

AVALIAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO EM REATORES UASB EM TERMOS DE CONCENTRAÇÃO DE H₂S PARA FINS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Alice Dias da Cruz

Orientadora: Eng.^a Carolina Bayer Gomes Cabral

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Belli Filho

2015/2



Alice Dias da Cruz

**AVALIAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO EM REATORES UASB
EM TERMOS DE CONCENTRAÇÃO DE H₂S PARA FINS DE
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO**

Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para a
Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Eng.^a Carolina Bayer
Gomes Cabral

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Belli
Filho

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Dias da Cruz, Alice

AVALIAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO EM REATORES UASB EM
TERMOS DE CONCENTRAÇÃO DE H₂S PARA FINS DE APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO / Alice Dias da Cruz ; orientadora, Carolina
Bayer Gomes Cabral ; coorientador, Paulo Belli Filho. -
Florianópolis, SC, 2015.

87 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Biogás. 3.
Reatores UASB. 4. Aproveitamento energético. 5. Sulfeto de
Hidrogênio. I. Bayer Gomes Cabral, Carolina . II. Belli
Filho, Paulo. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

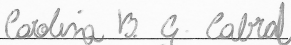
Alice Dias da Cruz

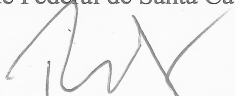
**AVALIAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO EM REATORES UASB
EM TERMOS DE CONCENTRAÇÃO DE H₂S PARA FINS DE
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO**


Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Sanitarista e Ambiental, e aprovado em sua forma final pela banca examinadora.

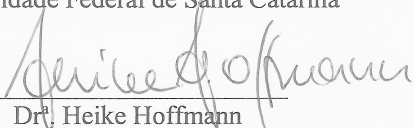
Florianópolis, 16 de março de 2016.

Banca Examinadora:


Eng.^a Carolina Bayer Gomes Cabral
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Dr. Paulo Belli Filho
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina


Eng.^o Wanderli Rogério Moreira Leite
Universidade Federal de Santa Catarina


Dr.^a Heike Hoffmann
Rotária do Brasil

Este trabalho é dedicado aos meus pais
e irmãos e às minhas queridas amigas.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais e irmãos, por todo amor, apoio e compreensão nos momentos de maior tensão. Vocês me fizeram acreditar que eu poderia fazer isso.

Às queridas amigas da faculdade Ana Clara, Debora e Laura, pela consultoria, companhia e conselhos.

À Camila, pelos momentos de distração muito necessários durante o nosso tão querido e esperado café.

À Cássia, Fernanda e Marcella, Maria Eduarda e Ana Luiza por todo o apoio e amizade durante todos esses anos.

Aos colegas de trabalho da Rotária do Brasil, em especial Sebastian, por todo o ensinamento, e Luisa, por toda a ajuda.

À minha orientadora Carolina por ter incentivado e orientado este trabalho com muita dedicação, sempre disponível para me aconselhar.

Ao meu coorientador, Professor Paulo Belli Filho.

À Rotária do Brasil, pela oportunidade que me foi dada e todo o conhecimento que me foi passado durante um ano e meio, o que me possibilitou desenvolver esse trabalho.

Às companhias de saneamento envolvidas no projeto.

Por fim, agradeço a todos aqueles que me apoiaram, e que de alguma forma tornaram essa trajetória mais divertida e gratificante.

“É preciso que eu suporte duas ou três larvas se quiser conhecer as borboletas. Dizem que são tão belas.”

(Antoine de Saint-Exupéry, 1943)

RESUMO

O cenário atual de crise energética e aquecimento global está impulsionando uma crescente busca por fontes alternativas de energia. O biogás gerado em estações de tratamento de esgoto é uma das opções cada vez mais alvo de pesquisas. Quando pensado no aproveitamento energético do biogás, um dos componentes do biogás muito importante de se analisar é o sulfeto de hidrogênio (H_2S). Esse trabalho tem, então, como objetivo analisar os valores de concentração de sulfeto de hidrogênio (H_2S) no biogás gerado no tratamento de esgoto em reatores UASB, com foco em seu aproveitamento energético. O trabalho foi elaborado a partir de dados provenientes de seis estações de tratamento de esgoto (ETE). Foram coletados dados de vazão de esgoto; vazão, temperatura e pressão do biogás gerado; composição do biogás (CH_4 , CO_2 , H_2S e O_2); DQO afluente e efluente ao UASB. Os dados eram transmitidos via telemetria a cada 5 minutos e armazenados em um banco de dados. Foram escolhidos para análise períodos que representassem com acurácia o comportamento do biogás em cada uma das estações. Foi analisada a variação característica dos componentes analisados, com ênfase no sulfeto de hidrogênio, através dos valores mínimos, máximos e médios de cada ETE. Com a construção de gráficos, foi possível analisar a variação temporal dos mesmos. Após isso, foi sugerido que tipo de tratamento satisfaria os requisitos necessários para o seu uso em motores de combustão interna. Para finalizar, foi realizado o dimensionamento do motor-gerador para aproveitamento energético em três ETE, comparando, ainda, os valores esperados e os medidos de vazão de biogás. A composição do biogás gerado está dentro da faixa encontrada na literatura, com os valores de metano próximos à faixa superior, com valores de 76 a 83%. O H_2S variou de um mínimo de 185,18 ppm (ETE I) ao máximo de 3.162,39 ppm (ETE J) e um valor médio próximo a 2000 ppm. Cinco das seis ETE apresentaram H_2S com variação temporalmente variável e periódica. Já os valores de vazão de biogás gerados foram menores do que os estimados, resultando, consequentemente, em uma potência menor para o motor do que a teórica. Os resultados reforçam a necessidade de monitoramento do biogás gerado nas estações anteriormente à implantação de um sistema de aproveitamento do mesmo.

Palavras-chave: sulfeto de hidrogênio, biogás, reatores UASB, aproveitamento energético, tratamento do biogás.

ABSTRACT

The current scenario of energy crisis and global warming is driving a growing demand for alternative energy sources. The biogas generated in sewage treatment plants is one options that has been the target of many researches. When thought of the energy use of biogas, one of the most important components of biogas to analyze is the hydrogen sulfide (H_2S). This work aims to analyze the values of concentration of hydrogen sulfide (H_2S) in the biogas generated in the wastewater treatment in UASB reactors, focusing on their energy use. The study was elaborated using data from six sewage treatment plants (STP). Data of the sewage flow; flow, temperature and pressure of the biogas; biogas composition (CH_4 , CO_2 , H_2S and O_2) and COD before and after the UASB were collected. The data were transmitted via telemetry every 5 minutes and were stored in a database. They were chosen for analysis periods that represented with accuracy the biogas behavior in each of the stations. It was analyzed the characteristic variation of the components, with focus on hydrogen sulfide, through the minimum, maximum and average values from each STP. It was possible to analyze their temporal variation. After that, it was suggested what type of treatment would satisfy the requirements for its use in internal combustion engines. Finally, it was calculated the power of the motor-generator for energy recovery in three STPs, comparing also the expected values and the measured ones of the biogas flow. The composition of the biogas measured is within the range found in literature, with methane values near the upper range, ranging from 76-83%. H_2S ranged from a minimum of 185.18 ppm (ETE I) to a maximum of 3162.39 ppm (ETE J) and presented an average value close to 2000 ppm. Five of the six STPs presented a H_2S with a temporally variable and periodic variation. The flow of the biogas measured were lower than estimated, resulting thereby in a lower power for the motor than the expected. The results reinforce the need for monitoring the biogas generated in the STP prior to the implementation of one of the utilization system.

Keywords: Hydrogen Sulfide. Biogas. UASB reactors. Energy recovery. Biogas treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Balanço esquemático de DQO nos sistemas anaeróbios e aeróbios	19
Figura 2 - Rotas metabólicas e grupos microbiano envolvidos na digestão anaeróbia	22
Figura 3 - Desenho esquemático de um reator UASB.....	24
Figura 4- Reator UASB.....	25
Figura 5 - Poder calorífico inferior por concentração de metano	26
Figura 6 - Diagrama de distribuição do H ₂ S (T=25°C).....	29
Figura 7 - Corrosão em tubulação (a) e em concreto (b) causada pelo vazamento do biogás	32
Figura 8 - Rotas tecnológicas para dessulfurização do biogás	38
Figura 9 - Localização das ETE analisadas	44
Figura 10 - Medidor de vazão de biogás tipo vortex.....	45
Figura 11 – Medidor da vazão de biogás instalado (esquerda) e medidor de pressão e temperatura (direita), instalado na ETE B.	45
Figura 12 - Analisador de gases	46
Figura 13 – Analisador de gases instalado e ponto de coleta de gás para análise.....	46
Figura 14- a) sonda medidora de DQO b) sonda instalada com o quadro controlador	47
Figura 15 - Exemplo de dados brutos de composição do biogás.....	50
Figura 16- Exemplo de correção de drift dos valores de DQO	51
Figura 17 - Infiltração de ar na tubulação de biogás na ETE I.....	56
Figura 18 - Composição do biogás nas ETE D	57
Figura 19 - Composição do biogás nas ETE A	58
Figura 20 - Composição do biogás nas ETE I.....	58
Figura 21 - Composição do biogás nas ETE a) F e b) J	59
Figura 22- Composição do biogás na ETE C	60
Figura 23 - Carga afluente e H ₂ S nas ETE C e D.....	61
Figura 24 - Variação do sulfeto de hidrogênio e da temperatura ambiente na ETE C	63
Figura 25 - Vazão de metano e H ₂ S na ETE C	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico.....	26
Tabela 2- Poder calorífico de combustíveis	32
Tabela 3: Principais requisitos de qualidade do biogás para fins energéticos	35
Tabela 4 - Processos de dessulfurização.	39
Tabela 5 - Vantagens e Desvantagens de técnicas de dessulfurização..	40
Tabela 6: Dados das ETE analisadas	44
Tabela 7- Princípio de funcionamento, faixa de medição e local de instalação dos equipamentos utilizados	47
Tabela 8 - Período de análise e parâmetros analisados em cada ETE...	48
Tabela 9 -Análises adicionais na ETE C.....	49
Tabela 10- Parâmetros utilizados na estimativa do biogás e no dimensionamento do motor-gerador	52
Tabela 11 - Composição do biogás nas ETE analisadas	55
Tabela 12 – Dados de entrada das ETE analisadas	66
Tabela 13 - Período de análise da vazão e composição do biogás nas ETE	66
Tabela 14 - Resultado do dimensionamento do motor-gerador nas ETE A, C e F.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CH₄ – Metano

CO₂ – Gás carbônico

H₂S – Sulfeto de hidrogênio

O₂ – Oxigênio

DBO – Demanda Biológica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

Q – Vazão

UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo)

PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	Tratamento de esgoto.....	19
3.1.1	Digestão anaeróbia.....	20
3.1.2	Reator UASB	23
3.2	Biogás	25
3.3	Enxofre e Sulfeto de Hidrogênio	27
3.3.1	Presença de enxofre no esgoto	27
3.3.2	Fontes	29
3.3.3	Fatores que influenciam a produção de H ₂ S	30
3.3.4	Problemas no tratamento de esgoto.....	30
3.4	Biogás como fonte energética.....	32
3.4.1	Formas de utilização	33
3.5	Tratamento do biogás.....	35
4	METODOLOGIA	43
4.1	Medição dos parâmetros	44
4.1.1	Medidor de Vazão de Biogás	45
4.1.2	Analisador de Qualidade de Biogás	46
4.1.3	Medidor Online de Concentração de DQO	46
4.1.4	Medidor de Vazão de Esgoto	47
4.2	Coleta e Análise dos Dados	48
4.2.1	Manutenção dos dados	51
4.3	Dimensionamento do Motor-Gerador.....	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1	Composição do biogás	55
5.1.1	Comportamento do H ₂ S	56

5.2	Influências sobre o H ₂ S.....	60
5.2.1	Sulfeto de hidrogênio e carga afluyente	60
5.2.2	Sulfeto de hidrogênio e fatores ambientais.....	61
5.3	Tratamento do biogás para uso energético.....	65
5.4	Estudo de caso - dimensionamento do motor-gerador 65	
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
Anexo.....		78

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o diagnóstico dos serviços de água e esgotos (Brasil, 2014), 69,4% do esgoto produzido é coletado, porém apenas 38,6% é tratado. Uma pesquisa realizada em 2011 pelo World Bank, a respeito do desenvolvimento do saneamento em 200 países, colocou o Brasil na 112ª posição (INSTITUTO TRATA BRASIL/CEBDS, 2014). Porém, com o Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab), aprovado em 2013, o governo prevê alcançar, em 2033, 92% de domicílios urbanos servidos por rede coletora de esgotos sanitários ou fossa séptica e atingir 93% de tratamento do esgoto coletado (BRASIL, 2013).

O tratamento de efluentes tem por finalidade garantir qualidade suficiente para que o mesmo possa ser reintroduzido a corpos d'água ou reutilizado, retirando, assim, substâncias prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. O tipo de tratamento utilizado depende das características do efluente e dos requisitos exigidos pela legislação, assim como fatores econômicos e disponibilidade de área. De uma forma geral, os tipos de tratamento biológico podem ser divididos em aeróbios e anaeróbios.

O tratamento anaeróbio tem como característica a degradação da matéria orgânica em meio anóxico, realizado por um grupo de microrganismos. Como resultado, tem-se a produção do biogás, gás composto, principalmente, por metano e dióxido de carbono, e quantidades menores de sulfeto de hidrogênio, nitrogênio e oxigênio. Uma tecnologia muito utilizada no Brasil para este tipo de tratamento é o reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, em inglês) (VON SPERLING, 2005).

Desenvolvido na Holanda, os reatores UASB vem sido amplamente utilizados no Brasil devido ao baixo custo, baixa produção de lodo (sólidos) e condições climáticas favoráveis. Esse tipo de reator opera através do fluxo ascendente do efluente em seu interior por meio de um manto de lodo. Neste manto, microrganismos presentes no lodo digerem a matéria orgânica do efluente liberando gases e produzindo biomassa bacteriana. No topo do reator, um dispositivo chamado separador trifásico separa o biogás gerado do efluente tratado e decanta os sólidos que foram carregados pelos gases através do manto (CHERNICHARO, 2007).

O biogás apresenta um grande potencial de geração de energia, porém o seu aproveitamento no Brasil encontra-se ainda nos primeiros estágios (SILVEIRA et al, 2015). Países de clima frio, como a

Alemanha, já utilizam o biogás como fonte de energia elétrica e térmica, porém o mesmo é resultado do tratamento de lodo (SILVEIRA et al, 2015). Desta forma, não existem muitas pesquisas avaliando quali- e quantitativamente a produção de biogás em reatores UASB no mundo.

Para a utilização do biogás, é necessário o tratamento do mesmo, de forma a eliminar componentes indesejados, como sulfeto de hidrogênio (H_2S), água e CO_2 . A presença de H_2S no biogás é extremamente prejudicial, visto que é um gás tóxico e corrosivo, atacando os materiais utilizados nos biodigestores e, além disso, reduzindo a qualidade do biogás para ser utilizado como fonte energética (IEA, 2000).

O trabalho em desenvolvimento tem como objetivo avaliar a concentração de H_2S no biogás gerado no tratamento de esgoto em reatores UASB. Serão analisados dados de seis estações de tratamento de esgoto (ETE) brasileiras de forma a estudar o comportamento normal de produção do gás, com ênfase no sulfeto de hidrogênio. Será realizado, também, o dimensionamento do motor-gerador necessário para o aproveitamento energético.

O projeto faz parte do Projeto Probiogás do Ministério das Cidades e da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável por meio Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, em parceria também com a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Os equipamentos de medição foram adquiridos e importados por essa parceria.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo analisar o biogás gerado no tratamento de esgoto sanitário em reatores UASB, visando o seu aproveitamento energético, com foco nos valores de concentração de sulfeto de hidrogênio (H_2S).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a composição do biogás, com foco no H_2S , e fatores de influência (DQO, temperatura, pluviometria);
- Avaliar o tipo de tratamento indicado para o biogás gerado em reatores UASB;
- Dimensionar um motor-gerador com base nos dados de projeto das ETE e nos obtidos durante o monitoramento das mesmas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TRATAMENTO DE ESGOTO

O tratamento de efluentes tem por finalidade garantir qualidade suficiente para que os mesmos possam ser reintroduzidos a corpos d'água ou reutilizados, retirando, assim, substâncias prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. De acordo com Costa (2006), o tratamento biológico de esgotos é um fenômeno que pode ocorrer naturalmente no solo ou na água, desde que predominem condições apropriadas.

Os processos biológicos, dependendo da natureza do aceptor de elétrons, podem ser divididos em aeróbios ou anaeróbios. Nos aeróbios, o aceptor de elétrons é o oxigênio molecular, e resulta na formação de CO_2 e H_2O . Nos anaeróbios, onde o oxigênio molecular está ausente, podem ser utilizadas algumas formas de carbono, enxofre e nitrogênio como aceptores de elétrons, degradando a matéria orgânica a CO_2 e CH_4 (FREIRE et al, 2012).

Os sistemas anaeróbios apresentam vantagens significativas aos aeróbios, dentre elas, a baixa produção de lodo, a possibilidade de preservação da biomassa e a tolerância a elevadas cargas orgânicas. Além disso, ao degradar a matéria orgânica, tem-se uma produção maior de biogás, como pode ser observado na Figura 1 (CHERNICHARO, 2007).

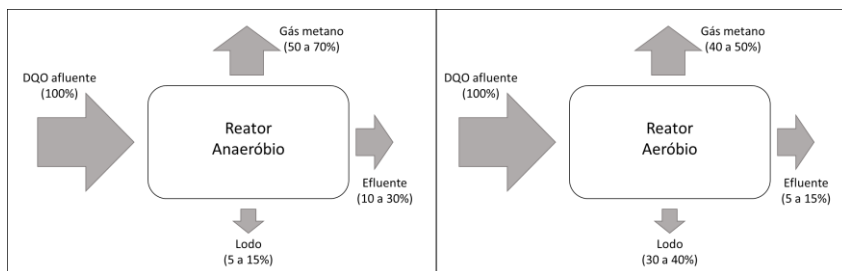


Figura 1 - Balanço esquemático de DQO nos sistemas anaeróbios e aeróbios

Fonte: adaptado de CHERNICHARO (2007)

De acordo com Chernicharo (2007), devido a condições favoráveis de temperatura, os sistemas anaeróbios, com destaque para os reatores de munda de lodo (UASB), vêm sendo altamente utilizados no tratamento de esgoto. Além disso, esses sistemas suportam elevadas

taxas orgânicas, possuem baixo tempo de detenção hidráulico e baixa produção de sólidos. Esses sistemas se baseiam na digestão anaeróbia da matéria orgânica.

3.1.1 Digestão anaeróbia

Os processos anaeróbios são aqueles aonde ocorrem os processos metabólicos de fermentação e respiração. É um sistema delicado e que depende da ação de três tipos de bactérias: bactérias fermentativas, bactérias sintróficas e microrganismos metanogênicos. Esses grupos de microrganismos realizam a conversão da matéria orgânica em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia (CHERNICHARO, 2007).

De acordo com Costa (2006), na digestão, algumas espécies de bactérias atacam a estrutura de materiais orgânicos complexos, para produzir compostos simples, deixando na solução aquosa subprodutos como amônia, sulfetos e fosfatos, extraindo, em simultâneo, a energia e os compostos necessários para o seu próprio crescimento.

A digestão anaeróbia de material orgânico complexo, como é o caso de águas residuárias, ocorre em quatro etapas, descritas abaixo (CAMPOS, 1999). Um fluxograma do processo de digestão anaeróbia pode ser visto na Figura 2.

Hidrólise

Na hidrólise, exoenzimas excretadas por bactérias fermentativas hidrolíticas realizam a hidrólise de materiais particulados complexos (polímeros) em materiais dissolvidos simples (moléculas menores) (CHERNICHARO, 2007). De acordo com Campos (1999), a velocidade da hidrólise influencia as demais etapas do processo, ou seja, a conversão do material orgânico para biogás é limitada dependendo da velocidade desta primeira etapa.

Acidogênese

Na etapa seguinte, a acidogênese, os produtos solúveis resultantes da hidrólise são metabolizados no interior das células, através do metabolismo fermentativo, e degradados em, principalmente, ácidos orgânicos (CHERNICHARO, 2007).

Acetogênese

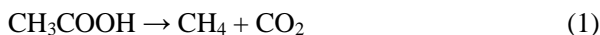
Os produtos da fermentação são transformados, nesta etapa em acetatos, hidrogênio e dióxido de carbono. Esse processo é realizado por

bactérias sintrófica acetogênicas e o produto será utilizado na próxima etapa por microrganismos metanogênicos (CHERNICHARO, 2007).

Metanogênese

Nesta etapa, os microrganismos metanogênicos realizam a conversão de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono. A metanogênese ocorre através de duas reações catabólicas, uma na qual o metano é produzido a partir de ácido acético, e a outra a partir de hidrogênio e dióxido de carbono (CHERNICHARO, 2007):

- Metanogênese acetoclástica
Responsável pela produção de 60 a 70% da produção de metano. É formado a partir da seguinte equação:



- Matanogênese hidrogenotrófica
O metano é produzido pela reação do gás carbônico com o hidrogênio (Equação 2), resultando em um grande desprendimento de energia.



Quando em condição estritamente anaeróbia e na presença de sulfato e outros compostos a base de enxofre no efluente, a digestão anaeróbia pode incluir ainda uma outra fase, chamada sulfetogênese.

Sulfetogênese

Realizado por bactérias sulforedutores que são capazes de utilizar uma ampla gama de substratos, como hidrogênio e acetato. Desta forma, passam a competir com as bactérias metanogênicas, reduzindo a produção de metano. O fator limitante para a ocorrência deste processo é a presença de enxofre no meio, que pode estar como sulfato (SO_4^{2-}), sulfito (SO_3^{2-}) (CHERNICHARO, 2007).

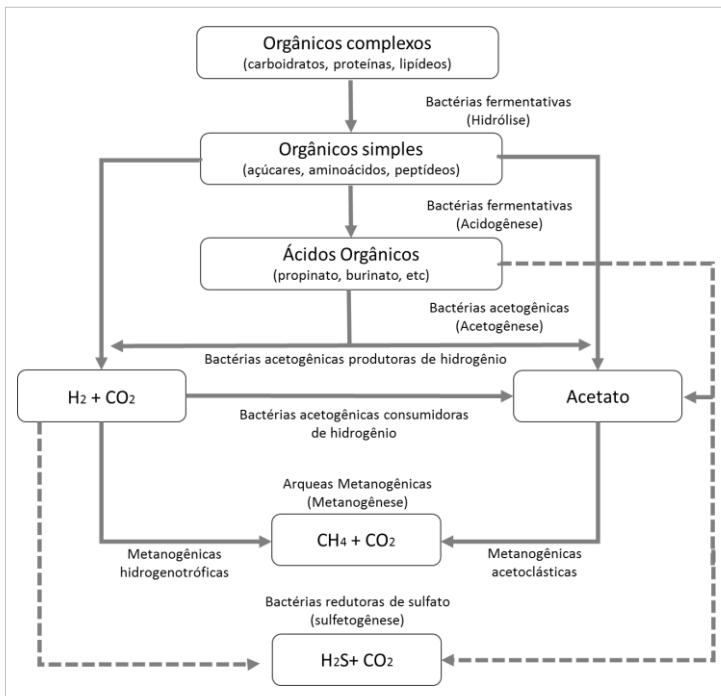


Figura 2 - Rotas metabólicas e grupos microbiano envolvidos na digestão anaeróbia.

Fonte: Adaptado CHERNICHARO (2007)

3.1.1.1 Fatores que influenciam a digestão anaeróbia

Alguns fatores ambientais podem afetar a digestão anaeróbia e, conseqüentemente, a geração de biogás, como: a natureza do substrato; a composição dos resíduos; a impermeabilidade ao ar; o teor de água no digestor; a temperatura e o pH. Com relação a natureza do substrato, alguns elementos têm efeito inibitório sobre a digestão anaeróbia e outros favorecem-na. Já a composição do resíduo, quanto maior a porcentagem de matéria orgânica, maior a geração de metano e vazão de biogás. (PECORA, 2006)

A temperatura tem grande influência na atividade enzimática das bactérias, principalmente a das bactérias metanogênicas. São diferenciadas as seguintes faixas (SILVEIRA et al, 2015):

- Faixa psicrófila: menor que 20°C;

- Faixa mesófila: entre 20 e 40°C;
- Faixa termófila: maior que 40°C.

As bactérias mesofílicas apresentam como faixa ideal para a produção de biogás a de 32°C a 37°C, e as termofílicas entre 50°C a 60°C. Já em temperaturas próximas a 10 °C apresentam uma atividade reduzida e, acima de 65 °C, as enzimas são destruídas pelo calor (PECORA, 2006). Um estudo feito utilizando a alga *Laminaria digitata* como substrato para a digestão anaeróbia, que foi mantida em três diferentes temperaturas (20, 35 e 45°C), mostrou que a maior produção de biogás ocorreu a 35°C e a menor a 20°C (VANEGAS e BARLETT, 2013).

3.1.2 Reator UASB

Desenvolvido na Holanda, o reator UASB é um dos processos utilizados no tratamento biológico de esgoto, transformando-o em subprodutos, como lodo, água e gases, entre eles o metano e gás carbônico. O reator UASB basicamente consiste de três partes fundamentais (Figura 3) (CHERNICHARO, 2007):

- Leito de lodo;
- Zona de sedimentação; e
- Separador trifásico.

Ao entrar pelo fundo do reator, o efluente passa, de forma ascendente, através de um leito de lodo denso e de elevada atividade, onde ocorre a digestão anaeróbia. O fluxo ascendente e a presença de bolhas resultam na mistura do efluente com o lodo, ocorrendo, assim, a degradação da matéria orgânica. Como resultado, tem-se a produção de biogás e o crescimento da biomassa bacteriana.

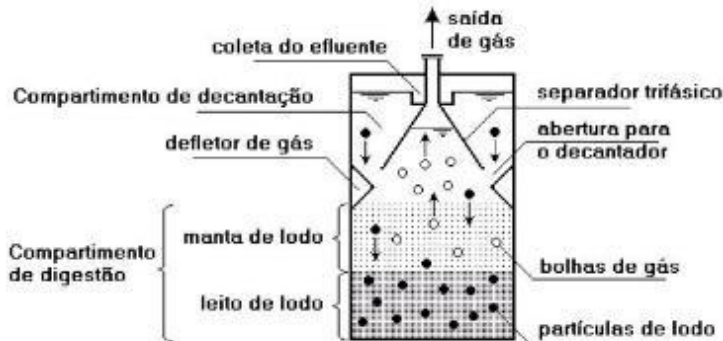


Figura 3 - Desenho esquemático de um reator UASB.

Fonte: CHERNICHARO, 2007.

Após passar pelo leito e manta de lodo, o biogás gerado e o efluente seguem em fluxo ascendente até o separador trifásico, enquanto que a biomassa gerada irá sedimentar para o fundo do reator. Os gases são direcionados ao separador trifásico pelo defletor de gases, já os sólidos que acabaram sendo carregados pelas bolhas de gases através da manta de lodo, ao sedimentarem no decantador, retornam à câmara de digestão. O efluente, já tratado, sai do reator através de um vertedor.

Essa tecnologia de separador trifásico é o que garante que não seja necessário nenhum tipo de meio suporte, visto que garante o retorno do lodo e a retenção de uma grande quantidade de biomassa de elevada atividade. O lodo excedente, quando estabilizado, é descartado. Para garantir um bom desempenho, as características do fluxo ascendente devem assegurar o máximo contato entre a biomassa e o substrato.



Figura 4- Reator UASB
Fonte: Rotária do Brasil, 2015.

3.2 BIOGÁS

O biogás é uma mistura gasosa combustível, produzida através da digestão anaeróbia, na qual a remoção de matéria orgânica resulta na formação de biogás e de biofertilizantes ricos em nutrientes. É composto, em sua maior parte, por metano e gás carbônico, contendo, ainda, concentrações menores de outros gases como nitrogênio, hidrogênio, sulfeto de hidrogênio e oxigênio.

O biogás pode ser produzido a partir de praticamente todos os tipos de resíduos biológicos, de estações de tratamento de esgoto (ETE), resíduos de abatedouros, resíduos de alimentos, estrume e ou outros resíduos industriais, culturas e resíduos de culturas (HOLM-NIESEN et al, 2009 e MOESTEDT et al, 2013).

Sua composição é variável, dependendo do tipo e concentração da matéria orgânica a ser digerida, das condições físico-químicas no interior do digestor (pH, alcalinidade, temperatura) e da presença de outros ânions, como o sulfato e o nitrato (NOYOLA et al., 2006).

Na tabela abaixo, pode-se observar, a composição típica de biogás gerado no tratamento de esgoto doméstico em reatores anaeróbios.

Tabela 1: Composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico

Parâmetro	Unidade	Concentração
Metano	% em vol.	60 a 85
Gás carbônico	% em vol.	5 a 15
Monóxido de carbono	% em vol.	0 a 0,3
Nitrogênio	% em vol.	2 a 25
Hidrogênio	% em vol.	0 a 3
Sulfeto de hidrogênio	ppm	1000 a 5000
Oxigênio	% em vol.	0-2

Fonte: adaptado de SILVEIRA et al, 2015.

De acordo com Costa (2006), as características do biogás dependem da pressão, temperatura, concentração de metano e dos gases inertes e/ou ácidos.

O potencial energético do biogás é relacionado com a quantidade de metano em sua composição, fator este determinante para o seu poder calorífico (LOBATO, 2011). Como pode ser observado na Figura 5, o poder calorífico do biogás está diretamente relacionado com a concentração de metano presente no mesmo.

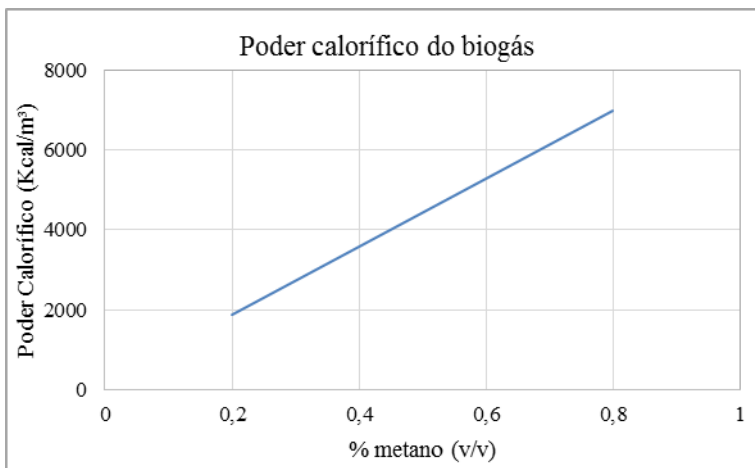


Figura 5 - Poder calorífico inferior por concentração de metano

Fonte: Adaptado de ALVES, 2000.

Segundo Alves (2000), a presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, prejudica o

processo de queima tornando-o menos eficiente, uma vez que estas substâncias entram no lugar do combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada.

Deve-se, ainda, monitorar e controlar a presença de H_2S no biogás, visto que este pode causar problemas como corrosão de equipamentos e emissão de odores (SAWYER et al., 2003). Desta forma, dependendo do uso do biogás, pode ser necessário o tratamento do mesmo de forma a reduzir as concentrações de CO_2 e H_2S , assim como a umidade.

3.3 ENXOFRE E SULFETO DE HIDROGÊNIO

O enxofre é um elemento natural encontrado na natureza em quatro estados de oxidação: sulfato (SO_4^{2-}), dióxido de enxofre (SO_2), sulfito (SO_3^{2-}) e sulfeto (S^{2-}) (HAAS, 2013). No esgoto doméstico, o enxofre é necessário para realizar a síntese de proteínas, sendo que normalmente a quantidade de sulfato presente no esgoto já é suficiente para fornecer a quantidade necessária, visto que esta é pequena. (CHERNICHARO, 2007).

Quando combinado com o hidrogênio, forma-se o sulfeto de hidrogênio (H_2S). O H_2S é um gás incolor, mais denso que o ar e muito tóxico, que em baixas concentrações possui um odor característico de ovo podre. Quando queimado é transformado em SO_2 , gás também muito tóxico e poluente na atmosfera (AD-NETT, 2000).

De acordo com Koppe e Stozek (1993), concentrações a partir de 200 ml/m^3 de H_2S causam irritação nos olhos e no sistema respiratório, vômito e dor de cabeça. Concentrações mais altas podem ser extremamente perigosas, visto que nessas concentrações o gás não possui odor, podendo resultar em morte por intoxicação, principalmente por paralisia respiratória.

3.3.1 Presença de enxofre no esgoto

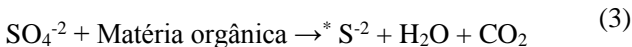
Conforme o item 3.1.1, a presença de compostos sulfurados no efluente a ser tratado resulta na produção de H_2S no biogás. Isso ocorre devido à competição entre bactérias sulforedutoras e microrganismos fermentativos, acetogênicos e metanogênicos (CHERNICHARO, 2007). Essas bactérias competem pelo mesmo substrato (por exemplo, hidrogênio e acetato). Normalmente, as bactérias sulforedutoras ganham a competição devido a alguns fatores como: maior afinidade destas com o hidrogênio e acetato; maior taxa de crescimento em relação às

metanogênicas; e maior liberação de energia quando utilizado o sulfato na respiração anaeróbia ao invés de CO_2 (MOESTEDT et al, 2013). As reações termodinâmicas de utilização do hidrogênio e acetato pelas bactérias sulforedutoras e metanogênicas estão descritas no trabalho de Souza et al (2009).

A competição é influenciada por alguns fatores, como o pH e a relação $\text{DQO}/\text{SO}_4^{-2}$ na água residuária. A inibição das metanogênicas é maior quando a relação $\text{DQO}/\text{SO}_4^{-2}$ é menor que 7. Já, quando é superior a 10, ocorre uma maior produção de biogás, e, assim, grande parte do H_2S produzido é removida da fase líquida (CHERNICHARO, 2007).

Porém, mesmo limitando a metanogênese, as bactérias metanogênicas dependem da produção de sulfeto para o seu crescimento. De uma forma geral, a concentração de sulfato nos esgotos domésticos é suficiente para fornecer o enxofre necessário para o crescimento bacteriano (CHERNICHARO, 2007).

Dentro do reator, de acordo com Bischofsberger et al (2005), o H_2S está em três formas: H_2S gasoso, H_2S na forma diluída em água, e na forma dissociada (HS^- , S^{-2}). A redução do sulfato em sulfeto de hidrogênio se dá pelas equações abaixo (SAWYER et al., 2003).



*sob condições anaeróbias

A dissociação está relacionada com a temperatura e pH. Para valores de pH menores de 7, predomina a presença da forma não dissociada (H_2S), já para valores maiores de 7, na forma dissociada (Figura 6). No tratamento de esgoto, a concentração de S^{-2} é desprezível (CHERNICHARO, 2007).

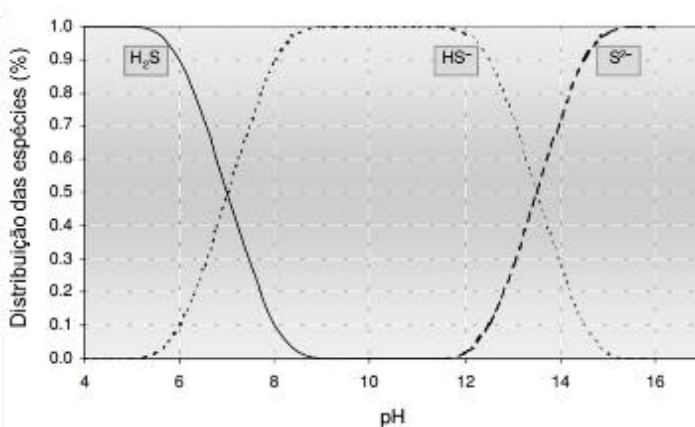


Figura 6 - Diagrama de distribuição do H₂S (T=25°C)

Fonte: CHERNICHARO, 2007.

O H₂S na forma não dissociada pode, ainda, estar diluído em água ou no estado gasoso. Segundo Chernicharo (2007), a presença de H₂S na fase gasosa depende da produção de gases no sistema, sendo que quanto maior a produção de metano no reator, maior será a quantidade de sulfeto retirada da fase líquida. Assim, quanto maior a DQO afluente (maior produção de metano), maior a concentração de H₂S presente no biogás.

3.3.2 Fontes

São diversas as fontes de enxofre em efluentes. No esgoto doméstico, pode vir dos alimentos, via urinas e fezes, da redução de sulfatos na ETA para o tratamento, e de detergentes (KOPPE e STOZEK, 1993). Segundo Boon (1995) apud Gostelow et al (2001), esgoto doméstico normalmente contém de 3 a 6 mg/L de enxofre orgânico oriundo de proteínas, e 4 mg/L de detergentes doméstico. Já a concentração de enxofre inorgânico, presente na forma de sulfato, depende da dureza da água, variando entre 30 a 60 mg/L.

Em sistemas aonde ocorre a mistura de esgoto com a drenagem urbana pode ocorrer a contaminação através da água da chuva, que pode ter de 10 a 100mg/l de SO⁴⁻, quando há queima de combustíveis fósseis (chuva ácida) (KOPPE e STOZEK, 1993).

Segundo ATV (2000), em processos de refinação (extração de gordura, óleos, graxas, vegetais ou animais), para a limpeza do produto

final são utilizados produtos com sulfato (H_2SO_4) e, normalmente, o efluente tem entre 300 e 1000 mg/l. Em indústria de levedura, o efluente possui concentrações de sulfato entre 1000 e 2700 mg/l. Além disso, Bischofsberger et al (2005) citam que processos de produção de levedura, papel cartolina, MDF, também contém efluentes com elevada carga de compostos com enxofre. A contaminação de esgoto doméstico por efluentes industriais destes citados pode ocasionar uma elevada concentração de sulfato no esgoto a ser tratado.

A presença de compostos sulfurados pode, ainda, ter origem no corpo d'água da onde é feita a coleta da água de abastecimento. Em regiões agrícolas, o uso de fertilizantes pode ocasionar o aumento na concentração de sulfato caso ocorra a infiltração no corpo d'água de água contaminada por eles (KOPPE e STOZEK, 1993).

3.3.3 Fatores que influenciam a produção de H_2S

Durante o tratamento anaeróbio, a produção de sulfetos pode ocorrer decorrente de alguns fatores, como: a relação $\text{DQO}/\text{SO}_4^{2-}$, sendo que quanto menor a relação maior a produção de sulfetos; a composição do substrato; o pH e a temperatura do meio; a competição entre microrganismos sulforedutores e metanogênicos (CHERNICARO, 2007).

De acordo com Bergey et al. (1993) apud Ahammad et al. (2008), a maioria das bactérias sulforedutoras são mesofílicas, porém algumas são termofílicas. Desta forma, a atividade das bactérias pode ser monitorada pela presença de H_2S , visto que quanto mais H_2S produzido maior a atividade das sulforedutoras.

Um experimento conduzido por Ahammad et al (2008) sobre a digestão anaeróbia com estrume bovino comparou o crescimento de bactérias sulforedutoras em diferentes temperaturas (37 e 55°C, condições mesofílica e termofílica, respectivamente). Nele, mostrou-se que em 55°C as bactérias em questão foram totalmente suprimidas e mesmo após 180 dias o biogás não continha nenhum traço de H_2S .

3.3.4 Problemas no tratamento de esgoto

De acordo com Sawyer et al. (2003), o sulfato é considerado um fator de preocupação no tratamento de esgoto visto que está associado a dois grandes problemas: odor e corrosão resultada da redução do sulfato em sulfeto de hidrogênio sob condições anaeróbias.

Em reatores UASB, uma parte do H_2S , a porção gasosa, é incorporada ao biogás e conduzida ao interior do separador trifásico. Já a parte solúvel entra no compartimento de sedimentação, vindo a ser perdida no efluente. Pode, ainda, acontecer de uma outra parcela ser liberada para a atmosfera gasosa do decantador do reator, e esta, juntamente com a parcela de sulfeto de hidrogênio desprendida nas zonas de turbulência ou queda do efluente líquido do reator, acaba por formar o denominado gás residual. A presença de H_2S , tanto no separador trifásico, como na parte superior do reator, pode estimular a formação de ácido sulfúrico e provocar corrosão das superfícies do reator, sendo elas feitas em concreto ou em aço (CHERNICHARO apud GLORIA, 2009).

No tratamento anaeróbio, a toxicidade do sulfeto sobre as bactérias anaeróbias é um grande problema em efluentes que contêm sulfato, visto que elevadas concentrações de sulfeto podem retardar ou eliminar os processos biológicos responsáveis por reduzir os níveis indesejáveis de sulfato (SINBUATHONG et al., 2007).

Segundo Bischofsberger et al (2005), o H_2S diluído em água tem maior efeito inibitório sobre o processo biológico. Quando dissolvido em água, quanto maior o pH, maior é a transformação em sulfeto de hidrogênio na forma dissociada, ou seja, quanto menor o pH, maior a presença da forma diluída e mais tóxico o H_2S . Já a temperatura atua de maneira que, quanto maior seu valor, maior a presença de H_2S na forma gasosa e menor na dissolvida.

Para as condições de pH no tratamento anaeróbio de esgoto, que varia entre 6,5 a 8, a inibição do sulfeto é completamente dependente do pH, visto que, nesta faixa, parte do sulfeto está na forma dissociada (menos tóxica) e a outra parte na não dissociada, conforme observado na Figura 6 (CHERNICHARO, 2007).



Figura 7 - Corrosão em tubulação (a) e em concreto (b) causada pelo vazamento do biogás

Fonte: Rotária do Brasil, 2015.

Segundo Chernicharo et al (2010), a emissão de gases odorantes em reatores anaeróbios vé um problema que faz com que várias estações de tratamento de esgoto estejam gastando significativas quantidades de recursos com a aplicação de produtos químicos, de forma a diminuir ou mascarar a dispersão das emissões de H₂S no entorno das estações.

3.4 BIOGÁS COMO FONTE ENERGÉTICA

Em virtude da maior procura por fontes renováveis, o uso de biogás como fonte energética deve aumentar. São diversas vantagens que ele apresenta quando comparado com outras fontes, mesmo as renováveis. O biogás, além de poder ser produzido quando necessário, é facilmente estocável e a sua distribuição pode ser realizada através da rede de gás natural (HOLM-NIELSEN et al, 2009).

A escolha da tecnologia e do uso do biogás deve ser feita analisando cada caso, levando em conta os aspectos econômicos e ambientais. Uma opção muito utilizada é a geração de energia elétrica para autoconsumo na própria ETE, sendo que a energia excedente pode ser, ainda, injetada na rede pública. Necessariamente, o gás não aproveitado deve ser retirado do sistema de forma adequada e segura, passando pelo queimador de gás (SILVEIRA et al, 2015).

De acordo com Holm-Nielsen et al (2009), para a utilização do biogás é necessário, pelo menos, que o mesmo seja resfriado, drenado e secado imediatamente após a produção, e quase sempre deve ser tratado para diminuir o conteúdo de H₂S.

O poder calorífico do biogás, com concentrações entre 60 a 70% de metano, é de 21,5 e 25,1 MJ/m³, respectivamente (Lobato, 2011). Quando purificado, segundo Alves (2000), o biogás corresponde ao gás natural comprimido (GNC), sendo que seu poder calorífico é menor quanto maiores forem as proporções de contaminantes na mistura que o compõe. Na tabela abaixo encontra-se o poder calorífico de alguns combustíveis.

Tabela 2- Poder calorífico de combustíveis

Combustível	Poder Calorífico (kcal/kg)	
	Superior	Inferior
Petróleo	10.200	10.900
Gasolina	10.556	11.230

Óleo Diesel	10.180	10.750
Gás natural	8.554	9.400
Gás liquefeito de petróleo	11.026	11.750
Carvão vegetal	6.115	6.800

Fonte: Adaptado de ALVES (2000)

3.4.1 Formas de utilização

De acordo com Lobato (2011), o biogás pode ter os seguintes usos:

- Uso direto como combustível em caldeiras, fornos e estufas em substituição aos outros tipos de combustíveis;
- Geração de eletricidade para uso local ou venda para a rede da concessionária de energia;
- Cogeração de eletricidade e calor;
- Combustível alternativo visando à injeção na linha de gás natural, ou
- Aproveitamento como combustível veicular.

Caldeiras a gás

Em caldeiras a gás, a conversão de energia do biogás em calor é realizada por meio da produção de fluido quente ou vapor. Além do biogás, são capazes de queimar outros gases ou óleo combustível. Dessa forma, a escassez de biogás pode ser compensada por essas outras fontes de energia. A eficiência da caldeira de gás é superior a 90% (SILVEIRA et al, 2015).

Secagem de lodo

Uma possibilidade muito interessante é o uso do biogás para a secagem térmica do lodo proveniente da ETE, visando, primordialmente, à redução do volume e à higienização do material e, conseqüentemente, aos custos atrelados ao seu transporte e disposição final (SILVEIRA et al, 2015). Existe, ainda, a possibilidade de utilizar o próprio lodo seco como combustível (LOBATO, 2011).

Cogeração de eletricidade e calor

Durante o processo de geração de energia pelo biogás, grande parte da energia contida nele é transformada em calor. Desta forma, a cogeração possibilita a utilização tanto da energia, quanto do calor gerado (LOBATO, 2011). As principais tecnologias de cogeração são:

a) Motores a gás

A queima de combustível e ar em motores de combustão interna resulta na formação de gases de alta temperatura e pressão. São divididos em motores de ciclo Otto ou ciclo Diesel (LOBATO, 2011). A diferença entre esses motores é que o primeiro realiza a ignição por meio de uma vela e o segundo através de uma pequena quantidade de óleo diesel. Os motores a gás de ciclo Otto são utilizados em planta de grande porte, já os de ciclo Diesel, em pequenas, médias e grandes plantas. Conforme as características locais, os motores a gás podem compensar a indisponibilidade de biogás utilizando propano ou gás natural (SILVEIRA et al, 2015).

b) Turbinas

Compostas por, basicamente, um compressor, uma câmara de combustão e a turbina em si, nessa forma de utilização a energia térmica de combustão é primeiramente convertida em energia mecânica e em seguida em energia elétrica (SILVEIRA et al, 2015). O gás entra pelo compressor, onde é submetido a elevadas pressões, resultando no aumento da temperatura do ar. O ar, ao entrar na câmara de combustão, reage com o combustível, provocando a expansão da mistura ar/combustível e, conseqüentemente, ao ir para a turbina, a geração de energia mecânica. Parte desta energia é utilizada para alimentar o compressor e outra para movimentar um gerador para produzir energia elétrica. Para o aproveitamento da energia térmica, o calor dos gases de exaustão é recuperado por uma unidade de recuperação de calor. (SILVEIRA et al, 2015 e LOBATO, 2011).

Maquinas rotativas a gás

A energia mecânica de motores a gás pode ser utilizada no acionamento direto de máquinas rotativas, sendo transmitida diretamente ao eixo de acionamento da máquina acionada. Em caso de ETE, podem ser acionados os sopradores para aeração do sistema de lodo ativado e bombas (SILVEIRA et al, 2015).

Uso veicular

O uso de biogás como combustível de veículos demanda sua purificação até o biometano, possuindo, então, altos custos de investimento e operação, uma vez que além da remoção do sulfeto de hidrogênio, requer, ainda, a remoção do dióxido de carbono (SILVEIRA et al, 2015).

Cessão do biogás a terceiros/injeção na rede de gás natural

Dependendo das condições locais e legislações, o biogás pode ser cedido a terceiros localizados nas imediações da planta de biogás. Atualmente, no Brasil, não é permitida a injeção de biometano produzido em ETE na rede de gás natural. (SILVEIRA et al, 2015)

3.5 TRATAMENTO DO BIOGÁS

Dependendo da aplicação do biogás, o mesmo deve ser tratado de forma a atingir os requisitos de qualidade das tecnologias de aproveitamento energético do biogás, que apresentam limites máximos de concentração de cada impureza, ou seja, ditam o nível do tratamento necessário (CRISTIANO, 2015).

Os principais parâmetros a serem tratados são o sulfeto de hidrogênio, água e CO_2 . O H_2S , além de tóxico e corrosivo, quando queimado é transformado em SO_2/SO_3 , que são ainda mais tóxicos. A água pode resultar em condensado na linha de gás, formando um gás corrosivo quando há sulfeto de hidrogênio dissolvido. Já o CO_2 deve ser removido quando o biogás for ser utilizado a nível de gás natural ou para uso como combustível veicular, visto que ele reduz o conteúdo energético do biogás (IEA, 2000).

Para o uso energético, são apresentados na tabela abaixo os requisitos de qualidade em função da tecnologia utilizada.

Tabela 3: Principais requisitos de qualidade do biogás para fins energéticos

Aproveitamento energético	Requisitos
Aquecimento (caldeiras)	$\text{H}_2\text{S} < 1000 \text{ ppm}$
Motores de combustão interna	Remoção de umidade; $\text{H}_2\text{S} < 130 \text{ ppm}$; Siloxanos $< 5 \text{ mg/m}^3$
Microturbinas	Remoção de umidade; Siloxanos $< 0,03 \text{ mg/m}^3$
Células a combustível de carbonato fundido	Remoção de umidade; $\text{H}_2\text{S} < 0,1 \text{ ppm}$; Halogênicos $< 1 \text{ ppm}$; Siloxanos $< 5 \text{ mg/m}^3$
Conversão a biometano	Remoção de umidade; $\text{H}_2\text{S} < 3,5 \text{ ppm}$; $\text{CH}_4 > 95\%$; $\text{CO}_2 < 2\%$

Fonte: Adaptado de CRISTIANO (2015).

A remoção do sulfeto de hidrogênio pode ser realizada antes ou após a digestão anaeróbia, com o uso de diferentes tecnologias. Antes da digestão, a remoção é realizada através da reação com um íon metálico ou da oxidação (RYCKEBOSCH et al, 2011). De acordo com Cristiano (2015), para o aproveitamento de biogás, a remoção de sulfeto de hidrogênio é normalmente realizada após a digestão anaeróbia, procedimento chamado de dessulfurização.

Os métodos mais aplicados e estudados atualmente envolvem processos físicos, químicos e biológicos. Esses processos, que podem ser utilizados separadamente ou em conjunto, podem ser aplicados visando a separação grosseira de sulfeto de hidrogênio, dentro do próprio digestor, no gasômetro ou em sistema próprio para este fim, ou a remoção fina (concentrações traço) de sulfeto de hidrogênio (SILVEIRA et al, 2015).

a) Processos físicos

Podem ser divididos em adsorção em sólido e absorção física. O primeiro se dá através da concentração do H_2S na superfície de um sólido, por meio de forças existentes entre eles. Os sólidos podem ser o carvão ativado, óxidos de ferro e óxidos de zinco. Já a absorção física acontece por meio da dissolução de compostos em um absorvente não volátil (COLTURATO, 2015).

- **Óxido de ferro**

Normalmente, esse método pode ser aplicado para gases com concentração de H_2S de até 6.000 ppm, podendo chegar a valores menores de 20 ppm, quando corretamente dimensionado (DWA-M 361, 2011).

- **Adsorção por carvão ativado**

Pode ser utilizado para gases com uma concentração máxima de 500 ppm no biogás bruto, podendo resultar em uma concentração inferior a 1 ppm (DWA-M 361, 2011).

- **Óxido de zinco**

Processo de alto custo, é utilizado principalmente para a dessulfurização fina do gás natural ou do gás de síntese no setor petroquímico, e pode chegar a concentrações menores que 1 ppm (DWA-M 361, 2011).

b) Processos químicos

A dessulfurização por processos químicos pode ser realizada através de lavadores químicos, inibição química e oxidação catalítica.

Os lavadores químicos funcionam através da absorção química realizada através de reações químicas entre o gás e um solvente líquido (COLTURATO, 2015). O uso de soluções de lavagem com soda cáustica é amplamente usado na indústria, sendo aplicado, principalmente, para elevadas concentrações de H_2S (DWA-M 361, 2011).

Na inibição química, são adicionadas soluções aquosas de sais de ferro, as quais proporcionam a precipitação do sulfeto de ferro II (FeS) ou enxofre coloidal (S) (COLTURATO, 2015). A adição de compostos de ferro durante a digestão anaeróbia resulta em uma considerável redução do sulfeto de hidrogênio. É um procedimento que possui baixo custo e normalmente resulta em concentrações residuais de aproximadamente 100 a 150 ppm de H_2S (DWA-M 361, 2011).

Já na oxidação catalítica são utilizados quelatos férricos, ligantes capazes de doar pares de elétrons para um cátion metálico. Na dessulfurização do biogás, o sulfeto de hidrogênio, solubilizado na fase líquida, reage com o quelato de ferro, sendo oxidado a enxofre coloidal (COLTURATO, 2015).

c) Processos biológicos

Nos processos biológicos, primeiramente, o sulfeto de hidrogênio deve ser transferido da fase gasosa para um meio líquido ou biofilme, nos quais se encontram os microrganismos responsáveis por degradar o H_2S . Esta degradação biológica ocorre por meio de oxidações bioquímicas envolvendo compostos orgânicos e inorgânicos, as quais resultam em biomassa microbiana, CO_2 , H_2O , S^0 , H_2SO_4 , sais e outros elementos. Os processos podem ser: biolavadores, biopercoladores e biofiltros (COLTURATO, 2015). A oxidação utilizando ar injetado no biodigestor é um método barato e eficiente, muito utilizado em usinas agrícolas (DWA-M 361, 2011). De acordo com Holm-Nielsen et al (2009), o tratamento biológico, atualmente, reduz o conteúdo de H_2S a níveis menores que 100 ppm.

Os diferentes tipos de processos de dessulfurização do biogás podem ser observados na figura abaixo (Figura 8).

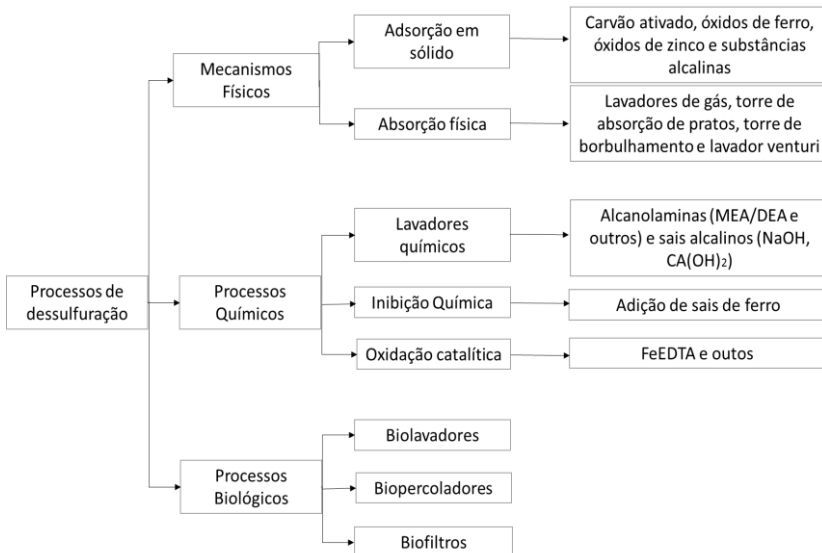


Figura 8 - Rotas tecnológicas para dessulfurização do biogás
Fonte: COLTURATO, 2015.

Na tabela abaixo são apresentadas algumas características de alguns tipos de tratamento, como consumo de energia elétrica e pureza atingida.

Tabela 4 - Processos de dessulfurização.

Processo	Consumo de energia elétrica	Insumos indiretos		Injeção de ar	Pureza em ppmv	Problemas
		Consumo	Eliminação			
Biodessulfurização no digestor ou gasômetro (injeção de ar)	++	++	++	Sim	50 - 2.000	Falta de exatidão no controle do processo
Biodessulfurização externa (filtro biológico percolador)	-	+	+	Sim	50 – 100	Falta de exatidão no controle do processo
Lavador biológico de gás	-	-	+	Não	50 – 100	Complexidade elevada
Precipitação de sulfeto	0	--	0	Não	50 – 500	Processo lento
Dessulfurização química interna	0	--	--	Sim	1 – 100	Efeito purificador reduzido drasticamente
Carvão ativado	0	--	-	Sim	< 5	Eliminação do carvão ativado

++ muito vantajoso, + vantajoso, 0 neutro, - desvantajoso, -- muito desvantajoso

Fonte: FNR, 2010.

Na tabela abaixo são apresentadas as vantagens e desvantagens dos tipos de tratamento

Tabela 5 - Vantagens e Desvantagens de técnicas de dessulfurização

Método	Vantagens	Desvantagens
Óxido de ferro	Baixo investimento; simples; alta eficiência (>99%)	Custos de operação elevados; sensível à água; a superfície de reação reduz a cada ciclo.
Absorção em água	Boa eficiência para baixas concentrações de H ₂ S.	Operação de alto custo; dificuldades técnicas.
Absorção química com NaOH e FeCl ₃	Leito de absorção de baixo volume; baixa demanda de eletricidade; baixa perda de CH ₄ .	Investimento e operação com alto custo; técnica difícil.
Absorção química com Fe(OH) ₃ e Fe-EDTA	Alta eficiência (95 a 100%); baixo custo de operação; baixo volume; regenerativo; baixa perda de CH ₄ .	Técnica difícil; regeneração através de oxigenação.
Adsorção em carbono ativado	Alta eficiência (H ₂ S < 3 ppm); alta taxa de purificação; técnica compacta; suporta grandes cargas.	Alto custo de investimento e operação; perda de metano; H ₂ O e O ₂ necessários para remover H ₂ S; H ₂ O pode diminuir a superfície de reação; regeneração a altas temperaturas
Biofiltros	Alta eficiência (> 97% é possível); baixo custo operacional.	Necessita de tratamento complementar para atingir níveis requisitados para o aproveitamento; a presença de O ₂ /N ₂ no

		biogás diminuem a sua qualidade.
--	--	----------------------------------

Fonte: Adaptado de RYCKEBOSCH et al (2011)

Independentemente da técnica utilizada, a remoção de sulfetos necessita do investimento em novos equipamentos, ou o uso extensivo de produtos químicos caros (MOESTEDT et al, 2013). Desta forma, faz-se necessário analisar o biogás gerado para encontrar a opção de tratamento com o melhor custo benefício.

4 METODOLOGIA

Este trabalho está inserido em um projeto do Probiogás (Projeto Brasil - Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil) do Ministério das Cidades e da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável por meio Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, O Projeto Probiogás tem por objetivo contribuir para a ampliação do aproveitamento energético do biogás e, por conseguinte, para a redução de emissões de gases indutores do efeito estufa. Desta forma, iniciou-se em dezembro de 2014 o monitoramento do biogás produzido em dez estações de tratamento de esgoto brasileiras que utilizam reatores UASB/RALF, de forma a analisar a quali- e quantitativamente o biogás produzido nos mesmos para fins de uso energético. O projeto está em andamento e tem previsão de término em junho de 2016. Mais informações sobre o projeto e as estações participantes podem ser encontradas em Cabral et. al. (2015).

Neste trabalho foram utilizados dados de seis ETE, dentre as dez analisadas. A escolha das estações a serem analisadas foi em virtude da disponibilidade de dados viáveis de serem utilizados durante a realização deste trabalho.

As estações estão distribuídas em seis estados e possuem contribuições de esgoto doméstico diferentes entre si. A Tabela 6 apresenta os dados das estações analisadas e a Figura 9 suas localizações aproximadas. Por decisão do projeto, não foram utilizados os nomes das estações para identificação, sendo utilizadas letras de A à J.



Figura 9 - Localização das ETE analisadas
Fonte: O autor.

Tabela 6: Dados das ETE analisadas

Nome da ETE	PE (hab.)	Vazão atual (L/s)
ETE A	198.000	310
ETE C	64.800	120
ETE D	85.000	100
ETE F	250.000	400
ETE I	92.250	150
ETE J	48.600	90

4.1 MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS

Através do projeto Probiogás, foram adquiridos e instalados nas ETEs os equipamentos necessários para analisar o comportamento do biogás e possíveis fatores de influência. Esses equipamentos realizavam a medição dos seguintes parâmetros:

- Composição do biogás;
- Vazão de biogás produzido no reator;
- Vazão de esgoto afluente;
- DQO de entrada e saída no reator anaeróbio tipo UASB.

4.1.1 Medidor de Vazão de Biogás

Sistema de medição da vazão de biogás composto por unidade de medição tipo vortex, medição de temperatura e pressão, com controlador.



Figura 10 - Medidor de vazão de biogás tipo vortex
Fonte: Hoentzsch, 2015.



Figura 11 – Medidor da vazão de biogás instalado (esquerda) e medidor de pressão e temperatura (direita), instalado na ETE B.
Fonte: Rotária do Brasil, 2015.

4.1.2 Analisador de Qualidade de Biogás

Foi utilizado o equipamento INCA 4001, da Union Instruments, um analisador fixo de gases, capaz de medir os seguintes componentes do biogás: CH₄, CO₂, O₂, H₂S. O equipamento mede o metano e dióxido de carbono por método infravermelho e o gás sulfídrico e oxigênio por método eletroquímico.



Figura 12 - Analisador de gases
Fonte: Union Instruments, 2015.



Figura 13 – Analisador de gases instalado e ponto de coleta de gás para análise.

Fonte: Rotária do Brasil, 2015.

4.1.3 Medidor Online de Concentração de DQO

Sistema de medição online da carga orgânica (DQO) composto por sonda e unidade controladora, da marca s::can, modelo Carbolyser. Mede concentrações entre 100 e 1.200 mg DQO/L através de espectrometria UV/VIS.

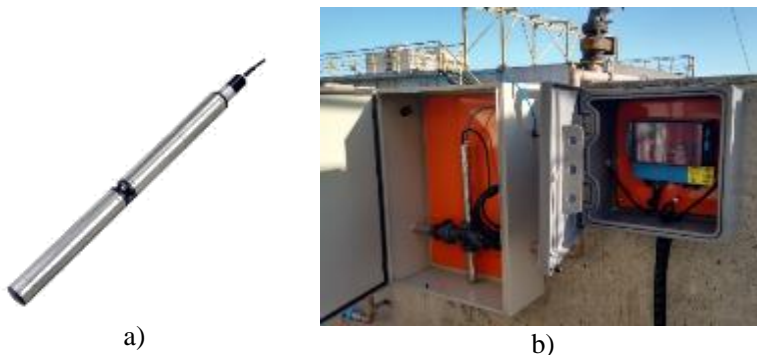


Figura 14- a) sonda medidora de DQO b) sonda instalada com o quadro controlador

Fonte: a) S::can, 2015, b) Rotária do Brasil, 2015.

4.1.4 Medidor de Vazão de Esgoto

Medidor ultrassônico de vazão de esgoto instalado na calha Parshall e unidade controladora.

É apresentado na *Tabela 7- Princípio de funcionamento, faixa de medição e local de instalação dos equipamentos utilizados* Tabela 7 um resumo da operação dos equipamentos citados acima, com o princípio de funcionamento, faixa de medição e local de instalação nas estações.

Tabela 7- Princípio de funcionamento, faixa de medição e local de instalação dos equipamentos utilizados

Parâmetro	Princípio de medição	Faixa de medição	Local de instalação
Vazão de Biogás	Medição tipo vortex	2,8 a 212 m ³ /h para DN 50	Tubulação de biogás
		7,2 a 724 m ³ /h para DN 80	
Qualidade do Biogás	CH ₄ e CO ₂ – método infravermelho	0-100 Vol. -%	Em local protegido próximo ao ponto de coleta do gás na tubulação de
	H ₂ S e O ₂ – método eletroquímico	H ₂ S – 0-10.000 ppm O ₂ – 0-25Vol.-	

		%	biogás
Medidor da DQO	Espectometria UV/VIS	100 – 3250 mgDQO/L	Próximo ao reator

4.2 COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados foram transmitidos por um sistema de telemetria SCADAweb através de um painel de controle e armazenados em um banco de dados online. A medição dos parâmetros foi realizada a cada cinco minutos, sendo que para a DQO, havia a alternância de 15 minutos de medição da DQO afluenta seguida por 15 minutos de medição da efluente. Os dados foram exportados em planilhas separadas no Excel através de um programa desenvolvido para o projeto. Foram utilizados dados da média horária dos parâmetros para a análise, com exceção de uma das estações (ETE D), cujos dados analisados foram extraídos do sistema online em um formato diferente.

A exportação dos dados do banco de dados online para o Excel era realizada uma vez por semana, sendo que nestes momentos identificavam-se possíveis problemas com os dados. Foram encontrados muitos períodos que apresentavam algum equipamento descalibrado, com mau funcionamento, ou falha na transmissão dos dados, conforme observado na Figura 15. Não foi possível, então, analisar o período total, sendo necessário realizar uma seleção de forma a excluir os períodos com erro. Desta forma, foram selecionados para a análise dos dados períodos de 5 a 11 dias que representassem com maior acurácia o comportamento de cada ETE e que haviam todos os equipamentos funcionando corretamente. Na ETE I, porém, não foi possível encontrar nenhum período com o correto funcionamento de todos os equipamentos. Na tabela abaixo, tem-se a relação das ETE com o período e os parâmetros analisados (Tabela 8).

Tabela 8 - Período de análise e parâmetros analisados em cada ETE

Estação	Período analisado	Parâmetros Medidos
ETE A	09 a 14/12/2015	Composição do gás, DQO, Qesg., Qbio., T e P
ETE C	7 a 15/11/2015	Composição do gás, DQO, Qesg., Qbio., T e P
ETE D	15 a 20/04/2015	Composição do gás, DQO, Qesg., Qbio., T e P

ETE F	22 a 29/09/2015	Composição do gás, DQO, Qesg., Qbio., T e P
ETE I	14 a 25/08/2015	Composição do gás, Qbio.
ETE J	1 a 14/12/2015	Composição do gás, Qesg., Qbio., T e P

Qesg. = Vazão do esgoto; Qbio. = Vazão do biogás; T = Temperatura e P = pressão

Para avaliar a influência de eventos de chuva e temperatura, foram utilizados dados de pluviometria e temperatura do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, do INMET e da EMBRAPA ou, quando disponíveis, dados das próprias estações.

Foi possível encontrar relação entre a temperatura e vazão de metano sobre o H₂S na ETE C, através de análises complementares, para os períodos encontrados na Tabela 9.

Tabela 9 -Análises adicionais na ETE C

Estação	Período analisado	Parâmetros Medidos
ETE C	25/02/2015 a 06/01/2016	Temperatura e H ₂ S
	16/11/2015 a 05/01/2016	Vazão de metano, temperatura e H ₂ S

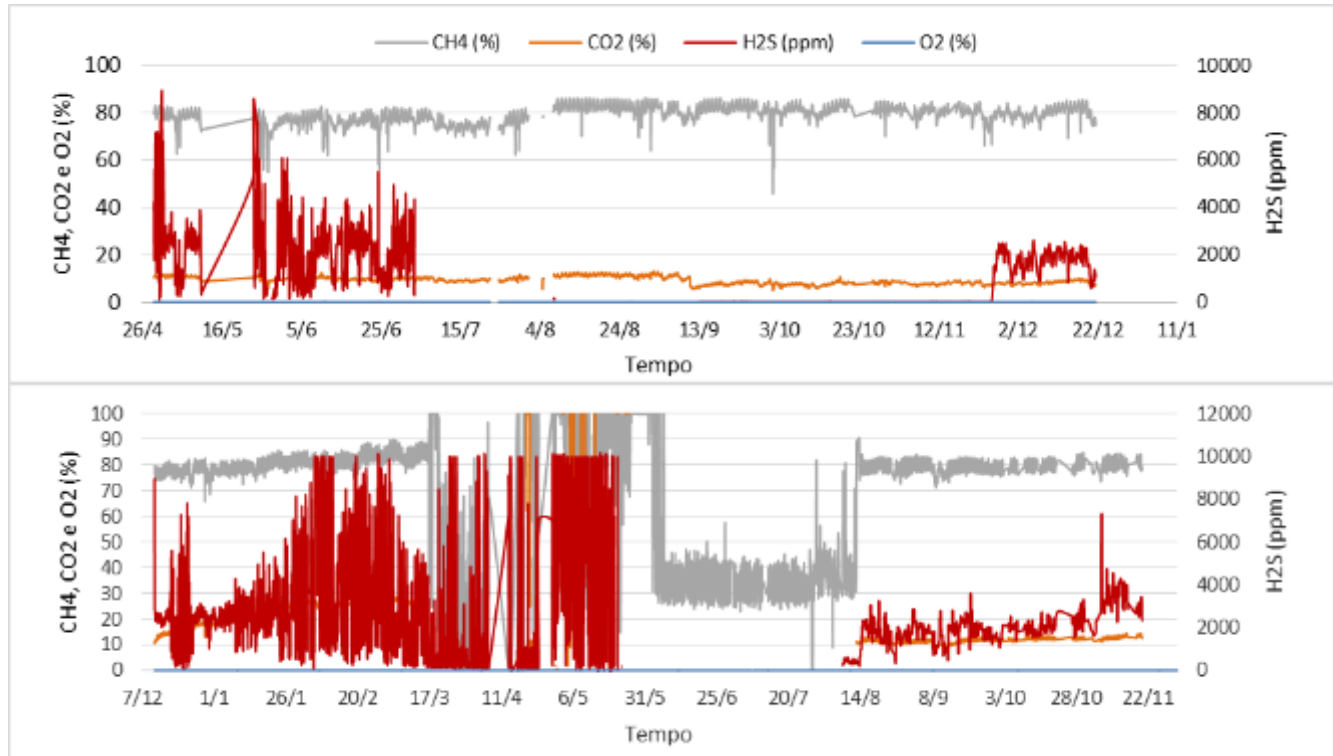


Figura 15 - Exemplo de dados brutos de composição do biogás

4.2.1 Manutenção dos dados

Em alguns momentos, observou-se valores de pico de DQO devido à obstrução da sonda por alguma sujeira. Os dados foram analisados e, quando o pico durava entre 10 a 15 minutos, retornando depois à mesma tendência na qual os dados vinham apresentando, os valores do pico foram deletados e realizada a nova média horária.

Em virtude de um drift apresentado pela sonda medidora de DQO na ETE A e C, foi necessário realizar o tratamento dos dados de forma a eliminá-lo. Para isso, encontrou-se a linha de tendência dos dados com drift e a tendência natural do restante dos dados. Depois disso, foi calculada a diferença entre as duas linhas de tendência e subtraída essa diferença dos dados originais, conforme observado na Figura 16.

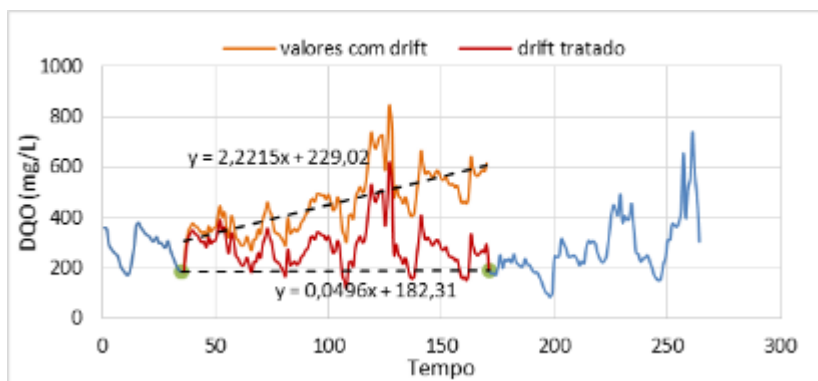


Figura 16- Exemplo de correção de drift dos valores de DQO

4.3 DIMENSIONAMENTO DO MOTOR-GERADOR

O dimensionamento do motor-gerador foi feito utilizando a vazão de biogás disponível, o rendimento do motor e a energia ativa específica. Ele foi realizado utilizando tanto a vazão de biogás estimada através do método proposto por Chernicharo (2007) e a monitorada durante este trabalho para três estações, as ETE A, C e F. Foi considerado o uso de um motor de ciclo Otto.

Como dados de entrada, foram utilizados, valores médios de vazão de esgoto, DQO afluente ao UASB e eficiência do UASB,

provenientes de análises realizadas pelas ETE antes das medições deste trabalho. A escolha de utilizar os dados de DQO de laboratório das estações e não os monitorados durante este trabalho foi em virtude da indisponibilidade de períodos representativos nos quais equipamentos apresentassem um funcionamento correto.

A energia ativa específica é calculada através da multiplicação do poder calorífico inferior do metano com a porcentagem do mesmo no biogás. De acordo com Silveira et al (2015), o metano possui um poder calorífico inferior de 35,9 MJ/m³, o equivalente a 9,97 kWh/m³. Desta forma, cada estação pode ter uma energia ativa específica diferente.

Foram utilizados, ainda, os seguintes parâmetros:

Tabela 10- Parâmetros utilizados na estimativa do biogás e no dimensionamento do motor-gerador

Parâmetro	Valor
Y_{obs}	0,21
Temperatura (°C)	20
K (gDQO/mol)	64
Constante universal dos gases	0,08206
Pressão (atm)	1
Rendimento elétrico do motor (%)	36

Para estimar a vazão de biogás, é necessário calcular a produção volumétrica do metano, sendo que para obter esta é necessário saber qual a parcela de DQO que é convertida em metano.

De acordo com Chernicharo (2007), a parcela de DQO convertida em gás metano (DQO_{CH_4}) é calculada pela Equação (6).

$$DQO_{CH_4} = Q_{média} \times [(DQO_{UASB\ afluente} - DQO_{UASB\ efluente}) - Y_{obs} \times DQO_{UASB\ afluente}] \quad (6)$$

Sendo:

- DQO_{CH_4} - Parcela de DQO convertida em metano em kgDQO/d
- $DQO_{UASB\ afluente}$ - DQO afluente em kg/m³,
- $DQO_{UASB\ efluente}$ - DQO efluente em kg/m³
- $Q_{média}$ - Vazão média do

Y_{obs} - Coef. de produção de sólidos em termos de DQO

Já a estimativa da DQO efluente no UASB foi realizada através de:

$$DQO_{UASB\ efluente} = DQO_{UASB\ afluente} \times (1 - \eta) \quad (7)$$

Sendo:

$DQO_{UASB\ afluente}$ - Concentração da DQO do afluente em mg/l;

$DQO_{UASB\ efluente}$ - Concentração da DQO do efluente em mg/l;

η - Eficiência de remoção de DQO em %.

A produção volumétrica de metano (em m³/d) é calculada por:

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K_{(T)}} \quad (8)$$

sendo o fator de correção para a temperatura operacional do reator determinado por:

$$K_{(T)} = \frac{p \times K}{R \times (273 + T)} \quad (9)$$

Sendo:

$K_{(T)}$ - Fator de correção para a temperatura operacional do reator kg_{DQO}/m³

p - Pressão atmosférica em atm

K - COD correspondente a um mol de CH₄

R - Constante universal dos gases

T - Temperatura operacional do reator

Com a vazão de metano produzida por dia e a porcentagem de metano presente no biogás, tem-se a produção estimada de biogás, obtida por:

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{K_{CH_4}} \quad (10)$$

Sendo:

$K_{(CH_4)}$ - Porcentagem de metano no biogás.

Na prática, tem-se uma perda de biogás devido a fatores como pontos de vazamento na tubulação de gás ou na superfície do reator. De acordo com Souza (2010), na prática, os valores de perda de metano dissolvido no efluente dos reatores UASB são maiores que 50 % com relação a todo o metano medido no biogás, e maiores que 30 % de todo o metano gerado no sistema (no biogás e dissolvido no efluente). Desta forma, adotou-se uma perda de 40 % para chegar à vazão de biogás disponível para aproveitamento. Este valor foi adotado visto que foram selecionadas para participar deste projeto estações que apresentavam uma melhor manutenção de suas estruturas.

Finalmente, a potência do motor-gerador é calculada por:

$$P = Q_{\text{biogás disponível}} \times EA_{\text{específica}} \times \eta_{\text{elétrico}} \quad (11)$$

Sendo:

$Q_{\text{biogás, disponível}}$ - Vazão de biogás disponível em m^3/d ;

P - Potência ativa em kW

$\eta_{\text{elétrico}}$ - Rendimento elétrico em %;

$EA_{\text{específica}}$ - Energia ativa específica em $\text{kWh}/\text{m}^3_{\text{biogás}}$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

A composição do biogás medida nas estações durante o período analisado encontra-se na *Tabela 11*.

Tabela 11 - Composição do biogás nas ETE analisadas

		CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	O ₂ (%)
ETE A	Mínimo	78	7,45	1.485	0,02
	Máximo	85	9,28	2.535	0,12
	Médio	81	8,37	2.010	0,05
ETE C	Mínimo	80	5,77	1.484	0,01
	Máximo	84	6,53	1.835	0,14
	Médio	82	6,20	1.636	0,06
ETE D	Mínimo	--	--	1.673	0,0
	Máximo	--	--	3.052	0,0
	Médio	--	--	2.419	0,0
ETE F	Mínimo	76	11,11	1221	0,00
	Máximo	83	13,22	2259	0,09
	Médio	79	11,87	1818	0,00
ETE I	Mínimo	74	4,47	185	0,0
	Máximo	83	9,35	1.898	1,05
	Médio	80	8,49	1.117	0,07
ETE J	Mínimo	71	7,81	1.416	0,0
	Máximo	79	8,97	2.234	0,01
	Médio	76	8,35	1.955	0,00

-- Dados não confiáveis

Fonte: O autor.

Os valores de CH₄ e CO₂ da ETE D não foram apresentados, pois o sensor infravermelho que mede a concentração destes parâmetros estava descalibrado. Essa descalibração, porém, não afeta os valores de H₂S e O₂, visto que estes são medidos por um sensor diferente e que não apresentava problema durante o período analisado.

As ETE apresentaram a composição de gás dentro ou próxima da faixa encontrada na literatura (CH₄ (60 a 85%), CO₂ (5 a 15%), H₂S (1000 a 5000 ppm) e O₂ (0 a 2%)). A concentração média de metano em todas as ETE encontra-se próxima à faixa superior para biogás produzido em reatores UASB, conforme apontado por Cabral et. al.

(2015), com valores de 75 a 83%, representando um biogás de boa qualidade para aproveitamento energético.

Observa-se uma variação dos valores tanto entre estações como em cada estação. O H_2S variou de um mínimo de 185,18 ppm (ETE I) ao máximo de 3.162,39 ppm (ETE J) e um valor médio próximo a 2000 ppm. Porém, os valores baixos de H_2S na ETE I podem ser explicados pela infiltração de ar na tubulação, que pode ser observado na Figura 17. A infiltração de oxigênio na tubulação de biogás é perigosa, visto que pode resultar numa mistura explosiva (SILVEIRA et al, 2015).

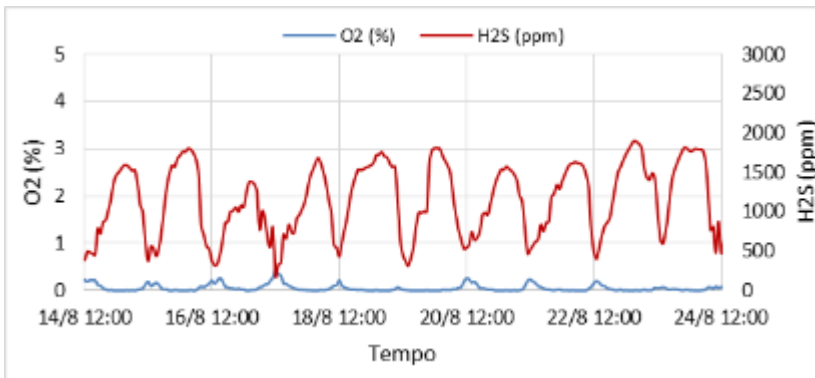


Figura 17 - Infiltração de ar na tubulação de biogás na ETE I

Destaca-se que problemas de vazamento e infiltração de ar são comuns nas estações brasileiras, reforçando a necessidade de uma melhor manutenção das estruturas das estações. Além de ser perigoso e causar corrosão, o vazamento do biogás na estrutura do UASB e tubulação de gás resulta na diminuição do biogás disponível para aproveitamento energético e a produção de odor nas estações.

Um estudo feito por Silva (2007) na ETE D, avaliou a emissão de H_2S e a produção de odor na estação e concluiu que o reator anaeróbico foi a unidade de tratamento que mais liberou H_2S e que o mau cheiro era percebido por quase 80% da vizinhança.

5.1.1 Comportamento do H_2S

Nas ETE A, D e I, a concentração de H_2S apresentou um comportamento temporalmente variável e periódico. Os valores máximos ocorreram entre 19hs e 00hs, e os mínimos entre 11hs e 14hs,

com exceção dos máximos da ETE I, que ocorreram entre as 01 e 05hs (Figura 18, Figura 19 e Figura 20).

A maior produção de H_2S no período noturno, porém, não era o comportamento esperado, mas sim durante o dia, nos períodos de maior temperatura devido à maior atividade das bactérias sulfetogênicas. Podia-se esperar também que, durante a noite, com a diminuição da temperatura, houvesse a condensação do vapor d'água e, conseqüentemente, a diminuição do H_2S gasoso, e o aumento da H_2S na forma diluída em água.

Uma hipótese para esse comportamento da produção de H_2S , seria que, durante a noite, tem-se uma vazão menor de esgoto a ser tratada, ou seja, menos matéria orgânica a ser digerida. Com menos matéria orgânica disponível, aumenta a competição entre as bactérias metanogênicas e as sulforedutoras por substrato. Como as sulforedutoras normalmente prevalecem sobre as metanogênicas, ocorreria uma maior produção de sulfeto de hidrogênio.

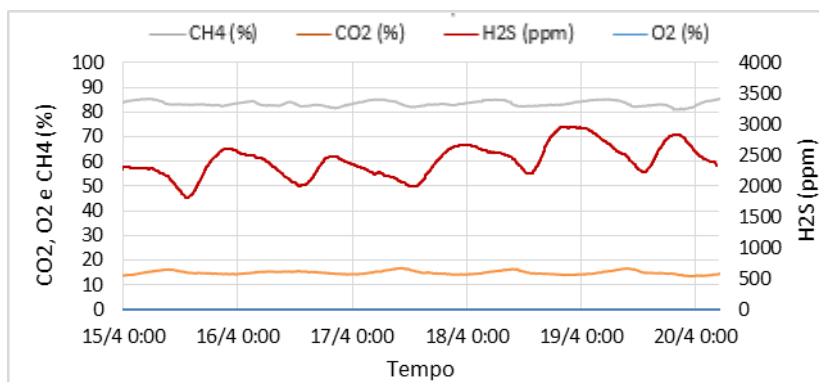


Figura 18 - Composição do biogás nas ETE D

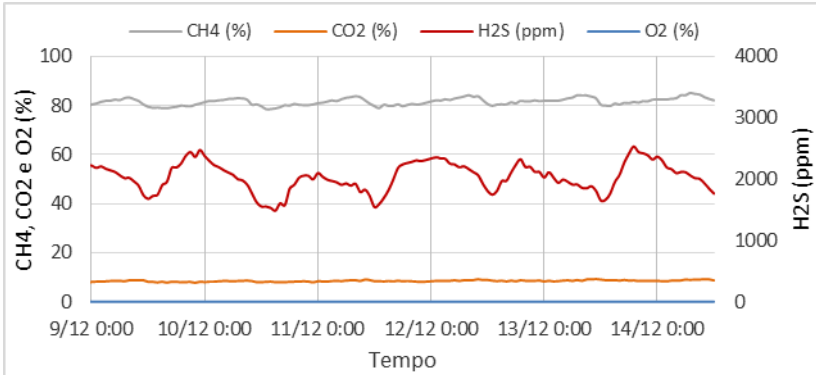


Figura 19 - Composição do biogás nas ETE A

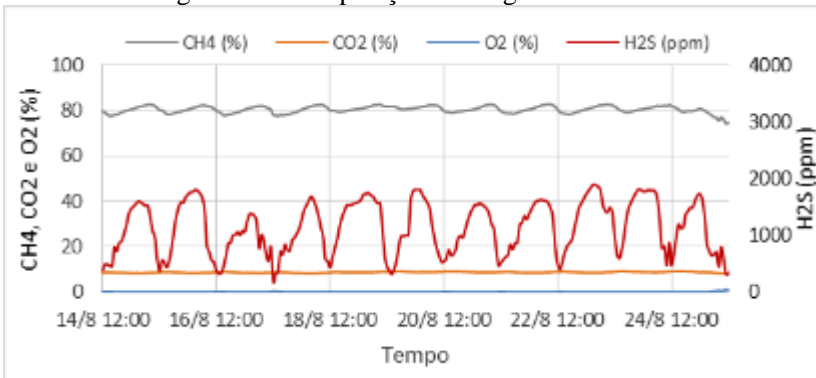
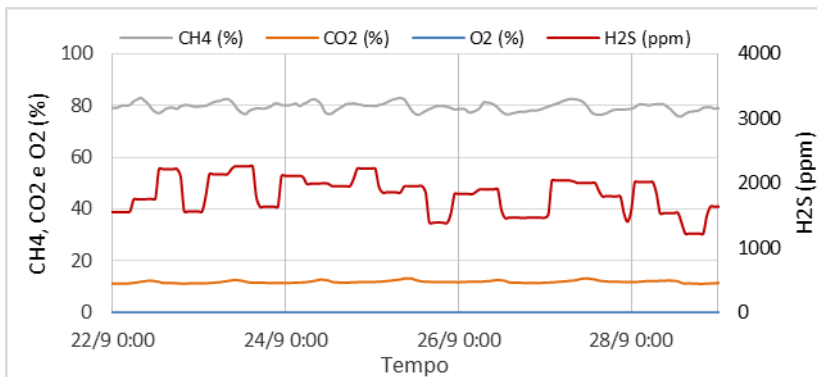
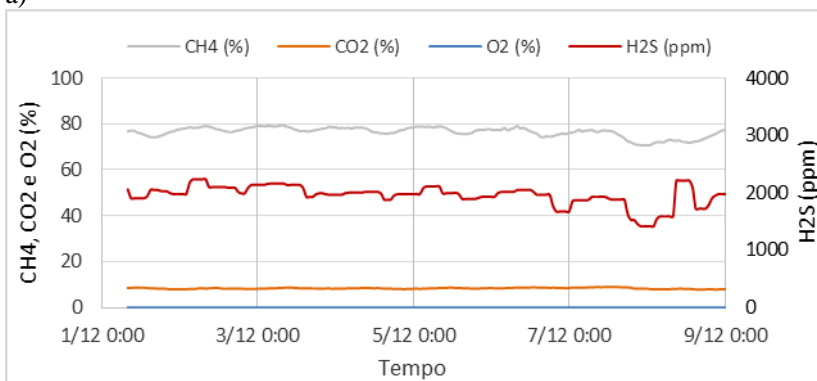


Figura 20 - Composição do biogás nas ETE I

Devido aos problemas com o desgaste da célula medidora de H₂S nas ETE F e J, a medição desse gás era realizada apenas quatro vezes ao dia. Porém, é possível observar que a ETE J também apresentou comportamento periódico similar a das ETE apresentadas acima.



a)



b)

Figura 21 - Composição do biogás nas ETE a) F e b) J

A ETE C, por outro lado, apresentou uma variação não periódica, com uma diferença pequena entre os valores mínimos e máximos (1.484,19 e 1.635,74 ppm, respectivamente). Com base nos dados monitorados e disponibilizados pela ETE, não foi possível encontrar o motivo deste comportamento diferenciado.

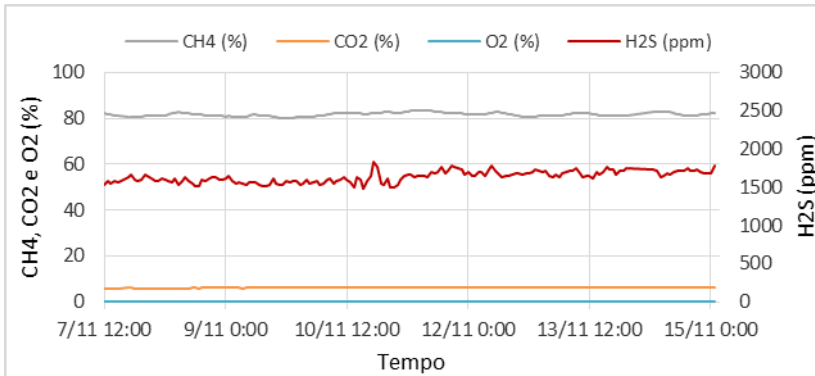


Figura 22- Composição do biogás na ETE C

5.2 INFLUÊNCIAS SOBRE O H₂S

A indisponibilidade de informações mais detalhadas, como a composição do esgoto bruto, momentos de descarga de efluente industrial, utilização de produtos químicos nas ETE, concentração de sulfato afluente ao UASB, dados de variação da temperatura e pluviométrica durante o dia nas estações, impossibilitaram a análise detalhada sobre fatores que podem vir a influenciar a produção de H₂S. Alguns dos resultados obtidos com relação a carga afluente, temperatura e vazão de metano são apresentados abaixo.

5.2.1 Sulfeto de hidrogênio e carga afluente

Para o cálculo da carga afluente, foi realizada a correção dos drifts apresentados no equipamento medidor de DQO, conforme discutido no item 4.2.1.

Porém, não foi possível realizar a análise de uma possível relação entre a variação da carga orgânica afluente com a produção de H₂S devido à pouca quantidade de dados disponíveis. Das seis estações analisadas, apenas duas apresentavam um período no qual os dados de DQO, vazão de esgoto e concentração de H₂S estivessem funcionando simultaneamente. Uma das ETE disponível foi a C, porém, devido ao seu comportamento diferenciado, além de não ter sido possível encontrar nenhuma relação entre os parâmetros, impossibilitou a comparação entre as duas ETE.

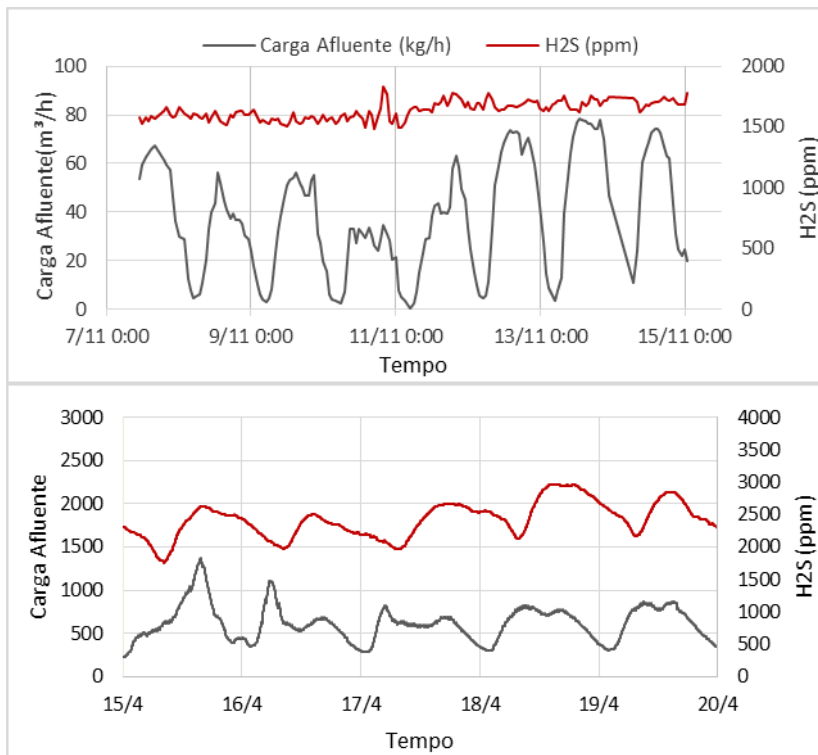


Figura 23 - Carga afluente e H₂S nas ETE C e D

5.2.2 Sulfeto de hidrogênio e fatores ambientais

Foi realizada uma análise com dados de pluviometria e temperatura ambiente, a fim de encontrar alguma relação entre esses parâmetros e a produção de H₂S. Para os dados disponíveis, não foi encontrada nenhuma relação com a pluviometria.

Já com a temperatura, encontrou-se uma possível influência desta na variação da concentração do sulfeto de hidrogênio, conforme pode ser observado na Figura 24. Percebe-se, em diversos períodos, que a temperatura e o sulfeto de hidrogênio variam de maneira similar. Porém, por falta de tempo hábil, não foi realizada uma análise estatística, impossibilitando de afirmar se tal relação realmente existe.

Entre os dias 20 e 21 de novembro, houve uma falha na medição do gás, resultando nos valores baixos medidos.

Uma leve influência da temperatura também pode ser observada na Figura 25. Nesta mesma figura, realizada com dados de média diária de vazão de metano, H_2S e temperatura do esgoto afluente ao UASB, tem-se que quanto maior a produção de metano no reator, maior a concentração de H_2S , ou seja, maior a quantidade de sulfeto retirada da fase líquida e liberada no biogás, conforme Chernicharo (2007).

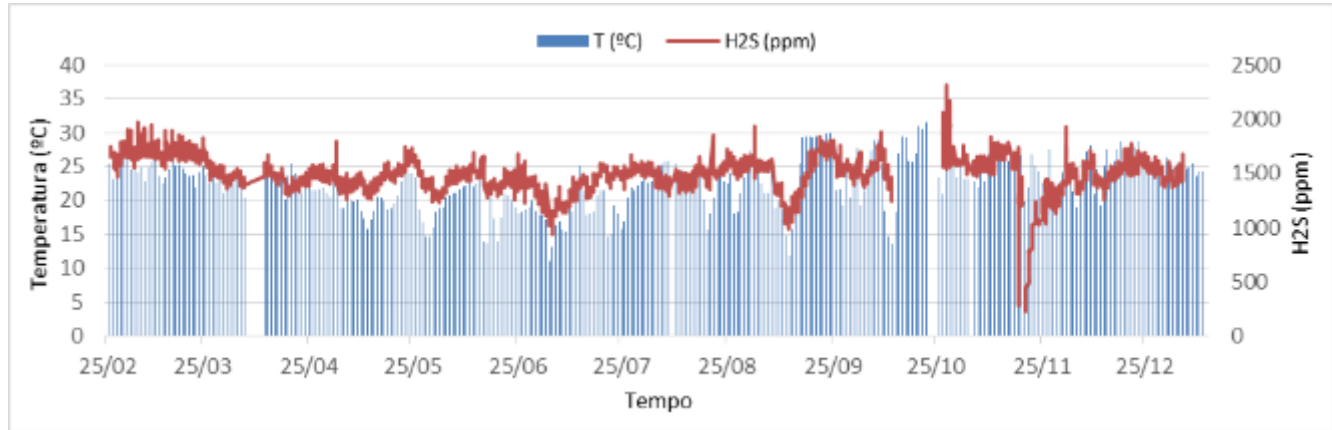


Figura 24 - Variação do sulfeto de hidrogênio e da temperatura ambiente na ETE C

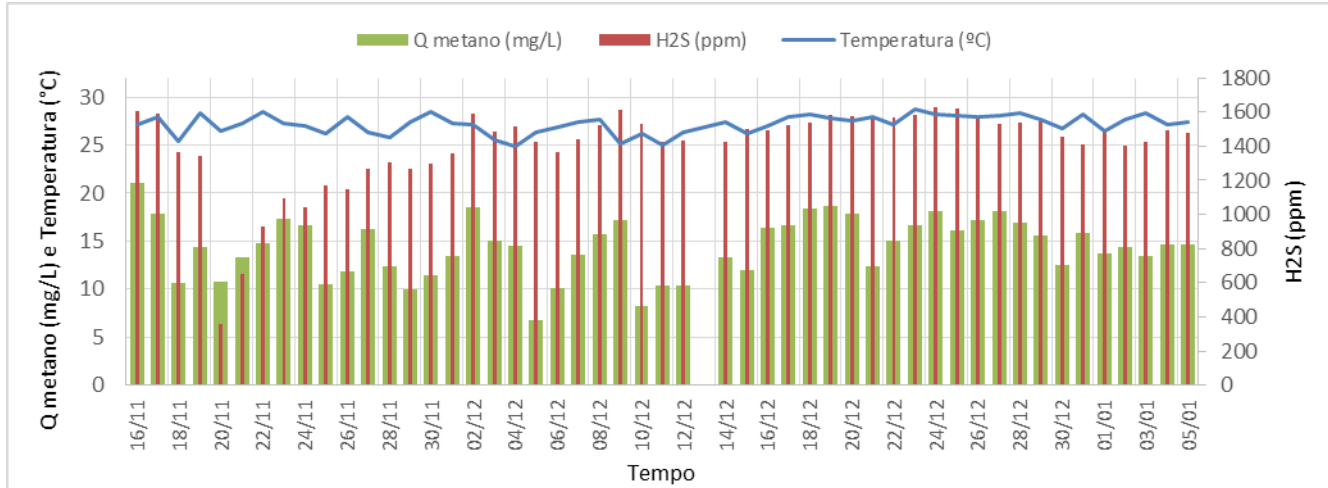


Figura 25 - Vazão de metano e H₂S na ETE C

5.3 TRATAMENTO DO BIOGÁS PARA USO ENERGÉTICO

Conforme o item anterior, o biogás gerado em reatores UASB apresenta uma concentração de H_2S superior à permitida pelos equipamentos de geração de energia elétrica. Desta forma, faz-se necessário o tratamento do mesmo.

Considerando o valor máximo atingido (3.162,39 ppm), e o valor requerido para uso em motores de combustão interna (menores que 130 ppm), o uso de óxidos de ferro, com utilização de ar, deve ser o suficiente para a dessulfurização do biogás gerado, visto que, conforme o item 3.5, é indicado para gás bruto com valores até 6.000 ppm e resulta em valores próximos a 20 ppm, quando bem dimensionado. De acordo com Silveira et al. (2015), a eliminação do H_2S se dá pela ligação do enxofre com o ferro em colunas de dessulfurização e a regeneração, com utilização de ar (2 a 3% de O_2). A eficiência desse tratamento depende de fatores como o tempo de detenção, a velocidade do fluxo e a concentração do sulfeto de hidrogênio no gás bruto.

Outra possível opção de tratamento seria a que está sendo aplicada na Bahia, em um projeto P&D da COELBA com a EMBASA. A remoção do sulfeto de hidrogênio é realizada através da microaeração (biodessulfurização) (ROSENFELDT et al, 2015). Essa tecnologia é eficiente e barata, sendo muito utilizada em plantas de biogás agrícolas. Através da injeção de ar, é realizada a oxidação biológica do H_2S à enxofre elementar e sulfato. A adição de ar deve ser monitorada de forma a não atingir limites que ofereçam risco de explosão (SILVEIRA et al, 2015). Mais informações sobre o projeto na Bahia podem ser encontradas em Rosenfeldt et. al. (2015).

Já para a utilização do biogás para fins que exijam uma remoção maior de sulfeto de hidrogênio, como por exemplo, conversão a biometano, pode ser necessário utilizar, ainda, tratamento por carvão ativado para o refinamento final.

5.4 ESTUDO DE CASO - DIMENSIONAMENTO DO MOTOR-GERADOR

Devido à confiabilidade no funcionamento e operação dos equipamentos medidores das ETE A, C e F, as mesmas foram utilizadas para ser realizado o estudo de concepção de um motor-gerador. Foi realizada, além disso, a comparação entre o valor teórico de vazão de biogás produzida e o medido durante o estudo.

Para a ETE A, foram utilizados como dados de entrada resultados de análises realizadas pela própria estação, durante o período de um ano (janeiro a dezembro de 2015), de vazão de esgoto, DQO afluente ao UASB e eficiência de remoção de DQO do UASB, visto que os resultados obtidos nas análises deste trabalho não compreendiam um período tão longo. Já os dados de entrada das ETE C e F foram disponibilizados pelas ETE, e são referentes ao ano de 2014. Os dados se encontram na tabela abaixo.

Tabela 12 – Dados de entrada das ETE analisadas

Parâmetro	ETE A	ETE C	ETE F
Vazão média do esgoto (L/s)	374	120	400
DQO afluente média (mg/L)	517	600	800
Eficiência média do UASB (%)	56	65	65

Fonte: O autor.

Foi realizada uma análise nos dados de vazão e composição do biogás para excluir períodos que apresentavam algum problema com esses parâmetros de forma a obter o maior período disponível de dados confiáveis. São apresentados abaixo os períodos analisados para cada ETE.

Tabela 13 - Período de análise da vazão e composição do biogás nas ETE

Parâmetro	ETE A	ETE C	ETE F
Porcentagem de metano no biogás	05/2015 a 02/2016	20/2015 a 01/2016	12/2014 a 11/2015
Vazão de biogás	09/2015 a 02/2016	04/2015 a 01/2016	08/2015 a 11/2015

Fonte: O autor.

Os resultados do dimensionamento estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultado do dimensionamento do motor-gerador nas ETE A, C e F

	ETE A	ETE C	ETE F
--	--------------	--------------	--------------

Carga DQO afluyente	16.706	6.220	27.648
Metano no biogás (%)	80	81	80
DQO _{CH₄} (kg DQO/d)	5.847	2.737	12.165
Q _{CH₄} (m ³ /d)	2.197	1.028	4.570
Vazão biogás total teórica (m ³ /d)	2.746	1.285	5.713
Perda (%)	40	40	40
Vazão biogás com perda teórica (m ³ /d)	1.647	771	3.428
Vazão biogás real (m ³ /d)	1.204	477	3.304
Potencia motor-gerador teórica (kW/d)	197	92	410
Potencia motor-gerador real (kW/d)	144	57	395

DQO_{CH₄} = Parcela de DQO convertida em gás metano; Q_{CH₄} = produção volumétrica de metano

Fonte: O autor.

Observa-se, em todas as estações, uma diferença no valor de vazão de biogás teórico e no medido durante o monitoramento. As ETE A e C apresentam uma diferença nos valores próxima a 30 e 40%, respectivamente, indicando uma possível perda maior do que 40% no o sistema. Já na ETE F, a diferença ficou próxima a 4%. Desta forma, destaca-se a importância de realizar um monitoramento do biogás produzido anteriormente ao dimensionamento do sistema de aproveitamento energético, além da manutenção adequada das estruturas dos reatores para diminuir os valores de perda.

Foi realizado o cálculo da carga afluyente ao UASB de cada ETE, conforme apresentado na *Tabela 14*, e é possível observar uma relação entre a carga orgânica e a vazão do biogás produzido. Quanto maior a carga tratada, maior a produção de biogás.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclusões:

O biogás medido nas estações apresentou uma boa qualidade para aproveitamento energético. A concentração média de metano em todas as ETE encontrou-se próxima à faixa superior encontrada na literatura, com valores entre 75 e 83%. Percebeu-se, para o H_2S , um comportamento temporalmente variável, com uma maior produção no período noturno, e valores variando entre 185,18 ppm (ETE I) a 3.162,39 ppm (ETE J) e um valor médio próximo a 2000 ppm.

A ETE C apresentou um comportamento diferenciado das demais ETE, com uma variação não periódica e uma pequena diferença entre as concentrações máximas e mínimas de H_2S . Porém, com os dados disponíveis, não foi possível encontrar o motivo deste comportamento.

Com relação às influências ambientais sobre a produção do sulfeto de hidrogênio, percebeu-se uma possível influência da temperatura, porém a mesma deve ser melhor analisada para que se possa chegar a uma conclusão definitiva. Foi ainda possível observar que quanto maior a produção de metano, maior a liberação do sulfeto de hidrogênio gasoso, conforme descrito por Chernicharo (2007).

Através do dimensionamento do motor-gerador em três estações, foi possível observar a importância do monitoramento do biogás gerado anteriormente a instalação do mesmo, visto que existe uma diferença entre o valor estimado e o medido de vazão de biogás. Para o valor estimado de perda de 40%, duas das três ETE analisadas apresentaram uma diferença próxima a 30% entre o estimado e o medido, sendo o estimado maior do que o medido. Isso pode indicar que a perda de biogás é ainda maior do que o valor estimado de 40%, o que mostra um grande problema nas estações. Percebe-se, também, a relação entre carga de DQO afluente ao UASB e a vazão de biogás gerado.

Recomendações para futuros trabalhos:

- Análise do motivo pelo qual o H_2S apresenta valores maiores no período noturno;
- Análise estatística sobre a influência da temperatura na produção de H_2S ;

- Análise da produção de H_2S analisando fatores como a concentração de sulfato afluente ao UASB, o pH do esgoto, dados de pluviometria, entre outros;
- Análise do comportamento diferenciado da ETE C;
- Realização de um estudo de caso em uma das estações de forma a acompanhar de maneira mais profunda fatores como a variação na composição do esgoto bruto, dosagem de produtos químicos, etc;
- Análise econômica para avaliar se é viável utilizar o biogás gerado nas ETE, analisando a energia produzida, o consumo de energia nas estações e o custo de tratamento do biogás com base em resultados de medições.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AD-NETT. **Anaerobic Digestion of Agro- Industrial Wastes: Information Networks. Technical Summary on Gas Treatment.** Netherlands, 2000.

AHAMMAD, S. Z.; GOMES, J.; SREEKRISHNAN, T. R.. **Wastewater treatment for production of H₂S-free biogas.** Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 83, 1163–1169. 2008.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos.** Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2000.

ATV. **Handbuch – Industrieabwasser Lebensmittelindustrie.** 4 Auflage. Ernst & Sohn, 2000.

BERGEY, DH; HOLT, JG; KRIEG, NR; SNEATH, PHA. **Bergey's Manual of Determinative Bacteriology**, 9th edn. Lippincott, Williams and Wilkins, Baltimore. 1993.

BISCHOFBERGER, W. DICHTL, N. ROSENWINKEL, K.H. SEYFRIED, C.F., BÖHNKE, B. **Anaerobtechnik.** 2 Auflage. Springer-Verlag, Berlin. 2005

BOON, A. G. **Septicity in sewers: causes, consequences and containment.** Water Sci.

BRASIL. **Plano Nacional de Saneamento Básico - PLANSAB.** Brasília, 2013.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2012.** Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014. 164 p.

CAMPOS, J.R. (Coord.). **Tratamento de esgotos Sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.** Projeto PROSAB. São Carlos, 1999.

CABRAL, B. G. C.; PLATZER, C. J.; ROSENFELDT, S.; HOFFMANN, H.; CHERNICHARO C.A.L. **Caracterização do biogás gerado no tratamento de efluentes domésticos em reatores UASB no Brasil**. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2.ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG. 380p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v.5), 2007.

CHERNICHARO, C.A.L. et al. **Alternativas para o controle de emissões odorantes em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico**. Nova Técnica, Belo Horizonte, p.229-236, set. 2010.

CRISTIANO, D. M. **Remoção de H₂S com óxido de ferro nanoestruturado para fins de purificação de biogás**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), UFSC. 2015.

COLTURATO, L., F., D., B. **Dessulfuração de Biogás da metanização da vinhaça: uma nova abordagem para remoção de altas concentrações de H₂S**. Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2015.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado do tratamento de esgoto**. São Paulo, 2006.

DWA-M 361. **Tratamento do Biogás**. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2011.

EMBRAPA. **Guia Clima**. Disponível em: <<http://www.cpao.embrapa.br/clima/>>. Acesso em: janeiro de 2016.

FNR. **Guia Prático do Biogás – Geração e Utilização**. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Leipzig, 2010.

FREIRE, R. S. F.; PELEGRINI, R.; KUBOTA, L. T.; DURÁN, N. **Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas**. Quím. Nova, v. 23, n. 4, 2012.

GLÓRIA, R.M. **Estudo dos processos de formação, acumulação, emissão e oxidação de sulfeto de hidrogênio em reatores UASB tratando esgotos domésticos**. Dissertação (Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Mestrado), UFMG, Belo Horizonte, 2009.

GOSTELOW, P.; PARSONS, S.A.; STUETZ, R.M. **Odour measurements for sewage treatment works**. Water Research, v. 35, n. 3, p. 579-597, 2001.

HAAS, L. B. **Desenvolvimento de um filtro para a remoção de H₂S de Biogás**. Cascavel, PR: UNIOESTE, 2013

HOENTZCH. Disponível em: <<http://www.hoentzsch.com/>>. Acesso em: maio de 2015.

HOLM-NIELSEN, J. B., AL SEADI, T. e OLESKOWICZ-POPIEL, P. **The future of anaerobic digestion and biogas utilization**. Bioresource Technology, 100, 5478-5484. 2009.

IEA. **Bioenergy Task 24: energy from biological conversion of organic waste**. Biogas upgrading and utilisation. International Energy Agency. 2000.

INMET. **BDMEP-Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em 20 de janeiro de 2016.

INSTITUTO TRATA BRASIL. CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Benefícios Econômicos da Expansão do Saneamento Brasileiro**. São Paulo. 2014. Disponível em: < <http://cebds.org/wp-content/uploads/2014/03/BeneficiosEconomicosdaexpans%C3%A3odoSaneamentoBrasileiro.pdf> >. Acesso em: 05 de janeiro de 2016.

KOPPE, P; STOZEK, A. **Kommunales Abwasser: Seine Inhaltsstoffe nach Herkunft, Zusammensetzung und Reaktionen im Kläranlagenprozeß einschließlich Klärschlämme**. 3 Aufl. Essen 1993.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico** – Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais UFMG. 2011

MOESTEDT, J., NILSSON PÅLEDAL, S., AND SCHNÜRER, A. **The effect of substrate and operational parameters on the abundance of sulphate-reducing bacteria in industrial anaerobic biogas digesters.** *Bioresour Technol* 132: 327– 332. 2013.

NOYOLA, A., ORGAN-SAGASTUME, J. M. e LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. **Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery.** *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 5 (1), 93–114. 2006.

PECORA, Vanessa. **Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás de Tratamento de Esgoto Residencial da USP – Estudo de Caso.** São Paulo, 2006.

PROSAB. **Esgoto.** Disponível em: < <http://www.finep.gov.br/Prosab/esgoto.htm> > Acesso em: 03 de outubro de 2014

ROSENFELDT, S.; CABRAL, C. B. G. ;PLATZER, C. J.; HOFFMANN, H.; ARAUJO, R.A. **Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE.** 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. **Techniques for transformation of biogas to biomethane.** *Biomass and Bioenergy.* 2011.

SAWYER, C.N., MCCARTY P.L., PARKIN, G.F. **Chemistry for Environmental Engineering and Science.** 5 th Edition, McGraw-Hill. 2003.

SCADAWEB. Disponível em: < <http://www.komvex-scada.com/site/#>>. Acesso em 2014 a 2016.

SCAN. Disponível em: <<http://www.s-can.at/>>. Acesso em: maio de 2015.

SILVA, A. B. **Avaliação da produção de odor na estação de tratamento de esgoto Paranoá e seus problemas associados.** Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM105/2007, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p. 2007.

SILVEIRA, B. et al. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto.** Brasília, DF. Ministério das Cidades, 2015. 183 p.

SINBUATHONG, N; KHAODHIAR, S.; LIENGCHARERNSIT, W.; SIRIROTE, P.; WATTS, D. **Effect of sulfate on the methanogenic activity of a bacterial culture from a brewery wastewater during glucose degradation.** J. Environ. Sci. p. 1025/1027. 2007.

SOUSA D.Z., ALVES J.I., ALVES M.M., SMIDT H., STAMS A.J.M. **Effect of sulfate on methanogenic communities that degrade unsaturated and saturated long-chain fatty acids (LCFA).** Environ Microbiol.2009;11:68–80.

SOUZA, C. L. **Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgotos domésticos em reatores UASB.** Tese de Doutorado. UFMG – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte – MG, 2010.

UNION INSTRUMENTS. Disponível em: <<http://www.union-instruments.com/index.php/en/>>. Acesso em: maio de 2015.

VANEGAS, C.e BARLETT, J. **Anaerobic Digestion of Laminaria digitata: The Effect of Temperature on Biogas Production and Composition.** Waste Biomass Valoris. 2013.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3a ed. Belo Horizonte: UFMG/DESA, 2005. 425 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.1).

WAISS, T.C.F. e POSSETI, G.R.C. **Influência de eventos de chuva na produção de biogás de reatores anaeróbios alimentados com esgoto doméstico.** In: Anais do 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.

ANEXO

DADOS DE TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA DA ETE C
DISPONIBILIZADOS PELA ETE

Data	Temperatura	Data	Temperatura
16/11/15	27,20	11/12/15	25,01
17/11/15	27,88	12/12/15	26,37
18/11/15	25,43	14/12/15	27,38
19/11/15	28,32	15/12/15	26,18
20/11/15	26,43	16/12/15	27,03
21/11/15	27,32	17/12/15	27,87
22/11/15	28,47	18/12/15	28,26
23/11/15	27,30	19/12/15	27,83
24/11/15	26,96	20/12/15	27,57
25/11/15	26,18	21/12/15	27,88
26/11/15	28,00	22/12/15	27,09
27/11/15	26,33	23/12/15	28,70
28/11/15	25,81	24/12/15	28,21
29/11/15	27,44	25/12/15	28,13
30/11/15	28,47	26/12/15	27,94
01/12/15	27,32	27/12/15	28,07
02/12/15	27,14	28/12/15	28,39
03/12/15	25,55	29/12/15	27,61
04/12/15	24,91	30/12/15	26,73
05/12/15	26,35	31/12/15	28,17
06/12/15	26,83	01/01/16	26,46
07/12/15	27,44	02/01/16	27,72
08/12/15	27,73	03/01/16	28,31
09/12/15	25,14	04/01/16	27,09
10/12/15	26,23	05/01/16	27,38