente em dióxido de carbono, reduzindo assim as emissões de GEE. No segundo, o biogás é aproveitado para gerar energia elétrica, o que possibilita a redução de emissões de gás carbônico e proporciona uma economia, visto que irá substituir outras fontes de energia. Já no último cenário, estima-se que o biogás será utilizado para substituir a gasolina e o etanol como combustível, evitando as emissões que seriam causadas por eles, além de também gerar economia.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar o potencial para a geração de créditos de carbono em seis estações de tratamento de esgoto sanitário do estado de Sergipe que utilizam reatores UASB.

2.2 Objetivos Específicos

- Estimar os créditos de carbono que podem ser gerados nas ETE's de Sergipe através da introdução de queimadores tipo flare;
- Estimar os créditos de carbono que podem ser obtidos através do aproveitamento energético do biogás formado nas ETE's que utilizam reatores UASB, para a geração de energia elétrica;
- Estimar os possíveis créditos de carbono ao substituir combustíveis como gasolina e etanol por biogás.

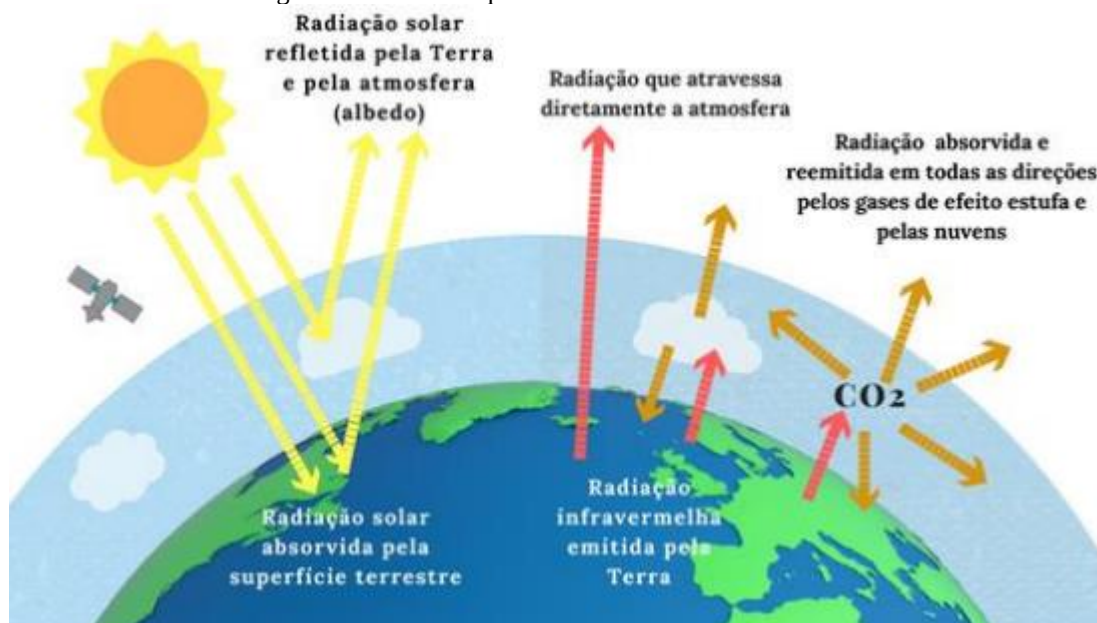
3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Os gases do efeito estufa e as alterações climáticas

A emissão de gases do efeito estufa (GEE) é um fenômeno natural que contribui para a manutenção da vida na Terra, pois são eles que controlam as condições climáticas. Entretanto, o aumento das emissões de GEE desencadeia inúmeros problemas (JUNGES, et al., 2018).

Por causa dos gases do efeito estufa, cerca de 70% da radiação visível proveniente do Sol, penetra com facilidade na superfície terrestre. Os outros 30% são refletidos e compõem o albedo (Figura 1). Após ser aquecida, a Terra reemite para o espaço radiação infravermelha, que é absorvida pelos GEE. A radiação infravermelha absorvida é então lançada em todas as direções, sendo que uma parte é perdida e outra parte é retida na baixa atmosfera. Desse modo, os GEE inibem a perda da radiação infravermelha para o espaço, o que deixa a baixa atmosfera mais quente. Com o excesso de emissões de gás carbônico (CO_2) a camada do efeito estufa passa a reter muito mais calor, fazendo com que a temperatura na Terra aumente (JUNGES, et al., 2018).

Figura 1: Desenho esquemático do efeito estufa na Terra.



Fonte: JUNGES, et al., 2018.

Em outras palavras, os GEE funcionam como uma espécie de “cortina” de gás que vai desde a superfície da Terra até o espaço e tem a capacidade de impedir que a energia do sol que é absorvida durante o dia retorne, mantendo a temperatura do planeta em torno de 15°C . Tal fenômeno permite que a água se mantenha em forma líquida e consequentemente, que exista vida. Vale ressaltar que muitos gases são emitidos naturalmente, como acontece nas erupções

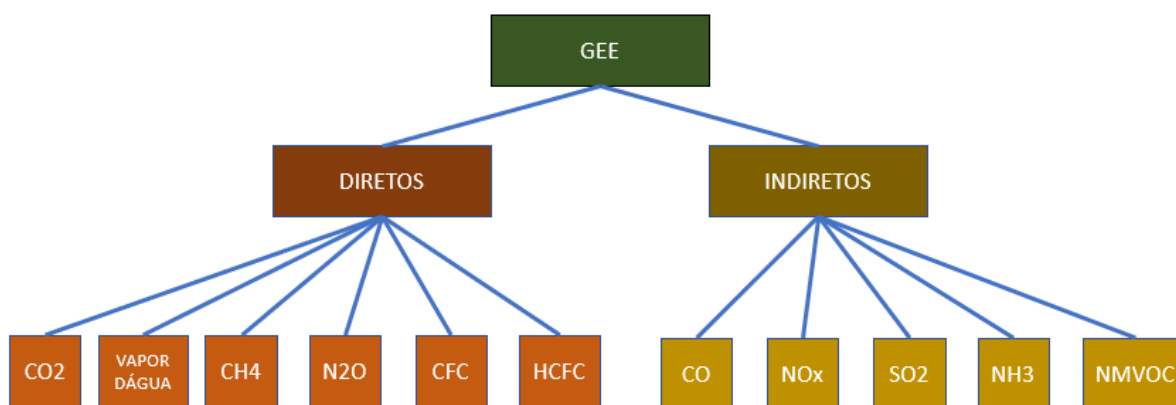
vulcânicas. Todavia, acredita-se que as emissões de GEE derivadas das atividades humanas perturbam o equilíbrio atmosférico. Com o aumento de emissões de GEE, a atmosfera também aumenta a sua capacidade de absorver radiação infravermelha. Sendo assim, a maior concentração desses gases dificulta a saída de radiação no topo da atmosfera, causando um desequilíbrio entre o fluxo de saída e entrada da radiação. Desse modo, a Terra precisará aquecer para emitir a mesma quantidade de energia e reestabelecer o equilíbrio. Assim, a nova temperatura da superfície terrestre será maior (JUNGES, et al., 2018).

De acordo com IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) *Guidelines* (IPCC, 2006), a remoção ou emissão de GEE é antrópica se advinda de atividades humanas, principalmente da queima de combustíveis fósseis em usinas termoeletricas, atividades pastoris, uso de veículos de circulação, indústrias e tratamento e disposição de resíduos.

3.1.1 Classificação dos gases do efeito estufa

Os GEE são divididos em duas classes, os diretos e os indiretos (Figura 2). Os GEE indiretos, normalmente resultantes de atividades humanas, geram influência nas reações químicas que ocorrem na troposfera e exercem papel indireto no efeito radiativo. São eles: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂), amônia (NH₃) e compostos orgânicos não voláteis (NMVOC). As emissões desses gases podem resultar da queima incompleta de combustíveis, de Processos Industriais no Subsetor de Alimentos e Bebidas, Vidro e Papel e Celulose (IPCC, 2006a).

Figura 2: Gases do efeito estufa (GEE).



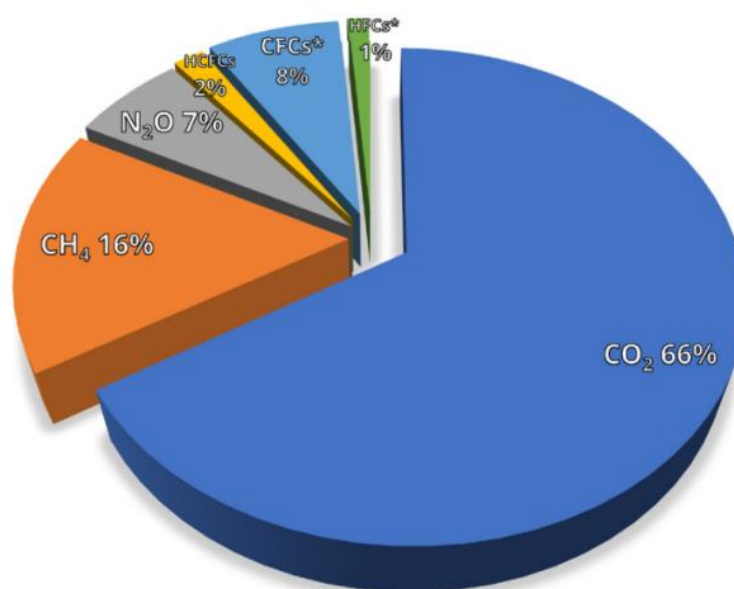
Fonte: Elaborado pela autora, baseado em IPCC, 2006a.

O CO, os NO_x e os NMVOC são denominados precursores do ozônio, pois na presença de luz solar contribuem para a formação do GEE ozônio (O₃) na troposfera (IPCC, 2006a).

Por outro lado, os GEE diretos são constituintes gasosos da atmosfera, naturais ou antrópicos, que absorvem e reemitem radiação infravermelha. São eles: vapor d'água, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarbonos (CFC) e hidroclorofluorcarbonos (HCFC) (IPCC, 2006).

Como visto na Figura 3, os dois gases que mais contribuem para o efeito estufa são o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4), os quais estão diretamente ligados com o objetivo do presente trabalho e por isso serão estudados com mais detalhes.

Figura 3: Contribuição dos gases do efeito estufa mais importantes desde a era pré-industrial até o ano de 2020.



Fonte: WMO Greenhouse Gas Bulletin No.17 apud Instituto Nacional de Meteorologia, disponível em <
<https://portal.inmet.gov.br/noticias/omm-registra-mais-um-recorde-na-emissao-de-gases-estufa>>.

3.1.2 Dióxido de carbono (CO_2)

Apesar de ser um gás de ocorrência natural, o dióxido de carbono é atualmente o gás que mais intensifica o efeito estufa. Isso acontece devido a sua grande utilização pelo homem, principalmente na queima de combustíveis fósseis. Dados do IPCC apontam que as emissões mundiais de CO_2 aumentaram cerca de 80% entre o ano de 1970 e 2004 (IPCC, 2001).

De acordo com IPCC (2001), em estações de tratamento de esgoto sanitário o CO_2 é produzido diretamente por bactérias (respiração aeróbia) quando estas realizam a conversão da matéria orgânica. Entretanto, esse CO_2 possui um ciclo biogeoquímico curto/fechado, ou seja, o dióxido de carbono emitido é recuperado pelos organismos, remetendo ao seu estado inicial.

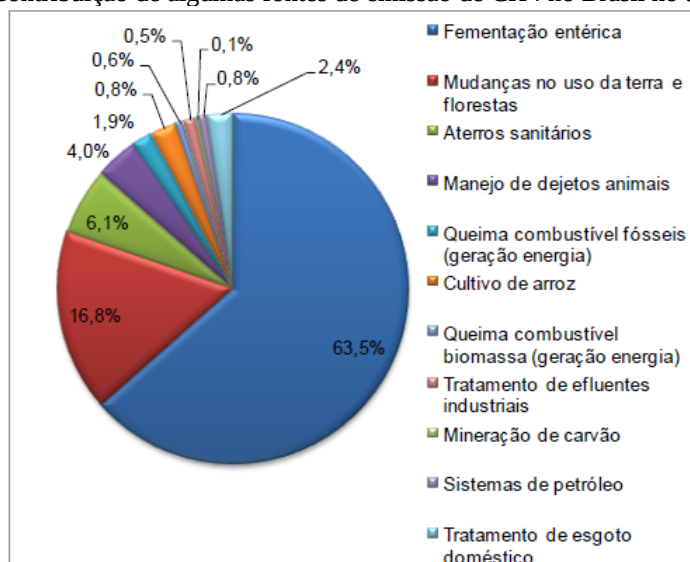
Desse modo, o CO₂ gerado nesse processo não aumentará o total de dióxido de carbono emitido para a atmosfera e por isso não caracterizará emissões líquidas.

Tendo em vista que as emissões de CO₂ geradas na respiração aeróbia não são contabilizadas no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), esse gás não será utilizado nas estimativas de emissão de gases do efeito estufa no presente trabalho.

3.1.3 Metano (CH₄)

Algumas atividades humanas, principalmente relacionadas à agricultura, a decomposição de resíduos e ao uso de combustíveis fósseis também fez com que a emissão de metano (CH₄) no efeito estufa aumentasse. Segundo El-Fadel e Massoud (2001) 70% das emissões de metano são provenientes de fontes antrópicas e apenas 30% de fontes naturais. No que diz respeito ao processo de tratamento de resíduos, o CH₄ é formado a partir de uma transformação por via anaeróbia, quando acontece a separação da fração orgânica do esgoto (Figura x4).

Figura 4: Contribuição de algumas fontes de emissão de CH₄ no Brasil no ano de 2007.



Fonte: Brasil 2005.

Metcalf e Eddy (2003) indicam que a quantidade de fração orgânica degradável no esgoto, expressa em demanda bioquímica ou química de oxigênio (DBO ou DQO), influencia diretamente na produção de CH₄. Sendo assim, com a elevação dos valores de DBO e DQO a produção de metano também aumenta. Além disso, Chernicharo (1997) indica outros fatores que estabelecem a produção de CH₄, são eles: grau de tratamento do esgoto, agentes tóxicos,

pH, temperatura, tempo de retenção, competição entre bactérias metanogênicas e redutoras de sulfato, dentre outros.

3.2 O Protocolo de Quioto

Em 1992 no Rio de Janeiro, ocorreu a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, onde foi estabelecido um processo permanente de revisão, discussão e troca de informações sobre conhecimentos científicos e disposições políticas, a fim de obter ações mais enérgicas no futuro. Nela, os países desenvolvidos reconheceram a problemática da grande quantidade de emissões de GEE e assinaram a “Comissão de Mudanças Climáticas na Cúpula da Terra” (Rio 92, Eco-92), garantindo que desenvolveriam programas nacionais de proteção ao meio ambiente e conscientizariam a população sobre a sua importância (BRASIL,1998).

Posteriormente, a primeira revisão da adequação dos compromissos dos países desenvolvidos ocorreu na primeira sessão da Conferência das Partes (COP-1), em Berlim (1995). Nessa Conferência, chegou-se à conclusão de que o compromisso acordado entre os países desenvolvidos de voltar suas emissões para os níveis de 1990, até o ano de 2000, não seria suficiente para atingir o objetivo de longo prazo de impedir “uma interferência antrópica perigosa no sistema climático” (BRASIL,1998).

Cinco anos depois, em 1997, em Quioto no Japão, a Conferência-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima decidiu adotar o Protocolo de Quioto, no qual os países industrializados, mencionados no Anexo I do protocolo, deveriam reduzir suas emissões combinadas de gases do efeito estufa em no mínimo 5% em relação às emissões de 1990 até o período entre 2008 e 2012 a fim de promover o desenvolvimento sustentável, visto que os países desenvolvidos contabilizaram pelo menos 55% das emissões totais de dióxido de carbono em 1990. Tal compromisso foi firmado com o objetivo de reverter a tendência histórica de crescimento de emissões lançadas por esses países há cerca de 150 anos da data da conferência (BRASIL,1998).

Segundo Limiro (2006), os principais objetivos definidos e aprovados no protocolo de Quioto foram:

- Reforma dos setores de energia e transporte;
- Promoção do uso de fontes energéticas renováveis;
- Eliminação dos mecanismos financeiros e do mercado inapropriados aos fins da Convenção;

- Limitação das emissões de metano no gerenciamento de resíduos e dos sistemas energéticos;
- Proteção das florestas e de outros sumidouros de carbono.

Conjuntamente, um dos compromissos definidos no Artigo 12 do Protocolo de Quioto, item VII foi “A limitação e/ou redução de emissões de metano por meio de sua recuperação e utilização no tratamento de resíduos, bem como na produção, no transporte e na distribuição de energia”. Compromisso este, que está diretamente relacionado com o objetivo desse trabalho (BRASIL,1998).

3.3 O Acordo de Paris e o Acordo Climático de Glasgow

Durante a 21ª Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, que aconteceu no final de 2015, um novo compromisso mundial foi firmado através do Acordo de Paris (*Paris Agreement*), com o objetivo de que novas políticas climáticas fossem adotadas para reduzir as emissões de gases do efeito estufa a partir de 2020. O Acordo de Paris foi assinado por 195 países, substituindo o Protocolo de Quioto (SOUZA e CORAZZA, 2017).

No Acordo de Paris, as metas de redução de emissões individuais e voluntárias foram definidas para cada país participante. O Brasil, por exemplo, se comprometeu a reduzir as emissões de GEE em até 37% até o ano de 2025 (KAUCZ *et al.*, 2021). As determinações do Acordo de Paris incluem (NAÇÕES UNIDAS, 2015 *apud* SOUZA e CORAZZA, 2017):

- Reconhecendo os grandes riscos e impactos das mudanças climáticas, é necessário deter o aumento da temperatura média do planeta abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais, assim como tentar ao máximo limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais;
- É necessário estimular o desenvolvimento com baixas emissões de GEE de uma maneira que não prejudique a produção de alimentos, e também aumentar a habilidade de adaptação para os diferentes impactos que as mudanças climáticas possam causar;
- É preciso fazer com que os fluxos monetários sejam direcionados à redução dos GEE, de modo que se desenvolvam de forma resiliente do ponto de vista climático.

O Artigo 6 do Acordo de Paris estabeleceu os princípios para a regulamentação de um mercado de carbono global, todavia, as regras para a operação desse novo mercado ainda não foram definidas. Esperava-se que o assunto fosse o principal foco da COP 26, que estava

prevista para acontecer no final do ano de 2020, mas precisou ser adiada devido à pandemia do Novo Coronavírus. Sendo assim, a COP 26 foi remarcada para o final do ano de 2021.

A 26ª Conferência das Partes aconteceu em novembro de 2021, na Escócia, na qual cerca de 200 países adotaram o Acordo Climático de Glasgow. Após quase duas semanas de debates, o novo acordo teve foco na redução das emissões de GEE causadas pelos combustíveis fósseis, a fim de manter a temperatura da Terra abaixo de 1,5°C. Para isso, foi solicitado às Partes que comparecessem à COP27, que acontecerá em 2022 no Egito, com atualizações sobre os planos que serão executados para reduzir as emissões de GEE até o ano de 2030. Todavia, o novo Acordo ainda gera muitas incertezas (DEWAN e CASSIY, 2021).

Tendo em vista que tanto o Acordo de Paris como o Acordo Climático de Glasgow são relativamente recentes e ainda não apresentam todas as diretrizes e mudanças do comércio de emissões, a análise desse trabalho foi feita com base no Protocolo de Quioto.

3.4 O Potencial de Aquecimento Global

Além do dióxido de carbono, outros seis gases também prejudicam o meio ambiente com diferentes intensidades. Por isso, foi criado pelo IPCC um parâmetro para compará-los e converte-los em seu equivalente em toneladas de CO₂ denominado de Potencial de Aquecimento Global (GWP – *Global Warming Potencial*). O GWP considera os diferentes tempos que esses gases permanecem suspensos na atmosfera e a sua eficiência na absorção de radiação infravermelha (LIMIRO, 2008).

Para o cálculo dos GWPs, leva-se em consideração a razão entre a emissão de 1kg de GEE com 1kg de emissão de CO₂ em um período de 100 anos. Desse modo, é possível encontrar o equivalente de gás carbônico (CO₂) para cada GEE. O metano, por exemplo, possui um GWP de 21, pois o seu potencial de aquecimento global é 21 vezes mais forte que o do CO₂ (SOUZA, 2014).

O resumo da relação entre os gases do efeito estufa e seu potencial de aquecimento global equivalente, conforme publicado no Segundo Relatório de Avaliação do IPCC (1995), encontra-se na Tabela 1. Nota-se que todos os principais gases do efeito estufa possuem um potencial de aquecimento global maior que o CO₂, entretanto, o dióxido de carbono é o gás mais emitido para a atmosfera.

Tabela 1: Gases do efeito estufa e seu respectivo GWP.

GEE	GWP*
Dióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	21
Óxido nitroso (N ₂ O)	310
Hidrofluorcarbonos (HFCs)	140 a 11.700
Perfluorcarbonos (PFCs)	6.500 a 9.200
Hexafluoreto (SF ₆)	23.900

Fonte: Adaptado de IPCC (2007).

Como demonstra a Tabela 2, o metano, principal GEE em estudo nesse trabalho, é o segundo gás mais representativo no efeito estufa.

Tabela 2: Contribuição dos GEE para o aquecimento global.

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Halogenados (HFC, PFC e SF ₆)
Contribuição para o aquecimento global	60%	20%	6%	14%
Aumento da concentração desde 1750	31%	151%	17%	-

Fonte: Adaptado de CETESB, disponível em <<https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>>. Acesso em 24/11/2021.

3.5 O Mercado de Carbono

O Comércio de Emissões pode acontecer através de transações realizadas via empresas ou em bolsas de valores e são chamadas de Reduções Certificadas de Emissões (RCE's) ou Créditos de Carbono. Através dele cada tonelada de carbono que um país em desenvolvimento deixar de emitir poderá ser vendida através do mercado de carbono para países industrializados a fim de que estes cumpram suas metas de redução de emissões, determinadas em Quioto (BRASIL, 1997).

O mercado de carbono possui vários segmentos. Dentre eles, existe o mercado que atua de acordo com o Protocolo de Quioto, foco do presente trabalho. Ademais, existem também mercados de carbono que atuam sobre suas próprias convenções e os mercados de carbono voluntários (GUIMARÃES, 2007).

3.5.1 Mercado de carbono regulado pelo Protocolo de Quioto

Seguindo as diretrizes do Protocolo de Quioto, o mercado de carbono atua através da comercialização de certificações de redução de emissão, emitidas pelos mecanismos de flexibilização. Existem três mecanismos (Brasil, 1998):

- CIE - Comércio Internacional de Emissões (*International Emissions Trading – IET*);
- IC – Implementação Conjunta (*Join Implementation – JI*);
- MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (*Clean Development Mechanism – CDM*).

O Comércio Internacional de Emissões é usado somente pelos países desenvolvidos que fazem parte do Anexo I do Protocolo de Quioto. A priori, os países que não alcançarem suas metas de redução de emissões poderão comprar o excedente de outro país. Entretanto, outras atividades de redução de emissões devem ser implementadas em conjunto pelo país que comprar as RCE's (CEBDS, 2002).

De modo similar, a Implementação conjunta também é usada somente pelos países do Anexo I do Protocolo de Quioto. Através dela, um país industrializado pode desenvolver projetos de redução de emissões em outros países que ainda estão em desenvolvimento e ficar com os créditos de carbono gerados. Os custos serão menores e o país não pertencente ao Anexo I será compensado com novas tecnologias. (CEBDS, 2002).

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é tratado no artigo 12 do Protocolo de Quioto e foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar os países que não fazem parte do Anexo I, mas que querem de forma voluntária reduzir suas emissões de GEE, viabilizando assim o desenvolvimento sustentável mediante investimentos em tecnologias mais eficientes, substituição de fontes de energias fósseis por renováveis, racionalização do uso da energia, florestamento e reflorestamento, entre outras. (LOPES, 2002).

Segundo Frondizi (2009), o MDL regula atividades de projeto que devem gerar reduções de emissões adicionais àquelas que ocorreriam na ausência do projeto, garantindo benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo.

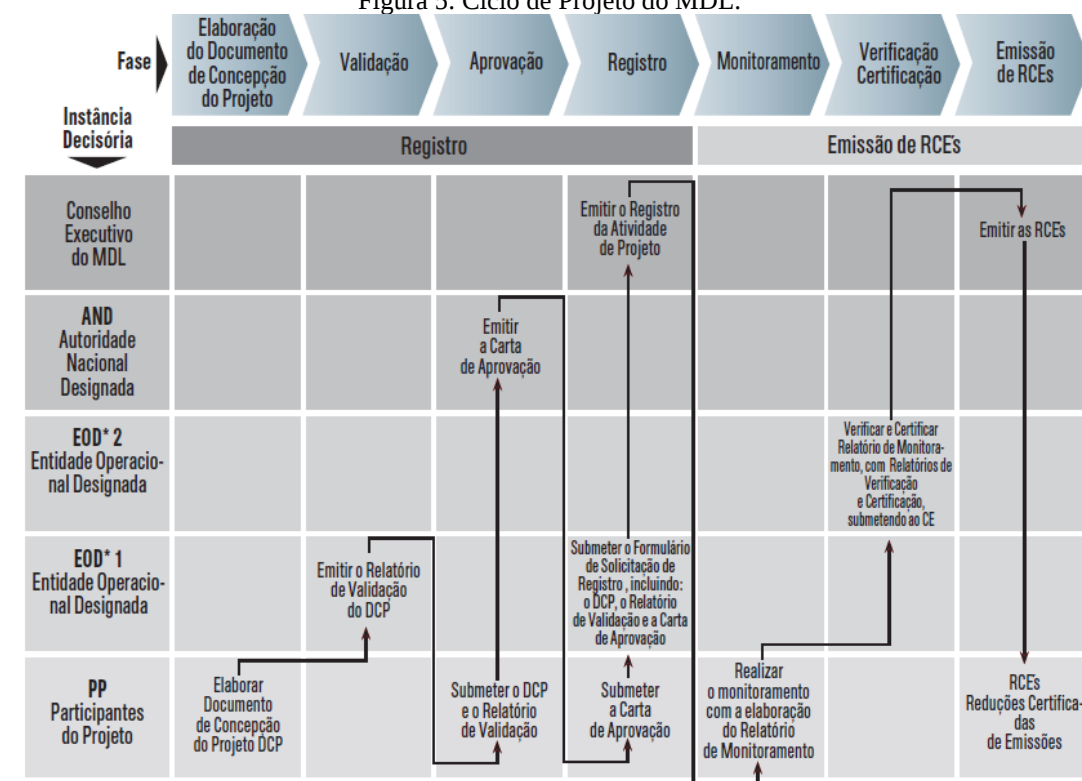
3.6 Ciclo de Projeto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

Os Projetos MDL são feitos para que haja redução de emissão de GEE através de mudanças industriais por novas alternativas menos poluentes. A redução de emissões geradas precisa ser contabilizada e comprovada, para que empresas certificadoras, designadas por um

comitê executivo, autorizem a transformação em créditos de carbono que possam ser negociados. Para resultar em créditos de carbono, uma atividade de projeto de MDL deve passar por todas as sete etapas listadas a seguir (LIMIRO, 2000) (Figura 5):

- Elaboração do Documento de Concepção de Projeto (DCP);
- Validação do projeto por uma Entidade Operacional Designada (EOD);
- Aprovação pela Autoridade Nacional Designada (AND);
- Submissão ao Conselho Executivo do MDL para registro;
- Monitoramento do projeto;
- Verificação e certificação;
- Emissão da Redução Certificada de Emissão (RCE).

Figura 5: Ciclo de Projeto do MDL.



Fonte: (FRONDIZI, 2009).

As atividades de projeto no âmbito do MDL são divididas em dois tipos principais: (i) atividades de redução de emissões de GEE; e (ii) atividades de remoção de gás carbônico (CO₂). A segunda atividade não será explorada no presente trabalho.

Conforme disposto por Frondizi (2009), para ser elegível como projeto de MDL, qualquer atividade deve atender aos seguintes critérios.

- Participar de forma voluntária do MDL;

- Proporcionar a remoção de gás carbônico da atmosfera ou reduzir as emissões de gases do efeito estufa, de modo adicional ao que ocorreria caso não houvesse uma atividade de projeto de MDL;
- Contribuir com os objetivos do desenvolvimento sustentável;
- Caso as emissões de GEE ocorram acima do limite estipulado para as atividades de projeto e possam ser mensuráveis, o aumento de emissões deve ser descontado.
- A opinião dos atores (*stakeholders*) que se interessarem pelo projeto deve ser levada em consideração;
- Deve-se documentar e analisar a existência de possíveis impactos ambientais, e caso eles existam, um estudo de impactos ambientais precisa ser feito de acordo com os procedimentos da Parte anfitriã;
- Proporcionar benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo que diminuam os efeitos negativos das mudanças climáticas;
- Estar diretamente relacionado com os gases do efeito estufa apresentados no Anexo I do Protocolo de Quioto ou se referir aos projetos de florestamento e reflorestamento;
- Conseguir Cartas de Aprovação (LoA) dos países referentes a cada participante da atividade de projeto.

3.6.1 *Elaboração do documento de Concepção de Projeto*

A elaboração do Documento de Concepção de Projeto (DCP) é a primeira etapa do ciclo de projeto. Esse documento contém informações técnicas e organizacionais da atividade de projeto segundo os procedimentos estabelecidos pelo MDL, além de justificar a linha de base, a metodologia escolhida e mostrar a sua adicionalidade. Inicialmente, é feita uma descrição da atividade de projeto, a qual contém informações sobre o seu objetivo, a tecnologia utilizada, explicações sobre a forma com que o projeto irá reduzir as emissões de GEE e a visão dos participantes sobre a contribuição do projeto para o desenvolvimento sustentável. Além disso, deve ser elaborada uma lista das Partes e participantes envolvidos (FRONDIZI, 2009).

Contudo, tendo em vista que para uma melhor compreensão acerca da elaboração de uma DCP, assim como para uma execução correta dos cálculos das reduções líquidas de emissões de GEE, é necessário entender com clareza os termos do âmbito MDL, uma melhor explicação acerca daqueles que mais se destacam será apresentada (FRONDIZI, 2009):

- **Linha de base:** É a apresentação de um cenário, de forma razoável, no qual são representadas as emissões antrópicas de GEE por fontes que ocorreriam na ausência da atividade de projeto proposta. Ademais, serve de base para a verificação da adicionalidade e para a quantificação de reduções certificadas de emissões (RCEs) do projeto MDL. Ela é qualificada e quantificada tomando como base um Cenário de Referência;
- **Adicionalidade:** Pode-se entender o conceito de adicionalidade da seguinte forma: “uma atividade de projeto MDL é adicional se as emissões de GEE por fontes antrópicas são reduzidas a níveis inferiores aos que teriam ocorrido na ausência da atividade de projeto MDL registrada” (SOUZA,2014).

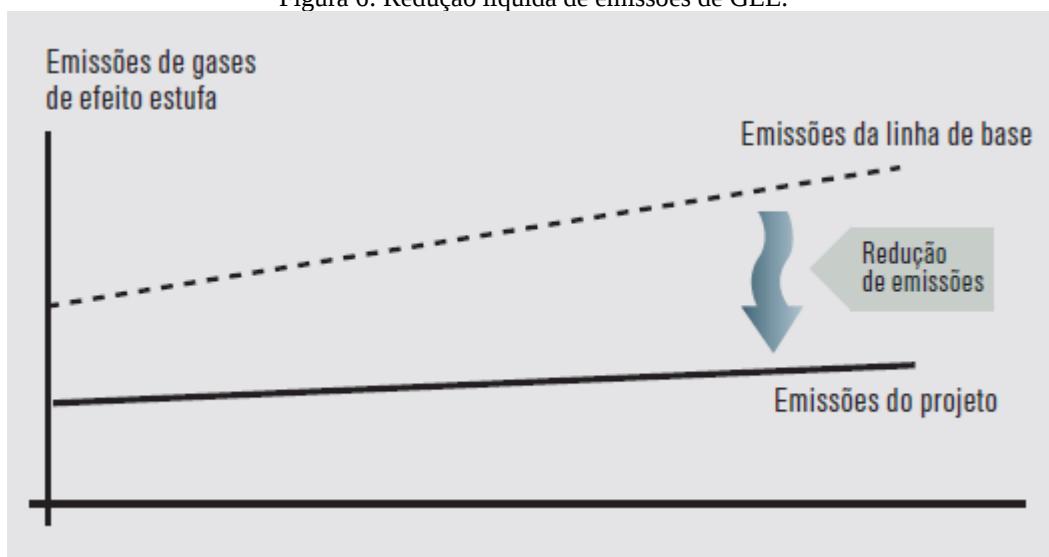
O MDL estabelece que a adicionalidade deve ser descrita de forma transparente e conservadora para que às partes interessadas possam reproduzir o projeto seguindo aquilo que foi detalhado no DCP. Além disso, existe uma ferramenta para a demonstração e avaliação da adicionalidade, na qual deve ser feita uma identificação de alternativas à atividade de projeto, que forneçam os mesmos serviços ou produtos com qualidade, propriedades e áreas de aplicações comparáveis; uma análise de investimentos, a fim de demonstrar que a atividade proposta não é a mais economicamente viável; uma análise de barreiras, para indicar as barreiras que dificultam que a atividade de projeto seja implementada, apresentando evidências documentadas e transparentes; e por fim, uma análise de prática comum, que objetiva explicar o porquê de projetos similares já terem sido implantados sem a utilização do MDL (FRONDIZI, 2009)..

- **Limite do projeto:** Compreende todas as emissões de GEE significativas e atribuíveis as atividades de projeto, controladas pelos seus participantes;
- **Fuga:** Como forma de manter um cenário mais conservador, todos os possíveis impactos negativos devem ser considerados. Desse modo, o termo “fuga” corresponde ao aumento de emissões de GEE que ocorre fora do limite do projeto do MDL, mas que é mensurável e atribuível a ele. A forma com que as fugas forem contabilizadas deve ser informada no DCP;
- **Redução líquida de emissões de GEE (Figura 6):** No âmbito do MDL, é estimada através da expressão:

Redução Líquida de Emissões = Emissões da Linha de Base – Emissões de Projeto – Fugas

As emissões de projeto podem existir e até crescer no decorrer do tempo, entretanto, precisam ser inferiores às emissões da linha de base ou não serão geradas RCEs.

Figura 6: Redução líquida de emissões de GEE.



Fonte: (FRONDIZI, 2009).

- **Plano de monitoramento:** O plano de monitoramento deve constar na metodologia do DCP. Ele deverá documentar as etapas presentes nos cálculos de redução de emissões e das fugas, com as respectivas séries históricas. Além disso, todos os protocolos de planos de monitoramento de processos e de meio ambiente precisam ser seguidos. Ademais, o plano de monitoramento terá que determinar a linha de base, estimar ou medir as emissões antrópicas que ocorram dentro do limite de projeto; identificar as potenciais causas do aumento de emissões que ocorrerem fora do limite de projeto; verificar os impactos ambientais da atividade; e estabelecer fatores de emissão e procedimentos para o cálculo dos efeitos das fugas;
- **Metodologia:** Caso não haja uma metodologia aplicável no âmbito do MDL que possa ser reaproveitada, uma nova metodologia deve ser criada, a qual deve ser submetida ao Conselho Executivo como parte de um DCP.

Quando a primeira ação objetiva e efetiva para o desenvolvimento da atividade de projeto do MDL for tomada, como a solicitação de um financiamento para a compra de algum equipamento por exemplo, a data de início da atividade será definida (FRONDIZI, 2009).

3.6.2 Validação por uma Entidade Operacional Designada (EOD)

O Projeto de MDL deverá ser validado por uma Entidade Operacional Designada (EOD). Essa validação é um processo de avaliação independente, na qual a Entidade atestará que os seguintes pontos estão contemplados de maneira adequada no DCP (FRONDIZI, 2009):

- Os critérios de elegibilidade previstos no início da atividade de projeto foram atendidos;
- A atividade de projeto é de caráter voluntário;
- Indicação das respectivas Autoridades Nacionais Designadas (AND) pelas Partes participantes;
- O critério de adicionalidade foi atendido;
- As considerações dos atores envolvidos foram consideradas;
- A documento de análise dos impactos ambientais foi submetido a EOD;
- Foi verificada a existência de fugas;
- A metodologia de linha de base e de monitoramento adotada está de acordo com as diretrizes;
- Tempo de obtenção dos créditos de carbono.

Para verificar os critérios listados, a EOD precisará analisar o DCP e as demais documentações, visitar o empreendimento e solicitar alterações complementares caso seja necessário. Se tudo estiver dentro dos conformes, a EOD emitirá um Relatório de Validação da atividade de projeto, que deverá ser submetido pelos participantes do projeto à Atividade Nacional Designada (AND) para aprovação (SOUZA, 2014).

3.6.3 *Aprovação por uma Autoridade Nacional Designada (AND)*

Antes de ser registrado pelo Conselho Executivo do MDL, cada Parte envolvida na atividade de projeto deve obter uma Carta de Aprovação (LoA), concedida pela Autoridade Nacional Designada do país anfitrião, atestando que a atividade de projeto é voluntária, segue as diretrizes do Protocolo de Quioto e contribui para o desenvolvimento sustentável do país. No Brasil, a AND responsável é a Comissão Interministerial de mudança Global do Clima (CIMGC) (MCT, 2008).

3.6.4 *Registro pelo Conselho Executivo do MDL*

Assim que a Carta de aprovação for obtida, deve ser encaminhado pela EOD para o Conselho Executivo um formulário com o objetivo de solicitar o registro. O formulário deve conter os seguintes documentos em anexo (FRONDIZI, 2009):

- Documento de concepção de projeto (DCP);
- Carta de Aprovação (LoA);
- Relatório de Validação;

- Explicação de quando e como o Relatório de Validação foi tornado público;
- Informação de como levou-se em consideração os comentários acerca do projeto de MDL;
- Informações bancárias sobre o pagamento da taxa de registro;
- Declaração contendo as formas de comunicação com o Conselho Executivo.

Desse modo, após o reconhecimento de que a documentação enviada pela EOD está completa e for realizado o pagamento da taxa de registro, a solicitação de registro será considerada como recebida. O valor da taxa de registro é baseado nas estimativas de redução de emissões declaradas no DCP, seguindo os seguintes critérios (FRONDIZI, 2009).

- US\$0,10 por tonelada de CO₂ e para reduções anuais de GEE para as primeiras 15.000 toneladas;
- US\$0,20 por tonelada de CO₂ e para reduções anuais de GEE para qualquer quantidade além de 15.000 toneladas;
- Para atividades de projeto com estimativa de reduções anuais inferiores a 15.000 toneladas de CO₂ e nenhuma taxa deve ser paga.

3.6.5 *Monitoramento*

Os participantes do projeto devem executar um monitoramento das atividades, coletando e armazenando dados que permitam a realização do cálculo de redução de emissões de GEE. Pois as Reduções certificadas de emissões só poderão ser emitidas caso o procedimento tenha sido executado devidamente. Portanto, os participantes do projeto precisam elaborar um Relatório de Monitoramento e encaminhá-lo à EOD para que esta realize a etapa de Verificação e Certificação (FRONDIZI, 2009).

Todavia, poderá ser solicitada uma revisão do plano de monitoramento a fim de melhorar a precisão e a abrangência das informações, portanto, as alterações realizadas precisam ser justificadas e enviadas a EOD para uma nova validação. Essa solicitação de revisão é realizada se o plano de monitoramento que foi registrado não for compatível com a metodologia de monitoramento aprovada, aplicável à atividade de projeto, ou quando uma nova modalidade de monitoramento for adotada (FRONDIZI, 2009).

3.6.6 *Verificação e Certificação*

Após a submissão do relatório de monitoramento à EOD contratada, esta o enviará ao Secretariado para que o relatório seja publicado no site da convenção. A priori, caberá a EOD verificar se as reduções de emissões de GEE monitoradas realmente aconteceram. Posteriormente, a EOD deve confirmar por escrito que a atividade de projeto atingiu a redução de emissões de GEE proposta e divulgar o Relatório de Certificação aos participantes do projeto, ao Conselho Executivo, as partes envolvidas e ao público (FRONDIZI, 2009).

3.6.7 *Emissão das RCEs*

Ainda no Relatório de Certificação, a EOD realizará uma solicitação ao Conselho Executivo do MDL para que este emita o montante de RCEs referente ao total de emissões reduzidas e certificadas. Desse modo, é de responsabilidade do Conselho Executivo garantir que todos os pré-requisitos de verificação e certificação foram atendidos, gerando reduções de emissões de GEE reais, mensuráveis e longo prazo, e só assim, as Reduções Certificadas de Emissão serão emitidas (SOUZA, 2014).

Caso não haja uma solicitação de revisão da emissão de RECs por parte do Conselho Executivo ou das Partes envolvidas do projeto, esta poderá ser emitida automaticamente após 15 dias do recebimento da solicitação. Entretanto, se a revisão for necessária, em caso de suspeita de fraude, má execução ou incompetência da EOD, o Conselho Executivo deverá finalizar a revisão em 30 dias. Ademais, se o Relatório de Certificação for rejeitado, a EOD pode recorrer uma única vez (FRONDIZI, 2009).

Após a aprovação do Relatório de Certificação, as RCEs serão emitidas de forma provisória para a conta pendente do Conselho Executivo no Registro do MDL até o site da Convenção tornar as emissões das RCEs públicas. Feito isso, os participantes da atividade de projeto poderão solicitar a transferência destas Reduções Certificadas de Emissões para uma conta no Registro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo ou em algum Registro Nacional (FRONDIZI, 2009).

3.7 **Tratamento de Esgoto**

De acordo com Lima (2012), a escolha do sistema de tratamento e disposição do esgoto depende de inúmeros fatores, dentre eles estão: a população a ser atendida, as características do

efluente bruto, o corpo receptor e os recursos disponíveis. O objetivo simplificado das soluções de tratamento do efluente é diminuir a parcela orgânica dos resíduos, ou seja, reduzir a presença de carbono orgânico degradável a fim de torna-lo inerte. Metcalf e Eddy (2003) informam que existem sistemas diversos para o tratamento que podem ser utilizados de forma individual ou combinada. A escolha do sistema depende de fatores como custos de implantação, impactos ambientais, sustentabilidade, eficiência/aplicabilidade, confiabilidade, disposição do lodo e simplicidade.

A maior parcela do esgoto sanitário é composta de matéria orgânica, principalmente de carboidratos, proteínas e lipídios. No que se refere à contribuição às estações de tratamento de esgoto, o efluente provém de três fontes (VON SPERLING, 2005):

- Esgoto doméstico;
- Águas de infiltração;
- Despejos industriais.

No Brasil, o sistema separador de esgoto sanitário é utilizado de forma predominante. Desse modo, as águas provenientes dos sistemas de drenagem de águas pluviais não contribuem com a vazão das ETEs. Todavia, caso a escolha seja optar por um sistema combinado, o dimensionamento da ETE deve ser feito considerando todas as contribuições (VON SPERLING, 2005).

Von Sperling (1996) classifica o tratamento centralizado do esgoto em quatro níveis: preliminar, primário, secundário e terciário.

3.7.1 *Tratamento preliminar*

O tratamento preliminar tem como objetivo separar as partes sólidas do esgoto, como grandes materiais que foram lançados de modo inadequado no esgoto, além de remover a areia presente. A forma de tratamento principal é o gradeamento e a caixa de areia, sendo o gradeamento usado para separar os sólidos mais grosseiros. Além disso, também existem caixas de gordura ou pré-decantadores (VON SPERLING, 2005).

3.7.2 *Tratamento primário*

O objetivo do tratamento primário é remover os sólidos sedimentáveis decorrentes principalmente da matéria orgânica, pois as partículas poluidoras continuam presentes no esgoto mesmo após o tratamento preliminar. Através dele, os materiais poluentes são separados da

água através do processo de sedimentação. Caso sejam utilizados agentes químicos no processo (coagulantes e/ou floculantes), a sedimentação irá gerar flocos maiores que são decantáveis mais facilmente (VON SPERLING, 1996).

Com o tratamento primário finalizado, ainda restarão poluentes de dimensões reduzidas (normalmente colóides devido à digestão do lodo), que não são removíveis por processos exclusivamente físico-químicos (VON SPERLING, 1996). Conforme Lima (2012), a remoção de poluentes nesse processo é baixa, sendo: sólidos suspensos (50-80%), nitrogênio (10-25%), DBO e DQO (40-75%), fósforo (10-20%) e coliformes fecais (30-40%).

3.7.3 Tratamento secundário

O tratamento secundário tem como principal objetivo remover a matéria orgânica carbonácea através do uso predominante de mecanismos biológicos. Nessa etapa a matéria orgânica coloidal será consumida por microrganismos através de reatores biológicos. Desse modo, o processo biológico adotado pode ser aeróbio, anaeróbio ou uma combinação de ambos (VON SPERLING, 1996).

No tratamento secundário, o índice de remoção de poluentes é bem maior. De acordo com Salvador (2010) *apud* LIMA (2012), os valores médios de remoção verificados são: DBO e DQO (70-89%), sólidos suspensos (80-95%), nitrogênio (30-50%), fósforo (20-60%) e coliformes fecais (60-99,9%).

Somente com o tratamento secundário, os níveis de eficiência alcançam os padrões legais de emissão de efluentes, entretanto, os padrões de qualidade ambiental dependem também de fatores como o poluente considerado, a classificação e a vazão do corpo receptor e da qualidade da água. Por conseguinte, um tratamento terciário se torna necessário devido à insuficiência de remoção de nutrientes e principalmente de coliformes fecais (SALVADOR, 2010 *apud* LIMA, 2012).

3.7.4 Tratamento terciário

Segundo Von Sperling (1998), o objetivo do tratamento terciário é remover poluentes específicos, sejam eles tóxicos ou compostos não-biodegradáveis, e complementar a remoção nos poluentes que restaram após o tratamento secundário. Todavia, a remoção de nutrientes ou de organismos patogênicos, pode fazer parte tanto do tratamento secundário como do tratamento terciário a depender do processo adotado.

Lima (2012) aponta que o tratamento terciário remove completamente os coliformes fecais, além de remover 95% de nitrogênio e 99% de fósforo. Contudo, por ser muito caro, é pouco utilizado no Brasil.

3.7.5 *Processos biológicos do tratamento de esgoto*

De acordo com Lima (2012), tanto os processos aeróbios quanto anaeróbios contribuem para que o efeito estufa se intensifique, visto que o metabolismo microbiano produz alguns GEE. O tratamento biológico do esgoto ocorre devido à atividade de microrganismos, principalmente de bactérias, quando estas se alimentam da matéria orgânica presente nos resíduos.

O objetivo da utilização de processos biológicos no tratamento de esgoto é reproduzir, em volume controlado, as reações bioquímicas de oxidação da matéria orgânica que ocorreriam naturalmente em corpos de água receptores. Entretanto, nas ETEs esse mecanismo é feito por meio de uma concentração de microrganismos, visto que os volumes de confinamento são pequenos (VON SPERLING, 1996).

Segundo o Relatório da CETESB (SÃO PAULO, 2010), os processos de tratamento de esgoto mais utilizados no Brasil, que mais contribuem para o aquecimento global, devido ao potencial para emissões de GEE são:

- Quando não existe rede coletora: tanque séptico e sumidouro, vala aberta, fossa seca e lançamento em cursos d'água sem coleta;
- Quando existe rede coletora: lodo ativado/digestor anaeróbio, lagoas de estabilização, reator anaeróbio, tanque séptico, tanque séptico condominial e lançamento em cursos d'água com coleta.

3.7.6 *Rotas de decomposição da matéria orgânica*

Tendo em vista que o tratamento de esgoto consiste em principalmente degradar e remover a matéria orgânica mediante a transformação de substâncias complexas em outras mais simples, o processo pode acontecer por rotas: anaeróbia, anóxica e aeróbia (LIMA, 2012). Von Sperling (1996) informa que existem organismos adaptados para condições metabólicas distintas, alguns dos mais importantes para o tratamento de esgoto são:

- Organismos aeróbios estritos: que usam somente o oxigênio livre na respiração;
- Organismos facultativos: que usam preferencialmente o oxigênio livre, mas também pode usar nitrato como aceptores de elétron;

- Organismos anaeróbios: que usam sulfato ou dióxido de carbono como aceptores de elétron e não podem obter energia através da respiração aeróbia.

3.7.7 Digestão anaeróbia

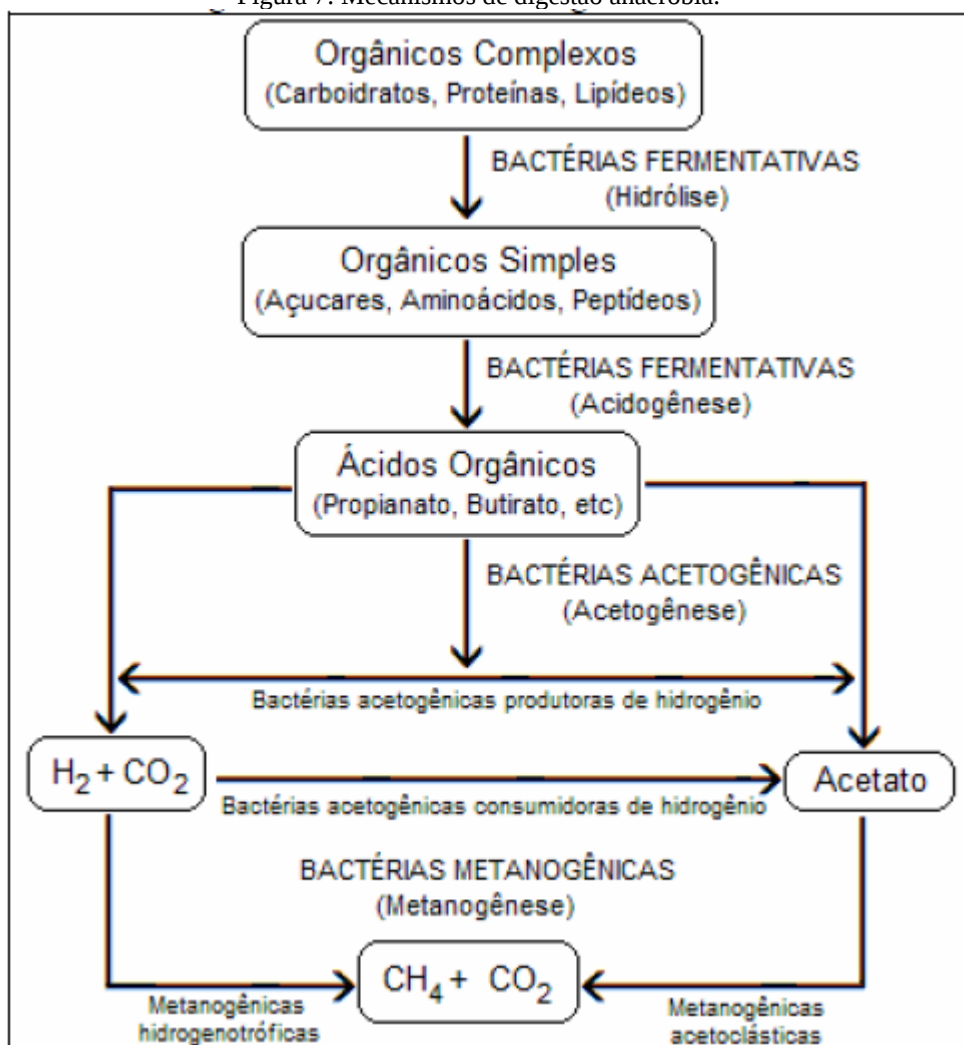
De acordo com Chernicharo (1997), é possível dividir o processo de digestão anaeróbia de compostos orgânicos em dois estágios. No primeiro, um grupo de bactérias facultativas e anaeróbias converte os orgânicos complexos como proteínas, carboidratos e lipídios em compostos mais simples, principalmente em ácidos voláteis. Já no segundo estágio, ácidos orgânicos, hidrogênio e gás carbônico são transformados por um grupo especial de bactérias estritamente anaeróbias, denominadas de formadoras de metano (arqueas metanogênicas), em produtos finais gasosos, o gás carbônico e o gás metano.

Os diversos grupos de microrganismos presentes na digestão anaeróbia trabalham de modo interativo, a fim de converter a matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico, amônia e novas células bacterianas. Esses microrganismos podem ser divididos em três grupos de bactérias que possuem comportamentos fisiológicos distintos, são eles (CHERNICHARO, 1997):

- Bactérias fermentativas: Responsáveis por transformar através de hidrólise, polímeros em monômeros que podem atravessar as paredes celulares dos organismos fermentativos, e estes em substâncias como acetato, dióxido de carbono, hidrogênio, ácidos orgânicos de cadeia curta, aminoácidos e glicose;
- Bactérias acetogênicas: São bactérias produtoras de hidrogênio, responsáveis por oxidar o grupo de aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e álcoois em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- Arqueas metanogênicas: Os produtos gerados pelo segundo grupo formam o substrato essencial para as bactérias metanogênicas, sendo que estas constituem dois diferentes grupos. Enquanto um dos grupos usa o acetato, o transformando em metano e dióxido de carbono, o outro grupo produz metano através da redução do dióxido de carbono.

A Figura 7 ilustra uma representação esquemática dos grupos bacterianos e das fases da digestão anaeróbia.

Figura 7: Mecanismos de digestão anaeróbia.



Fonte: Chernicharo, 1997.

O processo de digestão anaeróbia pode ser subdividido em quatro fases principais: a hidrólise, a acidogênese, a acetogênese e a metanogênese.

Em primeiro lugar, acontece a hidrólise de materiais particulados complexos (polímeros), em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores) que possam atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas. Essa conversão acontece devido à ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas (CHERNICHARO, 1997). Segundo Lettinga *et al.*, (1996), vários fatores podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado, alguns deles são:

- Temperatura operacional do reator;
- Tempo de residência do substrato no reator;
- Composição do substrato;
- Dimensão das partículas;

- pH do meio;
- Concentração de produtos da hidrólise.

Em seguida acontece a acidogênese, na qual as substâncias solúveis que foram geradas através da hidrólise serão metabolizadas por bactérias fermentativas, sendo convertidas em compostos mais simples que serão excretados pelas células (METCALF e EDDY, 2003 *apud* LIMA, 2012). Alguns dos compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, amônia, hidrogênio, sulfeto de hidrogênio e novas células bacterianas. Tendo em vista que os ácidos graxos voláteis são os principais produtos dos organismos fermentativos, estes são chamados de bactérias fermentativas acidogênicas (CHERNICHARO, 1997).

Conforme Kunz *et al.*, (2019), graças a atividade das bactérias fermentativas acidogênicas, o material particulado presente no esgoto doméstico será hidrolisado, fazendo com que os produtos solúveis da primeira etapa sejam fermentados em ácidos orgânicos, álcoois e compostos minerais.

A acetogênese é a terceira etapa da digestão anaeróbia, na qual as bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na segunda etapa, para produzir um substrato que seja apropriado para as bactérias metanogênicas. As bactérias acetogênicas geram o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato (CHERNICHARO, 1997).

A quarta e última etapa é a metanogênese, responsável pela degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono, executada pelas arqueas metanogênicas. Essas arqueas utilizam um número limitado de substratos: ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Ademais, vale ressaltar que estes organismos são estritamente anaeróbios.

De acordo com o substrato utilizado como fonte de energia, as metanobactérias mencionadas podem ser divididas em dois grandes grupos (CHERNICHARO, 1997):

- **Arqueas metanogênicas acetoclásticas:** Conseguem gerar metano a partir do acetato e são os microrganismos predominantes na digestão anaeróbia, responsáveis por aproximadamente 60 a 70% de toda a produção de metano. Os principais gêneros aos quais as bactérias pertencem são *Methanosarcina* e *Metanosaeta*;
- **Arqueas metanogênicas hidrogenotróficas:** A maior parte das espécies de bactérias metanogênicas consegue produzir metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono. Os gêneros mais frequentes em reatores anaeróbios são: *Methanobacterium*, *Methanospirillum* e *Methanobrevibacter*.

As arqueas metanogênicas são de extrema importância para a manutenção da digestão anaeróbia, tendo em vista que elas são responsáveis por consumir o hidrogênio produzido nas três fases anteriores.

Ademais, além das quatro fases supracitadas, dependendo da composição química do despejo que será tratado, o processo de digestão anaeróbia pode incluir uma quinta etapa, a sulfetogênese. Nela, despejos que contenham compostos de enxofre passam por uma redução de sulfato e formação de sulfetos, através da ação de bactérias anaeróbias denominadas bactérias redutoras de sulfato (CHERNICHARO, 1997).

Estima-se que soluções de desenvolvimento sustentável serão cada vez mais impostas em sistemas de tratamento de esgoto que se baseiam na rota natural de mineralização biológica. Desse modo, os reatores UASB, que representam uma grande parcela da tecnologia de tratamento anaeróbio, tem enorme potencial para a produção de recursos para a sociedade. Visto que, enquanto a tecnologia UASB remove uma grande quantidade da matéria orgânica afluente, ela também gera subprodutos utilizáveis como o biogás e o lodo excedente (LETTINGA, 2005).

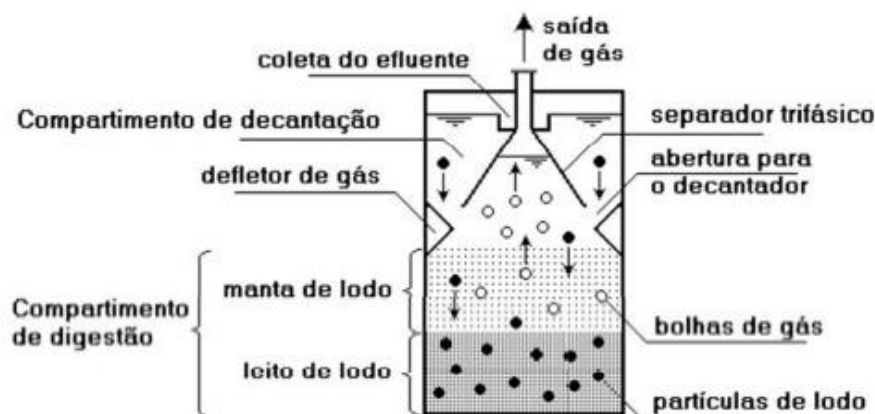
3.7.8 *Reatores anaeróbios UASB*

Os reatores UASB são utilizados no tratamento anaeróbio de esgoto doméstico, com o objetivo de remover a matéria orgânica carbonácea que se encontra em suspensão ou dissolvida nas águas residuárias. No reator, a matéria orgânica é estabilizada em todo o compartimento de digestão (leito e manta de lodo) e a mistura do sistema ocorre com o fluxo ascendente de esgoto e de bolhas de ar (LOBATO, 2011). De acordo com Chernicharo (1997), é possível definir o reator UASB como um tanque Imhoff de fluxo vertical, que contém câmaras de sedimentação e digestão anaeróbia sobrepostas e com uma abertura no fundo, pela qual passam os sólidos sedimentados que se dirigem ao compartimento inferior.

Tendo em vista que o movimento de ascensão das bolhas de ar causa o arraste do lodo, é necessário que haja a instalação de um separador trifásico para gases, sólidos e líquidos na parte superior do reator, a fim de que o lodo possa ser retido e retornado. Existe também um compartimento de decantação localizado no entorno e acima do separador trifásico, onde acontece a remoção do lodo mais pesado contido na massa líquida. O lodo é então mandado de volta para o compartimento de digestão, entretanto, as partículas mais leves são perdidas junto ao efluente final. Além disso, as bolhas de gás que foram formadas no compartimento de digestão, sobem na fase líquida até encontrarem a interface líquido-gás que fica abaixo do separador trifásico. É nessa interface que as bolhas se soltam e criam uma fase gasosa. O biogás

produzido não entra no sedimentador devido a colocação de defletores. Além disso, o biogás deve ser conduzido por tubulações que levem a algum tipo de tratamento ou aproveitamento (HAANDEL e LETTINGA, 1994). Uma ilustração de um reator anaeróbico de fluxo ascendente (UASB) está apresentada na Figura 8.

Figura 8: Desenho esquemático do reator UASB.



Fonte: Chernicharo (2007)

3.8 Produção de Biogás

Segundo Comastri Filho (1981), o biogás é um gás incolor, geralmente inodoro, insolúvel, pouco denso, que queima na cor azul e produz uma quantidade mínima de poluição. Ele é resultante da fermentação anaeróbica, em condições adequadas de umidade, de lixo residencial e industrial e de dejetos animais. O biogás é combustível e tem alto poder calorífico. Sua composição pode ser resumida em dois gases, o gás carbônico (CO_2) e o metano (CH_4), que representa a maior parcela do biogás. Outros gases menos representativos são o nitrogênio (N), o hidrogênio (H) e o gás sulfúrico (H_2S). Quanto maior a porcentagem de metano presente na mistura, maior será a qualidade do biogás.

Além disso, o biogás pode ser gerado naturalmente em lagos, rios, mangues e pântanos de origem industrial, urbana ou rural. De acordo com Noyola *et al.* (2006), o biogás gerado em reatores UASB nas estações de tratamento de esgoto possui uma composição de metano entre 70 a 80%, nitrogênio entre 10 a 25% e gás carbônico entre 5 a 10%. A parcela de gás carbônico ser menor significa que a maior parte dele permanece no efluente como íons de bicarbonato, todavia, em digestores de lodo com altas concentrações de matéria orgânica, a porcentagem de CO_2 é mais alta (AGRAWAL *et al.*, 1997). A composição do biogás gerado em reatores

anaeróbios no tratamento de esgoto sanitário, em aterros sanitários e em digestores de lodo está representada na Tabela 3:

Tabela 3: Composição do biogás gerado em reatores anaeróbios no tratamento de esgoto sanitário, em aterros sanitários e em digestores de lodo.

Parâmetro	Unidade	Composição volumétrica típica		
		Biogás de reatores anaeróbios	Biogás de aterro sanitário	Digestores de lodo
Metano – CH ₄	%	60 a 85	45 a 50	60 a 70
Gás carbônico – CO ₂	%	5 a 15	30 a 45	20 a 40
Monóxido de carbono – CO	%	0 a 0,3	0 a 0,2	-
Nitrogênio – N ₂	%	10 a 25*	0 a 15	< 2
Hidrogênio – H ₂	%	0 a 3	Traços a > 1	-
Sulfeto de hidrogênio – H ₂ S	Ppmv	1000 a 2000	10 a 200	até 1000
Oxigênio – O ₂	%	Traços	0,8	-

Fonte: Adaptado de Rands *et al.* 1981; Noyola *et al.* 1988; Agrawal *et al.* 1997; Bohn 2001 *apud* Belli *et al.*

2001; Pagliuso *et al.* 2002; Barbosa e Stuetz 2005; Usepa 2005; Noyola *et al.* 2006; Rasi *et al.* 2007 *apud* Lobato 2011.

A quantidade de metano presente no biogás é o principal fator determinante do seu poder calorífico. Sabendo que o poder calorífico do metano é de 35,9 MJ.Nm⁻³, um biogás com cerca de 60% de metano em sua composição tem poder calorífico de 21,5 MJ.Nm⁻³, o que corresponde a 67% do poder calorífico do gás natural (Tabela 4).

Tabela 4: Poder calorífico inferior do biogás e de outros combustíveis e sua equivalência com o metano.

Combustível	MJ.kg ⁻¹	MJ.Nm ⁻³	kWh.Nm ⁻³	Equivalência ao metano
Gases				
Metano	50,0	35,9	10,0	1,0
Gás natural	45,1	31,8	8,8	0,9
Biogás típico (60% CH ₄)	30,0	21,5	6,0	0,6
Butano	45,7	118,5	32,9	3,3
Propano	46,4	90,9	25,2	2,5
Líquidos				
Metanol	19,9	15.900*	4.415,4*	442,9
Etanol	26,9	21.400*	5.942,8*	596,1
Gasolina	45,0	33.300*	9.247,4*	927,6
Diesel	42,1	34.500*	9.580,7*	961,0

Nm³: volume e condições padrão de temperatura e pressão: 273 K e 1 atm; 1 kJ = 0,2388 kcal, 1 kJ = 0,2777 Wh

*MJ.m⁻³ e kWh.m⁻³

Fonte: Adaptado por Lobato (2011) de Constant *et al.* (1989) *apud* Noyola *et al.* (2006).

3.9 Recuperação e utilização do Biogás

Sabe-se que cerca de 80% da demanda por energia em todo o mundo é atendida por combustíveis fósseis, todavia, é previsto que esses combustíveis um dia irão acabar de modo permanente. No que diz respeito ao gás natural e ao petróleo, estima-se que seu esgotamento teórico acontecerá em 2070, entretanto, esses recursos acabarão gradativamente, visto que não são ilimitados (BOERIU *et al.*, 2005).

Desse modo, faz-se necessário um investimento maior em fontes de energia renováveis, que causem pouco ou nenhum impacto ambiental e com baixas emissões de gases do efeito estufa. Entretanto, o consumo de combustíveis fósseis representa 56,6% de todas as emissões antrópicas de GEE. Portanto, a adoção de fontes de energia renováveis é um importante fator para a mitigação das mudanças climáticas, pois podem fornecer energia elétrica, térmica e mecânica, além de produzir combustíveis capazes de satisfazer inúmeras necessidades energéticas. Ademais, entende-se como fonte renovável qualquer forma de energia que provém de fontes solares, geofísicas ou biológicas, reabastecidas por processos naturais em uma taxa maior ou igual a sua taxa de utilização. A maior parte das fontes de energia renovável produz pouca ou nenhuma emissão de gás carbônico (CO₂) (IPCC, 2011).

Trazendo para o escopo desse trabalho, a recuperação do biogás gerado através da digestão anaeróbia em estações de tratamento de esgoto sanitário oferece benefícios ambientais, econômicos, energéticos e sociais. O benefício ambiental é enorme, visto que reduziria significativamente as emissões de metano. Do mesmo modo, o reaproveitamento energético do biogás para uso no lugar de combustíveis fósseis também diminuiria as emissões de GEE.

Segundo Zanette (2009), o Brasil tem um potencial significativo para produzir biogás em aterros sanitários e em estações de tratamento de esgoto devido a população estar concentrada em grandes centros urbanos. Em um cenário onde se considera a universalização dos serviços de coleta e tratamento de efluentes, além de disposição adequada dos resíduos sólidos, o potencial de produção de metano chegaria a 15,8 milhões de m³.d⁻¹ e nas estações de tratamento de esgoto a 7,3 milhões de m³.d⁻¹.

Salomon e Lora (2009) listam os principais fatores que limitam o uso do biogás como fonte de energia, são eles: equipamentos com custos muito altos, falta de tecnologia nacional para a geração de energia elétrica através do biogás, baixos investimentos governamentais no setor, garantia de que as unidades de aproveitamento do biogás funcionariam a longo prazo, viabilidade econômica, dependência das condições locais, capacidade de armazenamento e distribuição do biogás, e por fim, as dificuldades que pequenos produtores de biogás encontram em comercializar os créditos de carbono.

3.10 Viabilidade de ETE'S como atividade de projeto de MDL

No que diz respeito às emissões de gases do efeito estufa no tratamento anaeróbio dos esgotos sanitários, as principais alternativas tecnológicas para as reduções de GEE são (IPCC, 2006):

- Substituir um processo anaeróbio por um aeróbio, visto que as emissões passariam a ser nulas se o procedimento for feito de modo adequado. Todavia, essa solução não será explorada no presente trabalho;
- Investir em tecnologias de recuperação e queima de metano, como flares, em ETE's onde existam tratamento anaeróbio. A adoção dessa solução faz com que o sistema gere dióxido de carbono no lugar de metano que como já dito, não é contabilizado. A eficiência do queimador escolhido irá determinar qual parcela do gás sofrerá combustão completa até gerar o produto final (CO_2);
- Utilizar novas tecnologias para o aproveitamento energético do biogás devido a sua queima. Desse modo, através da energia gerada é possível obter créditos de carbono de acordo com os requisitos e normas do setor Energia.

3.10.1 Combustão direta do biogás sem recuperação de energia

O biogás pode ser queimado através de combustão direta sem recuperação de energia com o uso de queimadores que possibilitam a ignição e a queima de gases. Todavia, optar por queimadores não possibilita o aproveitamento energético do biogás, mas por motivo de segurança, essa alternativa deve sempre estar presente, já que o biogás causa riscos de explosões. Além disso, sua adoção também ajuda a controlar odores e principalmente, diminui significativamente a emissão de gases do efeito estufa. Ademais, o uso de queimadores também é necessário em sistemas que utilizam o biogás para gerar energia elétrica, a fim de que ele possa ser utilizado quando o equipamento de geração de energia estiver inativo, bem como em situações nas quais a produção de biogás e a concentração de metano forem baixas demais para permitir que o equipamento gere energia (EUROPEAN COMMISSION, 2001, *apud* LOBATO, 2011). Os queimadores podem ser divididos em dois tipos (IEA, 2000):

- Queimador aberto (Figura 9): A combustão do biogás acontece no interior de uma câmara de material refratário, assentada no terreno. O biogás é queimado em condições controladas, nas quais é convertido quase que completamente, e as emissões de GEE são reduzidas. Nesse tipo de queimador, a fumaça, a chama e o ruído praticamente não

são percebidos. Também existe a possibilidade de transferi-lo para outro local, e seu custo é 25-70% menor do que dos queimadores fechados. Entretanto, a combustão do biogás é incompleta, ocorre perda de calor na queima, e os padrões internacionais de desempenho e de emissões não são atendidos;

Figura 9: Queimador aberto.



Fonte: Soluções Industriais *apud* Energês (2020).

- Queimador fechado (Figura 10): Em queimadores fechados, a queima do biogás ocorre no interior de uma câmara de material refratário, cilíndrica e assentada no terreno. A combustão acontece em condições controladas, de modo uniforme, e o biogás é convertido quase completamente, reduzindo as emissões de GEE. Assim como no queimador aberto, os níveis de fumaça, chama e ruído são pouco perceptíveis. Apesar do preço mais elevado, o queimador tipo flare é capaz de atender os padrões internacionais de desempenho de emissões, capaz de operar em uma grande faixa de condições de combustão e pode ser projetado para situações específicas de cada local.

Figura 10: Queimador flare fechado.



Fonte: Fokal *apud* Energês (2020).

3.10.2 Potencial do biogás para geração de energia

Com o objetivo de utilizar o biogás como fonte de energia, a combustão direta é a maneira mais simples a ser adotada, pois mais de 80% do poder calorífico do metano será recuperado como energia útil (USEPA, 2008b). De acordo com Lobato (2011), os combustíveis usados anteriormente podem ser substituídos ou complementados pelo biogás, que é canalizado diretamente até o consumidor e usado nos equipamentos de combustão.

A combustão direta do biogás pode acontecer através de caldeiras, nas quais a energia é transferida de um combustível para a água ou outro fluido contido em uma câmara fechada, de onde é levado até o ponto final de utilização. Esse fluido aquecido ou vaporizado pode ser usado em processos de aquecimento tanto em residências e indústrias, como fornecendo vapor para embarcações, por exemplo. Combustíveis como madeira, petróleo ou gás natural servem de fonte de calor para as caldeiras, entretanto, o biogás também pode substituir esses combustíveis. A exemplo disso, nos Estados Unidos essa é uma prática conhecida e de sucesso há mais de 25 anos. A energia produzida por caldeiras que são alimentadas por biogás pode variar de 2kJ.h^{-1} a 160.000 MJ.h^{-1} (USEPA, 2008b).

O biogás também pode ser utilizado como combustível em secadores térmicos para o lodo produzido nas estações de tratamento de esgoto. Vários secadores de lodo estão disponíveis no mercado, dentre eles: secadores rotativos diretos e indiretos, secadores de esteira diretos, secadores de caçamba diretos com misturadores internos, dentre outros (LOBATO, 2011).

Segundo Lobato (2011), para evitar a perda de calor residual nos processos termodinâmicos, pode haver uma geração combinada de eletricidade e calor para a recuperação de energia do biogás. O aproveitamento pode acontecer na forma de vapor e água quente ou fria, aumentando a eficiência energética do processo. Algumas das principais tecnologias disponíveis para a cogeração são motores de combustão interna, turbinas a gás e microturbinas.

Como já mencionado, o Brasil tem um grande potencial para a geração de energia elétrica através do biogás obtido com a digestão anaeróbia no tratamento de esgoto sanitário. Algumas vantagens do aproveitamento energético do biogás são (SALOMON E LORA, 2009):

- Geração de energia próxima da fonte consumidora;
- Possibilidade de obtenção de lucro ao comercializar a energia gerada com companhias energéticas;
- Redução no consumo de energia pela produtora;
- Potencial uso de processos para a cogeração de energia;

- Redução de emissões de metano para a atmosfera e a possibilidade de obtenção de créditos de carbono.

4 METODOLOGIA

4.1 Unidades de tratamento com reatores UASB em Sergipe.

O início do desenvolvimento do presente trabalho se deu através da obtenção de Relatórios de Automonitoramento das Estações de Tratamento de Esgoto do estado de Sergipe. Os dados supracitados foram disponibilizados pela Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO) e apresentam informações mensais referentes às vazões e a demanda química de oxigênio de entrada (DQO) de cada estação.

Ao analisar as estações de tratamento de esgoto monitoradas pela DESO, optou-se por avaliar o potencial para a geração de créditos de carbono de seis ETE's que utilizam reatores UASB no tratamento do esgoto. São elas:

- A Estação Recuperadora de Qualidade (ERQ) Sul, que está localizada no Bairro Santa Maria em Aracaju/SE e possui como corpo receptor o Rio Pitanga. Todo o efluente passa inicialmente pelo gradeamento e pela caixa de areia e em seguida é levado ao reator UASB e a lagoa anaeróbia de maturação (Figura 11).

Figura 11: Estação Recuperadora de Qualidade (ERQ) Sul.



Fonte: Construtora Heca, 2021. Disponível em: <<http://heca.com.br/atuacao/saneamento/>>.

- A Estação Recuperadora de Qualidade (ERQ) Oeste, localizada na Rua Quirino, DIA, em Aracaju-SE, que assim como a ETE Sul, conta com gradeamento e caixa de areia e possui como tratamento secundário uma combinação entre reator UASB, valos de oxidação e unidade de cloração, além de depositar seu efluente tratado no Rio Pitanga (Figura 12).

Figura 12: Estação Recuperadora de Qualidade (ERQ) Oeste.



Fonte: Construtora Heca, 2021. Disponível em: <<http://heca.com.br/atuacao/saneamento/>>.

- A Estação de Tratamento de Esgoto de Itabaiana, que está localizada na Estrada do Sítio de Josa Boiadeiro em Itabaiana/SE e possui como corpo receptor o Riacho Marcela. A estação conta com tratamento preliminar, sistema DAFA, lodos ativados e desinfecção ultravioleta (Figura 13).

Figura 13 Estação de Tratamento de Esgoto de Itabaiana/SE.



Fonte: Jorge Henrique, 2017. Disponível em: <<https://cohidro.se.gov.br/?p=4841>>.

- A ETE Barra, localizada na Rua C do Loteamento Rio Mar, no município da Barra dos Coqueiros e tem como corpo receptor o Rio Sergipe. Ela conta com tratamento preliminar, reator UASB, valos de oxidação, decantadores secundários e desinfecção por cloração (Figura 14).

Figura 14: Estação de Tratamento de Esgoto da Barra dos Coqueiros/SE.



Fonte: Google Earth (2021).

- A Estação de Tratamento de Esgoto Rosa Elze, localizada no Loteamento Rosa do Oeste no bairro Eduardo Gomes, em São Cristóvão/SE, que tem como corpo receptor o Rio Poxim. A estação possui tratamento preliminar, dois digestores anaeróbios (DAFA's), lagoas anaeróbias, lagoas facultativas e lagoas de estabilização (Figura 15).

Figura 15: Estação de Tratamento de Esgoto Rosa Elze.



Fonte: Google Maps (2021).

- A Estação de Tratamento de Esgoto Dorés, localizada no município de Nossa Senhora das Dorés/SE, que tem como corpo receptor o Rio Siriri. A estação conta com tratamento preliminar, sistema DAFA, lagoas facultativas aeradas, caixa de cloração e leito de secagem (Figura 16).

Figura 16: Estação de Tratamento de Esgoto Dorés.



Fonte: Deso (2019).

4.2 Tratamento estatístico dos dados

Os dados disponibilizados pela Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO), fornecem informações de concentração da DQO de entrada (mg.L^{-1}) e da vazão de saída ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) para um período de um ano (2020). Em cada relatório trimestral consta a vazão diária de saída e sua média mensal, além da DQO medida mensalmente em cada estação de tratamento de esgoto.

Sendo assim, com a finalidade de eliminar dados discrepantes da realidade observada (*outliers*), foi realizado um tratamento estatístico dos dados através do software Excel. Para isso, foram gerados diagramas de comparação (*box plots*), que representam a alteração dos dados de uma variável através de quartis.

O objetivo de gerar os *boxs plots* é eliminar possíveis *outliers* que possam influenciar nos dados de vazão e de DQO obtidos mensalmente nos relatórios de monitoramento de cada ETE.

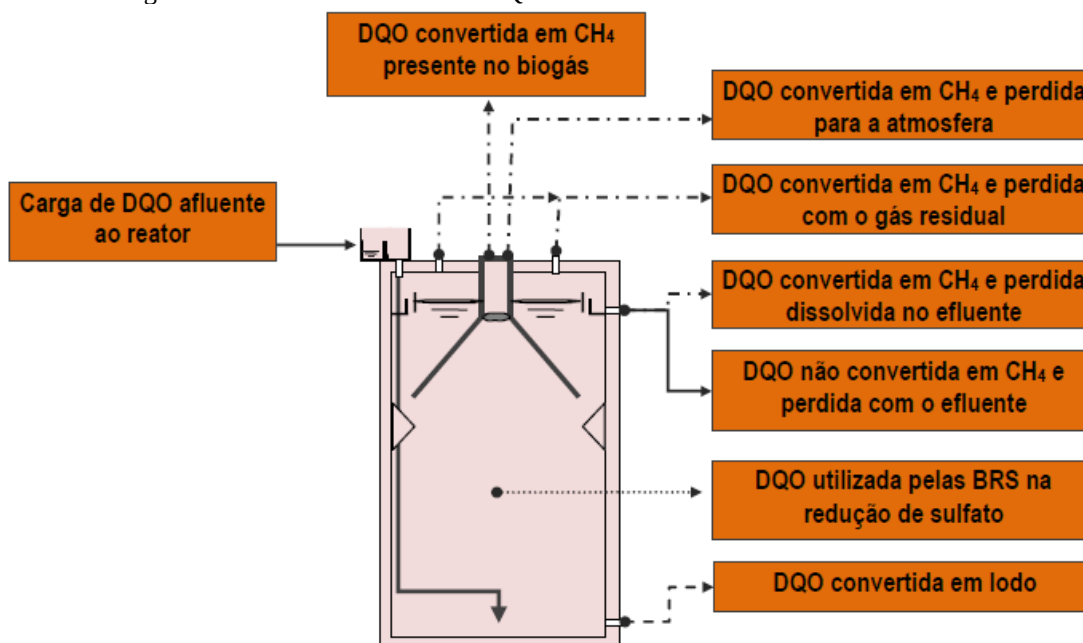
Ao analisar um *box plots*, é possível obter informações como a média, a mediana, a amplitude dos dados, a simetria ou assimetria do conjunto de dados, além da presença de *outliers*.

4.3 Cálculo da estimativa de produção do biogás.

Em todos os métodos utilizados para a estimativa de créditos de carbono que podem ser gerados nas estações de tratamento de esgoto em Sergipe, utilizou-se o software ProBio 1.0 (Programa de estimativa de produção de biogás em reatores UASB), que foi desenvolvido por meio de uma parceria técnica e científica entre a Companhia de Saneamento do Panamá (Sanepar) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). O seu download pode ser feito gratuitamente no Site do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em ETE's Sustentáveis (INCT ETES SUSTENTÁVEIS, 2021).

A lógica do programa foi baseada no modelo matemático de estimativa de produção de biogás em reatores UASB proposto por Lobato (2011), e sua estrutura é baseada de acordo com as rotas de conversão de demanda química de oxigênio (DQO) e fluxos de metano (CH_4) em reatores UASB (Figura 17).

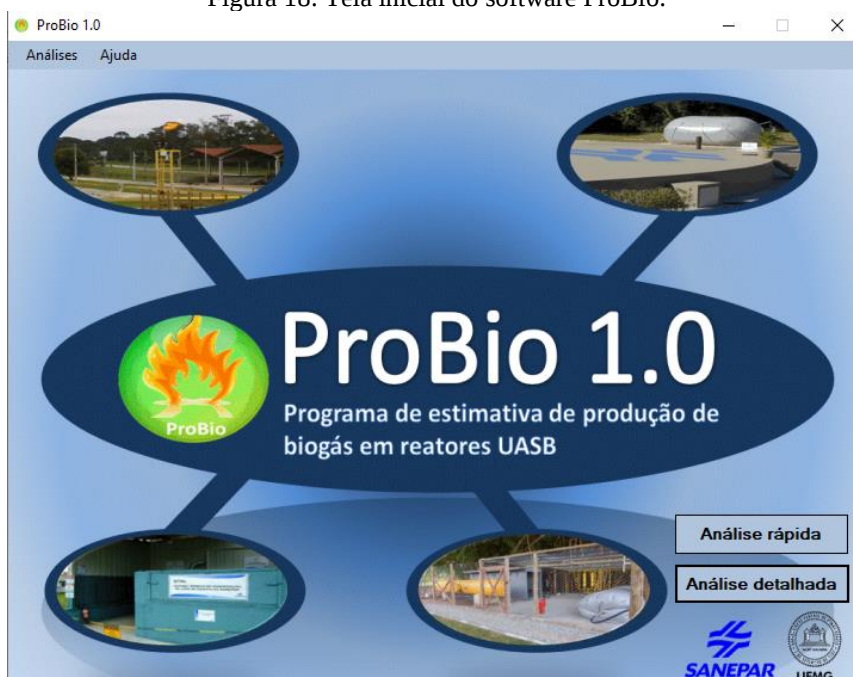
Figura 17: Rotas de conversão de DQO e fluxos de metano em reatores UASB.



Fonte: ProBio, 2015.

Ao iniciar o programa são apresentadas duas opções (Figura 18): a análise rápida, que tem como dado de entrada somente a vazão média do efluente ($m^3.dia^{-1}$), e a análise detalhada, utilizada no presente trabalho, na qual além da vazão também é necessário informar a concentração média de DQO afluente ($mg.L^{-1}$), gerando resultados mais exatos.

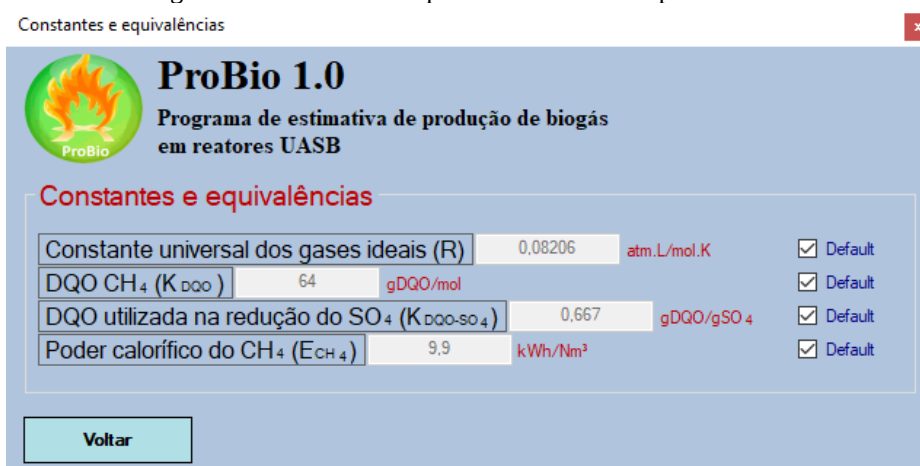
Figura 18: Tela inicial do software ProBio.



Fonte: ProBio 2015.

O próprio programa determina as constantes e equivalências de unidades padrão utilizadas nos cálculos, conforme demonstra a Figura 19.

Figura 19: Constantes e equivalências adotadas pelo ProBio.



Fonte: ProBio, 2015.

Onde:

A Constante universal dos gases: $R = 0,08206 \text{ atm.L}(\text{mol.K})^{-1}$;

DQO CH₄: $K_{DQO} = 64 \text{ gDQO.mol}^{-1}$;

DQO utilizada na redução do SO₄: $K_{DQO-SO_4} = 0,667 \text{ gDQO} \cdot (\text{gSO}_4)^{-1}$;

Poder calorífero do CH₄: $E_{CH_4} = 9,9 \text{ kWh} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$.

Além disso, o software ProBio apresente três possibilidades de cenários para a análise dos dados:

1. Pior situação: Considera que o sistema está operando com o esgoto mais diluído, concentrações de sulfato (SO_4) maiores, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano (CH_4). Consequentemente, o potencial energético é menor;
2. Melhor Situação: O potencial energético é maior, sendo assim, o sistema opera com um esgoto mais concentrado, concentrações de sulfato (SO_4) menores, maior eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de metano (CH_4);
3. Situação típica: Considera parâmetros intermediários aos das duas situações descritas acima.

Como forma de comparar as diversas possibilidades, os cálculos foram executados para cada um dos cenários. Portanto, os valores adotados como parâmetros para a estimativa de produção do biogás pelo ProBio para os três cenários estão representados na Tabela 5.

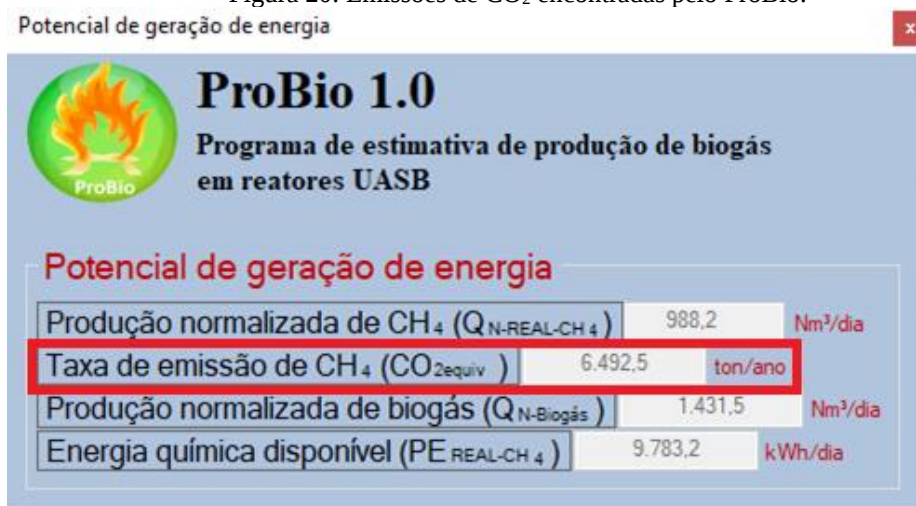
Tabela 5: Valores adotados pelo ProBio para a estimativa de produção de biogás em cada cenário.

Parâmetros	Unidades	Pior cenário	Cenário típico	Melhor cenário
Concentração de SO_4 no afluente (CSO_4)	mg.L^{-1}	20	15	10
Eficiência de remoção de DQO (E_{DQO})	%	60	65	70
Eficiência redução SO_4 (ESO_4)	%	80	75	70
Coef. Produção de lodo (Y)	$\text{kgSV.kgDQO}_{\text{rem}}^{-1}$	0,15	0,15	0,15
Coef. Produção DQO-lodo ($K_{\text{sólidos}}$)	$\text{kgDQO-lodo.kgDQO}_{\text{rem}}^{-1}$	0,213	0,213	0,213
Temperatura operacional reator (T)	$^{\circ}\text{C}$	25	25	25

Fonte: ProBio (2015).

4.4 Geração de créditos de carbono com o uso de flares.

O software ProBio apresenta diretamente as emissões de gás carbônico geradas por cada estação de tratamento de esgoto em cada um dos três cenários (Figura 20). Desse modo, estimou-se que 100% do metano de cada estação, eliminando as perdas, é recuperado e queimado por flares, cuja eficiência é de 50%. Assim, foi possível encontrar as emissões anuais que podem ser evitadas com a adoção desse método.

Figura 20: Emissões de CO₂ encontradas pelo ProBio.

Fonte: ProBio, 2015.

4.5 Geração de créditos de carbono através do aproveitamento energético do biogás

Além de estimar a quantidade de biogás (m³.dia⁻¹) gerada em cada ETE para os três cenários, o ProBio também estima a energia por volume de biogás produzido (KWh.m⁻³). Sendo assim, a produção de energia com biogás em Megawatt-hora por ano foi encontrada fazendo:

$$Produção \left[\frac{MWh}{ano} \right] = (Energia \left[\frac{KWh}{m^3} \right] * biogás \left[\frac{m^3}{dia} \right] * 360) / 1000$$

Vale ressaltar que para a conversão foi usado o ano comercial de 360 dias.

Tendo a produção de energia que pode ser gerada através do biogás (MWh.ano⁻¹), esta foi multiplicada pelo Fator médio de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil (tCO₂.MWh⁻¹), encontrando assim o total de emissões (tCO₂) evitadas por ano através do aproveitamento energético do biogás.

Disponibilizado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, o fator de emissão de CO₂ é calculado através da ferramenta metodológica aprovada pelo conselho executivo do MDL, que tem como objetivo estimar a redução de emissões de CO₂ de um projeto MDL que gere eletricidade para a rede (BRASIL, 2008).

O fator de emissão é calculado diariamente, e posteriormente são calculadas as médias mensais e anuais respectivamente. Todavia, tendo em vista que para o ano de 2021 somente foram disponibilizados os fatores do mês de janeiro até o mês de agosto, para o presente trabalho utilizou-se a média desses oito meses (Tabela 6).

Tabela 6: Fator de Emissão médio ($\text{CO}_2.\text{MWh}^{-1}$) mensal.

MARGEM DE OPERAÇÃO							
Fator de Emissão Médio ($\text{tCO}_2.\text{MWh}^{-1}$) - MENSAL							
Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto
0,6001	0,6023	0,5657	0,5522	0,5909	0,5940	0,5824	0,6214

Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, disponível em < [https://www.gov.br/mcti/pt-](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao)

[br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao)).

4.6 Geração de créditos de carbono ao substituir alguns combustíveis por biogás.

Como mencionado anteriormente, ao adicionar a vazão de saída ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) e a concentração da DQO de entrada (mg.L^{-1}) de cada estação de tratamento de esgoto no software ProBio 1.0, obtêm-se o volume de biogás produzido em cada uma delas.

A eficiência energética do biogás em comparação a outros combustíveis pode ser determinada levando em consideração o poder calorífico e a eficiência média de combustão de cada um. Nogueira (1992) apresenta uma relação entre o potencial energético do biogás e alguns outros combustíveis de uso cotidiano, conforme apresentado na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7: Equivalência energética entre o biogás e outros combustíveis.

Combustível	Biogás (m^3)
Gasolina (L)	0,61
Querosene (L)	0,62
Óleo Diesel (kg)	0,55
Gás de Cozinha (kg)	1,43
Lenha (kg)	3,50
Álcool hidratado (L)	0,80
Carvão mineral (kg)	0,74

Fonte: Nogueira (1992).

Para o presente trabalho, foi feita uma comparação energética do biogás com dois dos combustíveis mais utilizados no Brasil, a gasolina e o etanol.

Posteriormente, através da Tabela 8 foram obtidos os fatores de emissão de CO_2 para queima direta da gasolina e do etanol a fim de encontrar as emissões anuais devido à queima de cada um deles. Contudo, o processo não contabiliza as emissões geradas na cadeia de produção dos combustíveis.

Tabela 8: Fatores de emissão de CO₂ para queima direta de combustíveis convertida em energia térmica (kWh) – Brasil.

Combustível	Fatores de Emissão de CO ₂ por Queima de Combustível	Unidade
Gás natural	0,202	kg.CO ₂ .kWh ⁻¹
Óleo diesel	0,267	kg.CO ₂ .kWh ⁻¹
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	0,227	kg.CO ₂ .kWh ⁻¹
Madeira	0,531	kg.CO ₂ .kWh ⁻¹
Gasolina	0,249	kg.CO ₂ .kWh ⁻¹
Etanol	0,248	kg.CO ₂ .kWh ⁻¹

Fonte: MCTI, 2019.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise estatística dos dados

Com os dados dos relatórios de automonitoramento das estações de tratamento de esgoto de Sergipe foi elaborada a Tabela 9, que contém as principais informações utilizadas no presente trabalho, sendo elas a concentração de DQO de entrada e a vazão média mensal efluente para os 12 meses do ano de 2020.

Tabela 9: DQO de entrada e vazão média mensal das estações de tratamento de esgoto analisadas.

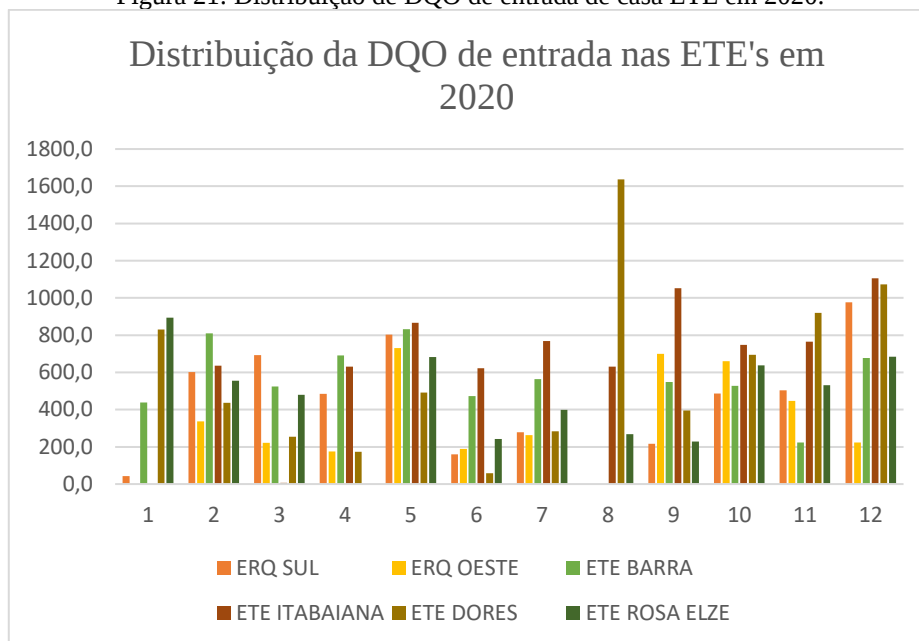
2020	ERQ SUL		ESQ OESTE		ETE BARRA		ETE ITABAIANA		ETE DORES		ETEROSA ELZE	
	DQO de entrada 1 coleta mensal (mg/l)	Média mensal de vazão efluente (m³/h)	DQO de entrada 1 coleta mensal (mg/l)	Média mensal de vazão efluente (m³/h)	DQO de entrada 1 coleta mensal (mg/l)	Média mensal de vazão efluente (m³/h)	DQO de entrada 1 coleta mensal (mg/l)	Média mensal de vazão efluente (m³/h)	DQO de entrada 1 coleta mensal (mg/l)	Média mensal de vazão efluente (m³/h)	DQO de entrada 1 coleta mensal (mg/l)	Média mensal de vazão efluente (m³/h)
JANEIRO	42,5	989,5		185,0	439,0	82,8		-	831,0	-	894,0	74,8
FEVEREIRO	602,0	1198,2	336,0	251,9	810,0	80,9	636,0	-	437,0	-	556,0	90,9
MARÇO	693,0	1256,6	221,1	277,0	525,0	93,9	7,3	-	255,0	-	480,0	96,4
ABRIL	484,0	1207,9	175,0	226,8	691,0	107,5	630,0	-	174,0	-	-	105,3
MAIO	802,0	1455,2	731,0	271,9	832,0	103,9	866,0	-	492,0	-	683,0	106,0
JUNHO	160,0	1250,8	189,0	261,8	473,0	98,6	622,0	-	59,0	-	243,0	103,2
JULHO	278,0	1422,1	263,0	260,6	564,0	65,5	769,0	101,0	284,0	11,3	399,0	96,9
AGOSTO	-	1174,1	-	276,5		27,5	630,0	82,6	1636,0	11,3	268,0	102,7
SETEMBRO	217,0	1199,5	700,0	200,2	548,0	110,8	1053,0	79,8	395,0	9,6	229,0	94,1
OUTUBRO	486,0	1132,5	660,0	168,0	528,0	129,8	747,0	89,5	695,0	11,4	637,0	83,0
NOVEMBRO	503,0	1081,9	446,0	173,6	224,0	100,1	765,0	89,6	920,0	12,0	531,0	
DEZEMBRO	976,0	355,9	223,0	225,2	677,0	102,3	1106,0	83,8	1072,0		684,0	64,8
MÉDIAS	476,68	1143,69	394,41	231,54	573,73	97,82	782,40	87,70	604,17	11,10	509,45	92,55

Fonte: Adaptado de DESO, 2020.

Com o objetivo de realizar uma análise mais exata dos dados obtidos com a DESO, as informações passaram por um tratamento estatístico executado através do *software* Excel. A princípio, para interpretar o comportamento da DQO e da vazão média mensal em cada ETE ao

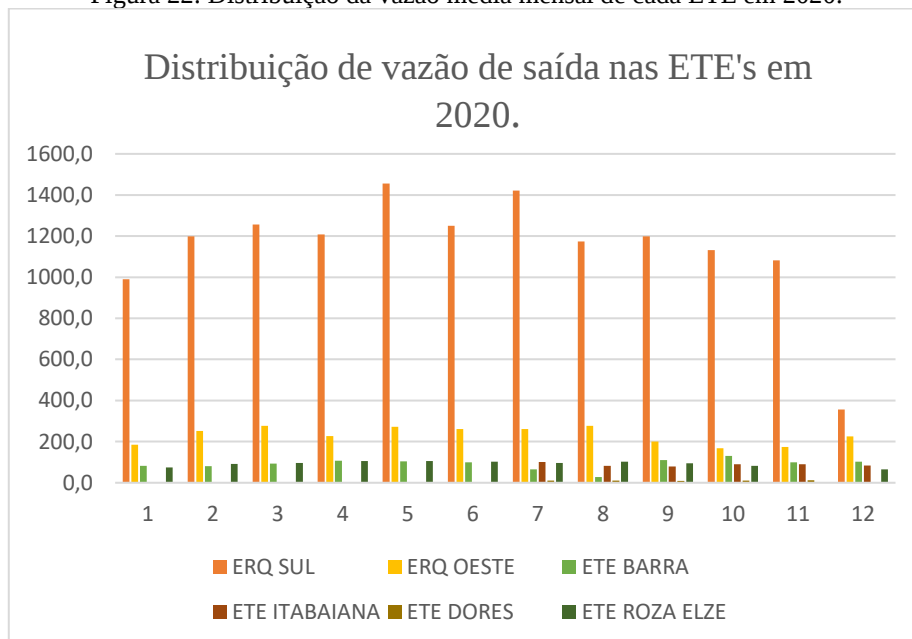
longo de todos os meses de 2020, foram elaborados os gráficos de colunas apresentados nas Figuras 21 e 22.

Figura 21: Distribuição de DQO de entrada de casa ETE em 2020.



Fonte: A autora, 2021.

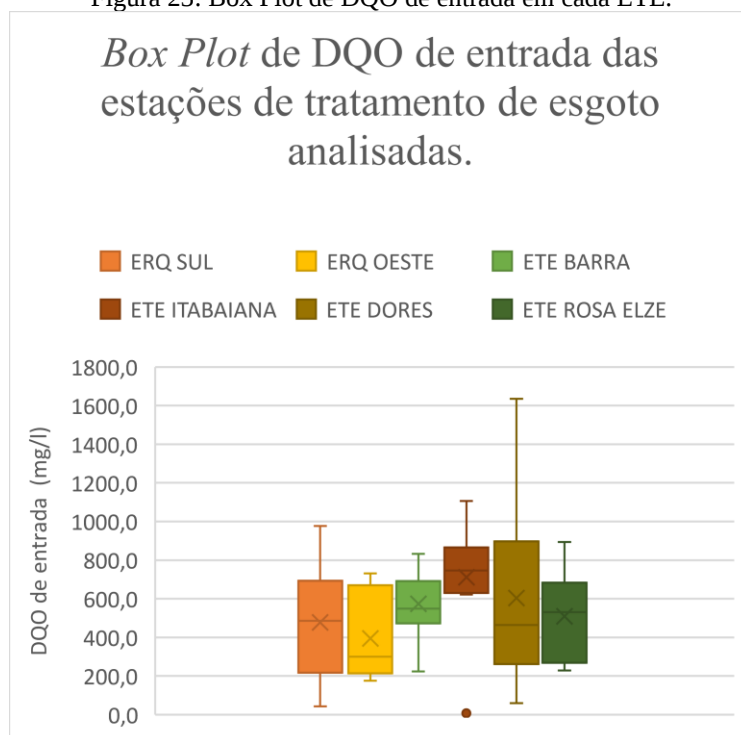
Figura 22: Distribuição da vazão média mensal de cada ETE em 2020.



Fonte: A autora, 2021.

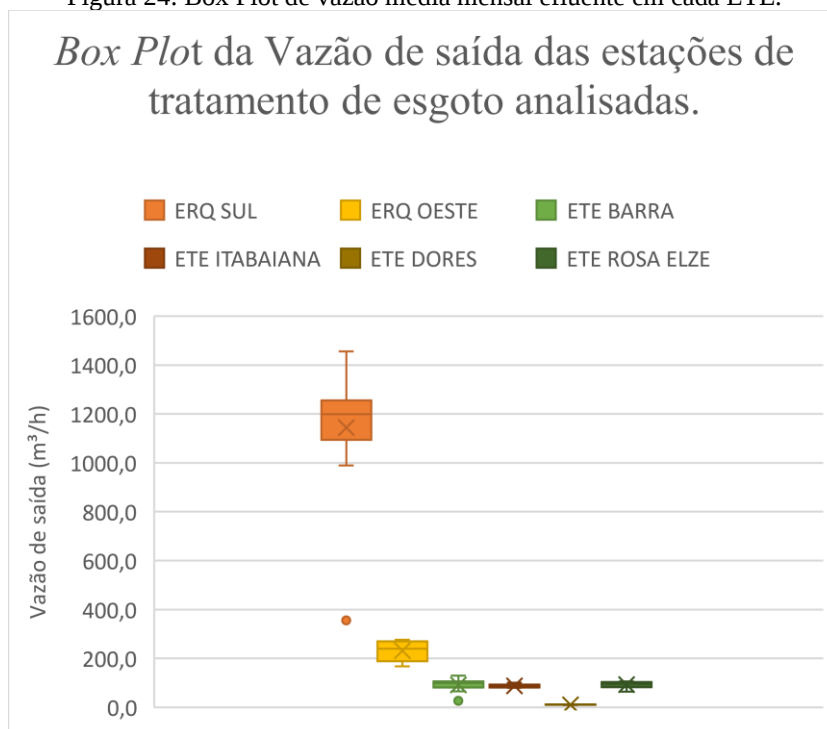
Posteriormente, gerou-se gráficos *BoxPlots* a fim de determinar os valores médios representativos de DQO de entrada (Figura 23) e de vazão média mensal (Figura 24) para cada ETE, bem como identificar e eliminar possíveis dados inconsistentes denominados *outliers*.

Figura 23: Box Plot de DQO de entrada em cada ETE.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 24: Box Plot de vazão média mensal efluente em cada ETE.



Fonte: A autora, 2021.

Em relação aos gráficos BoxPlots que dizem respeito à DQO de entrada de cada ETE, percebe-se que quase todas possuem valores próximos e não apresentam variações

inconsistente, o que torna possível o descarte do surgimento de *outlier*. A exceção está na ETE Itabaiana, que mostra apenas um valor fora da normalidade. Contudo, em relação às vazões de saída mensais das ETE's, notou-se que a ETE Sul e a ETE Barra apresentaram *outliers*. Já as demais estações de tratamento de esgoto demonstraram valores constantes. Com a identificação e eliminação dos *outliers*, a Tabela 10 foi elaborada com as novas médias de DQO de entrada e vazão de saída de cada ETE analisada.

Tabela 10: Concentrações médias de DQO de entrada e da vazão média afluyente das ETE's, desconsiderando os outliers.

ETE	DQO (mg.L ⁻¹)	VAZÃO(m ³ .d ⁻¹)
ERQ SUL	476,68	29167,2
ERQ OESTE	394,41	5556,96
ETE BARRA	573,73	2347,68
ETE ITABAIANA	782,4	2107,2
ETE DORES	604,17	266,4
ETE ROSA ELZE	509,45	2221,2

Fonte: A autora, 2021, adaptado de DESO, 2020.

5.2 Créditos de carbono através da inclusão de flares nas ETE's

Por meio da DQO e das vazões médias de cada estação encontradas através do tratamento estatístico dos dados da DESO foi possível determinar com o auxílio do software ProBio 1.0 a estimativa de produção de biogás para cada ETE em estudo, bem como a taxa de produção de metano e as emissões de gás carbônico geradas em cada um dos três cenários adotados pelo programa (pior, típico, melhor) (Tabela 11).

Tabela 11: Dados obtidos através do ProBio para cada ETE.

Potencial de Geração de Energia	Unidade	ERQ SUL		
		Pior	Típica	Melhor
Produção normalizada de CH ₄ (Q-N-REAL-CH ₄)	Nm ³ .dia ⁻¹	988,2	1438	1.928,10
Taxa de emissão de CH ₄ (CO ₂ equivalente)	ton.ano ⁻¹	6.492,50	9497,7	12.667,60
Produção normalizada de biogás (Q N-Biogás)	Nm ³ .dia ⁻¹	1.431,50	2083,1	2.793,10
Energia Química disponível (PE Real-CH ₄)	kWh.dia ⁻¹	9.783,20	14236,3	19.088,10
Potencial de Geração de Energia	Unidade	ERQ OESTE		
		Pior	Típica	Melhor
Produção normalizada de CH ₄ (Q-N-REAL-CH ₄)	Nm ³ .dia ⁻¹	145,6	218,5	297,8
Taxa de emissão de CH ₄ (CO ₂ equivalente)	ton.ano ⁻¹	956,9	1.435,20	1.956,50
Produção normalizada de biogás (Q N-Biogás)	Nm ³ .dia ⁻¹	242,5	363,7	495,8
Energia Química disponível (PE Real-CH ₄)	kWh.dia ⁻¹	1.441,80	2.162,70	2.948,10
Potencial de Geração de Energia	Unidade	ETE BARRA		
		Pior	Típica	Melhor
Produção normalizada de CH ₄ (Q-N-REAL-CH ₄)	Nm ³ .dia ⁻¹	88,6	135,3	185,6
Taxa de emissão de CH ₄ (CO ₂ equivalente)	ton.ano ⁻¹	582,10	889,10	1.219,50
Produção normalizada de biogás (Q N-Biogás)	Nm ³ .dia ⁻¹	127,3	194,4	266,7
Energia Química disponível (PE Real-CH ₄)	kWh.dia ⁻¹	877,20	1.339,70	1.837,60
Potencial de Geração de Energia	Unidade	ETE ITABAIANA		
		Pior	Típica	Melhor
Produção normalizada de CH ₄ (Q-N-REAL-CH ₄)	Nm ³ .dia ⁻¹	140,2	191,4	246,4
Taxa de emissão de CH ₄ (CO ₂ equivalente)	ton.ano ⁻¹	921,00	1.257,40	1.618,90
Produção normalizada de biogás (Q N-Biogás)	Nm ³ .dia ⁻¹	197,9	270,2	347,9
Energia Química disponível (PE Real-CH ₄)	kWh.dia ⁻¹	1.387,80	1.894,70	2.439,50
Potencial de Geração de Energia	Unidade	ETE DORES		
		Pior	Típica	Melhor
Produção normalizada de CH ₄ (Q-N-REAL-CH ₄)	Nm ³ .dia ⁻¹	11,2	16,6	22,5
Taxa de emissão de CH ₄ (CO ₂ equivalente)	ton.ano ⁻¹	73,40	109,40	148,10
Produção normalizada de biogás (Q N-Biogás)	Nm ³ .dia ⁻¹	16	23,9	32,3
Energia Química disponível (PE Real-CH ₄)	kWh.dia ⁻¹	110,60	164,80	223,10
Potencial de Geração de Energia	Unidade	ETE ROSA ELZE		
		Pior	Típica	Melhor
Produção normalizada de CH ₄ (Q-N-REAL-CH ₄)	Nm ³ .dia ⁻¹	64,1	105,3	149,7
Taxa de emissão de CH ₄ (CO ₂ equivalente)	ton.ano ⁻¹	421,4	692,00	983,50
Produção normalizada de biogás (Q N-Biogás)	Nm ³ .dia ⁻¹	92,7	152,2	216,2
Energia Química disponível (PE Real-CH ₄)	kWh.dia ⁻¹	635,00	1.042,80	1.482,00

Fonte: Adaptado ProBio 1.0, autora (2021).

Supondo a inclusão de flares em cada ETE, cuja eficiência é de 50%, é possível estimar a quantidade de créditos de carbono que podem ser obtidos com as seis estações de tratamento de esgoto analisadas nos três cenários, visto que as emissões encontradas com o ProBio seriam reduzidas pela metade. Além disso, foram feitas duas estimativas em relação à receita obtida com os créditos de carbono, uma supondo a venda no Mercado Europeu, tomando como base o valor de uma tonelada de carbono encontrado no site Udop (União Nacional da Bioenergia) de € 57,87 e outra supondo a venda no Mercado Voluntário Brasileiro, tomando como base o valor da tonelada de carbono disponível no site Planeta Campo, de US\$ 5,69 (Tabela 12). A conversão das unidades foi feita tomando como base a cotação das moedas na data dos cálculos, sendo € 1,00 equivalente a R\$ 6,22 e US\$ 1,00 correspondente a R\$ 5,64.

Tabela 12: Créditos de carbono e a receita gerada.

Taxa Total de emissão de CH ₄ (CO ₂ equivalente)		Receita anual dos créditos de carbono no Mercado Europeu		Receita anual dos créditos de carbono no Mercado Voluntário Brasileiro
	(ton.ano ⁻¹)	(€)	(R\$)	(R\$)
Pior	4.723,65	273.452,10	1.700.872,05	151.608,30
Típica	6.465,40	374.282,01	2.328.034,08	207.510,78
Melhor	9.297,05	538.206,22	3.347.642,72	298.394,24

Fonte: Adaptado ProBio 1.0, autora (2021).

Nota-se que no Mercado Voluntário a receita obtida é bem menor, visto que no Brasil ainda não existe a obrigatoriedade de redução de emissões de GEE e o mercado é formado por empresas que desejam por conta própria compensá-las.

5.3 Créditos de carbono através do aproveitamento energético do biogás

Conforme mencionado anteriormente, o software ProBio 1.0 utilizou o modelo proposto por Lobato (2011) para encontrar a quantidade de biogás gerada em cada ETE em três cenários, bem como a possível produção de energia elétrica em KWh.dia⁻¹, que foi convertida para determinar a produção de energia elétrica em MWh.ano⁻¹. A quantidade de metano presente no biogás e sua perda, a produção real de biogás e a produção de biogás *per capita*, bem como a capacidade para a geração de energia de cada estação de tratamento de esgoto nos três cenários determinados se encontram na Tabela 13.

Tabela 13: Dados obtidos através do ProBio para a geração de energia elétrica em cada ETE.

Parâmetros	Unidade	ERQ SUL		
		Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
CH4 no biogás	%	69	69	69
Perda de CH4 dissolvido no efluente	mg.L ⁻¹	25,1	20	14,8
Produção real de CH4 no biogás	m ³ .dia ⁻¹	1078,7	1569,7	2104,7
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	1562,6	2273,9	3048,8
Produção real de biogás per capita	L.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	6,25	9,1	12,2
Energia por volume de biogás produzido	kWh.m ³ ⁻¹	6,83	6,83	6,83
Produção de energia de biogás	kWh.dia ⁻¹	10672,56	15530,74	20823,30
	MWh.dia ⁻¹	10,67	15,53	20,82
	MWh.ano ⁻¹	3842,12	5591,07	7496,39
Parâmetros	Unidade	ERQ OESTE		
		Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
CH4 no biogás	%	60,1	60,1	60,1
Perda de CH4 dissolvido no efluente	mg.L ⁻¹	21,9	17,4	12,9
Produção real de CH4 no biogás	m ³ .dia ⁻¹	159	238,5	325,1
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	264,7	397	541,2
Produção real de biogás per capita	L.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	4,85	7,27	9,92
Energia por volume de biogás produzido	kWh.m ³ ⁻¹	5,95	5,95	5,95
Produção de energia de biogás	kWh.dia ⁻¹	1574,97	2362,15	3220,14
	MWh.dia ⁻¹	1,57	2,36	3,22
	MWh.ano ⁻¹	566,99	850,37	1159,25
Parâmetros	Unidade	ERQ BARRA		
		Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
CH4 no biogás	%	69,6	69,6	69,6
Perda de CH4 dissolvido no efluente	mg.L ⁻¹	25,3	20,1	14,9
Produção real de CH4 no biogás	m ³ .dia ⁻¹	96,7	147,7	202,6
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	139	212,2	291,1
Produção real de biogás per capita	L.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	6,34	9,68	13,28
Energia por volume de biogás produzido	kWh.m ³ ⁻¹	6,89	6,89	6,89
Produção de energia de biogás	kWh.dia ⁻¹	957,71	1462,06	2005,68
	MWh.dia ⁻¹	0,96	1,46	2,01
	MWh.ano ⁻¹	344,78	526,34	722,04

Fonte: Adaptado ProBio 1.0, autora (2021).

Tabela 14: Dados obtidos através do ProBio para a geração de energia elétrica em cada ETE (continuação)

Parâmetros	Unidade	ETE ITABAIANA		
		Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
CH4 no biogás	%	70,8	70,8	70,8
Perda de CH4 dissolvido no efluente	mg.L ⁻¹	25,8	20,5	15,2
Produção real de CH4 no biogás	m ³ .dia ⁻¹	153	208,9	269
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	216	294,9	379,7
Produção real de biogás per capita	L.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	2,82	3,85	4,96
Energia por volume de biogás produzido	kWh.m ³ ⁻¹	7,01	7,01	7,01
Produção de energia de biogás	kWh.dia ⁻¹	1514,16	2067,25	2661,70
	MWh.dia ⁻¹	1,51	2,07	2,66
	MWh.ano ⁻¹	545,10	744,21	958,21
Parâmetros	Unidade	ETE DORES		
		Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
CH4 no biogás	%	69,8	69,8	69,8
Perda de CH4 dissolvido no efluente	mg.L ⁻¹	25,4	20,2	14,9
Produção real de CH4 no biogás	m ³ .dia ⁻¹	12,2	18,2	24,6
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	17,5	26	35,2
Produção real de biogás per capita	L.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	0,7	1,04	1,41
Energia por volume de biogás produzido	kWh.m ³ ⁻¹	6,91	6,91	6,91
Produção de energia de biogás	kWh.dia ⁻¹	120,93	179,66	243,23
	MWh.dia ⁻¹	0,12	0,18	0,24
	MWh.ano ⁻¹	43,53	64,68	87,56
Parâmetros	Unidade	ETE ROSA ELZE		
		Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
CH4 no biogás	%	69,2	69,2	69,2
Perda de CH4 dissolvido no efluente	mg.L ⁻¹	25,2	20	14,8
Produção real de CH4 no biogás	m ³ .dia ⁻¹	70	115	163,4
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	101,1	166,1	236,1
Produção real de biogás per capita	L.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	2,02	3,32	4,72
Energia por volume de biogás produzido	kWh.m ³ ⁻¹	6,85	6,85	6,85
Produção de energia de biogás	kWh.dia ⁻¹	692,54	1137,79	1617,29
	MWh.dia ⁻¹	0,69	1,14	1,62
	MWh.ano ⁻¹	249,31	409,60	582,22

Fonte: Adaptado ProBio 1.0, autora (2021).

Posteriormente, os dados da produção de energia foram multiplicados pelo Fator Médio de Emissão pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil (tCO₂.MWh⁻¹), com o objetivo de determinar o total de emissões (tCO₂) evitadas por ano através do aproveitamento energético do biogás. Além disso, foram utilizados os mesmos valores do primeiro método para os créditos de carbono e cotações do euro e do dólar. A receita

que pode ser obtida com a venda dos créditos no Mercado Europeu e no Mercado Voluntário Brasileiro foi encontrada (Tabela 14)

Tabela 15: Emissões anuais de gás carbônico e receita gerada.

Produção de energia de biogás	Unidade	Cenário Conservador	Cenário típico	Cenário Otimista
	MWh.ano ⁻¹	5.591,83	8.186,27	11.005,68
Emissões anuais de gás carbônico	tCO ₂ .ano ⁻¹	3.320,43	4.861,01	6.535,17
Receita anual dos créditos de carbono no Mercado Europeu	(€)	192.219,51	281.403,70	378.321,20
Receita anual dos créditos de carbono no Mercado Europeu	(R\$)	1.195.605,38	1.750.331,04	2.353.157,85
Receita anual dos créditos de carbono no Mercado Voluntário Brasileiro	(R\$)	106.571,04	156.016,86	209.750,21

Fonte: A autora (2021).

5.4 Créditos de carbono ao substituir combustíveis fósseis por biogás

O método utilizado para estimar a quantidade de créditos de carbono gerados e a receita que pode ser obtida, foi utilizar o biogás produzido para substituir dois dos combustíveis mais usados no Brasil, o etanol e a gasolina. Desse modo, a equivalência energética do biogás quando comparado com os ambos foi determinada através da relação proposta por Nogueira (1992), mencionada anteriormente (Tabela 15).

Tabela 16: Equivalência energética do biogás em comparação a gasolina e ao etanol.

Parâmetros	Unidade	ERQ SUL		
		Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	1562,6	2273,9	3048,8
Equivalente em gasolina	L.dia ⁻¹	953,186	1387,079	1859,768
Equivalente em etanol	L.dia ⁻¹	1234,454	1796,381	2408,552
Parâmetros	Unidade	ERQ OESTE		
		Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	264,7	397	541,2
Equivalente em gasolina	L.dia ⁻¹	161,467	242,17	330,132
Equivalente em etanol	L.dia ⁻¹	209,113	313,63	427,548
Parâmetros	Unidade	ERQ BARRA		
		Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	139	212,2	291,1
Equivalente em gasolina	L.dia ⁻¹	84,79	129,442	177,571
Equivalente em etanol	L.dia ⁻¹	109,81	167,638	229,969
Parâmetros	Unidade	ETE ITABAIANA		
		Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	216	294,9	379,7
Equivalente em gasolina	L.dia ⁻¹	131,76	179,889	231,617
Equivalente em etanol	L.dia ⁻¹	170,64	232,971	299,963
Parâmetros	Unidade	ETE DORES		
		Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	17,5	26	35,2
Equivalente em gasolina	L.dia ⁻¹	10,675	15,86	21,472
Equivalente em etanol	L.dia ⁻¹	13,825	20,54	27,808
Parâmetros	Unidade	ETE ROSA ELZE		
		Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	101,1	166,1	236,1
Equivalente em gasolina	L.dia ⁻¹	61,671	101,321	144,021
Equivalente em etanol	L.dia ⁻¹	79,869	131,219	186,519

Fonte: Adaptado ProBio 1.0, autora (2021).

Posteriormente, determinou-se os fatores de emissão de CO₂ para queima direta da gasolina e do etanol a fim de encontrar as emissões anuais devido à queima de cada um deles. Com isso, concluiu-se que as emissões seriam evitadas, tendo em vista que o potencial energético do biogás seria utilizado para substituir esses combustíveis, não gerando emissões significativas de GEE (Tabelas 16 e 17).

Tabela 17: Equivalência energética do biogás em comparação a gasolina, emissões de CO₂ e receita.

Cenário	Cenário Pior	Cenário Típico	Cenário Melhor
Total de gasolina equivalente (L.dia⁻¹)	1.403,55	2.055,76	2.764,58
Total de gasolina equivalente (L.ano⁻¹)	505.277,64	740.073,96	995.249,16
Emissões devido à queima da gasolina kg.CO₂.ano⁻¹	1.131.316,64	1.657.025,60	2.228.362,87
Emissões devido à queima da gasolina t.CO₂.ano⁻¹	1.131,32	1.657,03	2.228,36
Receita anual dos créditos de carbono no Mercado Europeu (€)	65.491,92	95.925,21	128.999,93
Receita anual dos créditos de carbono no Mercado Europeu (R\$)	407.359,74	596.654,82	802.379,54
Receita anual dos créditos de carbono no Mercado Voluntário Brasileiro (R\$)	36.310,27	53.183,20	71.520,61

Fonte: A autora (2021).

Tabela 18: Equivalência energética do biogás em comparação ao etanol, emissões de CO₂ e receita.

Total de etanol equivalente (L.dia⁻¹)	1.817,71	2.662,38	3.580,36
Total de etanol equivalente (L.ano⁻¹)	654.375,96	958.456,44	1.288.929,24
Emissões devido à queima do etanol kg.CO₂.ano	962.587,04	1.409.889,42	1.896.014,91
Emissões devido à queima da gasolina t.CO₂.ano⁻¹	962,59	1.409,89	1.896,01
Receita anual dos créditos de carbono no Mercado Europeu (€)	55.724,16	81.618,50	109.760,30
Receita anual dos créditos de carbono no Mercado Europeu (R\$)	346.604,30	507.667,06	682.709,09
Receita anual dos créditos de carbono no Mercado Voluntário Brasileiro (R\$)	30.894,79	45.251,22	60.853,70

Fonte: A autora (2021).

5.5 Comparativo entre as três metodologias estudadas

Ao analisar os créditos de carbono encontrados através dos métodos propostos, percebe-se que a maior parcela de créditos de carbono gerados diz respeito ao uso de queimadores flare em estações de tratamento de esgoto, mostrando que essa solução mais simples já traria um ganho ambiental considerável. Todavia, devido as altas concentrações de metano presentes no biogás, ele também se torna uma ótima opção para a geração de energia elétrica, entretanto, a eficiência do sistema também depende muito da tecnologia usada na conversão do biogás. O último método, no qual o biogás é usado para substituir a gasolina e o etanol gera uma parcela menor de créditos de carbono (Tabela 18).

Tabela 19: Emissões de gás carbônico evitadas em cada uma das três metodologias

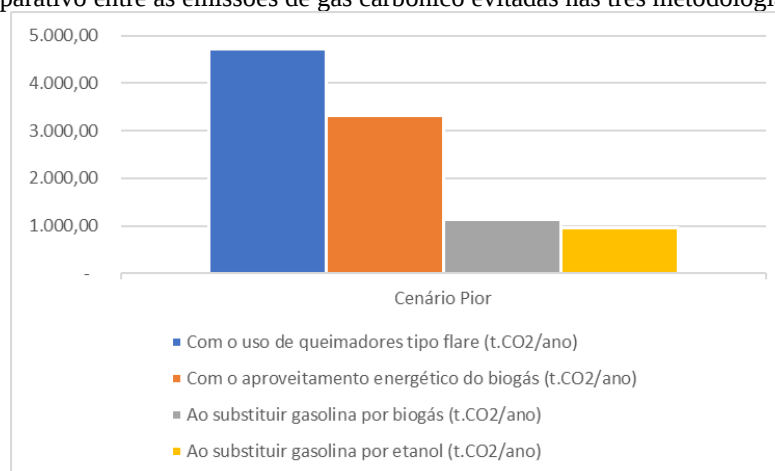
Total de emissões evitadas	Cenário		
	Pior	Típico	Melhor
Com o uso de queimadores tipo flare (t.CO₂.ano⁻¹)	4.723,65	6.465,40	9.297,05
Com o aproveitamento energético do biogás (t.CO₂.ano⁻¹)	3.320,43	4.861,01	6.535,17
Ao substituir gasolina por biogás (t.CO₂.ano⁻¹)	1.131,32	1.657,03	2.228,36
Ao substituir gasolina por etanol (t.CO₂.ano⁻¹)	962,59	1.409,89	1.896,01

Fonte: A autora (2021).

Analisando os créditos de carbono obtidos com o uso do biogás para substituir a gasolina e o etanol, nota-se que a quantidade é bem menor quando comparada aos créditos gerados com o aproveitamento energético encontrado através do Fator Médio de Emissão pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil. Pode-se atrelar a isso ao fato de que a equivalência energética do biogás, quando comparada a gasolina, não é tão grande. O etanol também não gera emissões de GEE significativas, visto que é uma energia limpa e renovável. Ademais, o poder calorífico do biogás é menor que o poder calorífico dos dois combustíveis analisados. Entretanto, o processo leva em consideração apenas a queima da gasolina e do etanol, deixando de fora toda a sua cadeia de produção, porém caso ela fosse considerada, a quantidade encontrada de emissões evitadas seria bem maior.

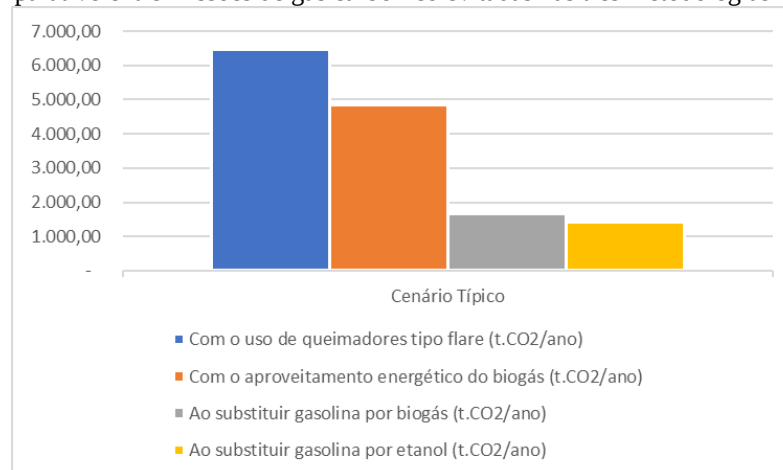
O comparativo entre os créditos gerados com o uso de queimadores flare, com o aproveitamento energético do biogás e com a substituição de gasolina e etanol por biogás está melhor representado nas Figuras 25, 26 e 27.

Figura 25: Comparativo entre as emissões de gás carbônico evitadas nas três metodologias no cenário pior.



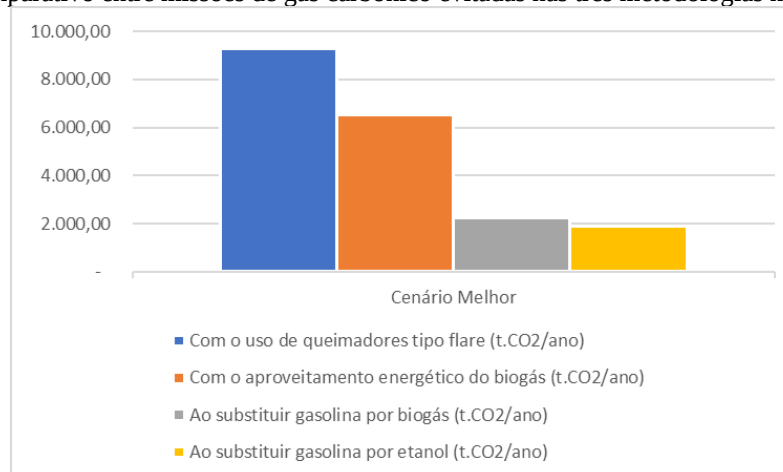
Fonte: A autora (2021).

Figura 26: Comparativo entre missões de gás carbônico evitadas nas três metodologias no cenário típico.



Fonte: A autora (2021).

Figura 27: Comparativo entre missões de gás carbônico evitadas nas três metodologias no cenário melhor.



Fonte: A autora (2021).

Todavia, a geração dos créditos de carbono obtidos com a introdução de queimadores flare pode acontecer de forma isolada ou concomitante aos créditos de carbono encontrados com o uso do biogás para gerar energia elétrica ou para substituir a gasolina e o etanol em veículos, por exemplo, visto que o processo de queima do biogás também gera energia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo do presente trabalho contemplou uma análise das possíveis maneiras de gerar créditos de carbono em estações de tratamento de esgoto de Sergipe que utilizam reatores UASB. É importante salientar que os cálculos de crédito de carbono foram feitos de forma simplificada, pois existem metodologias específicas através do ciclo de projeto de MDL, com exigências próprias para cada caso.

Ao analisar as três metodologias propostas, concluiu-se que o maior potencial para geração de créditos de carbono está na adição de flares em estações de tratamento com tecnologia anaeróbia. Além disso, a utilização de queimadores também gera energia, que pode ser usada para suprir outras demandas energéticas que antes eram atendidas por combustíveis fósseis, por exemplo, ou gerar energia elétrica para a rede municipal e até mesmo atender as próprias estações de tratamento.

Conforme Lima (2012), as estações de tratamento de esgoto no Brasil tratam o efluente e produzem gás metano, mas possibilitam a sua recuperação de modo que menores parcelas de GEE sejam emitidas. A CETESB (SÃO PAULO, 2010), informa que as estações utilizam sistemas de recuperação de biogás, mas somente com fins sanitários e de saúde pública, de modo que estes operem com taxas de eficiência limitadas, não contemplando o aspecto de mitigação das mudanças climáticas. Para garantir a obtenção de créditos de carbono é necessário que os queimadores possuam uma alta taxa de combustão para que funcionem de forma eficiente e minimizem ao máximo as emissões de GEE.

O valor monetário dos créditos de carbono varia muito a depender do mercado, que vem cada vez mais se valorizando devido à atenção voltada atualmente para a mitigação das mudanças climáticas e para o aquecimento global. Neste trabalho, a conversão foi feita para a cotação de carbono mais recente encontrada tanto para o Mercado de Carbono Internacional Europeu como para o Mercado de Carbono Voluntário vigente no Brasil. Entretanto, para resultados mais exatos recomenda-se o estudo de valoração dos custos de implantação do projeto MDL, além da receita que pode ser obtida.

Contudo, apesar da receita obtida com a venda dos créditos de carbono no Mercado Voluntário Brasileiro não ser tão significativa, os ganhos ambientais são enormes, visto que as emissões de GEE em estações de tratamento de esgoto são altas devido ao potencial de aquecimento global do metano, principal elemento da composição do esgoto, ser 21 vezes maior que o do gás carbônico.

O conceito de Adicionalidade dos projetos de MDL também é importante ao se analisar os resultados e a sua viabilidade econômica. Pois para ser adicional, o projeto precisa provar que ele reduz emissões de GEE e não é a opção mais viável economicamente, só assim irá gerar créditos de carbono.

Finalmente, a aprovação das estações de tratamento de esgoto de Sergipe como atividades de projeto de MDL pode proporcionar ganhos ambientais, econômicos e sociais para o estado, principalmente com a venda dos créditos de carbono e com o aproveitamento energético do biogás. Também traria efeitos positivos na saúde e no bem-estar da população que vive nos arredores das ETE's. Além disso, a prefeitura teria uma arrecadação monetária maior com a receita obtida com a venda dos créditos de carbono, além do estado se tornar um atrativo para investimentos estrangeiros, o que geraria mais empregos.

REFERÊNCIAS

ACORDO de Paris é aprovado no último dia da COP21. Meta é manter aquecimento global “muito abaixo dos 2°C”. **eCycle**, 2015. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/acordo-de-paris-e-aprovado-no-ultimo-dia-da-cop21-meta-e-manter-aquecimento-global-muito-abaixo-dos-2c/>>. Acesso em 22 de dez de 2021.

ACORDO de Paris: o que é, como surgiu e tratados ambientais. **Fundação Instituto de Administração**, 2020. Disponível em: <<https://fia.com.br/blog/acordo-de-paris/>>. Acesso em 22 de dez de 2021.

BOERIU, C.G.; VAN DAM, J.E.G.; SANDERS, J.P.M. **Biomass valorization for sustainable development**. In: LENS, P.; WESTERMANN, P.; HABERBAUER, M.; MORENO, A. (Ed.). Biofuels for fuel cells: renewable energy from biomass fermentation. London: IWA Publishing, 524 p. 2005.

BOXPLOT: Saiba tudo sobre o Diagrama de caixa e como interpretar esse gráfico. **Escola EDTI**, 2019. Disponível em: <<https://www.escolaedti.com.br/o-que-e-um-box-plot>>. Acesso em 22 de dez de 2021.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. **Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências**. 2006.

BRASIL. **Inventário de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal: Comunicação Inicial Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança de Clima**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 276 p. 2004.

BRASIL. **Inventário de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal: Segunda Comunicação Nacional do Brasil à**

Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança de Clima. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 518 p. 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: relatórios de referência. Brasília, 2006b.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Protocolo de Quioto. Tradução: Ministério da Ciência e Tecnologia. Brasília, 1997.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Protocolo de Quioto: a convenção sobre mudança do clima: O Brasil e a convenção – quadro das nações unidas. Brasília: MCT, [200-]. Apoio do Ministério das Relações Exteriores. 29 p.

BRONDANI, José Carlos, Biodigestores e biogás: balanço energético, possibilidades de utilização e mitigação do efeito estufa. 2010. 119 p. Dissertação (Mestrado em Concentração em Qualidade e Produtividade), Centro de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Inventário de Referência dos Gases de Efeito Estufa no Setor de Resíduos e Efluentes do Estado de São Paulo - Versão para consulta pública out/2010. São Paulo: CETESB, 2010.

CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores Anaeróbios. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de engenharia Sanitária e Ambiental, 379p. 2007.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).

CHERNICHARO, C.A.L.; LOBATO, L.C.S.; MELO, G.C.B.; PUJATTI, F.J.P.; STUETZ, R.M. Alternativas para aproveitamento energético do biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2011b.

CHERNICHARO, C.A.L.; SOUZA, C.L.; LOBATO, L. C. S. **Estimativa de perdas metano e de potencial de recuperação de energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico.** Engenharia Sanitária e Ambiental. 2011a.

CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (CQNUMC). **Metodologias de linha de base e monitoramento indicativas simplificadas para categorias selecionadas de atividades de projeto de pequena escala no âmbito do MDL: AIII.H. Recuperação de Metano no Tratamento de Águas Residuárias.** Versão 10.2006a.

CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (CQNUMC). **Metodologias de linha de base e monitoramento indicativas simplificadas para categorias selecionadas de atividades de projeto de pequena escala no âmbito do MDL: III.I. Produção de metano, no tratamento de águas residuárias, evitada por meio da substituição de sistemas anaeróbicos por sistemas aeróbicos.** Versão 7. 2006b.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S; GÓMEZ, E.O. (Organizadores) **Biomassa para energia.** Campinas, SP: **Editora da UNICAMP**, 2008. 732 p.

DEWAN, Angela, CASSIDY, AMY. COP26 termina com acordo climático; veja o que deu certo e as falhas nas negociações. **CNN**, 14 de nov. de 2021. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/cop26-termina-com-acordo-climatico-veja-o-que-deu-certo-e-as-falhas-nas-negociacoes/>>. Acesso em 22 de dez de 2021.

DUARTE, Anna Julia. OMM registra mais um recorde na emissão de gases do efeito estufa. **Instituto Nacional de Meteorologia**, 2021. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/noticias/omm-registra-mais-um-recorde-na-emissao-de-gases-estufa>>. Acesso em 22 de dez de 2021.

EL-FADEL, M.; MASSOUD, M. **Methane emissions from wastewater management.** **Environmental Pollution**, 114:177-185. 2001.

EL-FADEL, M.; MASSOUD, M. **Methane emissions from wastewater management.** **Environmental Pollution**, 114:177-185. 2001.

FRONDIZI, I. M. R. L. **O mecanismo de desenvolvimento limpo – guia de orientação 2009**. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2009.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006 **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**. EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). Published: IGES, Japan. 2006.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 1996: **The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. HOUGHTON, J.T.; MEIRA FILHO, L.G.; CALLANDER, B.A.; HARRIS N.; KATTENBERG, A.; MASKELL, K. (Eds.). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. 1996.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.

JUNGES et al., Efeito estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. **Experiências em Ensino de Ciências**. V.13, No.5. Rio Grande do Sul abr. 2021.

JUSTINO, Guilherme. Mercado de carbono: o que é e como funciona uma das principais apostas contra as mudanças climáticas. **Um Só Planeta**, 2021. Disponível em: <<https://umsoplaneta.globo.com/clima/noticia/2021/07/08/mercado-de-carbono-o-que-e-e-como-funciona-uma-das-principais-apostas-contras-as-mudancas-climaticas.ghml>>. Acesso em 22 de dez de 2021.

KAUCZ, Lavinia, MELLO, Mateus. Entenda o que é o mercado de carbono, um dos principais assuntos da COP26. **Poder 360**, 2021. Disponível em: <<https://www.poder360.com.br/meio-ambiente/entenda-o-que-e-o-mercado-de-carbono-um-dos-principais-assuntos-da-cop26/>>. Acesso em 22 de dez de 2021.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. EMBRAPA. Concórdia – Sbera: Embrapa suínos e aves, 2019. 214 p. Disponível em: < <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/197604/1/final9154.pdf> >. Acesso em: 03 dezembro 2021.

LETTINGA, G.; HULSHOFF-POL, L.W. **UASB: process design for various types of wastewater**. *Water Science and Technology*, Oxford, v.24, n.8, p.87-107, 1991.

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UEFES**. 2012. 106 p. Trabalho de conclusão de curso 102 (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

LIMA, Aline Pereira, **Produção de gases do efeito estufa e potencial de geração de créditos de carbono em processos de tratamento de esgoto sanitário**. 2012. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos

LIMA, Aline Pereira; SALVADOR, Nemésio Neves Batista. Geração de metano e de créditos de carbono no tratamento de esgotos sanitários. **Revista DAE**. Jan. 2012.

LIMIRO, Danielle Fernandes, **Mecanismo de desenvolvimento limpo: uma proposta para sustentabilidade do aterro sanitário de Goiânia**. 2007. 147 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) Programa de Mestrado em Ecologia e Produção Sustentável Universidade Católica de Goiás, Goiás.

METCALF & EDDY Inc. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th edition, **McGraw Hill**, New York. 2003. 1818 p.

OLIVEIRA, Wesley Rodrigues; DOMINGUES, Elder Geraldo. Energia Elétrica e Créditos de Carbono: uma Proposta de Aproveitamento Energético do Biogás Gerado em Estações de Tratamento de Esgoto: Estudo de Caso. **UNOPAR Cient. Exatas Tecnol.**, Londrina, v. 10, n. 1, p. 61-67, Nov. 2011.

O que é flare de biogás. **Energês**, 2020. Disponível em: <<https://energes.com.br/o-que-e-flare-para-biogas/>>. Acesso em 22 de dez de 2021.

PROPOSTAS do Brasil para COP 21 serão ambiciosas, diz ministro. **eCycle**, 2015. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/propostas-do-brasil-para-cop-21-serao-ambiciosas-diz-ministro/>>. Acesso em 22 de dez de 2021.

SZYMANSKI et al., Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso. **Redalyc**. vol. 31, No. 4. Paraná, out. 2010.

TUDO o que você precisa saber sobre o Acordo de Paris. **eCycle**, 2021. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/acordo-de-paris/>>. Acesso em 22 de dez de 2021.

USEPA. **Powering microturbines with landfill gas** - EPA430-F-02-012. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. 2002. Disponível em: Acesso em: 01/10/2021.

Von SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 452 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.1).

Von SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgoto**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 211 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.2).

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. 97 p. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.