

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GIOVANA FAGUNDES KAMINSKI

AVALIAÇÃO *IN-SITU* DA EFICIÊNCIA DE QUEIMADORES ENCLAUSURADOS DE
BIOGÁS EM ETES NO PARANÁ

CURITIBA

2020

GIOVANA FAGUNDES KAMINSKI

AVALIAÇÃO *IN-SITU* DA EFICIÊNCIA DE QUEIMADORES ENCLAUSURADOS DE
BIOGÁS EM ETES NO PARANÁ

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Michael Mannich

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

- K15a Kaminski, Giovana Fagundes
Avaliação *in-situ* da eficiência de queimadores enclausurados de biogás em ETES no Paraná [Recurso eletrônico] / Giovana Fagundes Kaminski – Curitiba, 2020.
- Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia ambiental.
- Orientador: Prof. Dr. Michael Mannich
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti
1. Biogás. 2. Combustão. 3. Queimador enclausurado. I. Universidade Federal do Paraná. II. Mannich, Michael. III. Possetti, Gustavo Rafael Collere. IV. Título.

CDD: 665.75.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585.

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **GIOVANA FAGUNDES KAMINSKI** intitulada: **Avaliação in-situ da eficiência de queimadores enclausurados de biogás em ETEs no Paraná**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 18 de Maio de 2020.

Assinatura Eletrônica

19/05/2020 09:12:58.0

MICHAEL MANNICH

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

19/05/2020 12:59:14.0

FABRÍCIO JOSÉ PACHECO PUJATTI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS)

Assinatura Eletrônica

19/05/2020 18:55:25.0

MIGUEL MANSUR AISSE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - DEP. DE
HIDRÁULICA)

Assinatura Eletrônica

18/05/2020 21:59:13.0

EMILIO GRACILIANO FERREIRA MERCURI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ter me guiado durante toda a minha trajetória.

A Univerisade Federal do Paraná, que me propiciou uma sólida formação acadêmica e oportunidade de crescimento pessoal e profissional.

A Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR, que me disponibilizou todos os recursos e apoio de seus colaboradores.

A CAPES, por ter me concedido bolsa auxílio, que me garantiu sustento durante o período do mestrado.

Aos meus orientadores Michael Mannich e Gustavo Possetti, pelos conhecimentos compartilhados e tempo despendido.

Ao INCT ETEs Sustentáveis, pela rede de apoio proporcionada.

Aos meus pais Ana Cristina e Leônidas, por sempre me incentivarem a seguir em busca de meus objetivos.

A todos os colegas da Sanepar, pela amizade, bem como, pela ajuda na execução do projeto, especialmente ao Felipe Owczarzak de Mello e Silva, Luiz Gustavo Wagner e André Luiz de Faria.

E, por fim, aos meus amigos, que mesmo indiretamente me incentivaram e me animaram para prosseguir neste objetivo.

RESUMO

Tradicionalmente, as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) que fazem uso de reatores anaeróbios adotam meios ineficientes para suprimir as emissões gasosas provenientes do processo de tratamento de esgotos domésticos. Este fluxo gasoso, denominado biogás, tem como componente majoritário o metano, composto 28 vezes mais indutor do efeito estufa quando comparado ao dióxido de carbono. Ademais, a emissão de biogás para a atmosfera propicia o mau odor no entorno das ETEs, uma vez que o sulfeto de hidrogênio presente no biogás possui características odoríferas e tóxicas quando em alta concentração. A combustão de modo eficiente do biogás proveniente de reatores UASB promove a minimização da emissão de gases de efeito estufa e de odores através da oxidação de seus compostos em óxidos e vapor d'água. A eficiência da combustão de biogás está relacionada, principalmente, a três fatores, sendo eles a temperatura de combustão, tempo de contato do gás com a chama e fornecimento de oxigênio suficiente para a completa oxidação dos compostos. Uma forma de viabilizar as condições adequadas para a combustão do biogás é por meio do uso de queimadores enclausurados para promover a combustão do biogás proveniente do tratamento de esgoto. Dessa forma, este projeto de pesquisa, viabilizado por meio de parceria com o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em ETEs Sustentáveis e a Companhia de Saneamento do Paraná, teve como tema a avaliação *in-situ* da eficiência de queimadores enclausurados de biogás instalados em 6 ETEs no Paraná. Neste contexto, o objetivo geral deste estudo foi avaliar a eficiência de queimadores enclausurados na destruição de biogás proveniente de reatores anaeróbios tipo UASB em estações de tratamento de esgoto. Os objetivos específicos do estudo foram: a) Caracterização do biogás proveniente das ETEs; b) Quantificar a eficiência de queimadores enclausurados quanto a destruição de metano e sulfeto de hidrogênio; c) Estimar as emissões evitadas de gases de efeito estufa a partir do uso de queimadores enclausurados. Para a caracterização dos gases foram utilizados analisadores de caráter quali-quantitativo, além da medição da temperatura da câmara de combustão do queimador enclausurado mensurada por termopares. A eficiência do processo de combustão foi quantificada por meio de cálculos de comparação mássica da composição do gás antecedente e posterior à queima. A eficiência foi ainda quantificada por meio de estimativas. Os resultados mostraram que a eficiência desse tipo de queimador, avaliadas nas ETEs selecionadas, foram superiores à 93% para o metano. No entanto, a eficiência de destruição de sulfeto de hidrogênio se mostrou bastante variável de ETE para ETE, sendo ainda necessários estudos mais aprofundados para a determinação dos fatores relacionados à destruição de tal composto.

Palavras-chaves: biogás. combustão. queimador enclausurado.

ABSTRACT

Traditionally, Wastewater Treatment Plants (WWTP) that use anaerobic reactors have adopted inefficient methods to suppress gaseous emissions from the domestic sewage treatment process. This gaseous flow, called biogas, has as its major component methane, which is 28 times more inducing to the greenhouse effect when compared to carbon dioxide. Also, the emission of biogas into the atmosphere causes a bad odor around the WWTPs, since the hydrogen sulfide present in the biogas has odorous and toxic characteristics when in high concentration. The efficient combustion of biogas from UASB reactors promotes the minimization of the emission of greenhouse gases and odors through the oxidation of its compounds in oxides and water vapor. The efficiency of biogas combustion is mainly related to three factors : combustion temperature, time of contact of the gas with the flame and sufficient oxygen supply for the complete oxidation of the compounds. One way to make the conditions suitable for combustion of biogas feasible is through the use of enclosed flares to promote the combustion of biogas from sewage treatment. Thus, this research project, made possible through a partnership with the National Institute of Science and Technology in Sustainable WWTPs and the Companhia de Saneamento do Paraná, had as its theme the in-situ evaluation of the efficiency of biogas enclosed flares installed in 6 WWTPs in Paraná. In this context, the general objective of this study was to evaluate the efficiency of enclosed burners in the destruction of biogas from anaerobic reactors type UASB in sewage treatment plants. The specific objectives of the study were : a) Characterization of the biogas from the WWTPs ; b) Quantify the efficiency of enclosed flares regarding the destruction of methane and hydrogen sulfide ; c) Estimate the avoided emissions of greenhouse gases from the use of enclosed flares. For the characterization of the gases, qualitative and quantitative analyzers were used, in addition to the measurement of the temperature of the combustion chamber of the enclosed flare measured by thermocouples. The combustion process efficiency was quantified by chemical mass balance comparison of the gas composition before and after burning. Efficiency was also quantified through estimation. The results showed that the efficiency of this type of burner, evaluated in the selected WWTPs, was higher than 93% for methane. However, the hydrogen sulfide destruction efficiency proved to be quite variable from WWTP to WWTP, and further studies are needed to determine the factors related to the destruction of such compound.

Key-words : biogas. combustion. enclosed flare.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Total de emissões de gases de efeito estufa por fonte antropogênica no ano de 2010. . .	16
Figura 2	– Rotas de conversão da matéria orgânica no tratamento de efluente: a) sistema anaeróbico e b) sistema aeróbico.	17
Figura 3	– Desenho esquemático de um reator UASB.	18
Figura 4	– Tipos de queimadores, queimador enclausurado à esquerda, queimador aberto à direita e queimador semi-enclausurado ao centro.	26
Figura 5	– Exemplificação de um queimador aberto de biogás.	27
Figura 6	– Exemplificação de um queimador semi-enclausurado de biogás.	29
Figura 7	– Exemplificação de um queimador enclausurado de biogás.	30
Figura 8	– Fluxograma das principais etapas da metodologia.	34
Figura 9	– Modelo do queimador enclausurado instalado nas ETEs participantes da pesquisa. . .	36
Figura 10	– Disposição básica dos queimadores enclausurados.	37
Figura 11	– Esquema do queimador enclausurado detalhando os fluxos de biogás, ar atmosférico e gás de combustão, bem como os parâmetros necessários para a obtenção das vazões mássicas de cada fluxo.	39
Figura 12	– Modelo FT2, equipamento para medição da vazão volumétrica e temperatura do biogás. .	39
Figura 13	– Multitec 545, equipamento para medição da composição do biogás com relação aos teores de CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , CO e H ₂ S.	40
Figura 14	– Sonda de amostragem dos gases de combustão.	43
Figura 15	– Resfriador e desumidificador de gases.	43
Figura 16	– Ilustração do interior de um queimador enclausurado com sensores termopares. . . .	44
Figura 17	– Disposição dos equipamentos e locais de amostragem ilustradas no queimador enclausurado.	45
Figura 18	– Gráfico de relação entre o oxigênio presente na composição final do gás de combustão e a temperatura de queima.	50
Figura 19	– Relações entre a eficiência de destruição do CH ₄ e a) temperatura de combustão; b) tempo de residência dos gases na câmara de combustão e c) excesso de oxigênio na reação de combustão.	52
Figura 20	– Relações entre a eficiência de destruição do H ₂ S e a) temperatura de combustão; b) tempo de residência dos gases na câmara de combustão e c) excesso de oxigênio na reação de combustão.	53
Figura 21	– Relações entre a eficiência de destruição do CH ₄ , H ₂ S e população atendida pelas ETEs. .	53
Figura 22	– Relações entre as emissões evitadas de CO ₂ por habitante ao ano e população atendida pelas ETEs.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Potencial de Aquecimento Global (GWP) dos gases CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O e CF ₄ no horizonte de 20 e 100 anos.	16
Tabela 2	– Composições típicas do biogás.	19
Tabela 3	– Respostas fisiológicas dos humanos à exposição ao sulfeto de hidrogênio.	19
Tabela 4	– Mecanismo de formação de produtos indesejáveis da combustão de biogás.	21
Tabela 5	– Taxa de destruição térmica de compostos orgânicos voláteis e, em específico, o metano.	24
Tabela 6	– Vantagens e desvantagens relacionadas ao uso de queimadores abertos.	28
Tabela 7	– Vantagens e desvantagens relacionadas ao uso de queimadores semi-enclausurados.	29
Tabela 8	– Vantagens e desvantagens relacionadas ao uso de queimadores enclausurados.	31
Tabela 9	– Parâmetros operacionais dos queimadores aberto, semi-enclausurado e enclausurado.	32
Tabela 10	– Matriz qualitativa entre o queimador aberto, semi-enclausurado e queimador enclausurado.	33
Tabela 11	– Características referentes ao ano de 2019 das ETEs A, B, C, D, E e F participantes do estudo.	35
Tabela 12	– Características do modelos de queimadores de de 60m ³ /h e 150m ³ /h utilizados na pesquisa.	35
Tabela 13	– Faixa de valores sugeridos possíveis de serem ajustados nos queimadores enclausurados.	37
Tabela 14	– Métodos e faixa de medição para cada componente medido pelo analisador Multitec 545.	41
Tabela 15	– Caracterização do biogás nas ETEs avaliadas referentes à composição e vazão média do gás.	47
Tabela 16	– Resultados referentes à caracterização do gás de combustão nas ETEs A, B, C, D, E e F avaliadas.	48
Tabela 17	– Condições referentes ao processo de combustão de biogás nas ETEs A, B, C, D, E e F avaliadas.	49
Tabela 18	– Eficiências de destruição de CH ₄ e H ₂ S utilizando cálculos pelos métodos balanço de massa, EPA e estimativa nas ETEs A, B, C, D, E e F avaliadas.	51
Tabela 19	– Modelos de queimadores utilizados em cada estação avaliada, bem como suas vazões de biogás.	53
Tabela 20	– Estimativa das emissões de GEE e reduções a partir da utilização de queimador enclausurado nas ETEs avaliadas.	55
Tabela 21	– Índices de avaliação social e ambiental a partir do uso de queimadores enclausurados nas ETEs estudadas.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR5	<i>Fifth Assessment Report</i>
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
ETEs	Estações de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases de efeito estufa
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GWP	Potencial de Aquecimento Global
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
HCNQ	Hidrocarbonetos não queimados
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
N ₂	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
NOAA	Agência Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
Plansab	Plano Nacional de Saneamento Básico
RTDs	<i>Real Time Digital Power System Simulator</i>
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UASB	Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo

SUMÁRIO

1	Introdução	12
2	Objetivos	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	Revisão da literatura	15
3.1	Emissões de gases de efeito estufa	15
3.1.1	Emissões de gases no tratamento anaeróbio de esgoto	16
3.2	Processos anaeróbios de tratamento de esgoto	17
3.2.1	Reatores UASB no tratamento de efluente doméstico	17
3.2.2	Biogás	18
3.3	Queima de biogás	20
3.3.1	A combustão	20
3.3.2	Princípios da combustão	20
3.3.2.1	Temperatura de combustão	21
3.3.2.2	Mistura ar/biogás	21
3.3.2.3	Tempo de contato entre o biogás e a chama	23
3.3.3	Determinação da eficiência de destruição de biogás	23
3.3.4	Queima de biogás em ETEs	24
3.4	Queimadores de biogás	25
3.4.1	Queimadores abertos	26
3.4.2	Queimadores semi-enclausurados	28
3.4.3	Queimadores enclausurados	29
3.4.4	Tipos de suprimento de ar	31
3.4.5	Análise comparativa dos queimadores	32
3.4.6	Estimativa de emissões evitadas de metano a partir do uso de queimadores de biogás ..	32
4	Métodos	34
4.1	Local da pesquisa	34
4.2	O queimador enclausurado	35
4.3	Quantificação da eficiência do queimador	38
4.3.1	Caracterização do biogás	38
4.3.2	Caracterização do ar atmosférico	41
4.3.3	Caracterização do gás de combustão	42
4.3.4	Cálculo da eficiência	44
4.4	Estimativa das emissões evitadas de GEE a partir do uso de queimadores enclausurados	46
5	Resultados e discussões	47
5.1	Caracterização do biogás	47
5.2	Quantificação da eficiência do queimador	48
5.2.1	Caracterização dos gases de combustão	48

5.2.2	Eficiência de destruição de CH ₄ e H ₂ S	51
5.3	Fatores que influenciam na eficiência dos queimadores	51
5.3.1	Relação da eficiência com o porte das ETEs	52
5.3.2	Comparação entre as ETEs A e F	54
5.4	Emissões evitadas por meio do uso de queimadores de biogás	54
5.4.1	Índices de avaliação no impacto social e ambiental do uso de queimadores enclausurados	55
6	Conclusões	57
	Referências	59
A	Tabelas	62

1 Introdução

O cenário de esgotamento sanitário brasileiro ainda é crítico. Pouco mais de 50% da população é atendida por rede coletora de esgotos, e, o índice de tratamento dos esgotos gerados no Brasil é de 46%. Por outro lado, segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS, estes índices de atendimento aumentam ano a ano, sendo a tendência continuar nesse crescente (SNIS, 2017).

O Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab), com um investimento de R\$ 508,4 bilhões, prevê ampliar para 92% os domicílios servidos por rede coletora de esgoto ou fossa séptica até o ano 2033, atingindo o índice médio de 93% de tratamento dos esgotos coletados (BRASIL, 2013).

Logo, o avanço do setor de saneamento e, conseqüentemente, aumento do número de estações de tratamento de esgoto doméstico (ETEs), por meio de reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (reatores UASB), tem resultado no incremento da geração de biogás e lodo subprodutos desse processo de tratamento, uma vez que reatores UASB são uma alternativa de baixo consumo de energia, reduzida demanda de área, simplicidade operacional e baixa produção de sólidos (SILVEIRA, 2015; ROSA et al., 2015).

O processo de degradação anaeróbia da matéria orgânica presente em esgotos domésticos em reatores do tipo UASB gera um subproduto denominado biogás. Esse biogás é uma mistura gasosa composta majoritariamente por metano (CH_4), nitrogênio (N_2) e dióxido de carbono (CO_2), contendo ainda, em menor proporção, sulfeto de hidrogênio (H_2S), hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) (NOYOLA; MORGAN-SAGASTUME; LOPEZ-HERNANDEZ, 2006).

A emissão direta de biogás para o meio ambiente pode contribuir para o agravamento do aquecimento global, uma vez que o CH_4 , presente nessa emissão, é um dos principais gases indutores do efeito estufa (GEE) e seu potencial de aquecimento global é 28 vezes maior que o atribuído ao CO_2 em um horizonte de 100 anos (IPCC, 2014). Além disso, a presença de H_2S associada ao biogás pode causar problemas com maus odores no entorno de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) quando não é devidamente gerenciado. Sendo assim, é de extrema importância a instalação de sistemas de coleta e combustão de biogás em ETEs, de modo que o gás coletado seja encaminhado para oxidação em queimadores.

A queima visa, principalmente, a conversão do metano e gás sulfídrico em componentes menos nocivos ao meio ambiente e à saúde humana por meio do processo de oxidação. Porém, em muitos casos, os sistemas de combustão de biogás em ETEs são inadequados para uma combustão eficiente de biogás, de modo que compostos não oxidados são liberados para a atmosfera.

Dessa forma, o intuito da queima de biogás é proporcionar três grandes benefícios: redução da emissão de GEE, minimização de maus odores e salvaguardar as condições operacionais seguras em ETEs, objetivando que o processo ocorra de forma eficiente e segura, à um custo acessível. No entanto, a queima pode ainda provocar ruídos, fumaça, poluição luminosa, além de, caso ocorra de maneira inadequada, geração de produtos indesejáveis (BAUKAL, 2013).

Em ETEs com reatores anaeróbios é comum a utilização de queimadores abertos, sendo chamados genericamente de *flares*. Esses queimadores não possuem câmara de combustão, ou seja, sua chama fica exposta à atmosfera. Pelo fato de a chama ser aberta, sua intensidade é baixa e o ar ambiente a resfria rapidamente. Assim, a eficiência de queima desses equipamentos é de difícil determinação.

Existem basicamente três tipos de queimadores de biogás: o queimador aberto, o queimador

semi-enclausurado e o queimador enclausurado (BARTON, 2008). Cada modelo possui características próprias relacionados à aspectos operacionais, ambientais, sociais e econômicos.

Uma alternativa à queima em flares abertos é a utilização de queimadores enclausurados, sendo que estes são supostamente mais eficientes para oxidação dos compostos do biogás. A utilização de queimadores enclausurados em ETEs com o mesmo processo de tratamento ainda é incipiente no Brasil, sendo que há poucos estudos no âmbito nacional que reportam resultados qualitativos de sua utilização, o que geram diversas dúvidas referentes à eficiência de destruição de biogás, segurança operacional do queimador, relação de custo-benefício, entre outras.

Esta pesquisa está inserida no âmbito de um projeto de parceria entre o Instituto de Ciências e Tecnologias em ETEs Sustentáveis (INCT ETEs Sustentáveis) e a companhia de saneamento do Paraná, Sanepar. A qual têm, como um dos objetivos, desenvolver pesquisas voltadas para o aprofundamento das possibilidades e condições necessárias para o aproveitamento energético e gerenciamento dos subprodutos gasosos em ETEs. É essencial o completo entendimento e controle das emissões atmosféricas decorrentes dos sistemas de esgotamento sanitário, particularmente das ETEs, devido aos efeitos locais, a começar pelos maus odores, relacionados notadamente ao sulfeto de hidrogênio, e efeitos globais, decorrentes da majoração do efeito estufa, atribuídos ao metano.

Nesse contexto, é de suma importância o estudo da aplicação de queimadores enclausurados para a queima de biogás proveniente de reatores UASB, uma vez que o tema torna-se importante para o meio ambiente, pois viabiliza a redução da emissão atmosférica do metano, gás potencializador do efeito estufa, e sulfeto de hidrogênio, gás de característica tóxica e odorífera.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência de queimadores enclausurados na destruição de biogás proveniente de reatores anaeróbios tipo UASB em estações de tratamento de esgoto.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterização do biogás proveniente dos reatores UASB;
- Quantificar a eficiência de queimadores enclausurados quanto a destruição de CH_4 e H_2S ;
- Estimar as emissões evitadas de GEE a partir do uso de queimadores enclausurados;

3 Revisão da literatura

3.1 Emissões de gases de efeito estufa

O efeito estufa é um processo natural causado pelo acúmulo de gases na atmosfera. Esses gases absorvem a energia emitida pela superfície terrestre e irradiam parte dessa energia de volta para a superfície da Terra, promovendo a retenção do calor atmosférico (USEPA, 2016).

Tais gases são encontrados naturalmente na atmosfera terrestre e o processo ocorre em função da concentração de vapor d'água, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e ozônio (O_3), provenientes de fontes biológicas e geológicas. Porém, atividades antropogênicas como queima de combustível fóssil, indústria e agricultura, provocam alteração na composição da atmosfera, e, o aumento da emissão destes gases, contribui com o aumento da temperatura global (IPCC, 2014).

Dados mais recentes divulgados pela Agência Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos – NOAA (2019) revelam que a emissão de GEE atingiu os maiores índices no ano de 2018. O boletim ressalta que a emissão de gases como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso seguiu aumentando e, combinados com outros gases halogenados, possuem um efeito de aquecimento 43% maior do que no ano de 1990. A temperatura global terrestre e oceânica anual aumentou a uma taxa média de $0,07^\circ\text{C}$ por década desde 1880. No entanto, a taxa média de aumento a partir do ano de 1981 é superior ao dobro da taxa anterior, sendo de $0,17^\circ\text{C}$ (NOAA, 2019).

Na Europa, países como França, Alemanha e Suíça registraram o ano de 2018 como sendo o ano mais quente desde que os registros nacionais de temperatura de cada país começaram a ser realizados. Ainda, a média da temperatura de 2018 na América do Sul foi a oitava mais alta já registrada, sendo que os anos de 2014 a 2017 compreendem os quatro anos mais quentes da América do Sul registrados, com recorde do ano de 2015 sendo o mais aquecido (NOAA, 2019).

O relatório “O Estado do Clima 2018” ainda ressalta problemas associados à emissão de GEE e seus efeitos no planeta, como o nível dos oceanos subir consecutivamente há 7 anos, chegando à 81 mm do nível médio de 1993, e, ainda, o território Ártico coberto por gelo diminuiu para a metade do que era há 35 anos (NOAA, 2019).

O IPCC (2014), a partir de um modelo de estimativas de emissões dos gases CO_2 , CH_4 , N_2O e aerossóis de enxofre em concentração de CO_2 equivalente, fez análise de quatro possíveis cenários sobre mudanças climáticas até 2100. É esperado, no caso mais otimista, elevação da temperatura entre $0,3^\circ\text{C}$ e $1,7^\circ\text{C}$ no período 2081-2100 frente à média observada entre 1986 e 2005. Já na hipótese mais pessimista, a elevação da temperatura no planeta seria entre $2,6^\circ\text{C}$ e $4,8^\circ\text{C}$ na mesma comparação.

O conceito de Potencial de Aquecimento Global (GWP), utilizado para comparar o potencial impacto climático de diferentes gases, já que cada gás afeta o aquecimento atmosférico diferentemente, baseia o potencial de cada gás em dois fatores, habilidade de absorção energética (forçamento radioativo) e tempo de vida. Nessa comparação, o CO_2 é tomado como gás de referência. Na Tabela 1 são apresentados alguns GWP (IPCC, 2014).

O panorama das mudanças climáticas, reportado no 5º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas do IPCC (2014), revela que as emissões antropogênicas anuais de GEEs cresceram, em média, $1 \text{ GtCO}_2\text{eq}$ por ano ($2,2\%$) em 2000–2010, em comparação com 1970–2000,

Tabela 1 – Potencial de Aquecimento Global (GWP) dos gases CO₂, CH₄, N₂O e CF₄ no horizonte de 20 e 100 anos.

	Tempo de vida (anos)	GWP ₂₀	GWP ₁₀₀
CO ₂	-	1	1
CH ₄	12,4	84	28
N ₂ O	121	264	265
CF ₄	50000	4880	6630

Fonte: IPCC (2014)

em que o crescimento foi de 0,4 GtCO₂eq ao ano (1,3%), a qual Gt equivale à 10⁹ toneladas de emissões de CO₂eq ao ano.

Em 2010, a principal fonte de CO₂ foi a queima de combustíveis fósseis, sendo seguido por processos industriais, silvicultura e demais usos do solo. O óxido nitroso foi emitido durante atividades agrícolas e industriais, bem como durante o processo de queima de combustíveis fósseis e resíduos sólidos. Os gases fluorados foram, em geral, emitidos a partir de processos industriais, tipicamente emitidos em menores quantidades, porém, possuem alto potencial de aquecimento global. Já o gás metano foi emitido durante práticas agrícolas e pecuárias, e resultou da degradação de resíduos orgânicos e tratamento de esgoto. Na Figura 1 é possível observar os dados referentes às emissões de GEE de cada setor.

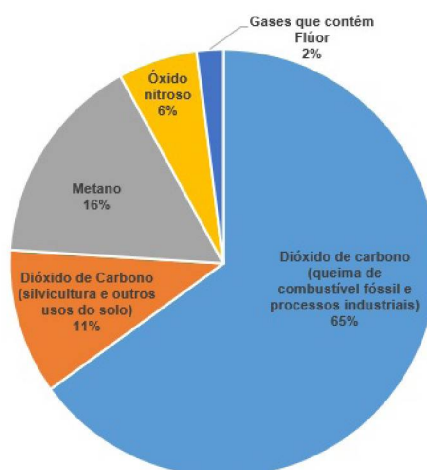


Figura 1 – Total de emissões de gases de efeito estufa por fonte antropogênica no ano de 2010.
Fonte: IPCC (2014)

3.1.1 Emissões de gases no tratamento anaeróbico de esgoto

Segundo o IPCC (2014), em 2010, o metano proveniente do setor de tratamento de esgoto sanitário foi responsável pela emissão de 667 MtCO₂ equivalente. Em suma, do total dos gases emitidos no processo de tratamento de esgoto doméstico/comercial e industrial, 86% são representados por gás metano, observado no período de 1970–2010, sendo que as principais contribuições na geração de GEE são devidas aos reatores anaeróbios e digestores de lodo.

Uma vez que a meta do setor de saneamento proposto pelo Plano Nacional de Saneamento Básico – Plansab é a universalização dos serviços de saneamento até o ano 2033, com a universalização dos serviços de saneamento, atendimento de toda população, há uma perspectiva de aumento das emissões de GEE nesse setor (BRASIL, 2013).

Inventários de GEE elaborados por Filippini (2018) constataram que, na prestadora de serviços de saneamento do Paraná, as emissões de GEE oriundas das ETes representam mais que 90% do total

de emissões da companhia, sendo que, no ano de 2015, as emissões de CH_4 provenientes do tratamento de esgotos foi estimada em 40 kt ou 1 MtCO_2eq , tornando fundamental que haja metas de redução para essa categoria.

3.2 Processos anaeróbios de tratamento de esgoto

Uma tecnologia que muito se adaptou às condições brasileiras, em que é necessária a utilização de técnicas que associem baixo custo e simplicidade operacional, tendo em vista a escassez de recursos e de mão de obra qualificada, que historicamente vigora no setor de saneamento do Brasil, foi a tecnologia anaeróbia (LOBATO, 2011).

As tecnologias envolvidas nos processos anaeróbios são responsáveis por promover a estabilização da matéria orgânica em um ambiente livre de oxigênio. Além de ser muito favorável às condições ambientais dos países de clima quente, como o Brasil, apresentam vantagens quanto a aeróbia, no que se refere à produção de biogás e à baixa produção de sólidos. A Figura 2 apresenta as rotas de conversão de matéria orgânica no sistema anaeróbio e no sistema aeróbio. A partir desses diagramas podem-se visualizar algumas das vantagens da digestão anaeróbia, em relação ao tratamento aeróbio.

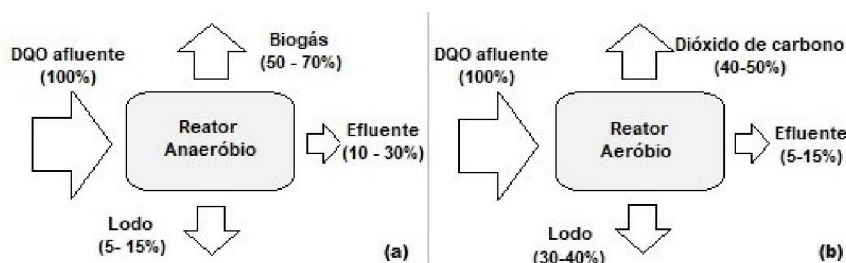


Figura 2 – Rotas de conversão da matéria orgânica no tratamento de efluente: a) sistema anaeróbio e b) sistema aeróbio.

Fonte: Chernicharo (2007)

Dentre as diversas tecnologias de digestão anaeróbia utilizadas pelas companhias de saneamento, os reatores de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) são os principais representantes da tecnologia anaeróbia para tratamento de esgotos domésticos no Brasil.

3.2.1 Reatores UASB no tratamento de efluente doméstico

Os reatores UASB, Figura 3, são unidades de tratamento anaeróbio que se prestam fundamentalmente à remoção de matéria orgânica carbonácea em suspensão ou dissolvida nas águas residuárias. O processo de tratamento está interligado diretamente aos microorganismos de degradação de matéria orgânica, bem como à estrutura física dos reatores.

Para que haja uma taxa de remoção de matéria orgânica dos reatores UASB, o esgoto sanitário bruto deve ser submetido a tratamentos preliminares à digestão anaeróbia (remoção de sólidos grosseiros, gorduras e areias), sendo conduzido posteriormente até a parte inferior dos reatores UASB. O esgoto afluente é distribuído uniformemente na parte inferior dos reatores, de forma a garantir um contato intenso entre biomassa e o esgoto, de modo que atravesse uma camada com elevada concentração de sólidos e microrganismos (manta de lodo). Parte da matéria orgânica presente no esgoto fica aderida nessa manta, onde, então, é realizado o processo de degradação e estabilização por meio da atividade microbiológica do processo (CHERNICHARO, 2007; SILVEIRA, 2015).

O movimento ascensional provocado pelas bolhas de biogás formado durante o processo de degradação do esgoto promove o carregamento de lodo, sendo necessária a instalação de um separador trifásico (gases, sólidos e líquidos) na parte superior do reator. No entorno e acima do separador trifásico configura-se uma câmara de sedimentação, em que o lodo mais pesado é removido da massa líquida e retornado ao compartimento de digestão. A coleta do efluente do reator é efetuada em sua parte superior por meio canaletas (CHERNICHARO, 2007).

As bolhas de gás resultantes do processo de digestão anaeróbia são coletadas na parte interna dos separadores trifásicos (câmara de gás), onde encontram a interface líquido-gás e desprendem-se com facilidade. O biogás coletado deve ser encaminhado a algum tipo de tratamento e/ou aproveitamento para fins energéticos (CHERNICHARO, 2007).

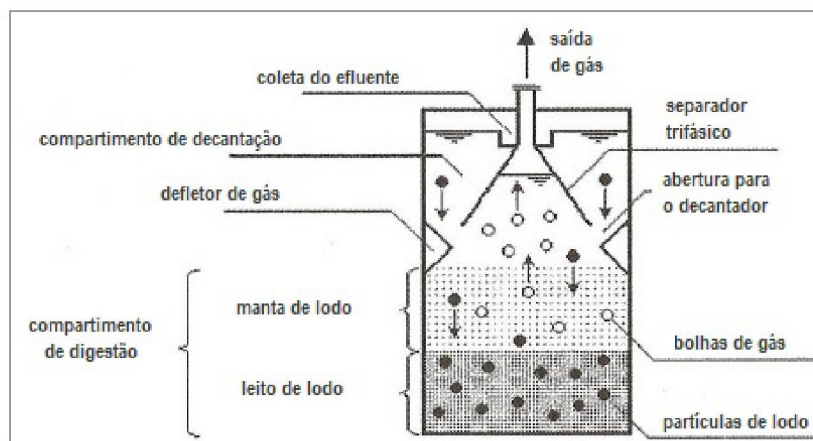


Figura 3 – Desenho esquemático de um reator UASB.

Fonte: Chernicharo (2007)

3.2.2 Biogás

Em geral, a composição do biogás é variável quando se trata da digestão anaeróbia de esgoto doméstico, sendo composto por uma mistura gasosa de metano (70–80%), nitrogênio (10–25%) e dióxido de carbono (5–10%). O alto teor de nitrogênio no biogás produzido por reatores UASB ocorre devido ao desprendimento do N_2 dissolvido na fase líquida do esgoto doméstico para a fase gasosa (NOYOLA; MORGAN-SAGASTUME; LOPEZ-HERNANDEZ, 2006). Ainda, o biogás possui constituintes em menor proporção, como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) (CONSTANT et al., 1989 apud NOYOLA; MORGAN-SAGASTUME; LOPEZ-HERNANDEZ, 2006).

Segundo Noyola, Morgan-Sagastume and Lopez-Hernandez (2006), a composição do biogás depende do tipo e concentração de matéria orgânica presente no efluente, das condições físico-químicas no interior do digestor (pH, alcalinidade, temperatura) e a presença de outros ânions, como sulfatos e nitratos. As composições típicas de biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico, aterros sanitários na fase metanogênica e digestores de lodo são apresentadas na Tabela 2

O metano é o principal componente do biogás e que inspira maior preocupação devido ao seu alto potencial de aquecimento global, sendo 28 vezes maior que o atribuído ao dióxido de carbono (IPCC, 2014). Atualmente, há trabalhos que relatam GWP do CH_4 de 32, o que representa um aumento de 14% comparado aos valores do IPCC AR5 (ALVAREZ et al., 2018).

Ademais, o metano é um gás incolor, inodoro e extremamente inflamável, podendo formar misturas explosivas em contato com o ar e agentes oxidantes, é caracterizado, principalmente, pelo seu

Tabela 2 – Composições típicas do biogás.

Parâmetro	Und.	Composição volumétrica típica		
		Biogás de reatores anaeróbios	Biogás de aterros sanitários	Digestores de lodo
Metano	%	60 a 85	45 a 50	60 a 70
Gás carbônico	%	5 a 15	30 a 45	20 a 40
Monóxido de carbono	%	0 a 0,3	0 a 0,2	-
Nitrogênio	%	10 a 25	0 a 15	<2
Hidrogênio	%	0 a 3	Traços a >1	-
Sulfeto de hidrogênio	ppmv	1000 a 2000	10 a 200	Até 1000
Oxigênio	%	Traços	0,8	-

Fonte: adaptado de [Lobato \(2011\)](#)

Tabela 3 – Respostas fisiológicas dos humanos à exposição ao sulfeto de hidrogênio.

Concentração (ppm)	Resposta Fisiológica
0,0003 - 0,02	Percepção do odor
3 - 10	Odor ofensivo
20 - 30	Odor extremamente ofensivo
30	Odor capaz de provocar enjoo
50	Conjuntivite, irritação nos olhos
50 - 100	Irritação das vias respiratórias
100 - 200	Perda de olfato
150 - 200	Paralisia das funções olfatórias
250 - 500	Edema pulmonar
500	Tontura, dor de cabeça, amnésia, desmaio
500 - 1000	Paralisia respiratória, ataque cardíaco, paralisia cerebral, morte

Fonte: [Reiffenstein, Hulbert and Roth \(1992\)](#)

potencial de energia química disponível. Pelo seu alto potencial calorífico, quando em contato com o calor, apresenta riscos de explosão ([CONSTANT et al., 1989](#) apud [NOYOLA; MORGAN-SAGASTUME; LOPEZ-HERNANDEZ, 2006](#)).

Destaca-se ainda outro problema associado à emissão de biogás para a atmosfera, o qual está interligado à tipologia e quantidade de contaminantes presentes no fluxo de biogás. A concentração de sulfeto de hidrogênio (H_2S) é frequentemente alta e chega a milhares de ppm em biogases originados do tratamento de esgoto doméstico. O H_2S , por sua vez, é perceptível aos humanos quando presente em concentrações acima de 0,1 ppb, possuindo cheiro desagradável quando sua concentração é superior à 0,5 ppm, além de ser prejudicial à saúde humana em níveis mais elevados ([PARK et al., 2014](#)).

Tais altos níveis de H_2S podem ser críticos para uma ETE, uma vez que resultará em mau odor no entorno de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) quando não devidamente gerenciado e em corrosão à tubulação de aço e ao concreto das instalações ([ROTUNNO; LANZINI; LEONE, 2017](#)). A reação do sulfeto de hidrogênio com a água origina o ácido sulfúrico (H_2SO_4), composto altamente corrosivo às estruturas metálicas e ao concreto, o qual reduz o tempo de vida útil dos componentes de uma ETE ([SILVEIRA, 2015](#)).

O H_2S é um componente do biogás que requer observação devido à sua toxicidade, a Tabela 3 apresenta as respostas fisiológicas dos humanos à exposição ao sulfeto de hidrogênio. A agência americana, que regulamenta a segurança e saúde no trabalho, *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), estabelece que o limite admissível para a exposição humana ao sulfeto de hidrogênio é de 20 ppm em um período de 8 horas ao dia, sendo que picos de 50 ppm com duração máxima de 10 minutos são toleráveis ([OSHA, 1998](#)).

Apesar do alto potencial de geração de energia a partir do biogás, o aproveitamento energético

do biogás ainda é muito incipiente no Brasil, sendo que a maioria dos aterros sanitários e das estações de tratamento de esgoto doméstico e efluentes industriais apenas realiza a coleta e queima do biogás gerado, sem aproveitamento do seu potencial energético (TSAGARAKIS, 2007).

3.3 Queima de biogás

A queima visa, principalmente, a conversão do metano e gás sulfídrico em componentes menos nocivos ao meio ambiente e à saúde humana por meio do processo de oxidação.

Devido à sua composição típica, o biogás pode apresentar possíveis danos no aspecto ambiental e à saúde associados à presença de metano e sulfeto de hidrogênio em sua composição. Como o metano é um gás potencializador do efeito estufa e o sulfeto de hidrogênio um gás de elevada toxidez e odor desagradável, minimamente, se faz necessária sua queima de modo eficiente, para que haja, praticamente, totalidade na conversão dos compostos orgânicos em óxidos correspondentes e vapor d'água.

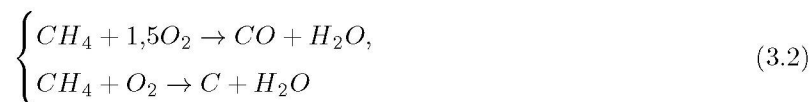
3.3.1 A combustão

As reações de combustão são reações químicas exotérmicas que ocorrem quando os elementos presentes em um combustível reagem com o oxigênio, liberando energia. Reações de combustão podem ocorrer de forma completa ou incompleta. A combustão completa tem lugar quando há o oxigênio do ar na quantidade suficiente para oxidação completa de todos os elementos combustíveis do combustível. Se fornecida uma quantidade menor de ar que a necessária, a combustão será dita incompleta, resultando na formação de monóxido de carbono (CO) como um dos produtos da reação. O monóxido do carbono é um gás tóxico e provoca a poluição do ambiente, por isso a combustão incompleta de combustíveis que apresentem carbono em sua composição é inadmissível (VLASSOV, 2008).

Para a combustão completa de um mol de metano são necessários dois moles de oxigênio, como descrito na Eq. 3.1, resultando em dióxido de carbono e vapor d'água (CAINE, 2000).



Porém, a combustão pode se dar de forma incompleta, situações quando não há oxigênio suficiente para consumir todo o metano. As equações descritas na Eq. 3.2 ilustram as reações incompletas com pouco e pouquíssimo oxigênio, respectivamente, resultando nos produtos de reação monóxido de carbono (CO) ou carbono elementar (C), também conhecido como fuligem.



Já a combustão completa do composto sulfeto de hidrogênio é descrita na Eq. 3.3. Para a combustão de um mol de gás sulfúrico são necessários 1,5 moles do oxigênio (VLASSOV, 2008).



3.3.2 Princípios da combustão

A combustão é um processo que envolve um combustível, o biogás, e um comburente, o ar. A eficiência de destruição é dependente de três fatores: temperatura de combustão, turbulência na mistura

Tabela 4 – Mecanismo de formação de produtos indesejáveis da combustão de biogás.

Produtos indesejáveis	Mecanismo de formação
Hidrocarbonetos parcialmente oxidados dioxinas e furanos HPAs NOx	T < 850°C na chama para evitar a formação dessas espécies por meio de rearranjos moleculares Formado em T > 1200°C pela oxidação de N ₂
Fonte: Caine (2000)	

ar – gás e tempo de residência dos gases quentes na câmara de combustão do queimador (CAINE, 2000).

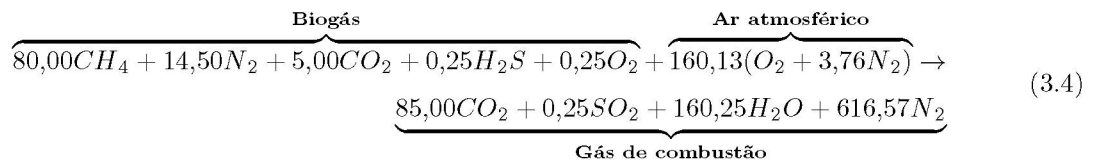
3.3.2.1 Temperatura de combustão

É recomendado que a temperatura da queima de biogás seja superior a temperatura de autoignição dos seus principais componentes, sendo a do CH₄ e H₂S de 540 °C e 260 °C, respectivamente (CAINE, 2000). Temperatura de autoignição é a temperatura mínima na qual ocorre a combustão, independente de uma fonte de ignição. O simples contato do combustível com o comburente, a esta temperatura, já é suficiente para manter a reação.

Ainda, a temperatura pode evitar o mecanismo de formação de alguns produtos indesejáveis da combustão do biogás, conforme Tabela 4. A temperatura de 850 °C previne o rearranjo das moléculas do biogás em elementos perigosos, tais como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), dioxinas, furanos e hidrocarbonetos parcialmente oxidados. Ao mesmo tempo que se é necessária alta temperatura para queima eficiente de biogás, não é recomendado exceder 1200°C, já que a oxidação de N₂ nesta temperatura resulta na formação do composto NOx (CAINE, 2000).

3.3.2.2 Mistura ar/biogás

Ainda, conforme enunciado por Caine (2000), em processos de combustão, o ar atmosférico pode desempenhar 3 funções distintas, oxidação dos elementos do combustível, resfriamento da chama e turbulência na mistura ar-combustível. Para a completa oxidação do biogás, é necessária estar disponível uma razão estequiométrica ar-combustível, a qual representa a massa de O₂ necessária para reagir completamente com a massa de biogás inserida, obtendo-se como produtos da combustão dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), a água (H₂O) e os gases inertes presentes no ar de admissão, como o nitrogênio (N₂). A Eq. 3.4 apresenta, como exemplo, a reação balanceada de combustão completa de um biogás genérico com o ar atmosférico.



Em função da composição do biogás, apresentado na Eq. 3.4, é possível determinar as massas de ar e de combustível que reagem durante a combustão e, dessa forma, determinar a relação ar/biogás estequiométrica (A/F_(s)) da reação. A massa de ar atmosférico pode ser determinada a partir do produto do número de mols pelas massas molares dos gases componentes do ar atmosférico, de acordo com a Eq. 3.5, a qual apresenta o cálculo da massa de ar (m_{AR}) consumida na reação.

$$m_{AR} = (160,13 \text{ mol } O_2) \left(\frac{32,00 \text{ g}}{\text{mol } O_2} \right) + (602,09 \text{ mol } N_2) \left(\frac{28,01 \text{ g}}{\text{mol } N_2} \right) = 21990,03 \text{ g} \quad (3.5)$$

De forma similar, a Eq. 3.6 apresenta o cálculo da massa de biogás (m_{BIOGÁS}) consumida na reação.

$$m_{\text{BIOGÁS}} = (80,00 \text{ mol } CH_4) \left(\frac{16,04 \text{ g}}{\text{mol } CH_4} \right) + (14,50 \text{ mol } N_2) \left(\frac{28,01 \text{ g}}{\text{mol } N_2} \right) + (5,00 \text{ mol } CO_2) \left(\frac{44,01 \text{ g}}{\text{mol } CO_2} \right) + (0,25 \text{ mol } H_2S) \left(\frac{34,08 \text{ g}}{\text{mol } H_2S} \right) + (0,25 \text{ mol } O_2) \left(\frac{32,00 \text{ g}}{\text{mol } O_2} \right) = 1925,96 \text{ g} \quad (3.6)$$

Determinados m_{AR} e $m_{\text{BIOGÁS}}$, a relação $A/F_{(S)}$ é calculada segundo a equação:

$$A/F_{(S)} = \left(\frac{m_{\text{AR}}}{m_{\text{BIOGÁS}}} \right) = 11,42 \implies A/F_{(S)} = 11,42 : 1 \quad (3.7)$$

A relação ar/biogás estequiométrica ($A/F_{(S)}$) varia de acordo com a composição do biogás em questão. Devido a variação dos valores de $A/F_{(S)}$ entre os diferentes biogases define-se um fator, conhecido como Lambda (λ), obtido a partir da divisão dos valores de relação ar/biogás real $A/F_{(R)}$ e estequiométrica segundo a Eq. 3.8.

$$\lambda = \frac{A/F_{(R)}}{A/F_{(S)}} \quad (3.8)$$

Para a obtenção da relação ar/biogás real ($A/F_{(R)}$) é necessário o conhecimento prévio das vazões mássicas, em kg/h, tanto do fluxo de ar atmosférico quanto de biogás que participam do processo de combustão.

De modo geral, queimadores de biogás não dispõem de controle do fluxo de entrada de ar atmosférico, este adentrando na câmara de combustão de modo passivo. Nesse contexto, pode-se fazer uso de equações matemáticas que permitam a estimação do fluxo de ar atmosférico a partir do conhecimento da vazão mássica de biogás ($\dot{m}_{\text{BIOGÁS}}$) e vazão mássica do gás resultante da combustão ($\dot{m}_{\text{GÁS DE COMBUSTÃO}}$). A Eq. 3.9 evidencia como pode ser aferido o valor da vazão mássica de ar atmosférico participante do processo de combustão.

$$\dot{m}_{\text{BIOGÁS}} + \dot{m}_{\text{AR ATMOSFÉRICO}} = \dot{m}_{\text{GÁS DE COMBUSTÃO}} \quad (3.9)$$

$$\dot{m}_{\text{AR ATMOSFÉRICO}} = \dot{m}_{\text{GÁS DE COMBUSTÃO}} - \dot{m}_{\text{BIOGÁS}}$$

As vazões mássicas (\dot{m}) podem ser obtidas por meio do produto da vazão volumétrica (\dot{V}) pela massa específica do fluxo gasoso (ρ), conforme exposto na Eq. 3.10.

$$\dot{m} = \dot{V} \rho \quad (3.10)$$

Desse modo, é essencial o conhecimento quali-quantitativo dos compostos químicos presentes nos fluxos gasosos, pois a conversão dos componentes do gás em massa possibilita a determinação da proporção mássica que cada composto representa no fluxo. Diante disso, é possível o cálculo da densidade do fluxo gasoso (ρ) por meio de uma média ponderada entre as densidades de cada componente presente no fluxo.

A partir da pressão absoluta do local (P_a) e a temperatura absoluta do fluxo (T_a), é possível determinar a massa específica (ρ_a) na condição em que os fluxos gasosos não estão nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP) conforme registrado na Eq. 3.11.

$$\rho_a = \rho_{\text{CNTP}} \left(\frac{P_a}{P_{\text{CNTP}}} \right) \left(\frac{T_{\text{CNTP}}}{T_a} \right) \quad (3.11)$$

A partir da determinação de tais parâmetros é possível determinar a relação ar/biogás real, $A/F_{(R)}$, segundo a Eq. 3.12, e compará-la à relação ar/biogás estequiométrica por meio de Lambda (λ), conforme Eq. 3.8.

$$A/F_{(R)} = \frac{\dot{m}_{AR}}{\dot{m}_{BIOGÁS}} \quad (3.12)$$

Segundo Caine (2000), o fornecimento de menor quantidade de ar pode resultar na combustão incompleta de biogás e, conseqüentemente, na emissão de metano e outros produtos indesejáveis, como o monóxido de carbono. Para assegurar que haja combustão completa de todos os elementos combustíveis do biogás, é recomendado fornecer à câmara de combustão uma quantidade de ar maior que a estequiométrica. Se houver ar em excesso, os produtos de combustão do biogás irão conter O_2 . Esse ar em excesso garante que não ocorram pontos na câmara de combustão com falta de ar (VLASSOV, 2008).

Segundo Lewandowski (2000), para garantir que as moléculas do composto a ser oxidado entrem em contato com as moléculas de oxigênio, um excesso de oxigênio deve ser fornecido ao sistema. Normalmente, esse excesso de oxigênio é estabelecido mantendo uma concentração de oxigênio nos produtos da combustão de pelo menos 3%.

3.3.2.3 Tempo de contato entre o biogás e a chama

Por fim, é necessário oferecer tempo de residência suficiente para que as reações cinéticas químicas ocorram. Geralmente, o tempo de residência na câmara de combustão varia entre 0,5 a 2,0 segundos. Tempos de residência menores correspondem à eficiência de destruição menores e vice-versa (LEWANDOWSKI, 2000).

A associação destes três fatores pode garantir a conversão completa dos componentes do biogás em compostos menos nocivos ao meio ambiente e à saúde humana, uma vez librados à atmosfera.

3.3.3 Determinação da eficiência de destruição de biogás

Eficiência representa o grau de sucesso com que um processo de transferência ou conversão de energia é realizado (BOLES MA; ÇENGEL, 2006). Existem distintos métodos para a determinação da eficiência do processo de queimada de biogás, sendo que, em ambos, a eficiência da queima é pautada na destruição de CH_4 e H_2S , sendo estes os gases que causam inconveniência.

A eficiência de destruição do biogás obtida de forma analítica é baseada em análises qualitativas, com finalidade de determinar a concentração e taxa de emissão dos elementos presentes no gás de combustão. A eficiência pode ser determinada por meio da comparação entre o teor de metano do biogás antes e após a queima e, também, por meio da composição final do gás de combustão.

Uma forma de se analisar o teor da eficiência de destruição de biogás é por meio da Eq. 3.13 proposta pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - EPA, em 1983 (MCDANIEL; TICHENOR, 1983). O cálculo da eficiência do método em questão se baseia apenas na composição final do gás, sem com que haja consideração de vazões.

$$\%ED_1 = \frac{[C] CO_2}{[C] CO_2 + [C] CO + [C] HCNQ} \quad (3.13)$$

Sendo que ED representa o percentual de eficiência de destruição do metano em %, $[C] CO_2$, $[C] CO$ e $[C] HCNQ$ representam, respectivamente, as concentrações de CO_2 , CO e hidrocarbonetos não queimados, ou seja, CH_4 no gás de combustão, sendo estes parâmetros em mg/m^3 .

Tabela 5 – Taxa de destruição térmica de compostos orgânicos voláteis e, em específico, o metano.

Eficiência de destruição (%)	Graus acima da TAI (°C)	Temperatura para o CH ₄ (°C)	Tempo de residência (s)
95	150	690	0,5
98	205	745	0,5
99	250	790	0,75
99,9	290	830	1
99,99	345	885	2

Fonte: adaptado de [Lewandowski \(2000\)](#).

Outro método para se calcular a eficiência de destruição de biogás se baseia no balanço de massa, realizado por meio da comparação entre a vazão mássica (\dot{m}) de metano presentes no biogás e ar atmosférico participantes do processo de combustão e no gás resultante do processo de combustão. A vazão mássica de metano pode ser obtida por meio do produto da vazão mássica total do fluxo, dado em kg/h, e a porção mássica de metano presente no fluxo. Tal eficiência pode ser obtida por meio da Eq. 3.14:

$$\%ED_{2,CH_4} = 100 - \left(\frac{\dot{m}_{CH_4 \text{ GÁS DE COMBUSTÃO}} 100}{\dot{m}_{CH_4 \text{ BIOGÁS}} + \dot{m}_{CH_4 \text{ AR ATMOSFÉRICO}}} \right). \quad (3.14)$$

Em que ED representa o percentual de eficiência de destruição do metano em %, $\dot{m}_{CH_4 \text{ GÁS DE COMBUSTÃO}}$ significa a vazão mássica de CH₄ no gás de combustão em kg/h, $\dot{m}_{CH_4 \text{ BIOGÁS}}$ representa a vazão mássica de CH₄ no biogás em kg/h e $\dot{m}_{CH_4 \text{ AR ATMOSFÉRICO}}$ é igual a vazão mássica de CH₄ no ar atmosférico em kg/h.

De modo análogo, o mesmo pode ser realizado para a determinação da eficiência de destruição de H₂S, conforme enunciado na Eq. 3.15:

$$\%ED_{2, H_2S} = 100 - \left(\frac{\dot{m}_{H_2S \text{ GÁS DE COMBUSTÃO}} 100}{\dot{m}_{H_2S \text{ BIOGÁS}} + \dot{m}_{H_2S \text{ AR ATMOSFÉRICO}}} \right). \quad (3.15)$$

Ainda, há métodos para determinação da eficiência de destruição em função da associação de tempo de residência dos gases na câmara de combustão e temperatura de queima, sendo este método definido como uma estimativa da quantificação da eficiência.

[Lewandowski \(2000\)](#), descreveu, na forma da Tabela 5, os requisitos para o alcance de distintas taxas de eficiência de destruição de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs). COVs são compostos que possuem carbono em sua composição, sendo o de interesse deste estudo o CH₄. O método envolve a associação de tempo de residência dos gases na câmara de combustão e graus acima da temperatura de autoignição (TAI) dos compostos. Para garantir a proposição de Lewandowski, é fundamental que haja, ao menos, 3,0% de oxigênio nos produtos da combustão, e turbulência na mistura ar-gás.

3.3.4 Queima de biogás em ETEs

Usualmente, nas estações de tratamento de esgoto do Brasil, o biogás gerado no processo de tratamento do esgoto doméstico é captado e conduzido para queimadores, equipamentos que promovem a destruição dos elementos componentes do biogás por meio do processo de combustão.

No estado do Paraná, a resolução nº 016/14 da Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA), art. 58, determina que o biogás gerado em reatores de digestão anaeróbia deve ser aproveitado e na impossibilidade de seu aproveitamento será necessária sua queima, por meio de instalação e operação contínua de queimadores para conversão do metano ([PARANA, 2014](#)).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), estabelece por meio da norma regulamentadora NBR 12209/11, as condições que garantem a completa oxidação térmica do biogás. Para um sistema de combustão direta de biogás, o fluxo de gás deve ser exposto a temperaturas entre 750 a 815 °C, em uma câmara de combustão, com tempo de residência de 1 a 2 segundos. A queima deve ser feita na presença de oxigênio, por meio de mistura turbulenta de O₂ e do biogás (ABNT, 2011).

No entanto, a legislação não versa sobre a eficiência de destruição do biogás, porém, todas as ETEs devem implementar mecanismos eficientes de captura e queima de biogás. A liberação do biogás de forma descontrolada na atmosfera é prejudicial, não apenas pela possibilidade de ocorrência de maus odores junto à vizinhança, mas principalmente pelos riscos inerentes ao gás metano, que, além de ser combustível, contribui cerca de 28 vezes mais que o gás carbônico para o efeito estufa. Dessa forma, é necessário que o biogás produzido no reator seja coletado, medido e posteriormente utilizado ou queimado (CHERNICHARO, 2007).

Para garantir a eficiência do queimador, uma medida que regule e mantenha a vazão constante é necessária, portanto, é recomendada a adoção de um gasômetro antecedente ao queimador, permitindo o armazenamento de biogás em períodos em que a produção na ETE é baixa e envie ao queimador somente quando o volume for suficiente para reunir as condições de queima eficiente.

No entanto, o primordial é a definição do tipo de queimador a ser adotado nas estações. Para isso, é necessária uma avaliação holística das principais características, necessidades e prioridades das estações. É recomendado analisar aspectos quanto ao porte da ETE, proximidade com a vizinhança, reclamações sobre maus odores, qualidade do ar local e global, recursos financeiros disponíveis, entre outros.

Dessa forma, na sequência, uma vez elencadas as características, necessidades e prioridades da ETE, a escolha do método de queima a ser adotado deve levar em consideração os parâmetros operacionais e aspectos econômicos, sociais, ambientais e operacionais proporcionados por cada tipo de queimador.

3.4 Queimadores de biogás

Queimadores são equipamentos que promovem a destruição dos elementos componentes de um gás por meio do processo de combustão. Os queimadores são utilizados para a combustão controlada de efluentes gasosos que possam ser prejudiciais e potencialmente tóxicos ao meio ambiente e à saúde humana. São largamente empregados em refinarias e indústrias químicas com o intuito de efetuar emissões seguras durante situações de emergência (USEPA, 2012).

O uso de queimadores deveria ser empregado com rara frequência, uma vez que a energia presente no efluente gasoso está sendo perdida ou desperdiçada. Apesar disso, os queimadores são amplamente empregados no Brasil para a combustão de biogás gerado em aterros sanitários, composteiras, estações de tratamento de esgoto, entre outros.

Em geral, os sistemas de combustão de biogás têm como objetivo a oxidação térmica do gás de forma eficiente e segura, à um custo acessível (BAUKAL, 2013). A queima de biogás, em vez de sua emissão direta a atmosfera, proporciona três grandes benefícios: redução da emissão de gás de efeito estufa (GEE), minimização de maus odores e salvaguardar as condições operacionais seguras em ETEs (BARTON, 2008).

No entanto, a queima pode provocar ruído, fumaça, poluição luminosa noturna, além de, caso ocorra de maneira inadequada, geração de produtos indesejáveis. Assim, o design dos queimadores deve procurar maximizar, principalmente, a conversão de metano e sulfeto de hidrogênio, de forma a minimizar a emissão e quaisquer produtos da queima incompleta do biogás (LING, 2007).

Dessa forma, como primeiro passo, para que seja possível conceber e projetar um sistema de queima de biogás, devem ser levantadas as características do biogás quanto à vazão, composição e temperatura (BADER et al., 2011). Assim, a partir do conhecimento das características do gás, deve-se fazer uma análise das características econômica, sociais, ambientais e operacionais inerentes ao uso de cada um dos tipos dos queimadores disponíveis no mercado, elencar os critérios prioritários de acordo com as necessidades do adquirente/usufrutuário, para então, finalmente, definir o tipo de queimador e a fonte de suprimento de ar a serem utilizados (KAMINSKI et al., 2018).

Além disso, os custos relacionados à aquisição, implementação e operação de um queimador sempre serão fatores que influenciarão diretamente na viabilidade de implementação de um sistema de captura e queima de biogás em uma ETE. O custo de sistemas de queima depende do grau de sofisticação desejado (ou seja, controle manual ou automático) e do número de acessórios escolhidos, como câmara flash, selo hídrico, painel de controle, entre outros.

No mercado podem ser encontrados três modelos distintos de queimadores de biogás: aberto, semi-enclausurado e enclausurado. Sendo que cada um deles possui características próprias que influenciam no processo de combustão. Na Figura 4 estão retratados os modelos existentes de queimadores de biogás.

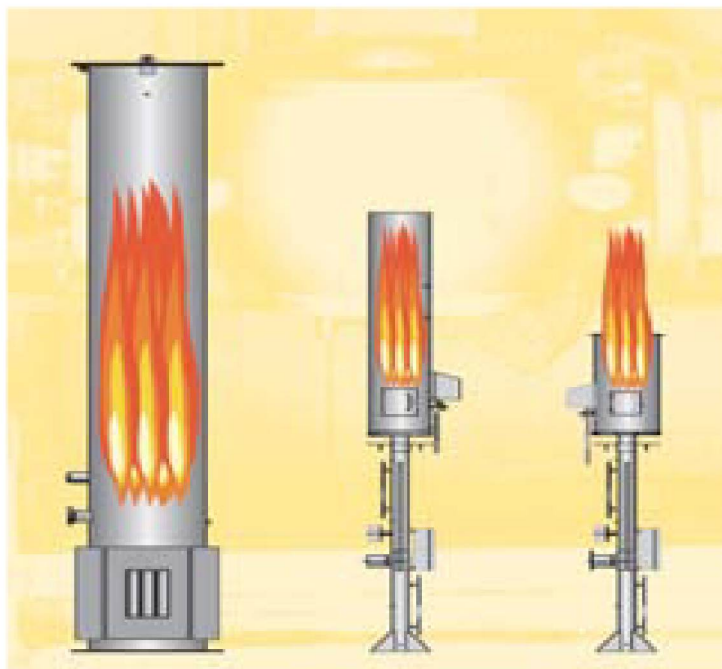


Figura 4 – Tipos de queimadores, queimador enclausurado à esquerda, queimador aberto à direita e queimador semi-enclausurado ao centro.

Fonte: Barton (2008)

3.4.1 Queimadores abertos

Queimadores abertos, também conhecidos como flares abertos (Figura 5), são o tipo de queimador mais utilizados para combustão de gases provenientes de indústrias de refinaria e químicas, aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto (STONE et al., 1992).

São a forma mais simplificada para controle de fases gasosas, como o biogás. Nestes queimadores, a combustão não ocorre de forma controlada. Portanto, esses queimadores, são usualmente utilizados para



Figura 5 – Exemplificação de um queimador aberto de biogás.

Fonte: [Baukal \(2013\)](#)

vazões de biogás pequenas e irregulares, de até 7 Nm³/h ([BARTON, 2008](#); [BAUKAL, 2013](#); [FOKAL, c2019](#)).

Queimadores abertos não possuem câmara de combustão, ou seja, sua chama fica exposta à atmosfera sem que haja garantia de contato prolongado entre a chama e o biogás. Durante o processo de combustão a chama fica sujeita às condições meteorológicas, como vento e chuva. Justamente pelo fato de a chama ser aberta, sua intensidade é baixa e o ar ambiente rapidamente a resfria ou, até mesmo, a apaga totalmente. Estes fatores contribuem para tornar a chama menos estável, acarretando uma chance maior de apagamentos, resultando na formação de subprodutos indesejáveis e compostos não oxidados, o que significa em uma eficiência reduzida de destruição do biogás ([BARTON, 2008](#); [BAUKAL, 2013](#)).

Além disso, em geral, os queimadores abertos não possuem válvulas de fechamento automáticas ou válvulas de isolamento que fecham quando a operação apresenta falhas, prevenindo a liberação de gás para a atmosfera. Nem sequer há fornecimento de ar de forma automatizada, de forma a assegurar uma combustão completa do biogás ([BAUKAL, 2013](#)).

Devido ao fato de a chama ficar exposta ao meio ambiente, queimadores abertos são, geralmente, elevados o suficiente para evitar que a radiação provocada pela chama atinja pessoas e equipamentos. O que, por outro lado, resulta em um dificultoso acesso para realização de manutenções ([BAUKAL, 2013](#)).

Em geral o consumo de energia elétrica dos queimadores abertos é baixo, uma vez que este requer baixa, ou nenhuma, fornecimento de pressurização do gás. Além disso, em muitos casos a ignição do queimador é realizada por meio de um centelhador alimentado por um painel solar.

Elevar a altura do queimador pode prevenir condições potencialmente perigosas ao nível do solo, onde a chama aberta (isto é, uma fonte de ignição) está localizada perto de uma unidade de processo. Além disso, os produtos da combustão podem ser dispersos acima das áreas de trabalho para reduzir os efeitos de ruído, calor, fumaça e odores desagradáveis ([PANDULLO, 1995](#)).

Por outro lado, a ausência de uma câmara de combustão e calor intenso associados a chamas abertas também dificultam o monitoramento do gás resultante do processo de combustão ([CAINE, 2000](#)). A Tabela 6 apresenta de forma sumarizada as vantagens e desvantagens ao se empregar queimadores

Tabela 6 – Vantagens e desvantagens relacionadas ao uso de queimadores abertos.

Vantagens	Desvantagens
- Baixo custo	- Poluição sonora
- Instalação simples	- Eficiência de destruição inferior comparado ao demais tipos de queimadores
- Baixo risco de explosões	- Emissão de subprodutos indesejáveis resultantes da queima incompleta
- Operação descomplicada	- Dificuldade de monitoramento
- Ótima relação custo benefício	- Emissão de radiação
- Baixo consumo de energia elétrica	- Poluição luminosa

abertos para a queima de biogás em ETEs.

Sua taxa de eficiência de destruição de biogás é de difícil determinação, pois queimadores abertos não são capazes de manter uma temperatura de combustão constante, além de não ser possível determinar o tempo de contato dos gases na zona de combustão. Sendo assim, acredita-se que o queimador aberto tenha eficiência de destruição de biogás inferior a 50%, baseado em manuais de fabricantes (FOKAL, c2019).

Os custos de aquisição dos queimadores abertos são baixo, sendo os modelos mais simples encontrados por preços que variam entre R\$ 6.000,00 e R\$ 15.000,00, sendo este o modelo com menor custo de aquisição dentre os demais modelos de queimadores existentes.

3.4.2 Queimadores semi-enclausurados

Queimadores semi-enclausurados, conforme o exemplo ilustrado na Figura 6 são amplamente empregados para queimas emergenciais, dado que estes queimadores são geralmente utilizados quando a necessidade da combustão direta de biogás excedente produzido em estações de tratamento de esgoto ou plantas de biogás que realizam a recuperação energética deste gás (RENEWPILOTINGGASTECHNOLOGY, c2019).

Os queimadores semi-enclausurados são considerados o sistema intermediário ou híbrido entre os queimadores abertos e enclausurados (BARTON, 2008). Este tipo de queimador possui algumas características de um queimador aberto, porém, possui o bocal de chama envolto por uma câmara de combustão equipada com revestimento isolante térmico, como em queimadores enclausurados (PROGECO, c2019).

Assim como os queimadores abertos, os queimadores semi-enclausurados são elevados. O diferencial entre os queimadores é a ocorrência da ignição dentro de uma câmara de combustão para prevenir a dispersão da chama, de forma a deixá-la com visibilidade parcial ou nula. A proteção impede eventuais apagamentos e garante que a chama permaneça dentro da zona de combustão, sendo possível o alcance de temperaturas superiores à 500°C (COMBUSTIONRESEARCHASSOCIATES, c2019).

Este tipo de queimador é ideal para a combustão de uma ampla faixa de vazões, atendendo desde pequenas a altas vazões de biogás. Devido ao tamanho e características particulares da câmara de combustão, estes queimadores permitem a queima do biogás em um fluxo maior do que em queimadores abertos (PROGECO, c2019).

Projetados de forma a ter longa vida útil e operar a qualquer momento, o objetivo dos queimadores semi-enclausurados é a queima imediata de biogás a um custo reduzido. Estes queimadores são projetados para funcionar com uma chama semi-aberta. Sua operação pode ser completamente automática, usando apenas controles de relés. Mesmo os modelos mais simplificados devem possuir válvula solenoide, selo hidráulico e válvula corta chamas (HOFSTETTERGASTECHNIK, c2019).

Embora ambos queimadores semi-enclausurados e enclausurados possuam o objetivo de oxidar

Tabela 7 – Vantagens e desvantagens relacionadas ao uso de queimadores semi-enclausurados.

Vantagens	Desvantagens
- Custo reduzido quando comparado ao queimador enclausurado	- Poluição luminosa
- Alta eficiência na taxa de conversão do biogás	- Poluição sonora
- Proteção contra intempéries	
- Possibilidade de automação do processo de queima	

os principais componentes do biogás, como o metano, o queimador enclausurado tem capacidade de atingir eficiências superiores de combustão do biogás, além de ser uma queima mais silenciosa e menos visível. Por outro lado, o ponto positivo da utilização de queimadores semi-enclausurados é o menor custo de aquisição, instalação e manutenção quando comparados aos queimadores enclausurados (PROMAR, 2009).



Figura 6 – Exemplificação de um queimador semi-enclausurado de biogás.

Fonte: HofstetterGastechnik (c2019).

Apesar da semelhança com queimadores enclausurados, os queimadores semi-enclausurados são consideravelmente mais baratos, tendo apenas uma ligeira diminuição na eficiência de combustão de biogás (PROMAR, 2009). Os custos referentes à aquisição de queimadores semi-enclausurados são superiores à R\$100.000,00.

As vantagens e desvantagens inerentes à aplicação de queimadores semi-enclausurados para a combustão de biogás estão expostos na Tabela 7.

Queimadores semi-enclausurados possuem eficiência de destruição de biogás ligeiramente menores que a eficiência usual de queimadores enclausurados. São relatadas eficiências de 98 até 99% na destruição térmica do biogás (ECOSECURITIES, c2019; INNOVATIONS, c2019).

3.4.3 Queimadores enclausurados

Os queimadores enclausurados, ou fechados, exemplificados na Figura 7 como explicitado em seu

nome, promovem a queima enclausurada de gás no interior de uma câmara de combustão. Seu interior é isolado termicamente, de modo a evitar o resfriamento devido à troca de calor com as paredes metálicas do queimador, proporcionando, assim, altíssimas temperaturas de queima (BARTON, 2008).

Estes queimadores são equipamentos que devem ser manufaturados de acordo com a necessidade do usuário, mediante o conhecimento das características do gás quanto à vazão, composição e temperatura (STONE et al., 1992). Logo, são confeccionados para atender fluxos específicos, podendo ser de pequeno à grande porte, confeccionados sob encomenda em empresas especializadas.

Além disso, a câmara de combustão é dimensionada de modo que o gás fique retido por um período de tempo específico. Dessa forma, a associação de altas temperaturas e tempo de retenção garantem que a eficiência de destruição do biogás seja, praticamente, completa. A temperatura de queima pode variar de 800 a 1200°C no interior da câmara de combustão (BADER et al., 2011).

Em geral, possuem local para monitoramento de temperatura, vazão de gás e tomada de amostras, garantindo assim, o monitoramento da performance do processo de combustão, por meio da análise qualitativa dos gases de exaustão (BARTON, 2008).

Comparados aos queimadores abertos, os queimadores enclausurados são operacionalmente mais seguros, não possuem chama visível, ou seja, sem problemas de poluição luminosa, e emissão mínima de radiação e ruído. Porém, queimadores fechados promovem baixa dispersão dos gases de combustão, devido ao fato de serem mais próximos ao solo e o bocal de saída ser mais estreito. Existe maior risco de explosões de gases que não foram oxidados no processo de queima (LING, 2007).

Em geral, queimadores enclausurados podem ser classificados entre aqueles com suprimento de ar ou sem esse auxílio. Em queimadores sem auxílio de ar o ar necessário para a combustão e para o controle de temperatura entra na câmara de combustão por corrente natural, após passar por aberturas do queimador (BAUKAL, 2013).



Figura 7 – Exemplificação de um queimador enclausurado de biogás.

Fonte: Baukal (2013)

Os queimadores enclausurados devem ser projetados para suportar mais do que o requisito de ar estequiométrico. O excesso de ar é usado para o controle da temperatura da chama. Isso reduz a classificação de temperatura exigida para o revestimento refratário, que é uma parte significativa do custo total do sistema (BAUKAL, 2013).

Tabela 8 – Vantagens e desvantagens relacionadas ao uso de queimadores enclausurados.

Vantagens	Desvantagens
- Minimização de compostos odorantes	- Custo de aquisição elevado
- Alta destruição de metano	- Baixa dispersão de compostos não oxidados
- Alta eficiência na taxa de conversão do biogás	- Processo operacional de maior complexidade
- Baixa liberação de compostos não oxidados	- Limitação ao fluxo de gás de dimensionamento
- Alta estabilidade de chama	
- Possibilidade de monitoramento e controle do processo	
- Baixa emissão de ruído sonoro	
- Baixo impacto visual da chama	
- Baixa emissão de radiação	
- Possibilidade de controle/queima de qualquer tamanho de fluxo gasoso	
- Baixa emissão de fumaça	

Embora a temperatura do gás de combustão possa ser de 900 °C ou inferior, o material de revestimento refratário da câmara de combustão - pelo menos na parte inferior - deve ser selecionado para uma temperatura de operação maior, pois as temperaturas próximas ao ponto de ignição podem ser mais altas que a temperatura final (BAUKAL, 2013).

Queimadores enclausurados possuem diversas vantagens no seu uso, estas vantagens, bem como as desvantagens de sua aplicação para a queima de biogás podem, ser observadas na Tabela 8.

Diferentemente dos demais modelos de queimadores, queimadores enclausurados podem possuir portas de amostragem no corpo do queimador, as quais permitem que a qualidade da combustão seja medida adequadamente antes de se misturar com o ar atmosférico ambiente. A capacidade de monitorar o gás de combustão significa que o desempenho do queimador pode ser determinado. A quantidade de metano destruída no processo de combustão pode ser determinada medindo-se a quantidade de metano antes e após a queima do biogás. Por meio desse parâmetro, é possível fazer o cálculo da quantidade de CO₂ evitada de ser lançada para a atmosfera (BARTON, 2008).

Devido ao fato de a combustão do biogás ocorrer sob condições controladas, o queimador enclausurado garante a conversão quase completa de biogás em óxidos e vapor d'água. A combinação de altas temperaturas e tempo de retenção mínimo dos gases no interior da câmara de combustão, associado à eliminação de zonas frias dentro da câmara, garante uma alta eficiência de destruição e combustão completa do biogás. São relatadas diversas eficiências para queimadores enclausurados, mas essas podem variar de 98-99,95% (BARTON, 2008; BAUKAL, 2013).

O custo de aquisição de um queimador enclausurado é bastante elevado devido à sua robustez, sendo de aproximadamente R\$ 200.000,00.

3.4.4 Tipos de suprimento de ar

Como em todos os processos de combustão, um suprimento adequado de ar e uma boa mistura são necessários para garantir a combustão completa e minimizar a emissão de fumaça. Os vários tipos de queimadores diferem principalmente na forma de suprimento de ar. Os queimadores podem apresentar diferentes fontes de oxigênio, como injeção de vapor, injeção de ar e sem injeção (PANDULLO, 1995).

O sistema de injeção de vapor, injeta vapor na zona de combustão da chama para promover

Tabela 9 – Parâmetros operacionais dos queimadores aberto, semi-enclausurado e enclausurado.

Parâmetro	Queimador		
	Aberto	Semi-enclausurado	Enclausurado
Porte da ETE	Pequeno	Médio - grande	Médio - grande
Faixa usual de aplicação (Nm^3/h)	<7	<100	7 - 100
Eficiência (%)	<50	98 - 99	98 - 99,95
Temperatura de queima ($^{\circ}\text{C}$)	<500	>500	800 - 1200
Custo de aquisição (R\$)	6.000 - 15.000	>100.000	200.000 - 250.000

Fonte: Adaptado de Kaminski et al. (2018).

turbulência à mistura e induzir a entrada de ar atmosférico na chama. Esta indução ocorre através do aumento da taxa de difusão do ar atmosférico para a chama, criado pela injeção de vapor (STONE et al., 1992).

Já o sistema de injeções de ar utiliza de ventiladores, posicionados anteriormente a queima, para fornecer o ar necessário para a turbulência e combustão completa do efluente gasoso. Esses ventiladores injetam ar na parte inferior e interna do queimador (STONE et al., 1992).

E por fim, a forma mais simplificada são os queimadores sem nenhum auxílio de injeções de ar ou vapor operam somente com o ar proveniente da difusão atmosférica. A entrada de ar no processo de combustão ocorre de forma passiva. Seu uso é limitado, em geral somente os gases de baixo calor de combustão e/ou de baixa razão estequiométrica de ar-gás são adequados para queima nesta condição (STONE et al., 1992).

3.4.5 Análise comparativa dos queimadores

A Tabela 9 expõe as características importantes a respeito dos modelos de queimadores aberto, semi-enclausurado e enclausurado e, na Tabela 10 estão reunidas as avaliações dos aspectos econômicos, sociais, ambientais e operacionais inerentes aos queimadores aberto, semi-enclausurado e enclausurado, de forma a resumir e facilitar a avaliação das vantagens e desvantagens da utilização dos diferentes tipos de queimadores de biogás.

3.4.6 Estimativa de emissões evitadas de metano a partir do uso de queimadores de biogás

A estimativa das emissões de GEE evitadas a partir do uso de queimadores de biogás, pode ser quantificada a partir da Eq. 3.16. A equação é uma adaptação ao método adotado pelo (IPCC, 2006), adotada por Carvalho and Possetti (2017), para quantificação de emissões específicas de metano em CO_2eq provenientes do tratamento de água residuárias.

O método permite realizar uma comparação entre as emissões de CO_2eq de cenário anterior à queima, no qual o biogás é liberado para a atmosfera sem qualquer tipo de tratamento, e posterior à combustão de biogás em queimadores.

$$E_{\text{emissões}_{\text{CO}_2\text{eq}}} = (\dot{m}_{\text{CH}_4} E_{\text{QUEIMADOR}2,44}) + ((1 - E_{\text{QUEIMADOR}}) \dot{m}_{\text{CH}_4} \text{GWP}_{\text{CH}_4}). \quad (3.16)$$

Em que \dot{m}_{CH_4} representa a vazão mássica de metano no biogás em $t\text{CH}_4/\text{ano}$, $E_{\text{QUEIMADOR}}$ significa a eficiência do queimador quanto à destruição de biogás em %, 2,44 representa a constante resultante da relação de massa da transformação química de CH_4 em CO_2 a partir da queima completa de CH_4 ; e GWP_{CH_4} é o potencial de aquecimento global referente ao CH_4 em um horizonte de 100 anos, na unidade CO_2eq .

Tabela 10 – Matriz qualitativa entre o queimador aberto, semi-enclausurado e queimador enclausurado.

Aspectos avaliados		Aberto	Queimador Semi-enclausurado	Enclausurado
Aspecto econômico	Custo de aquisição	+++++	++	+
	Consumo de energia elétrica	++++	++	++
Aspectos sociais	Controle de compostos odorantes	+	+++	+++++
	Impacto visual da chama	+++	++++	+++++
Aspecto ambiental	Destruição de metano	+	++++	+++++
	Liberação de compostos não oxidados	+	++++	+++++
Aspectos operacionais	Dispersão dos gases de combustão	+++++	+++	++
	Simplicidade operacional	+++++	+++	+++
	Temperatura de queima	++	+++	+++++
	Estabilidade da chama	+	+++	+++++
	Tempo de residência	+	+++	+++++
	Risco de explosão	++	++	++
	Emissão de radiação	++	++	+++
	Possibilidade de monitoramento e controle do processo	+	++	+++++
	Emissão de ruídos sonoros	++	++	+++

+++++: mais favorável; +: menos favorável; +++++, +++, ++: notas intermediárias, em ordem

Fonte: Adaptado de [Kaminski et al. \(2018\)](#).

Dessa forma, é possível quantificar a redução da emissão de GEE para a atmosfera somente com a implementação de sistema de combustão de biogás em ETEs.

4 Métodos

A seguir descreve-se como foram realizadas as medições de vazão de biogás, composição de biogás, mensuração da temperatura de queima de biogás em queimadores enclausurados, quantificação do ar disponível para o processo de combustão e a composição do gás resultante do processo de combustão do biogás. A metodologia descrita a seguir será realizada de forma idêntica para todos os queimadores enclausurados das ETEs avaliadas.

A presente pesquisa foi realizada no âmbito das instalações da Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar, e serão utilizadas 6 estações de tratamento de esgoto da companhia, as quais contêm queimadores enclausurados em suas dependências. As estações que serviram de local para este estudo possuem em comum o fato de utilizarem reatores UASB/RALF como sistema de tratamento de esgotos e geração de biogás, e estão distribuídas em Curitiba e Região Metropolitana.

Na Figura 8 pode-se visualizar um fluxograma das principais etapas da metodologia, que serão detalhadas nos subcapítulos a seguir.

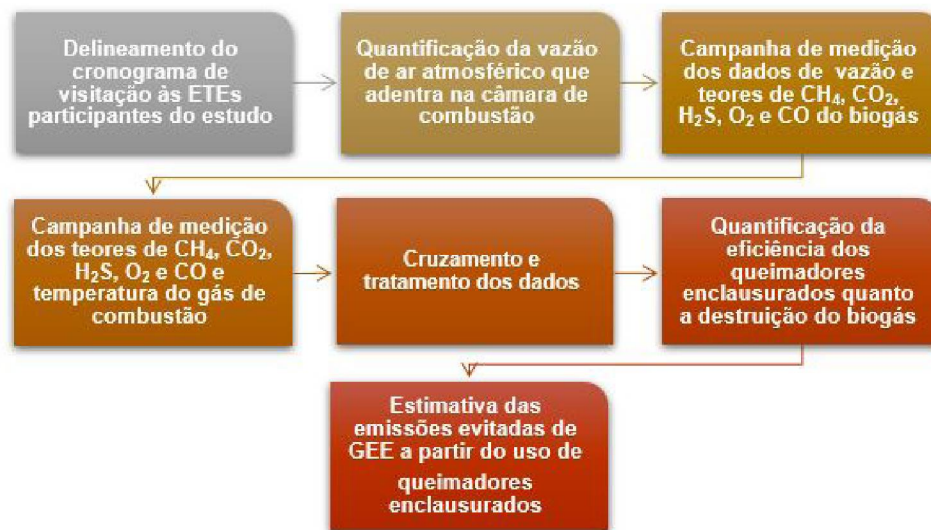


Figura 8 – Fluxograma das principais etapas da metodologia.

4.1 Local da pesquisa

O estudo foi desenvolvido em 6 ETEs da região de Curitiba e Região Metropolitana, no Estado do Paraná. Foram selecionadas ETEs que continham queimadores enclausurados, sendo que haviam 2 modelos distintos de queimadores, para vazões de 60 m³/h e 150 m³/h, alocado nas ETEs de acordo com a produção de biogás e seu porte. As estações escolhidas com seus respectivos dados de referência estão listadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Características referentes ao ano de 2019 das ETEs A, B, C, D, E e F participantes do estudo.

ETE	População equivalente atendida (hab)	Vazão média de esgoto (l/s)	Porte	Tecnologia de tratamento de esgoto	Modelo do queimador
A	228.821	476,71	Grande	REATOR ANAERÓBIO + FÍSICO QUÍMICO (DECANTAÇÃO/FLOTAÇÃO)	BCE150
B	49.152	102,4	Médio	REATOR ANAERÓBIO	BCE150
C	24.307	50,64	Pequeno	REATOR ANAERÓBIO + FÍSICO QUÍMICO (DECANTAÇÃO/FLOTAÇÃO)	BCE60
D	164.966	343,68	Grande	REATOR ANAERÓBIO + LAGOA ANAERÓBIA	BCE150
E	287.184	598,3	Grande	REATOR ANAERÓBIO + LAGOA ANAERÓBIA	BCE150
F	66.326	138,18	Médio	REATOR ANAERÓBIO + LAGOA ANAERÓBIA	BCE60

Fonte: Dados fornecidos pela companhia de saneamento.

Tabela 12 – Características dos modelos de queimadores de 60m³/h e 150m³/h utilizados na pesquisa.

Modelo	Valor de aquisição (R\$)	Biogás		Esgoto doméstico		Dimensão da câmara de combustão	
		Mín. (m ³ /h)	Máx. (m ³ /h)	Mín. (L/s)	Máx. (L/s)	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)
BCE 60	160.000	20	60	56	167	3	706
BCE 150	200.000	50	150	139	417	4	850

Fonte: Biochama (c2019).

4.2 O queimador enclausurado

Os queimadores enclausurados instalados nas ETEs avaliadas são de fabricação da empresa ©BIOCHAMA - Sistemas de Queima, localizada em Curitiba. Os queimadores enclausurados de biogás da BioChama, Figura 9, são aplicados em situações onde se queira eliminar, de forma limpa e com grande eficiência, o biogás originado da decomposição anaeróbica de massa orgânica.

Uma vez que o estudo engloba ETEs de diferentes portes, houve a necessidade de instalação de modelos distintos de queimadores, já que o dimensionamento de queimadores é realizado em função da vazão de biogás a ser queimado. A vazão de biogás pode ser estimada a partir da vazão de esgoto, usando uma taxa padrão de geração de biogás para o esgoto doméstico. Dessa forma, foram utilizados 2 modelos de queimadores com capacidade para combustão de 60m³/h e 150m³/h, sendo que seu a margem de funcionamento, bem como dimensões e valor de aquisição, podem ser observados na Tabela 12.

O material de confecção do corpo do queimador, o qual fica em contato com o biogás, é inox 316L, sendo que o material dos suportes e elementos secundários é inox 304. Há isolamento térmico da câmara de combustão, de modo a oferecer proteção e segurança ao toque externo ao queimador, sendo a ignição realizada por meio de centelha elétrica, a qual dispensa o uso de GLP. Além disso, o queimador possui base de concreto e o estaiamento calculado para suportar ventos de até 150km/h.

Os queimadores manufaturados pela BioChama foram confeccionados para operarem em temperatura nominal de trabalho de 1000°C, tempo de residência dos gases em contato com a chama superior à 0,5 segundos e operando em uma faixa típica de pressão da linha de biogás de -25 a 25mbar.

O queimador opera por meio de um painel de controle, por sinais de leitura de pressão na linha de alimentação de biogás e temperatura da câmara de queima. A operação do queimador pode ser

Figura 9 – Modelo do queimador enclausurado instalado nas ETEs participantes da pesquisa.

ajustada a partir de um painel elétrico com controlador lógico programável, sendo que neste há funções quanto ao controle de temperatura de trabalho, velocidade do motor – frequência do inversor (vazão), pressão de inicialização e desligamento, temperaturas de acionamento e desligamento, entre outros. Os itens possivelmente ajustáveis de operação, bem como as faixas e valores sugeridos pela fabricante, se encontram na Tabela 13.

Basicamente, o funcionamento do queimador consiste em monitorar a pressão da linha de biogás e temperatura da câmara de combustão. Quando a pressão da linha sobe e atinge a pressão configurada, o queimador, automaticamente, liga. A medida que o biogás vai sendo consumido pelo combustor, a pressão da linha e a temperatura vão caindo. Seu desligamento ocorre quando a pressão ou a temperatura cair abaixo da ajustada.

Na Figura 10 está detalhada a disposição básica dos queimadores enclausurados utilizados neste estudo. Os queimadores enclausurados utilizados nesse estudo são compostos por 3 partes principais:

- (i) Skid: Abrigo onde estão os principais elementos de controle do queimador: painel elétrico com controlador lógico programável, válvulas de bloqueio, compressor, entre outros.
- (ii) Corpo: Tem a função de promover a mistura do biogás com o ar e conter a chama para a correta queima.
- (iii) Estrutura de Fixação: Composta por fundação de concreto armado e base de fixação e sistema de estaiamento.

Tabela 13 – Faixa de valores sugeridos possíveis de serem ajustados nos queimadores enclausurados.

Item	Faixa / Valor	Valor sugerido
Temperatura de trabalho	850 a 1.000°C	1.000°C (1)
Vazão (velocidade do motor – frequência do inversor)	20 – 60 Hz	(2)
Pressão de inicialização	3 a 20 mbar	(2)
Temperatura de acendimento	100 a 1000°C	150°C
Tempo aguardando chama acender	10 a 180 seg.	90 s
Tempo para monitoramento da temperatura/pressão	1 a 20 seg	4 min
Temperatura de desligamento	100 a 1000°C	800°C
Pressão de desligamento	-100 a 100 mbar	(2)
Escala do transmissor de pressão	-25 a +25 mbar	(2)
Escala do transmissor de temperatura	0 a 1400°C	0 a 1400°C

(1) Valores acima deste podem danificar o queimador;
(2) Conforme processo do cliente;
Fonte: Biochama (c2019).

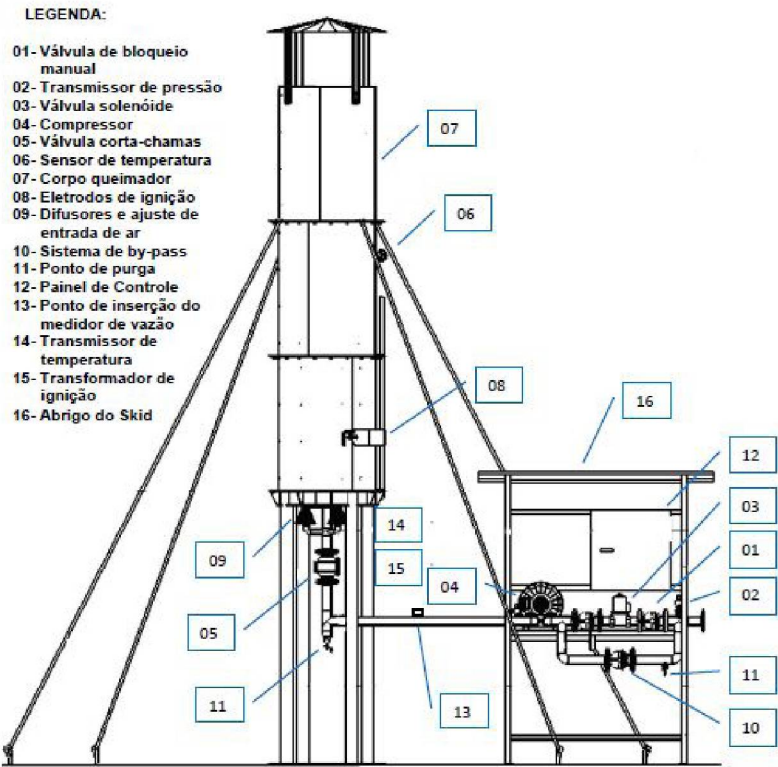


Figura 10 – Disposição básica dos queimadores enclausurados.
Fonte: Biochama (c2019).

4.3 Quantificação da eficiência do queimador

De modo a possibilitar o alcance do objetivo específico 2, foram utilizados três métodos distintos para o cálculo da eficiência de destruição do biogás, apresentados anteriormente na seção 3.3.2.3 pelas Eq. 3.13 e 3.14, além do método por meio de estimativas, proposto por Lewandowski (2000).

O método por estimativas se baseia na obtenção da eficiência do processo de queima a partir de dados de temperatura ($T_{\text{COMBUSTÃO}}$) e tempo de residência dos gases na câmara de combustão ($t_{\text{RESIDÊNCIA}}$). Dessa forma, são necessários dados referentes a vazão do gás de combustão ($\dot{V}_{\text{GÁS DE COMBUSTÃO}}$) para a determinação do tempo de residência deste na câmara de combustão. Portanto, a partir dos dados de tempo de residência, associados aos dados de temperatura, foram realizadas comparações entre os valores obtidos e padrões operacionais que garantem a eficiência do processo de combustão adotados por Lewandowski (2000). Esse método não exige o conhecimento da composição química do gás antes ou após o processo de queima.

O cálculo da eficiência de combustão proposto pela EPA, apresentado na Eq. 3.13, utiliza-se apenas de valores qualitativos dos compostos encontrados no gás de combustão, sendo elas as concentrações de CO_2 , CO e HCNQ no gás de combustão. Desse modo, este método não considera que pode haver diluição do gás anteriormente à queima, já que não são consideradas as vazões de gases. Sendo assim, os valores encontrados por meio da Eq. 3.13 podem gerar desconfiança e incerteza quando aplicados em processos de combustão de biogás em queimadores enclausurados que possuem entrada de ar atmosférico.

Logo, optou-se, também, por calcular a eficiência de destruição do CH_4 e H_2S presentes no biogás por meio da Eq. 3.14 e 3.15, respectivamente, uma vez que esta considera a vazão mássica (\dot{m}) de entrada e saída dos compostos analisados, ou seja, comparação entre a composição do biogás e gás de combustão. De modo a tornar possível o cálculo da eficiência por meio das equações descritas na seção 3.3.2.3, é necessário o conhecimento das vazões volumétricas (\dot{V}), composição dos gases, temperatura dos fluxos (T) e densidade dos compostos na CNTP (ρ_{CNTP}).

Nesse contexto, para possibilitar os cálculos das eficiências, foi necessária a caracterização do biogás, ar atmosférico e gás de combustão quanto as suas vazões mássicas, composições e temperaturas. A Figura 11 explicita de forma esquemática os fluxos de entrada de biogás e ar atmosférico além de o fluxo de saída do gás de combustão. Na imagem, os parâmetros destacados na cor vinho são aqueles que foram obtidos experimentalmente, em campo, e a obtenção daqueles não destacados estão descritas nas seções 4.3, 4.3 e 4.3 a seguir.

4.3.1 Caracterização do biogás

Como primeiro passo, foi necessária a aquisição de dados iniciais referentes à vazão volumétrica, temperatura e composição do biogás das ETEs em questão. Os dados adquiridos a partir de medições foram utilizados para a quantificação da eficiência de destruição do biogás e cálculos relacionados à estimativa de redução de emissão de GEE.

Para medição da vazão ($\dot{V}_{\text{BIOGÁS}}$) e temperatura ($T_{\text{BIOGÁS}}$) do biogás foi utilizado uma unidade de medição de vazão termal, também conhecidos como medidores de vazão por balanço térmico, (modelo FT2 da marca CONTECH ©), Figura 12, acoplado a um ponto de amostragem no duto que conduz o biogás até o queimador enclausurado. O medidor foi concedido pela empresa ©BIOCHAMA durante o período de campanhas de medição do estudo.

O medidor FT2 mede vazão normalizada de gases sem a necessidade de compensação de Temperatura e Pressão. O medidor consiste em um transmissor e sonda com dois sensores de temperatura

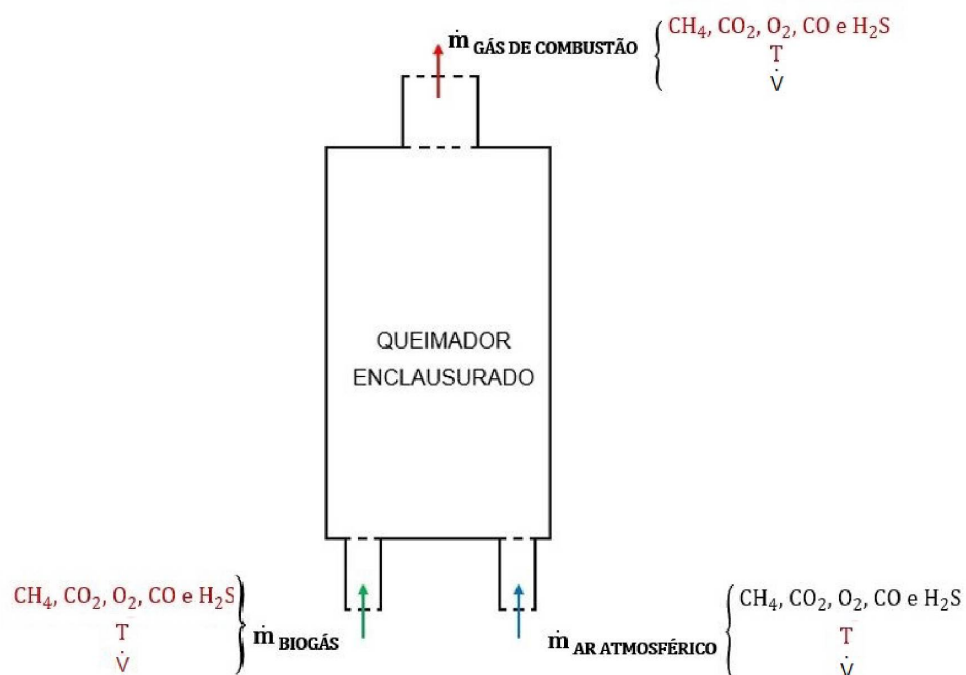


Figura 11 – Esquema do queimador enclausurado detalhando os fluxos de biogás, ar atmosférico e gás de combustão, bem como os parâmetros necessários para a obtenção das vazões mássicas de cada fluxo.

Figura 12 – Modelo FT2, equipamento para medição da vazão volumétrica e temperatura do biogás.
Fonte: [Contech](#) (c2019).

(RTDs) colocados nos pinos na parte superior da sonda. O princípio de funcionamento é baseado na medição da energia necessária para manter uma diferença de temperatura constante entre a temperatura do fluido e a temperatura de referência do dispositivo.

A precisão da leitura de vazão do medidor FT2 da CONTECH é de 1% da leitura e $\pm 0,2\%$ do fundo de escala, com repetibilidade de $\pm 0,2\%$ do fundo de escala. Para precisão da leitura é recomendado uma velocidade mínima na tubulação de $0,3\text{ m/s}$.

O medidor possui display o qual apresenta a vazão de gás resultante na constante de tempo, já que seu tempo de resposta é de apenas 0,9 segundos. Dessa forma, foram realizadas 6 leituras sequenciais, com intervalos de 2 minutos para medições, da vazão e temperatura de biogás em um ponto de amostragem antecedente ao queimador enclausurado.

Um analisador portátil de gases (modelo Multitec 545 da marca Sewerin), ilustrado na Figura 13, foi utilizado para a medição da composição do biogás. Esse equipamento foi conectado a um ponto precedente à entrada do biogás na câmara de combustão, e, simultaneamente, outro equipamento idêntico, foi conectado à saída do queimador, processo descrito na seção 4.3 de caracterização do gás de combustão. O analisador é capaz de medir os seguintes componentes: CH_4 , CO_2 , O_2 , CO e H_2S . O medidor reporta os resultados das medições simultaneamente no display do equipamento. As medições podem ser armazenadas na memória interna do equipamento e transferidas para PC via conexão USB.



Figura 13 – Multitec 545, equipamento para medição da composição do biogás com relação aos teores de CH_4 , CO_2 , O_2 , CO e H_2S .

Fonte: Sewerin (c2019).

O equipamento faz uso da tecnologia de medição infravermelha para análise dos gases CH_4 e CO_2 a fim de evitar resultados errôneos devido à interação com outros gases. Os elementos CO , O_2 e H_2S são medidos por sensor eletroquímico. Na Tabela 14 estão apresentadas, para cada elemento componente do biogás, suas faixas de medição e respectivas resoluções.

Da mesma forma como na aquisição dos dados de vazões, para a obtenção da composição do biogás foram realizadas 6 leituras. As leituras se deram de forma intervalada, a partir de um ponto de amostragem na linha de gás, de modo que a respeitar o tempo de estabilização do equipamento, recomendado por fabricante de 1 minuto. Dessa forma, foram realizadas as 6 leituras da composição do biogás, de forma que foi realizada a média de cada componente do gás, sendo que estas foram utilizadas para cálculos realizados no estudo.

Tabela 14 – Métodos e faixa de medição para cada componente medido pelo analisador Multitec 545.

Componente medido	Método de medição	Faixa de medição	Resolução
CH ₄	Infravermelho	0,0 - 100 % Vol.	0,1 % Vol. (0 - 79,9 % Vol.)
CO ₂	Infravermelho	0 - 100 % Vol.	1 % Vol. (80 - 100% Vol.)
H ₂ S	Eletroquímico	0 - 5000 ppm	1 % Vol. 1 ppm (0- 100 ppm)
O ₂	Eletroquímico	0,0 -25 % Vol.	2 ppm (100 - 998 ppm)
CO	Eletroquímico	0 - 500 ppm	200 ppm (1000 - 5000 ppm)
			0,1 % Vol. 1 ppm

Fonte: Sewerin (c2019).

A partir da caracterização do biogás, foi possível calcular a proporção mássica que cada composto representa no fluxo de biogás, sendo que estas proporções foram multiplicadas pelas densidades de cada composto na CNTP (ρ_i), resultado na densidade média do biogás nas condições normais de temperatura e pressão. A Eq. 4.1 explicita a forma com que foi realizado o cálculo, em que o "i" representa cada composto constituinte do biogás.

$$\rho_{\text{BIOGÁS}} = \sum_{n=1}^n \rho_i \%_i \quad (4.1)$$

Finalmente, as vazões volumétricas ($\dot{V}_{\text{BIOGÁS}}$) e a densidade do biogás ($\rho_{\text{BIOGÁS}}$) foram corrigidas, conforme descrito na Eq. 3.11, para as condições de temperatura e pressão do local de estudo para a obtenção da vazão mássica de biogás ($\dot{m}_{\text{BIOGÁS}}$) que adentra no sistema de combustão, conforme Eq. 4.2.

$$\dot{m}_{\text{BIOGÁS}} = \dot{V}_{\text{BIOGÁS}} \rho_{\text{BIOGÁS}} \quad (4.2)$$

4.3.2 Caracterização do ar atmosférico

Com relação ao ar atmosférico responsável pelo aporte de O₂ para a combustão, foi utilizada a composição base do ar atmosférico para os cálculos. A aferição da temperatura do ar se deu com a verificação da temperatura indicada nos termômetros já instalados nas ETEs.

Uma vez que a entrada de ar no queimador ocorre de modo passivo, foi necessária a realização de uma estimativa da vazão de ar atmosférico que participa do processo de queima. Adotou-se a hipótese de que ao acionar o compressor do queimador, de modo que fosse permitida a passagem de biogás pelo queimador (sem que houvesse a queima) fosse possível quantificar o volume de ar atmosférico que adentra na câmara de combustão a partir da medição da composição do biogás diluído mediante o uso do analisador portátil Multitec 545, ilustrado na Figura 13.

Então, em posse da composição do biogás diluído, foi estimada a sua densidade na CTPN ($\rho_{\text{BIOGÁS DILUÍDO}}$), por meio da Eq. 4.1, de forma análoga ao cálculo da densidade do biogás. Neste cenário, a partir do conhecimento da vazão volumétrica de biogás ($\dot{V}_{\text{BIOGÁS}}$), densidade do biogás ($\rho_{\text{BIOGÁS}}$), densidade do biogás diluído ($\rho_{\text{BIOGÁS DILUÍDO}}$) e a densidade padrão do ar atmosférico ($\rho_{\text{AR ATMOSFÉRICO}}$), estes na CNTP, foi adotada a lei de conservação de massas de modo a possibilitar o cálculo da vazão volumétrica de ar atmosférico ($\dot{V}_{\text{AR ATMOSFÉRICO}}$) que participa do processo de combustão, conforme descrito na Eq. 4.3.

$$\dot{m}_{\text{BIOGÁS}} + \dot{m}_{\text{AR ATM}} = \dot{m}_{\text{BIOGÁS DILUÍDO}}$$

$$\dot{V}_{\text{BIOGÁS}}\rho_{\text{BIOGÁS}} + \dot{V}_{\text{AR ATM}}\rho_{\text{AR ATM}} = (\dot{V}_{\text{BIOGÁS}} + \dot{V}_{\text{AR ATM}})\rho_{\text{BIOGÁS DILUÍDO}}$$

$$\dot{V}_{\text{AR ATM}} = \dot{V}_{\text{BIOGÁS}} \left(\frac{\rho_{\text{BIOGÁS}} - \rho_{\text{BIOGÁS DILUÍDO}}}{\rho_{\text{BIOGÁS DILUÍDO}} - \rho_{\text{AR ATM}}} \right). \quad (4.3)$$

Em posse destes dados foi obtida a vazão mássica de ar atmosférico ($\dot{m}_{\text{AR ATMOSFÉRICO}}$), por meio do produto da vazão volumétrica (\dot{V}) pela massa específica do fluxo gasoso (ρ), conforme exposto na Eq. 3.10, sendo esta corrigida para as condições de pressão absoluta do local e a temperatura absoluta do fluxo conforme registrado na Eq. 3.11.

Por fim, o resultado da estimação da vazão mássica de ar atmosférico possibilitou o cálculo da relação ar/biogás real ($A/F_{(R)}$) conforme descrito na Eq. 3.12, a qual indica a proporção de ar disponível para o processo de combustão no processo. Ainda, com finalidade de comparação, foi calculada a relação ar/biogás estequiométrica ($A/F_{(S)}$), descrita na seção 3.3.2.2, possibilitando o cálculo do fator Lambda (λ), enunciado na Eq. 3.8.

4.3.3 Caracterização do gás de combustão

Em posse dos resultados das caracterizações do biogás e do ar atmosférico, desenvolveu-se a etapa da análise quali-quantitativa dos gases resultantes do processo de combustão do biogás.

A vazão mássica do gás de combustão ($\dot{m}_{\text{GÁS DE COMBUSTÃO}}$) pôde ser calculada por meio da soma das vazões mássicas de biogás ($\dot{m}_{\text{BIOGÁS}}$) e ar atmosférico ($\dot{m}_{\text{AR ATMOSFÉRICO}}$).

De forma a ser possível a amostragem dos gases de combustão, foi necessária a utilização de uma sonda de coleta e um resfriador e removedor de umidade de fluxos gasosos, os quais serão descritos a seguir, ilustrados nas Figuras 14 e 15. O conjunto desses equipamentos correspondeu a um valor de aquisição de R\$ 15.000,00 para a companhia.

Para realizar a captura dos gases de combustão foi utilizada uma sonda para a amostragem de gases. O ponto de amostragem foi escolhido sendo a saída do queimador, de modo que a sonda própria para amostragem de gases de combustão pudesse ser inserida. A sonda está ilustrada na Figura 14. A sonda foi posicionada na saída da chaminé do queimador enclausurado, logo após a câmara de combustão, de modo que os gases amostrados se referem ao gás resultante do processo de queima do biogás.

A sonda possui aproximadamente 3 metros de extensão, confeccionada em inox e manufaturada de acordo com as necessidades deste estudo pela empresa Sewerin. A sonda possui uma curvatura em sua ponta, para viabilizar o encaixe na chaminé do queimador. Além disso, a sonda possui abertura para conexão de demais equipamentos, como o resfriador e removedor de umidade de fluxos gasosos.

Após a captura dos gases pela sonda de amostragem, o fluxo gasoso era direcionado para um equipamento que promove o resfriado e remoção de vapor d'água, Figura 15. Dessa forma, o equipamento promove a redução da umidade presente no gás de combustão para que esse seja analisado em base seca. Este equipamento é imprescindível para a não danificação do equipamento do analisador portátil Multitec 545 da marca Sewerin, já que o medidor atende uma temperatura de serviço de até 40°C e altos teores de umidade podem reduzir a vida útil do equipamento.

O resfriador é confeccionado em metal inox e possui 20 serpentinas de resfriamento. Ao final das serpentinas há um condensador de gases para reter a umidade e salvaguardar as condições operacionais do analisador de composição de gases.

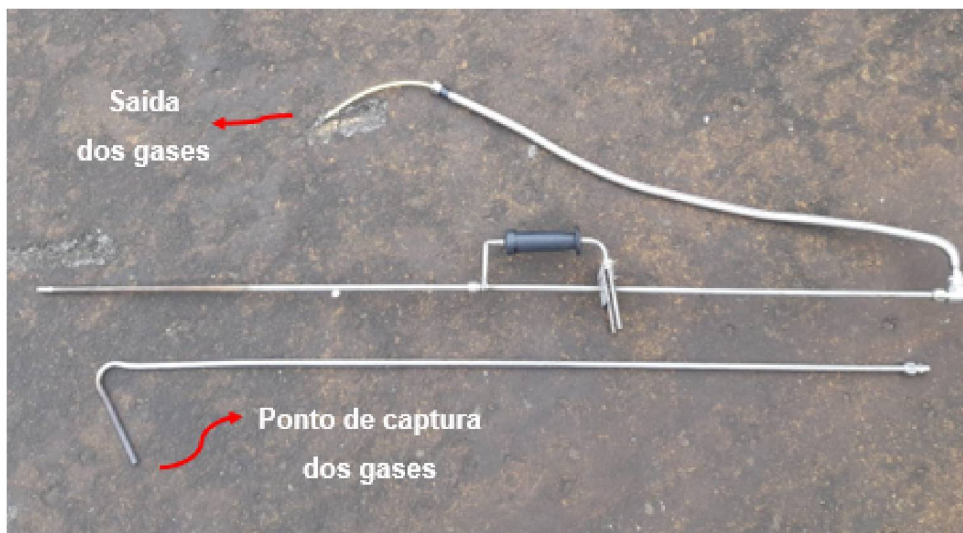


Figura 14 – Sonda de amostragem dos gases de combustão.

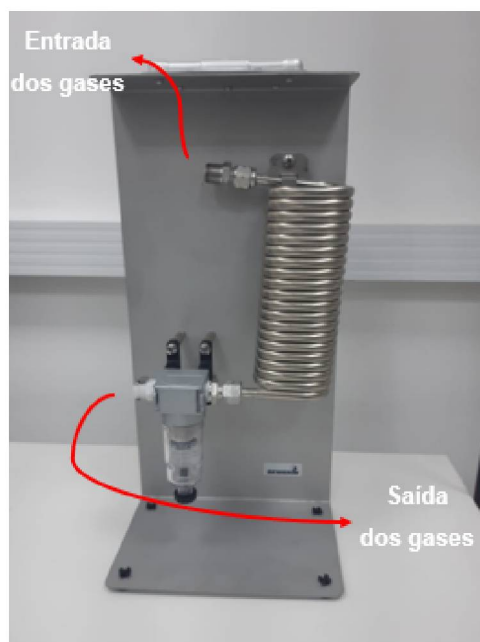


Figura 15 – Resfriador e desumidificador de gases.

Para a quantificação da composição do gás resultante do processo de queima foi utilizado, igualmente, o equipamento apresentado na Figura 13 e descrito na Tabela 14, uma vez empregado para a medição da composição do biogás anterior à queima.

Assim como na quantificação da composição do biogás, para a quantificação do gás de combustão foram realizadas 6 leituras, sendo as amostras coletadas a partir da saída da chaminé do queimador enclausurado. As leituras se deram de forma intervalada de modo a respeitar o tempo de estabilização do equipamento, recomendado por fabricante de 1 minuto, e, na sequência, o analisador era desconectado de forma que este atingisse o ponto zero, equivalente à composição do ar fresco. Dessa forma, foram realizadas as 6 leituras da composição do gás de combustão, de forma que foi realizada a média de cada componente do gás final. As medições do gás de combustão e biogás se deram de forma simultânea, uma vez que estavam disponíveis 2 equipamentos de leitura de gás.

Para o monitoramento da temperatura da queima foi instalado na câmara de combustão do

queimador enclausurado um termopar, sensor de temperatura simples, que faz o monitoramento da temperatura do gás resultante de combustão no interior da câmara. Na Figura 16 está ilustrado o interior de um queimador enclausurado com monitoramento da temperatura por sensores termopares.

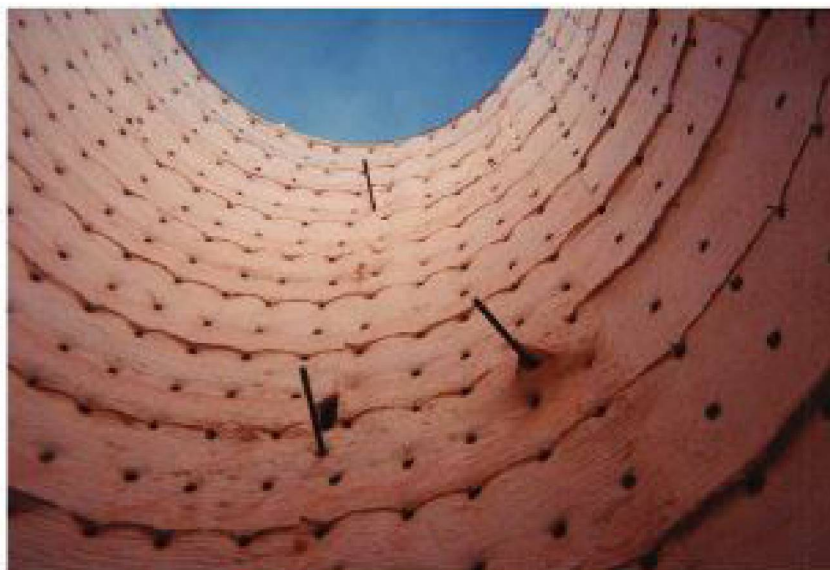


Figura 16 – Ilustração do interior de um queimador enclausurado com sensores termopares.
Fonte: [Baukal \(2013\)](#).

Os dados de temperatura adquiridos nessa seção foram utilizados para a realização dos cálculos de estimativa da eficiência de destruição do biogás, apresentados na seção 4.3.

O termopar foi conectado a um transmissor de temperatura, o qual, ligado ao painel de controle do queimador, registrou a temperatura da câmara de combustão. A coleta dos dados foi feita manualmente via observação dos dados registrados no display do painel do queimador e estes foram obtidos simultaneamente ao registro de vazão e composição final dos gases de combustão. Seus resultados foram grafados em arquivos de planilha, sendo que foram realizados 6 registros de temperatura a cada experimentação.

Logo, fundamentado na composição do gás resultante do processo de combustão, foi realizado o cálculo da densidade do gás de combustão ($\rho_{\text{GÁS DE COMBUSTÃO}}$) por meio da Eq. 4.1, sendo a resultante corrigida para as condições de pressão absoluta do local e a temperatura de combustão do fluxo gasoso, conforme registrado na Eq. 3.11.

Finalmente, foi possível quantificar a vazão volumétrica do gás de combustão ($\dot{V}_{\text{GÁS DE COMBUSTÃO}}$) a partir da divisão da vazão mássica pela densidade do gás de combustão.

A Figura 17 elucida de forma demonstrativa os locais de coletas, amostragens e a disposição de cada equipamento utilizado ao longo da etapa metodológica.

4.3.4 Cálculo da eficiência

Para o cálculo da eficiência, baseada na Eq. 3.13 proposta pela EPA, por [McDaniel and Tichenor \(1983\)](#), foram utilizados os resultados obtidos na etapa de caracterização da composição do biogás descrito na seção 4.3.

Já a determinação da eficiência por meio da análise qualitativa do gás de combustão foi baseada na comparação entre a concentração de CH_4 e H_2S antes e após a queima do biogás. Para tal, foram utilizadas as Eq. 3.14 e 3.15, em que as vazões mássicas de metano (\dot{m}_{CH_4}) e sulfeto de hidrogênio ($\dot{m}_{\text{H}_2\text{S}}$)

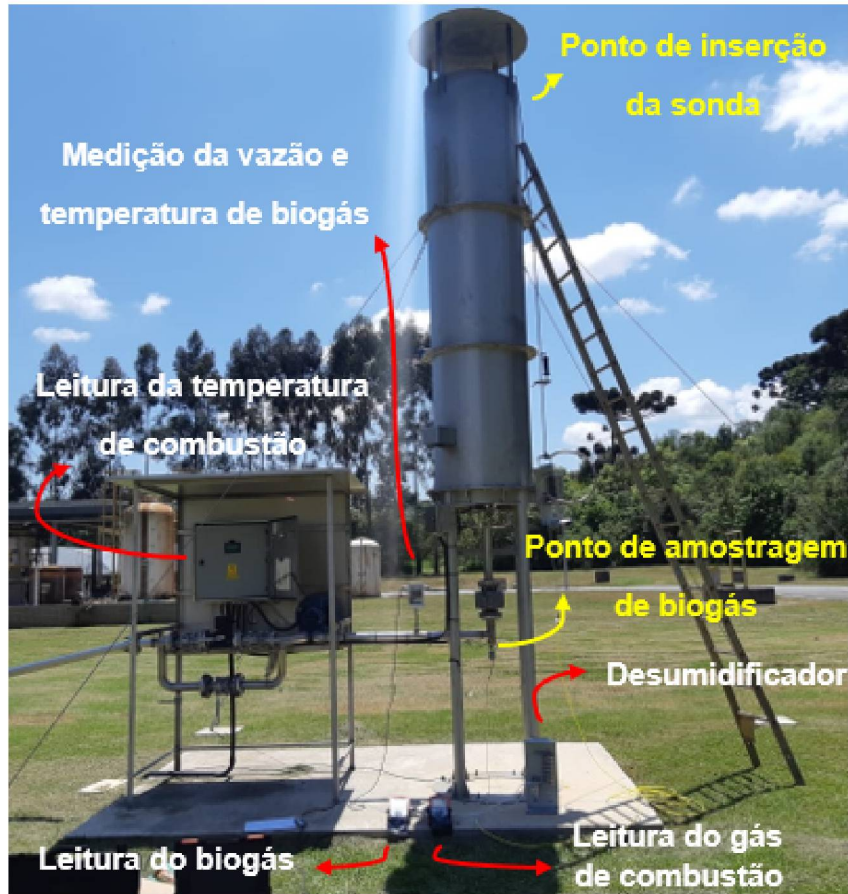


Figura 17 – Disposição dos equipamentos e locais de amostragem ilustradas no queimador enclausurado.

presentes em cada gás foram obtidas por meio do produto da vazão mássica total dos fluxos, dado em kg/h, e a proporção mássica de metano e sulfeto de hidrogênio presentes nos fluxos de biogás, gás de combustão e ar atmosférico.

Por fim, o método por estimativas, baseado no que propõe [Lewandowski \(2000\)](#), foi calculado a partir dos dados de temperatura ($T_{\text{COMBUSTÃO}}$) e tempo de residência dos gases na câmara de combustão ($t_{\text{RESIDÊNCIA}}$). Dessa forma, foram utilizados dados referentes a vazão do gás de combustão ($\dot{V}_{\text{GÁS DE COMBUSTÃO}}$) para a determinação do tempo de residência deste na câmara de combustão.

O tempo de residência dos gases deve ser calculado com base no tempo de contato entre a chama e o gás durante o processo de combustão. Para este cálculo foi considerado o volume total da câmara do queimador enclausurado ($V_{\text{CÂMARA}}$) dividido pela vazão do gás de combustão ($\dot{V}_{\text{GÁS DE COMBUSTÃO}}$), descrita na Eq.4.4.

$$t_{\text{RESIDÊNCIA}} = \frac{V_{\text{CÂMARA}}}{\dot{V}_{\text{GÁS DE COMBUSTÃO}}} \quad (4.4)$$

Portanto, a partir dos dados de tempo de residência, associados aos dados de temperatura, foram realizadas comparações entre os valores obtidos e padrões operacionais que garantem a eficiência

do processo de combustão adotados por [Lewandowski \(2000\)](#).

4.4 Estimativa das emissões evitadas de GEE a partir do uso de queimadores enclausurados

De modo a possibilitar o alcance do objetivo específico 3, o qual se resume em analisar o potencial de queimadores enclausurados na mitigação das emissões de GEE, as emissões de metano proveniente do tratamento de esgoto em ETEs, utilizou-se a metodologia adaptada do [IPCC \(2006\)](#), apresentada na seção 3.4, calculada por meio da Eq. 3.16.

Em posse dos resultados médios referentes à vazão, composição de biogás e eficiência de queimadores enclausurados foi possível realizar o cálculo das emissões evitadas pela utilização de queimadores enclausurados para combustão de biogás. De modo a agregar ao estudo, a partir dos dados obtidos pela experimentação, foram calculados dois índices de avaliação, sendo eles o de custo social e custo ambiental da utilização de queimadores enclausurados nas ETEs.

Segundo estudo de [Ricke et al. \(2018\)](#), publicado na revista Nature, o custo social do carbono no Brasil é, em média, de US\$24 por tCO₂, com um intervalo de variação de 14 à 41 dólares por tonelada de CO₂ emitido. Dessa forma, o custo da emissão de carbono foi multiplicado pelas emissões evitadas de GEE de tal forma que foi obtido, ao final, um índice de custo social da utilização dos queimadores. A partir deste índice, foi possível, ainda, calcular um índice do custo ambiental da utilização dos mesmos queimadores instalados nas ETEs estudadas. O custo ambiental foi calculado por meio divisão do valor de aquisição do queimador enclausurado por habitante, sendo este resultado, dividido pelo índice social.

5 Resultados e discussões

5.1 Caracterização do biogás

Observou-se, de modo geral, as amostras de biogás avaliadas em cada uma das ETEs estudadas apresentaram teores médios de CH_4 , CO_2 , H_2S , O_2 e CO semelhantes à composição típica de biogases provenientes do tratamento de esgoto doméstico em reatores anaeróbios constatados por [Noyola, Morgan-Sagastume and Lopez-Hernandez \(2006\)](#) em seus experimentos, estes expostos anteriormente na Tabela 2. O teor de N_2 presente no biogás foi calculado mediante a diferença da soma dos teores dos demais componentes para 100%.

A Tabela 15 apresenta de forma discriminada a média dos teores dos componentes do biogás das ETEs avaliadas bem como a vazão média de produção de biogás em cada estação.

É possível notar que todas as análises de biogás avaliadas apresentaram alto teor de metano, exceto pela ETE D, porém, estes encontram-se dentro da faixa preconizada por [Noyola, Morgan-Sagastume and Lopez-Hernandez \(2006\)](#). Os teores de dióxido de carbono de todos os biogases mensurados apresentaram valores levemente abaixo da concentração típica. Já a concentração de sulfeto de hidrogênio constatada nas ETEs B e C apresentou-se acima de 2000ppm, valor de referência para biogases oriundos de reatores UASB, fator de pode potencializar o mau odor no entorno destas estações. Os valores de oxigênio encontrados nos biogases de todas as ETEs podem ser considerados valores traços, a não ser pelo biogás da ETE D. Além disso, os valores encontrados de monóxido de carbono de todas as ETEs são compatíveis aos valores sugeridos para o tipo de biogás estudado neste documento [Noyola, Morgan-Sagastume and Lopez-Hernandez \(2006\)](#). Por fim, os teores de N_2 encontrado para cada ETE permaneceram dentro do padrão sugerido para biogás de ETEs anaeróbias, o que ratifica o correto funcionamento do método utilizado para a experimentação.

A composição do biogás não é igual em todas as ETEs devido ao fato da composição do esgoto

Tabela 15 – Caracterização do biogás nas ETEs avaliadas referentes à composição e vazão média do gás.

Parâmetros		ETE		
		A	B	C
CH_4	(%vol.)	86,67 \pm 0,47	85,00 \pm 0,00	86,00 \pm 1,00
CO_2	(%vol.)	02,83 \pm 0,37	03,00 \pm 0,00	04,83 \pm 0,90
H_2S	(ppm)	1500,00 \pm 141,42	2483,33 \pm 89,75	2816,67 \pm 89,75
O_2	(%vol.)	00,48 \pm 0,09	00,73 \pm 0,05	00,35 \pm 0,16
CO	(ppm)	17,33 \pm 0,47	52,83 \pm 1,95	18,17 \pm 3,24
* N_2	(%vol.)	10,01	11,26	8,81
Vazão volumétrica	(Nm^3/h)	49,25 \pm 0,57	31,89 \pm 0,41	23,12 \pm 1,62
Vazão mássica	(kg/h)	33,42	21,82	16,88
Temperatura	($^{\circ}\text{C}$)	40,00	41,63	36,23
		D	E	F
CH_4	(%vol.)	69,42 \pm 5,07	85,17 \pm 0,37	85,17 \pm 0,37
CO_2	(%vol.)	04,33 \pm 0,94	04,83 \pm 0,37	02,00 \pm 0,00
H_2S	(ppm)	1766,67 \pm 398,61	1716,67 \pm 106,72	1100,00 \pm 57,74
O_2	(%vol.)	02,95 \pm 1,17	00,02 \pm 0,04	00,12 \pm 0,04
CO	(ppm)	10,00 \pm 1,53	18,50 \pm 1,50	39,83 \pm 4,22
* N_2	(%vol.)	23,30	9,98	12,71
Vazão volumétrica	(Nm^3/h)	85,41 \pm 0,37	64,35 \pm 0,95	48,91 \pm 0,67
Vazão mássica	(kg/h)	69,12	49,06	36,49
Temperatura	($^{\circ}\text{C}$)	35,70	30,27	24,15

* N_2 calculado por meio do complementar para 100%.

Tabela 16 – Resultados referentes à caracterização do gás de combustão nas ETEs A, B, C, D, E e F avaliadas.

Parâmetros	ETE		
	A	B	C
CH ₄ (%vol.)	0,10 ± 0,00	0,47 ± 0,17	0,03 ± 0,05
CO ₂ (%vol.)	2,17 ± 0,37	1,00 ± 0,00	3,17 ± 0,37
H ₂ S (ppm)	46,00 ± 12,81	29,33 ± 5,79	4,33 ± 4,03
O ₂ (%vol.)	14,32 ± 0,25	17,17 ± 0,29	14,08 ± 0,45
CO (ppm)	25,17 ± 4,56	269,67 ± 105,04	40,83 ± 10,11
*N ₂ (%vol.)	83,41	81,34	82,71
Parâmetros	D	E	F
CH ₄ (%vol.)	0,02 ± 0,03	0,02 ± 0,04	0,13 ± 0,12
CO ₂ (%vol.)	7,17 ± 0,69	4,00 ± 0,00	2,50 ± 0,12
H ₂ S (ppm)	21,83 ± 29,28	60,50 ± 7,54	51,83 ± 4,06
O ₂ (%vol.)	7,20 ± 0,81	13,22 ± 0,31	14,62 ± 0,00
CO (ppm)	22,33 ± 3,90	28,00 ± 13,96	500,00 ± 0,00
*N ₂ (%vol.)	85,61	82,76	82,70

*N₂ calculado por meio do complementar para 100%.

bruto de cada estação ser variável e possuir características distintas. Além disso, a composição do biogás está diretamente relacionada às atividades das bactérias anaeróbias, sendo que a alteração de algum fator pode influenciar na digestão anaeróbia, favorecendo a formação de algum elemento sobre outro.

Quando comparadas as vazões de biogás a sofrerem combustão e os modelos de queimadores enclausurados instalados em cada estação, discriminados e apresentados na Tabela 11 e 12, é possível afirmar que o modelo de queimador utilizado na ETE B está superdimensionado, uma vez que a vazão de biogás da ETE é inferior à faixa de operação do queimador modelo BCE150. Ademais, é interessante observar que a vazão de biogás a sofrer combustão na ETE A encontra-se no limite inferior recomendado pelo modelo adotado em tal estação.

Ainda, é importante ressaltar que os queimadores podem ficar subdimensionados, uma vez que há projeções de crescimento populacional das áreas atendidas pelas estações de tratamento de esgoto, ocasionando um consequente aumento na vazão de esgoto e produção de biogás. Logo, deve-se haver uma margem de segurança a qual prevê-se o aumento na produção de biogás, uma vez que queimadores possuem longa vida útil, se bem gerenciados. O mau dimensionamento de queimadores pode afetar diretamente a eficiência de combustão dos compostos do biogás, ocasionando problemas de emissão de GEE e mau odor.

5.2 Quantificação da eficiência do queimador

Neste subcapítulo são apresentados os resultados referentes às medições nas ETEs selecionadas para a pesquisa. Primeiramente serão apresentados resultados quanto à caracterização do gás derivado do processo de combustão, como sua composição, vazão e temperatura ao qual foi submetido na câmara de combustão, e, na sequência, serão descritos os resultados referentes à eficiência de destruição de CH₄ e H₂S nos queimadores enclausurados instalados em cada ETE.

5.2.1 Caracterização dos gases de combustão

Como resultados, estão apresentados na Tabela 16, os teores médios dos compostos CH₄, CO₂, O₂, H₂S e CO do gás resultante do processo de combustão do biogás nos queimadores enclausurados. O teor de N₂ presente no biogás foi calculado mediante a diferença da soma dos teores dos demais componentes para 100%.

Tabela 17 – Condições referentes ao processo de combustão de biogás nas ETEs A, B, C, D, E e F avaliadas.

Parâmetros		ETE					
		A	B	C	D	E	F
Relação Ar/Biogás estequiométrica	(kg/kg)	13,12	12,69	12,76	9,11	12,59	12,89
Relação Ar/Biogás real	(kg/kg)	20,47	18,69	14,67	10,07	16,00	19,09
Lambda (λ)		1,56	1,47	1,15	1,11	1,27	1,48
Vazão volumétrica	(m ³ /h)	2332,37	1004,08	891,38	2822,73	2836,61	2340,55
Vazão mássica	(kg/h)	717,75	429,64	264,57	765,09	833,84	732,94
Tempo de residência	(s)	2,05	4,76	5,36	1,69	1,68	2,04
Temperatura	Média (°C)	882,67	553,00	934,67	1078,33	953,00	866,17
	Máxima (°C)	906,00	585,00	957,00	1148,00	994,00	874,00
	Mínima (°C)	831,00	514,00	870,00	963,00	850,00	852,00

Observou-se que os gases de combustão das ETEs avaliadas apresentaram concentrações distintas entre si, porém com um padrão de concentração final similar quando comparados aos biogases de mesma origem. A máxima concentração de CH₄ encontrada nos gases de combustão amostrados foi o gás correspondente à ETE B, sendo de $(0,47 \pm 0,17)\%$, os demais gases de combustão apresentaram concentrações inferiores de metano, próximos à 0,10%. Com relação ao H₂ a máxima concentração encontrada correspondeu à ETE E, sendo de $(60,50 \pm 7,54)ppm$.

A presença de O₂ no gás resultante de um processo de combustão pode indicar que houve excesso de oxigênio durante a queima, sendo sugerido que haja um excesso de oxigênio para garantir a oxidação completa dos compostos componentes do gás. As estações que apresentaram a maior e menor concentração de O₂ em excesso foram as ETEs B e D, sendo de $(17,17 \pm 0,29)\%$ e $(7,20 \pm 0,81)\%$, respectivamente.

A presença do composto N₂ em todas as ETEs foi superior a 81%, sendo esta elevada uma vez nesta porcentagem é englobada o nitrogênio presente no ar atmosférico participante do processo de combustão e o nitrogênio presente inicialmente no biogás, uma vez que este não sofre oxidação.

Ademais, percebe-se que as concentrações de metano reduziram drasticamente quando comparadas ao metano presente nos biogases anteriores à queima. Tanto as concentrações de CO₂ e CO tiveram um aumento expressivo em algumas das ETEs, sendo que isso pode indicar que está ocorrendo a conversão de metano em componentes menos nocivos. Possivelmente, a formação de CO se deu devido ao fornecimento de ar atmosférico inferior ao necessário para uma combustão completamente eficiente.

É importante salientar que o amostrador utilizado na análise do gás de combustão possui faixa máxima de medição de 500 ppm de monóxido de carbono. A média das 6 amostragens do gás de combustão da ETE F resultaram no valor de 500,00 ppm, sendo que, possivelmente, o valor de CO presente no gás de combustão seja ainda superior ao valor quantificado pelo amostrador.

As condições nas quais ocorreram os processos de combustão de biogás das ETEs avaliadas são apresentados na Tabela 17, são eles a estimativa de proporção de ar/biogás dentro da câmara de combustão, vazão total do gás de combustão e as temperaturas de queima.

A relação Ar/Biogás estequiométrica calculada para cada uma das ETEs reportou que são necessários minimamente, exceto pela ETE D, 12 vezes mais massa de ar do que de biogás na mistura da câmara de combustão. No entanto, todas as proporções mássicas reais encontradas de Ar/Biogás se apresentaram acima da proporção estequiométrica recomendada para cada ETE avaliadas. Dessa forma, observa-se que em todas as estações o fator Lambda encontrado foi superior à 1, indicando que há um excesso de ar durante o processo de combustão.

Em posse dos resultados da estimativa da vazão dos gases de combustão, aumentada drástica-

mente quando comparada à vazão inicial de biogás devido à adição do ar atmosférico e ao processo de combustão do biogás dentro da câmara de combustão, foi possível realizar a estimativa do tempo de residência, conforme equacionado pela Eq. 4.4, em que os gases permanecem dentro da câmara em contato com a chama.

Em todas as estações avaliadas o biogás apresentou um tempo de residência de, minimamente, 1,68 segundos dentro da câmara de combustão. Lewandowski (2000) recomenda que os gases devem ter tempo de residência entre 0,5 a 2,0 segundos, dessa forma, os tempos de residência calculados foram superiores ao mínimo recomendado, no entanto, em algumas estações superou o máximo indicado pelo autor.

Verificou-se que, com excessão à ETE B, as temperaturas médias dos processos de combustão de biogás nos queimadores enclausurados no período analisado foram de, minimamente, 882,67°C, valor superior aos 850 °C indicados como padrão operacional em normas mencionadas por Caine (2000). De modo geral, inclusive os valores mínimos e máximos de temperatura permanecem dentro da faixa operacional recomendada de 850 à 1200 °C.

Até mesmo as temperaturas mínimas observadas se apresentaram acima das temperaturas de autoignição tanto do metano quanto do sulfeto de hidrogênio, de 540 e 260°C, respectivamente, exceto à ETE B. Os valores de temperatura encontrados na ETE B estão abaixo do recomendado pelos padrões de combustão de biogás expostos por Caine (2000), sendo que a temperatura mínima se encontra abaixo, inclusive, da temperatura de autoignição do metano. Fato este que pode comprometer a qualidade da eficiência de conversão de metano em dióxido de carbono.

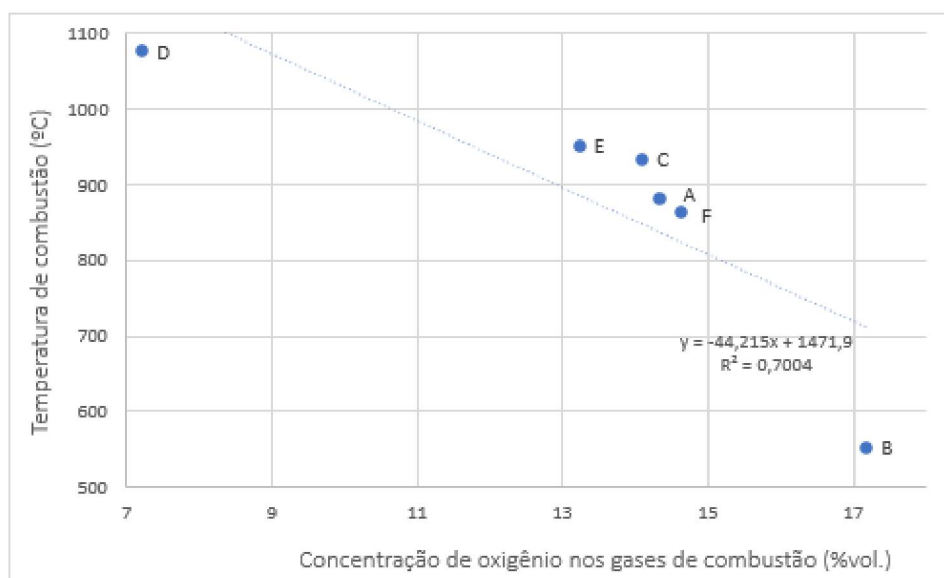


Figura 18 – Gráfico de relação entre o oxigênio presente na composição final do gás de combustão e a temperatura de queima.

Em uma relação entre o O₂ em excesso presente no gás de combustão e a temperatura de queima é possível verificar que a maior presença de oxigênio no gás final correspondeu à menor temperatura de combustão, fato observado na ETE B. O oposto ocorre na observação dos resultados referentes à ETE D, a qual apresentou a menor concentração de oxigênio em excesso e a maior média de temperatura de combustão. Este comportamento pode ser observado por meio da Figura 18.

Tabela 18 – Eficiências de destruição de CH₄ e H₂S utilizando cálculos pelos métodos balanço de massa, EPA e estimativa nas ETEs A, B, C, D, E e F avaliadas.

Composto	Método		ETE					
			A	B	C	D	E	F
H ₂ S	Balanço de massa	(%)	58,74	85,44	98,46	90,47	61,83	40,73
	Balanço de massa	(%)	98,45	93,06	99,61	99,81	99,79	98,17
CH ₄	EPA	(%)	95,48	66,95	98,83	99,74	99,52	93,17
	Estimativa	(%)	99,90	<95,00	99,99	99,90	99,90	99,90

5.2.2 Eficiência de destruição de CH₄ e H₂S

Finalmente, em posse dos resultados das etapas anteriores, nessa seção serão apresentados os resultados referentes à eficiência do queimador enclausurado quanto a destruição de metano e sulfeto de hidrogênio componentes do biogás das ETEs avaliadas. Os resultados podem ser observados na Tabela 18.

Os queimadores enclausurados instalados nas ETEs A, B, C, D, E e F apresentaram resultados referentes à destruição média de H₂S entre 40,73% e 98,46% calculados pelo método de balanço de massa, baseados na Eq. 3.15, apresentada anteriormente.

As eficiências de destruição de CH₄ encontradas para cada ETE, baseada no que é proposto pela Eq. 3.14 de balanço de massa, foram bastante elevadas, sendo que estes variaram de 99,81% a 93,06%.

Já a eficiência obtida por meio da Eq. 3.13 proposta pela EPA, a qual se baseia apenas na concentração dos compostos do gás de combustão, apresentou resultados para a destruição de metano para as ETEs de 66,95% a 99,74%. Resultados semelhantes aos encontrados pelo balanço de massa.

As estimativas, realizadas com base no que é proposto por Lewandowski (2000), resultaram em valores, para as ETEs A, D, E e F de 99,90%, enquanto para a ETE C foi de 99,99% e ETE B foi inferior à 95,00%.

5.3 Fatores que influenciam na eficiência dos queimadores

Após a análise dos dados obtidos em campo, somados às eficiências calculadas para os queimadores enclausurados de cada ETE, foi possível observar que alguns fatores podem ter influência positiva ou negativa na destruição do CH₄ e H₂S dos biogases das estações avaliadas.

Foram relacionados a temperatura de combustão, tempo de residência e excesso de O₂ à eficiência de destruição do CH₄. Estas relações podem ser observadas na Figura 19 na forma de 3 gráficos.

Segundo Caine (2000), a qualidade de um processo de combustão de biogás é dependente de 3 fatores, sendo eles, temperatura de combustão, tempo de residência e presença de oxigênio durante o processo. Pode-se notar que houve uma relação grande entre a temperatura e a eficiência de combustão do metano, uma vez que os processos que obtiveram maior temperatura, resultaram em uma maior eficiência.

Com relação ao tempo de residência, todas as ETEs apresentaram um tempo de residência superior à 1,68 segundos, acima do recomendado de 1 segundo. Dessa forma, não é possível observar grande influência da medida do tempo de residência e eficiência de destruição.

Já o excesso de oxigênio, resultado final do gás de combustão, parece não ser favorável à eficiência de destruição do metano, sendo que as ETEs que apresentaram maior índice de O₂ final obtiveram as menores eficiências de combustão. Cabe destacar que foi observado que há uma relação entre o excesso de oxigênio e temperatura de combustão, como visto na Figura 18, uma vez que o excesso do gás oxigênio pode causar o resfriamento da chama, fator este que, por observação, está intrinsecamente relacionado à

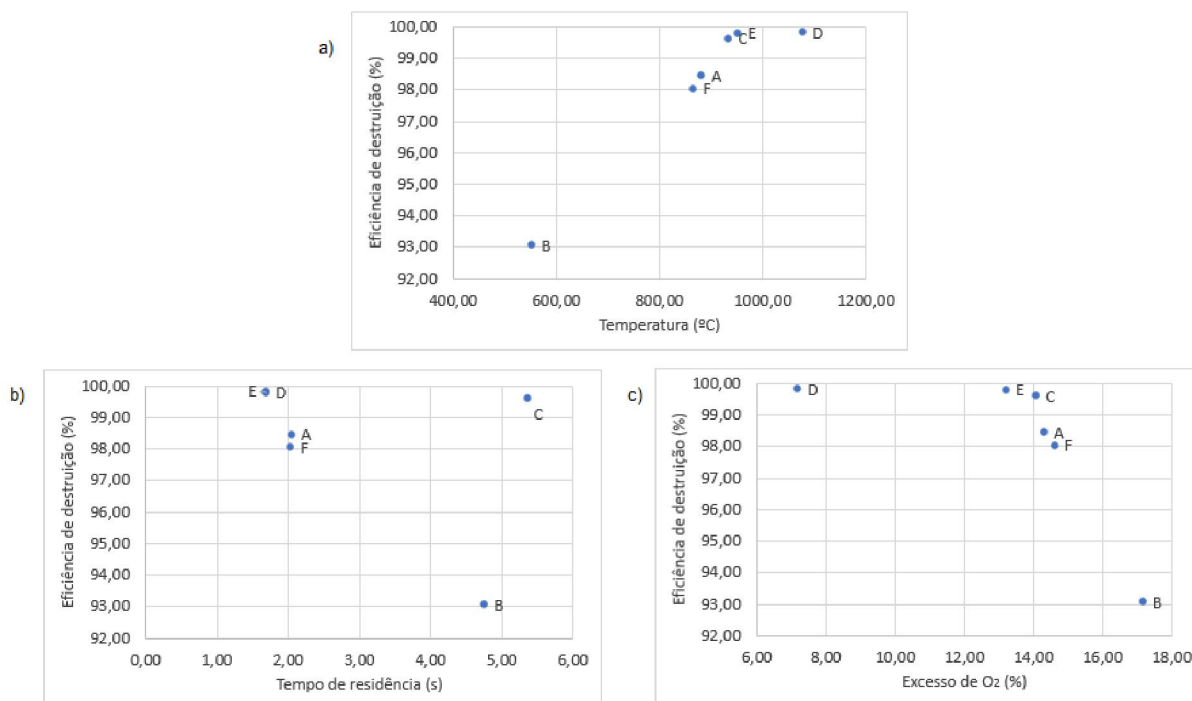


Figura 19 – Relações entre a eficiência de destruição do CH_4 e a) temperatura de combustão; b) tempo de residência dos gases na câmara de combustão e c) excesso de oxigênio na reação de combustão.

eficiência de combustão. Logo, um excesso de O_2 pode causar, por conseguinte, a diminuição da eficiência de destruição de metano.

As eficiências de destruição calculadas para o composto H_2S não pareceram se comportar de forma proporcional há nenhum dos 3 fatores listados por Caine (2000), fato o qual pode ser observado na Figura 20.

5.3.1 Relação da eficiência com o porte das ETEs

Foi traçado um gráfico, o qual pode ser observado na Figura 21, de eficiências de destruição de CH_4 e H_2S e as populações atendidas por cada ETE avaliada nesse estudo.

É possível observar que não há uma relação direta entre as eficiências de destruição e populações atendidas, com isso, é interessante observar a Tabela 19, a qual discrimina os queimadores enclausurados utilizados em cada estação e suas vazões de biogás. Cabe ressaltar que as faixas de operação dos modelos BCE60 e BCE150 são, respectivamente, 20 a 60 Nm^3/h e 50 a 150 Nm^3/h .

É possível observar que o queimador instalado na ETE B está verdadeiramente superdimensionado. Os queimadores das ETEs A e C estão muito próximos do valor inferior de operação do queimador, enquanto o queimador instalado na ETE F corre o risco de ficar subdimensionado em pouco tempo, com o crescimento populacional ou melhorias nas estruturas da ETE, a qual geraria um aumento na vazão de biogás captado. Apenas as ETEs E e D estão com vazões de operação dentro da faixa adequada para os queimadores instalados.

Desse modo, por meio da análise da Figura 21 e Tabela 19, é possível notar que, a ETE que apresentou pior eficiência de destruição de CH_4 foi a ETE B, ETE na qual o queimador está superdimensionado para a vazão da estação em questão. É interessante observar também, que na ETE A, em que a vazão de biogás está no limite de operação do queimador, apesar de o valor de eficiência de destruição

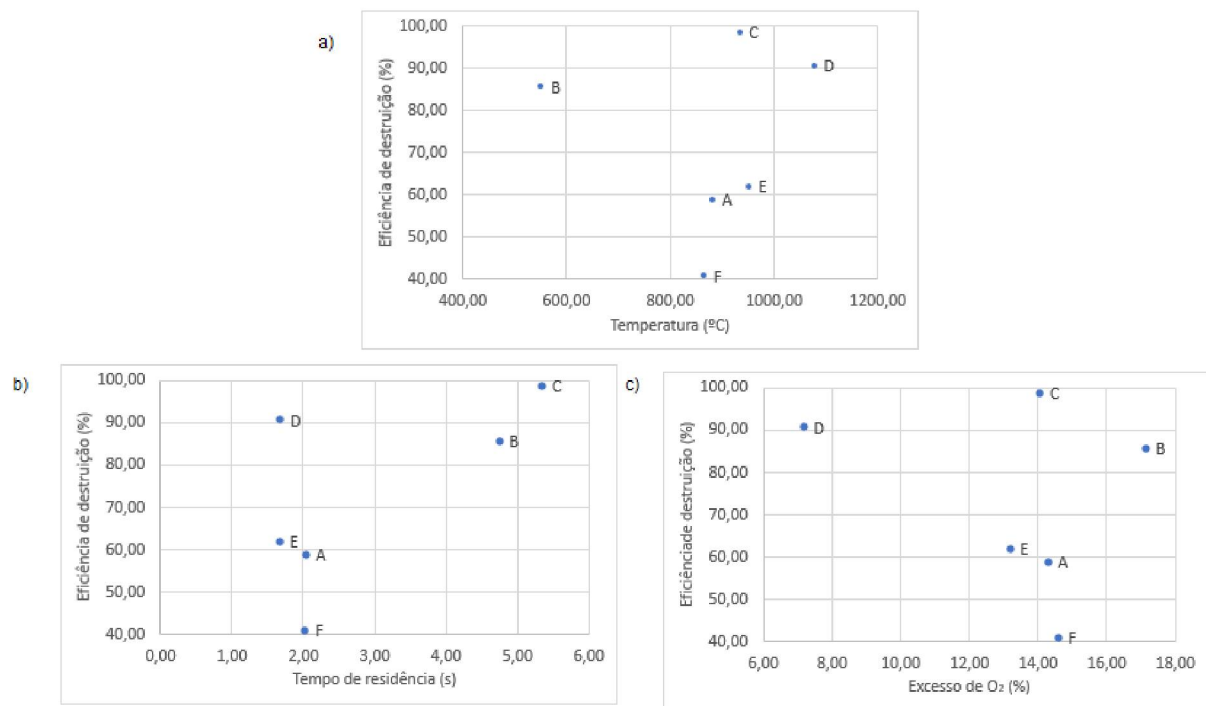


Figura 20 – Relações entre a eficiência de destruição do H_2S e a) temperatura de combustão; b) tempo de residência dos gases na câmara de combustão e c) excesso de oxigênio na reação de combustão.

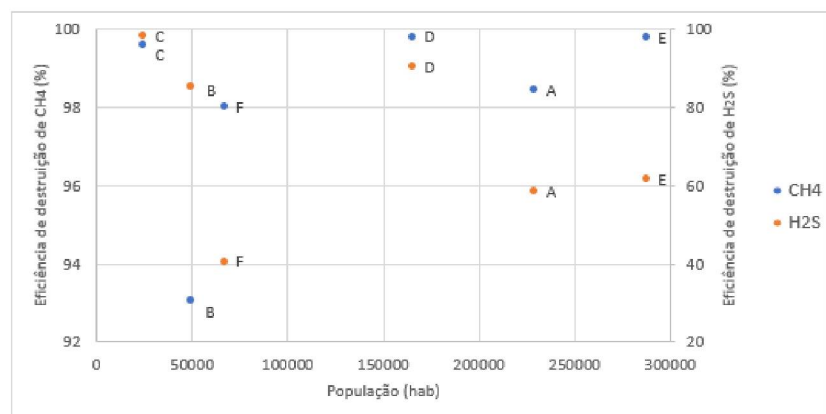


Figura 21 – Relações entre a eficiência de destruição do CH_4 , H_2S e população atendida pelas ETEs.

Tabela 19 – Modelos de queimadores utilizados em cada estação avaliada, bem como suas vazões de biogás.

Modelo	Limite (Nm ³ /h)	Vazão (Nm ³ / h)	ETE
BCE60	20 – 60	23,12	C
		48,91	F
		31,89	B
BCE150	50 – 150	49,25	A
		64,35	E
		85,41	D

ser elevado, representa o terceiro pior resultado dentre as ETEs avaliadas. Por outro lado, as estações de tratamento de esgoto C, D e E foram as que apresentaram melhor resultado para a destruição de metano.

A respeito da influência do dimensionamento dos queimadores e eficiência de destruição de H_2S , pode-se notar que, apesar de que fosse esperado que a ETE B, assim como no caso do metano, a eficiência de destruição fosse reduzida devido ao superdimensionamento do queimador instalado na estação B, a ETE B apresentou eficiência de conversão de H_2S elevada, em comparação com as demais ETEs.

No entanto, a ETE F, na qual o queimador está dimensionado de forma correta, porém com a ressalva de poder ficar subdimensionado dentro de pouco tempo, foi a estação em que a eficiência de destruição de sulfeto de hidrogênio foi a mais baixa dentre as ETEs avaliadas.

Percebe-se, portanto, que apesar de a combustão de CH_4 e H_2S terem ocorrido sob as mesmas condições de queima, bem como, o mesmo queimador, as eficiências de destruição desses compostos não apresentam similaridade no padrão de resposta à queima as mesmas condições e fatores.

5.3.2 Comparação entre as ETEs A e F

Ao longo da análise dos resultados, foi observado que as estações de tratamento de esgoto A e F possuem vazões de biogás semelhantes, porém, utilizam como método de queima queimadores de modelos distintos, sendo a ETE A dotada de queimador modelo BCE 150, enquanto a ETE F faz uso do queimador BCE60.

Apesar da vazão semelhante, as estações mencionadas atendem um contingente de pessoas com proporção distinta. Esse fato, provavelmente, se deve a problemas de vazamentos de biogás durante a etapa de tratamento de esgoto, anterior à captação.

Ao se comparar as eficiências de destruição H_2S nessas estações, é interessante observar que a conversão deste composto se dá de forma menos eficiente na ETE que comporta o queimador modelo BCE60, cuja conversão gira em torno de 40%. Enquanto a ETE de queimador modelo BCE150 a conversão se aproxima de 60%.

O mesmo comportamento pode ser observado quanto ao composto CH_4 , o modelo de queimador BCE150 apresentou melhor resultado, sendo próximo à 98,5% de eficiência de conversão, ao passo que a ETE que faz uso do queimador BCE60 apresentou eficiência inferior, de, aproximadamente, 98%.

Baseado nessa comparação, pode-se cogitar a influência do correto dimensionamento de queimadores e eficiência na destruição do composto CH_4 e, especialmente, H_2S . Visto que ambos apresentaram o mesmo comportamento quanto aos dois modelos citados, pode-se supor que, de fato, o resultado obtido pelo queimador instalado na ETE F sugere um subdimensionamento do equipamento de queima.

5.4 Emissões evitadas por meio do uso de queimadores de biogás

O uso dos queimadores enclausurados nas estações proporcionou prevenção da emissão de um fluxo maior de CO_2 sendo emitido para atmosfera, uma vez que a queima do biogás viabiliza a oxidação do CH_4 em CO_2 , nos casos de combustão completa. A Tabela 20 apresenta as emissões evitadas de gases de efeito estufa em CO_2 por estação, sendo que neste cálculo foram utilizadas as vazões e eficiências específicas de cada ETE. Ademais, ainda nesta tabela, se encontra a redução global de emissão de GEE a partir do uso dos queimadores para cada estação.

O processo de combustão do biogás resultou em uma estimativa de redução de emissão de GEE por habitante para as ETEs A, B, C, D, E e F variando entre os valores 114,94 e 24,33 $kgCO_{2eq}ano^{-1}hab^{-1}$ e uma redução estimada entre 90,97 e 73,03 %, em comparação a um cenário onde não há queima. Logo,

Tabela 20 – Estimativa das emissões de GEE e reduções a partir da utilização de queimador enclausurado nas ETEs avaliadas.

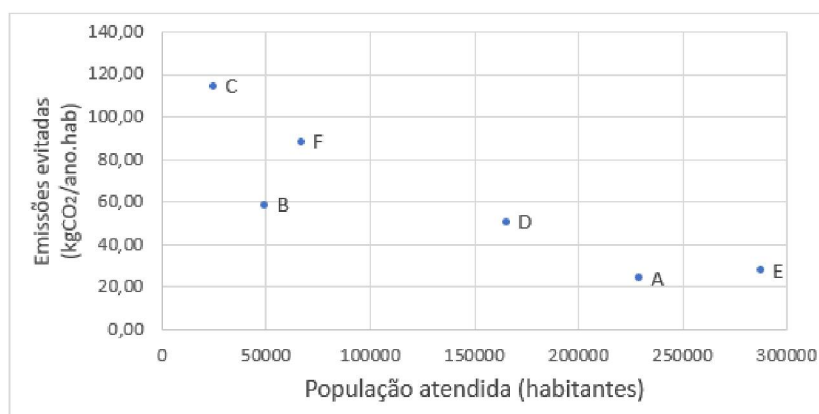
GEE evitados		ETE					
		A	B	C	D	E	F
Emissões evitadas de GEE em CO _{2eq.}	(kgCO ₂ /ano.hab)	24,33	59,05	114,94	50,79	27,99	88,65
Redução global em CO _{2eq.}	(%)	88,52	73,03	90,58	91,08	90,97	87,27

Tabela 21 – Índices de avaliação social e ambiental a partir do uso de queimadores enclausurados nas ETEs estudadas.

Índices		ETE					
		A	B	C	D	E	F
Custo social	(U\$/ano.hab)	0,58	1,42	2,76	1,22	0,67	2,13
Custo ambiental	(ano)	0,36	0,68	0,57	0,24	0,25	0,27

a combustão do biogás no queimador enclausurado representou as reduções de emissão de GEE para a atmosfera apresentadas na Tabela 20.

As maiores reduções per capita ocorrem nas menores ETEs como mostra a Figura 22. Isso se deve à magnitude da vazão de biogás produzido, mesmo considerando altas eficiências de destruição de CH₄ (93,06–99,81%). Neste contexto, restringindo a análise a emissões de GEE, os resultados sugerem que ETEs menores equipadas com queimadores implicam em maior redução de emissões de GEE em termos de CO_{2eq.}

Figura 22 – Relações entre as emissões evitadas de CO₂ por habitante ao ano e população atendida pelas ETEs.

5.4.1 Índices de avaliação no impacto social e ambiental do uso de queimadores enclausurados

O uso dos queimadores enclausurados, como já apresentado, proporciona reduções significativas na emissão de GEE para a atmosfera. A partir dos dados obtidos pela experimentação, foram calculados dois índices de avaliação, sendo eles o de custo social e custo ambiental. O custo social e ambiental calculados para as ETEs avaliadas estão expostos na Tabela 21.

Os índices de custo por habitante ao ano para reduzir as emissões de GEE para a atmosfera, ou seja, o custo social, calculados para as ETEs estudadas variaram entre U\$0,58 e 2,13 por habitante ao ano. Com relação ao custo ambiental, o qual representa simbolicamente o custo para abater o investi-

mento na aquisição dos queimadores, resultou em índices que variaram de 0,43 a 0,68 ano. Tal índice é simbólico, uma vez que não haverá retorno financeiro para a companhia de saneamento a partir do uso de queimadores enclausurados.

6 Conclusões

Os teores dos componentes do biogás proveniente das ETEs avaliadas estão de acordo com os valores sugeridos por [Noyola, Morgan-Sagastume and Lopez-Hernandez \(2006\)](#), sendo que a concentração de CH_4 foi acima da proposta pelo autor. Ainda, notou-se que há uma variação na composição do biogás entre as ETEs avaliadas. Possivelmente, decorre-se das diferentes características, quanto ao aspecto qualitativo, do esgoto tratado em cada estação de tratamento de esgoto. Uma vez o biogás é um subproduto do tratamento do esgoto, este influencia diretamente na composição final do biogás.

A queima do biogás em queimador enclausurado demonstra ser eficiente, uma vez que os resultados encontrados nos ensaios de análise qualitativa realizados nas ETEs comprovaram que os queimadores podem destruir o metano e o sulfeto de hidrogênio presentes no biogás com altas eficiências, principalmente em se tratando do CH_4 . A partir do uso desses combustores, a eficiência de destruição de metano pode ser superior à 93,06%, alcançando índices de até 99,81%.

Outros métodos de verificação da eficiência de destruição de metano, como o proposto pela EPA e o método de estimativa, foram testados e apresentaram resultados similares ao método de balanço de massa, usado como base. A eficiência estimada, baseada nas proposições de [Lewandowski \(2000\)](#), correspondeu aos resultados que mais se aproximaram das eficiências calculadas. No entanto, o método de aferição da eficiência proposto pela EPA apresentou resultados próximos à eficiência calculada.

Logo, o método da EPA pode ser um método de cálculo aproximado da eficiência de destruição de CH_4 , ainda mais pelo fato de que este é bastante simples de ser calculado, uma vez que apenas as concentrações finais do gás de combustão são relevantes para a determinação da eficiência de conversão. Portanto, esse método pode ser utilizado quando não há a necessidade de dados extremamente precisos ou quando não há aparatos experimentais capazes de aferir dados como a vazão dos gases e temperatura de combustão do processo de queima.

Os fatores listados por [Caine \(2000\)](#) como a temperatura de combustão, tempo de residência e excesso de oxigênio influenciam diretamente na eficiência de destruição do biogás, sobretudo na conversão de metano, sendo a temperatura o fator que demonstra ser o maior influenciador na eficiência de destruição de tal composto. As mais altas temperaturas de queima proporcionaram os melhores resultados quanto à destruição de CH_4 , já o excesso de ar e tempo de residência demonstraram certo impacto negativo quanto à eficiência.

Não foi possível identificar alguma relação dos fatores listados por [Caine \(2000\)](#) e a eficiência de destruição do composto H_2S . Desse modo, não há uma relação direta entre os fatores e a destruição do composto, sendo necessários estudos complementares identificá-los, proporcionando, assim, o aumento da eficiência de destruição de sulfeto de hidrogênio.

Apesar de, ainda, não representarem retorno relacionado a aspectos econômicos financeiros, o uso dos queimadores enclausurados promovem benefícios no âmbito social e ambiental. Os índices de custo por habitante ao ano para abater emissões de GEE para a atmosfera calculados para as ETEs estudadas variaram entre U\$0,58 e 2,76 por pessoa ao ano. Dessa forma, o retorno para abater o investimento na aquisição dos queimadores, resultou em índices que variaram de 0,24 a 0,68 ano. A relação dos custos sociais e ambientais da utilização de queimadores enclausurados podem ser usados como referencial para a elaboração de inventários de GEE.

Dessa forma, o uso de queimadores enclausurados promove a redução das emissões de gases de

efeito estufa para a atmosfera de forma bastante acentuada, sendo instrumento fundamental em operações geradoras de biogás como instrumento mitigador.

Referências

- ABNT. Nbr 12209/2011 - elaboração de projetos hidráulico-sanitário de estações de tratamento de esgotos sanitários. 2011.
- ALVAREZ, R. A.; ZAVALA-ARAIZA, D.; LYON, D. R.; ALLEN, D. T.; BARKLEY, Z. R.; BRANDT, A. R.; DAVIS, K. J.; HERNDON, S. C.; JACOB, D. J.; KARION, A. et al. Assessment of methane emissions from the us oil and gas supply chain. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 361, n. 6398, p. 186–188, 2018.
- BADER, A.; BAUKAL, C. E.; BUSSMAN, W.; ZINK, J. Selecting the proper flare systems. *Chemical Engineering Progress*, American Institute of Chemical Engineers(AICHE), v. 107, n. 7, p. 45–50, 2011.
- BARTON, A. C. T. *Assessment of Australian Biogas Flaring Standards*. Brisbane: GHD Pty Ltd, 2008.
- BAUKAL, C. E. *The john zink hamworthy combustion handbook: Applications*. 2ª ed. ed. [S.l.]: CRC press, 2013. v. 3 Volume.
- BIOCHAMA. *Manual do Queimador Enclausurado de Biogás BCE 60 e BCE 150*. c2019. <https://www.biochama.com.br/queimadores-enclausurados/>. Acesso em: mar. 2019.
- BOLES MA; ÇENGEL, Y. Termodinâmica. 5ª edição. *São Paulo: McGraw-Hill*, p. 740p., 2006.
- BRASIL. *Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab)*. [S.l.]: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental Brasília, 2013.
- CAINE, M. Biogas flares: state of the art and market review. *Topic report of the IEA Bioenergy Agreement Task 24-Biological conversion of municipal solid waste*, 2000.
- CARVALHO, M. E.; POSSETTI, G. R. C. Potencial de redução das emissões de gases do efeito estufa provenientes de reatores anaeróbios de estações de tratamento de esgoto: proposição de cenários para o estado do paraná (potential of reduction of greenhouse gases emissions from anaerobic-based sewage treatment plants: proposal of scenarios for the state of paraná). In: *Congresso ABES FENASAN-29 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, F. Abes (ed.), *São Paulo, Brazil*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–7.
- CHERNICHARO, C. d. Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. *Belo Horizonte: Polyécnica*, v. 2ª ed, v. 5, p. 380 p., 2007.
- COMBUSTIONRESEARCHASSOCIATES. *Enclosed flares - thermal destruction of waste gases & vapours*. c2019. <http://contechind.com.br/instrumentacao/medidor-de-vazao/medidor-de-vazao-de-gas-termal/>. Acesso em: mar. 2019.
- CONSTANT, M.; NAVEAU, H.-t.; FERRERO, G.; NYNS, E. et al. *Biogas end-use in the European Community*. [S.l.]: Elsevier Science Publishers, 1989.
- CONTECH. *Modelo FT2 Fluxômetro de Massa Térmica e Transmissor de Temperatura*. c2019. <http://contechind.com.br/instrumentacao/medidor-de-vazao/medidor-de-vazao-de-gas-termal/>. Acesso em: mar. 2019.
- ECOSECURITIES. *Methane recovery and electricity generation project-gcm 23*. c2019. <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1158830601.57/ReviewInitialComments/ZL25ZITY2ROPNLXFCF3T605UMHB09L>. Acesso em: mar. 2019.
- FILIPPINI, R. M. K. *Subsídios para diretrizes corporativas visando a gestão das emissões de gases de efeito estufa em um prestador de serviços de saneamento do estado do Paraná*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2018.
- FOKAL. *Queimadores de biogas*. c2019. <http://www.fokal.com.br>. Acesso em: mar. 2019.
- HOFSTETTERGASTECHNIK. *Emergency flares*. c2019. http://www.hofstetter-gt.ch/en/products/emergency_flare_emf.htm. Acesso em: mar. 2019.

- INNOVATIONS, T. *Combustion and energy recovery – biogas flare system*. c2019. <http://www.tridentti.com.my/combustion.php>. Acesso em: mar. 2019.
- IPCC. *Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. [S.l.]: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.
- IPCC. Climate change 2014: Mitigation of climate change. *Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, v. 1454, 2014.
- KAMINSKI, G.; WAGNERR, L.; SILVA, F.; POSSETTI, G. Análise crítica acerca da aplicação de queimadores enclausurados em etes para destruição de biogás. *3º Simpósio MAUI Brasil-Alemanha*, 2018.
- LEWANDOWSKI, D. A. *Design of thermal oxidation systems for volatile organic compounds*. [S.l.]: CRC Press, 2000.
- LING, A. Flare selection and sizing (engineering design guideline). *KLM technology group, Malaysia*, 2007.
- LOBATO, L. d. S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores uasb tratando esgoto doméstico. *Universidade Federal de Minas Gerais, Tese. Belo Horizonte, Minas Gerais*, 2011.
- MCDANIEL, M.; TICHENOR, B. A. Flare efficiency study. *Engineering Science, Industrial Processes Branch, Industrial Environmental Research Laboratory*, 1983.
- NOAA. National centers for environmental information. state of the climate: Global climate report for annual 2018. *National Climatic Data Center*, 2019.
- NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LOPEZ-HERNANDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. *Reviews in environmental science and bio/technology*, Springer, v. 5, n. 1, p. 93–114, 2006.
- OSHA. Occupational safety and health administration and others. occupational safety and health standards: toxic and hazardous substances. *Code of federal regulations*, 1998.
- PANDULLO, D. K. S. S. K. L. R. F. *Flares*. [S.l.]: Citeseer, 1995.
- PARANA, S. d. M. A. e. R. H. S. Resolução nº 16, de 26 de março de 2014. art. 58. diário oficial do estado do paraná. *Poder executivo*, 2014.
- PARK, K.; LEE, H.; PHELAN, S.; LIYANAARACHCHI, S.; MARLENI, N.; NAVARATNA, D.; JEGATHEESAN, V.; SHU, L. Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Elsevier, v. 95, p. 251–261, 2014.
- PROGECO. *Emr adv - semi-enclosed flare stack*. c2019. <https://www.progecosrl.com/en/emr-advanced-biogas-combustion-flare.html>. Acesso em: mar. 2019.
- PROMAR. *Master plan for landfill management to improve methane capture and use in the state of espírito santo*. 2009. https://www.globalmethane.org/Data/337_Master_Plan_Report_FINAL.pdf.
- REIFFENSTEIN, R.; HULBERT, W. C.; ROTH, S. H. Toxicology of hydrogen sulfide. *Annual review of pharmacology and toxicology*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 32, n. 1, p. 109–134, 1992.
- RENEWPILOTINGGASTECHNOLOGY. *Emergency flares - emf*. c2019. <http://renewtechnologies.co.za/products/flaring/>. Acesso em: mar. 2019.
- RICKE, K.; DROUET, L.; CALDEIRA, K.; TAVONI, M. Country-level social cost of carbon. *Nature Climate Change*, Nature Publishing Group, v. 8, n. 10, p. 895–900, 2018.
- ROSA, A. P.; CONESA, J. A.; FULLANA, A.; MELO, G.; BORGES, J. M.; CHERNICHARO, C. Energy potential and alternative usages of biogas and sludge from uasb reactors: case study of the laboreaux wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*, IWA Publishing, v. 73, n. 7, p. 1680–1690, 2015.

- ROTUNNO, P.; LANZINI, A.; LEONE, P. Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogas upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as transportation fuel. *Renewable energy*, Elsevier, v. 102, p. 417–432, 2017.
- SEWERIN. *Multitec 545*. c2019. <http://www.sewerin.com/cms/us/our-products/detailview/multitec-545.html>. Acesso em: mar. 2019.
- SILVEIRA, B. e. a. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. *Ministério das Cidades*, p. 183p., 2015.
- SNIS. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2017*. [S.l.]: SNSA/MCIDADES Brasília, 2017.
- STONE, D. K.; LYNCH, S. K.; PANDULLO, R. F.; EVANS, L. B.; VATAVUK, W. M. Flares. part i: Flaring technologies for controlling voc-containing waste streams. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Taylor & Francis, v. 42, n. 3, p. 333–340, 1992.
- TSAGARAKIS, K. P. Optimal number of energy generators for biogas utilization in wastewater treatment facility. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 48, n. 10, p. 2694–2698, 2007.
- USEPA. *US Environmental Protection Agency. Parameters for properly designed and operated flares*. [S.l.]: Report for Flare Review Panel, EPA Office of Air Quality Planning and ..., 2012.
- USEPA. Us environmental protection agency.inventory of us greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2014. *EPA 430-R-16-002*, 2016.
- VLASSOV, D. Fundamentos da combustão. *VIII Curso de Especialização em Motores e Combustíveis*. Curitiba: UTPR, 2008.

APÊNDICE A – Tabelas

			ETEs											
			A		B		C		D		E		F	
Características da ETE	População estimada atendida	Habitante	228.821		49.152		24.307		164.966		287.184		66.326	
	Vazão média de esgoto	l/s	476,71		102,4		50,64		343,68		598,3		138,18	
Porte			Grande		Médio		Pequeno		Grande		Grande		Médio	
Características do queimador	Modelo do equipamento		BCE150		BCE150		BCE60		BCE150		BCE150		BCE60	
	Vazão (Nm³/h)	Máxima	150		150		60		150		150		60	
		Mínima	50		50		20		50		50		20	
Biogás	Composição	CH4 (%)	86,67	0,47	85,00	0,00	86,00	1,00	69,42	5,07	85,17	0,37	85,17	0,37
		CO2 (%)	2,83	0,37	3,00	0,00	4,83	0,90	4,33	0,94	4,83	0,37	2,00	0,00
		H2S (ppm)	0,15	0,01	0,25	0,01	0,28	0,01	0,18	0,04	0,17	0,01	0,11	0,01
		O2 (%)	0,48	0,09	0,73	0,05	0,35	0,16	2,95	1,17	0,02	0,04	0,12	0,04
		CO (ppm)	17,33	0,47	52,83	1,95	18,17	3,24	10,00	1,53	18,50	1,50	39,83	4,22
		N2 (%)	10,01		11,26		8,81		23,30		9,98		12,71	
	Vazão volumétrica (Nm³/h)		49,25	0,57	31,89	0,41	23,12	1,62	85,41	0,37	64,35	0,95	48,91	0,67
	Vazão mássica (kg/h)		33,42		21,82		16,88		69,12		49,06		36,49	
	Temperatura (°C)		40,00		41,63		36,23		35,70		30,27		24,15	
	Gás de combustão	Composição	CH4 (%)	0,10	0,00	0,47	0,17	0,03	0,05	0,02	0,04	0,02	0,04	0,13
CO2 (%)			2,17	0,37	1,00	0,00	3,17	0,37	7,17	0,69	4,00	0,00	2,50	0,50
H2S (ppm)			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
O2 (%)			14,32	0,25	17,17	0,29	14,08	0,45	7,20	0,81	13,22	0,31	14,62	1,16
CO (ppm)			25,17	4,56	269,67	105,04	40,83	10,11	22,33	3,90	28,00	13,96	500,00	0,00
N2 (%)		83,41		81,34		82,71		85,61		82,76		82,70		
Vazão volumétrica (m³/h)		2332,37		1004,08		891,38		2822,73		2836,61		2340,55		
Vazão mássica (kg/h)		717,75		429,64		264,57		765,09		833,84		732,94		
Tempo de residência estimado (s)		2,05		4,76		5,36		1,69		1,68		2,04		
Temperatura (°C)		Média	882,67	23,93	553,00	24,15	934,67	29,71	1078,33	70,34	953,00	49,79	866,17	7,65
	Máxima	906,00		585,00		957,00		1148,00		994,00		874,00		
	Mínima	831,00		514,00		870,00		963,00		850,00		852,00		
Ar atmosférico	Relação mássica Ar/Biogás teórico (kg/kg)		13,12		12,69		12,76		9,11		12,59		12,89	
	Relação mássica Ar/Biogás (kg/kg)		20,47		18,69		14,67		10,07		16,00		19,09	
	Lambda		1,56		1,47		1,15		1,11		1,27		1,48	
	Excesso de ar (%)		56,07		47,31		14,97		10,52		27,03		48,03	
	Vazão volumétrica estimada de ar atmosférico (m³/h)		587,69		352,55		212,00		593,73		658,34		580,28	
	Vazão mássica estimada de ar atmosférico (kg/h)		684,33		407,82		247,68		695,97		784,78		696,45	
	Temperatura (°C)		29,00		31,00		28,00		27,00		22,00		20,00	
Eficiência de combustão	Comparativo	H2S	58,74		85,44		98,46		90,47		61,81		40,73	
	Comparativo	CH4	98,45		93,06		99,61		99,81		99,79		98,03	
	EPA		95,48		66,95		98,83		99,74		99,52		93,17	
	Estimativa		99,90		<95%		99,99		99,90		99,90		99,90	
GEE Evitados	Emissões de GEE em CO2 eq. (kgCO2/ano.hab)		24,33		59,05		114,94		50,79		27,99		88,65	
	Redução global em CO2 eq. (%)		88,52		73,03		90,58		91,08		90,97		87,27	
Índices de avaliação	Custo social	US\$/hab.ano	0,58		1,42		2,76		1,22		0,67		2,13	
	Custo ambiental	Ano	0,36		0,68		0,57		0,24		0,25		0,27	