

CAROLINA BAYER GOMES CABRAL

**AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS PARA FINS
ENERGÉTICOS EM REATORES ANAERÓBIOS TRATANDO
ESGOTO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Programa de Mestrado, da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Belli Filho

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

**Florianópolis
2016**

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

Cabral, Carolina Bayer Gomes
AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS PARA FINS ENERGÉTICOS EM
REATORES ANAERÓBIOS TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO / Carolina
Bayer Gomes Cabral ; orientador, Paulo Belli Filho ;
coorientador, Carlos Augusto de Lemos Chernicharo. -
Florianópolis, SC, 2016.
139 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Biogás. 3. Reatores UASB em
escala real. 4. Tratamento anaeróbio. 5. Esgoto sanitário.
I. Belli Filho, Paulo. II. Chernicharo, Carlos Augusto de
Lemos . III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.



**“Avaliação da Produção de Biogás para Fins Energéticos em Reatores Anaeróbios
Tratando Esgoto Sanitário”**

CAROLINA BAYER GOMES CABRAL

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental.

Aprovado por:

Prof. Paulo Belli Filho, Dr.
(Orientador)

Prof. Maria Eliza Nagel Hassemer, Dr.

Prof. Pablo Heleno Sezerino, Dr.

Prof. Christoph Platzer, Dr.

Prof. Katt Regina Lapa, Dr.

Prof. William Gerson Matias, Dr.
(Coordenador)

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL
MAIO/2016

Aos meus pais, meus
maiores mestres,
Patrícia e Luiz Carlos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS/UFSC), pela minha formação como Engenheira e Mestre. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA/UFSC) e ao LABEFLU.

A todos os envolvidos no projeto PROBIOGÁS, dentre eles o Ministério das Cidades, a GIZ e todas as companhias de saneamento participantes do projeto de medições: Águas do Brasil, CAESB, COPASA, SAAE Itaboraí, SABESP, SANASA, SANEPAR, SANESUL e SeMAE Rio Preto.

Ao meu orientador, Prof. Paulo Belli Filho, por me orientar desde a graduação e acreditar no meu potencial e no do biogás.

Ao meu co-orientador, Prof. Carlos Chernicharo, que prontamente me atendeu e orientou, mesmo aos finais de semana, pelas correções e ensinamentos valiosos e exemplo de dedicação.

Aos membros da banca, por aceitarem meu convite prontamente e pelas considerações valiosas.

A minha família, especialmente meus pais, por todo o apoio, por serem um exemplo de dedicação e ética na engenharia e na vida e maiores entusiastas das minhas conquistas.

Ao Julio, por toda paciência e companheirismo e por me incentivar a cada dia a lutar pelo que acredito.

Ao Dudu, o primo que mostrou que esse caminho era possível com exemplo de foco e determinação.

A todos os meus amigos, especialmente aos que acompanharam mais de perto e entenderam a minha ausência em momentos importantes. Aos amigos de Stuttgart e do programa WASTE, onde comecei o mestrado, por me acolherem e por me apoiarem na hora de seguir outro caminho. Ao Torsten que me incentivou desde o início.

A equipe Rotária, com a qual eu aprendo todos os dias. Aos que contribuíram de forma especial para este trabalho: Daniel, pelo desenvolvimento e adaptação do programa que tornou possível o trabalho com esse imenso mundo de dados. Alice e a Luísa, que trabalharam com os dados e contribuíram para o projeto. Heike, pelo apoio, troca de ideias, relatórios e discussão do andamento do projeto. Sebastian, pela ajuda na discussão dos dados, por me apoiar e ensinar, e por seu otimismo alemão de cada dia. Ao Christoph, que tem sido um grande mestre, pelos ensinamentos, pela oportunidade, incentivo e pelo tempo disponibilizado para que eu pudesse executar esse trabalho.

RESUMO

O aproveitamento energético do biogás é uma maneira de minimizar as emissões de gases de efeito estufa, como o gás metano, e explorar uma fonte de energia renovável. A utilização do biogás gerado no tratamento de efluentes líquidos em reatores anaeróbios tipo UASB, se integra nessa proposta de boa prática em ETE. A melhoria na eficiência energética e aproveitamento de biogás em sistemas de tratamento com reator UASB dependem de um maior conhecimento sobre o comportamento da produção de biogás e de medidas no âmbito construtivo e operacional. Neste contexto, o objetivo geral desse estudo foi avaliar o potencial de geração de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tipo UASB/RALF em escala plena a partir de medições. Os objetivos específicos deste trabalho foram: a) Analisar em tempo real a vazão e composição do biogás; b) Estabelecer as relações unitárias de produção específica de biogás para cada ETE e correlacionando-as com as condições operacionais e ambientais; c) Estimar o potencial de geração de energia. Para atingir os objetivos propostos foram realizadas medições em seis estações de tratamento de esgoto durante doze meses através de medidores online das concentrações de DQO, das vazões de esgoto e de biogás, e da qualidade do biogás. Os resultados mostraram que para reatores UASB a concentração de metano média variou de 70 a 80%, CO₂ de 6 a 12% e de H₂S de 1300 a 2100 ppm, e que estas não sofreram grandes variações durante o ano. A vazão de biogás teve um comportamento periódico e variável de acordo com as diferentes condições operacionais, apresentando redução após eventos significativos de chuva. De maneira geral as relações unitárias de produção de biogás apresentaram valores inferiores ao esperado, indicando perdas de biogás. Os valores obtidos variaram de 81 a 142 NL de CH₄/kgDQOrem, com eficiências de remoção de DQO de 63 a 88%. Os reatores com boa vedação atingiram valores de produção específica de biogás de 17 l/hab.d, 89 l/m³ de esgoto e 179 l/kg DQOremovida. A geração de energia elétrica específica para esse caso foi de 17,8 kWh/hab.ano. As demais estações apresentaram valores inferiores devido a maiores perdas de biogás.

Palavras-chave: Biogás; Reatores UASB; esgotos sanitários, tratamento anaeróbio.

ABSTRACT

The energy recovery of biogas is way of minimizing the greenhouse gas emissions such as methane and explore a renewable energy source. The use of the biogas generated by wastewater anaerobic treatment in UASB reactors integrates in this proposal of good practices in WWTP. The energy efficiency improvement and the recovery of biogas in WWTP with UASB reactors depend of a better knowledge of the biogas production behavior and of constructional and operational measurements. The specific aims of this study were a) To quantify the biogas flow and composition; b) To establish unitary yields of specific biogas production for each WWTP, correlating them to the operational and environmental conditions; c) To estimate the energy potential of each WWTP analyzed. In order to achieve this goals, six wastewater treatment plants with UASB reactors were monitored during 12 months by online measurements of COD, wastewater and biogas flow, and biogas quality. The results showed that the average CH_4 concentration ranged from 70 to 80%, the CO_2 from 6 to 12% and the H_2S from 1300 to 2100 ppm, and didn't show much variation during the year. The biogas flow had a periodic and variable behavior according to the different operational conditions, decreasing after heavy rainfall. In general, the specific biogas production yields were lower than expected, indicating biogas losses. The values obtained ranged from 81 to 142 NL of $\text{CH}_4/\text{kgCOD}_{\text{removed}}$ and the COD removal efficiencies from 63 to 88%. The well sealed reactors achieved biogas production yields of 17 L/inhab.day, $89 \text{ L/m}^3_{\text{wastewater}}$ e $179 \text{ l/kg COD}_{\text{removed}}$. In this case, the unitary electrical energy potential was $17,8 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{inhab. year}$. The others WWTP presented lower values due to higher biogas losses.

Keywords: Biogas, UASB reactors, domestic wastewater, anaerobic treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Balanço esquemático de DQO nos sistemas anaeróbios e aeróbios.	31
Figura 2 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.	33
Figura 3 – Desenho esquemático UASB.....	37
Figura 4 - Tópicos de interesse para possíveis melhorias em reatores UASB.....	40
Figura 5 – Poder calorífico inferior por concentração de metano.	45
Figura 6 - Rotas de conversão de DQO e fluxos de metano em reatores UASB.....	47
Figura 7 – Validação do modelo a partir dos dados da ETE Laboreuax (Itabira – MG).....	50
Figura 8 – Curva de vazão de biogás em função do tempo para um intervalo de 30 dias. Em destaque as vazões de biogás para um intervalo de 4 dias.....	51
Figura 9 - Curva de vazão de biogás em função do tempo para um intervalo de 8 dias. Eventos de chuva ocorreram durante 2 dias (138 mm).	52
Figura 10 - Métodos de determinação do potencial de produção de energia química associado com o biogás oriundo de reatores UASB alimentados com esgoto doméstico.....	53
Figura 11 – Quantidade de energia disponível por ano (MWh/ano) inerente ao biogás produzido nos reatores UASB da ETE Atuba Sul, de acordo com resultados de medições e de estimativas por diferentes métodos disponíveis na literatura.	54
Figura 12 – Fluxograma das principais etapas da metodologia.....	56
Figura 13 – Exemplo das condições observadas em uma das ETE, com visível fuga de gás: a) Efluente no meio, onde todas as partes sem lodo são bolhas de escape de biogás, b) Defletores furados e deslocados.....	58
Figura 14 – Mapa com as ETE participantes no projeto de medição....	59
Figura 15 – Desenho esquemático da configuração geral dos medidores instalados nas ETE.....	61
Figura 16 – Ilustrações da sonda de medição de DQO.....	62
Figura 17 – Medidores de vazão de biogás.....	63

Figura 18 – Figura demonstrativa do princípio de medição do medidor de vazão de biogás	64
Figura 19 – Princípio de funcionamento dos Sensores: a) Infravermelho Não Dispersivo (medição de CO ₂ e CH ₄) b) Eletroquímicos (medição de H ₂ S e O ₂).....	65
Figura 20– Calibração dos sensores.....	66
Figura 21 – Detecção dos principais pontos de vazamento em reatores UASB: a) Detector de metano; b) Exemplo de desenho entregue com os pontos detectados.	67
Figura 22 - Parte do desenho de indicação de instalação da sonda de DQO, do quadro de análises da composição do gás, e do quadro de comando.....	68
Figura 23 – Parte do desenho de instalação do medidor de vazão de biogás e da coleta de amostra de biogás.....	69
Figura 24 – Medição da composição de biogás: a) Quadro de medição da Union; b) Tomada da amostra de gás.....	69
Figura 25 – Medição da vazão de biogás: a) Linha de gás com os medidores; b) Flange com medidor de pressão e temperatura; c) Medidor de vazão de biogás.....	70
Figura 26 – Medição da DQO - Sonda e seu controlador: a) Instalação dentro da casa de operação; b) Instalação ao ar livre com caixa de proteção.....	70
Figura 27 – Banco de dados online com monitoramento das 10 ETEs.	72
Figura 28 – Efeito da entrada de ar na tubulação de coleta devido a um procedimento operacional.....	75
Figura 29 – Exemplo de período com drift dos valores de DQO devido ao acúmulo de sujeira na sonda na ETE A.....	76
Figura 30 – Padrão de produção e consumo de biogás com alimentação e utilização contínua	78
Figura 31 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 12/09/2015 a 22/02/2016 na ETE A.....	80
Figura 32 – Médias horárias da composição do biogás de 12/09/2015 a 22/02/2015 na ETE A	81
Figura 33 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 30/04/2015 a 12/01/2016 na ETE C.....	82

Figura 34– Médias horárias da composição do biogás 26/02/2015 a 20/12/2015 na ETE C.....	82
Figura 35 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 06/11 a 01/12/2015 e 02/02/2016 a 27/03/2016 na ETE D.....	83
Figura 36 – Médias horárias da composição do biogás de 17/12/2015 a 22/02/2016 na ETE E.....	84
Figura 37 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 11/12/2014 a 18/11/2015 na ETE F.....	85
Figura 38 – Médias horárias da composição do biogás de 15/08/2015 a 18/11/2015 na ETE F.....	85
Figura 39 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 01/12/2015 a 22/02/2016 na ETE J.....	86
Figura 40 – Médias horárias da composição do biogás de 03/11/2015 a 10/02/2016 na ETE J.....	87
Figura 41 – Gráficos Box-Plot das Vazões de esgoto e biogás para as ETEs analisadas.....	88
Figura 42 – Gráficos Box-Plot da composição de biogás.....	90
Figura 43 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 01/10/2015 a 07/10/2015 na ETE A.....	92
Figura 44– Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 16/07/2015 a 22/07/2015 na ETE C.....	92
Figura 45– Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 06/11/2015 a 13/11/2015 na ETE D.....	93
Figura 46– Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 16/07/2015 a 23/07/2015 na ETE F.....	93
Figura 47 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 14/12/2015 a 21/12/2015 na ETE J.....	94
Figura 48 - Comportamento horário da produção média de biogás no período analisado para ETE A – Médias horárias.....	95
Figura 49 - Comportamento horário da produção média de biogás no período analisado para ETE C – Médias horárias.....	95
Figura 50- Comportamento horário da produção média de biogás no período analisado para ETE D– Médias horárias.....	96
Figura 51 - Comportamento horário da produção média de biogás no período analisado para ETE F– Médias horárias.....	96

Figura 52- Comportamento horário da produção média de biogás no período analisado para ETE J– Médias horárias	97
Figura 53 - Gráficos Box-plot das variáveis: a) Vazão de biogás, b) Carga removida, c) DQO afluente, d) Vazão de esgoto, e) temperatura. f) Gráfico de colunas de precipitação acumulada	99
Figura 54 – Pluviometria e temperatura do esgoto de 01/08 a 06/08 na estação C	101
Figura 55– Médias horárias da vazão de esgoto e concentração de DQO de 02/08 a 06/08/2015 na ETE C	102
Figura 56 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás e carga de DQOremovida na ETE C	102
Figura 57 - Pluviometria e temperatura do esgoto de 02/12 a 09/12 na estação C	103
Figura 58 - Médias horárias da vazão de esgoto e concentração de DQO de 02/12 a 08/12/2015 na ETE C	104
Figura 59 - Médias horárias da vazão de esgoto e biogás e carga de DQO removida de 02/12 a 08/12/2015 na ETE C	104
Figura 60 - Pluviometria e temperatura do esgoto de 08/12 a 14/12 na estação C	106
Figura 61 - Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 08/12 a 14/12/2015 na ETE C.....	106
Figura 62 - Gráficos de distribuição da vazão média diária de biogás com relação a vazão de esgoto para a) Mês de estiagem (agosto) b) Mês de chuva (dezembro).....	107
Figura 63 – Variação da relação vazão de esgoto por habitante	109
Figura 64– Box plot das relações unitárias obtidas e dos cenários do Modelo de Lobato	110
Figura 65– Infográfico com as informações a nível macro das relações unitárias obtidas	113
Figura 66 – Dendograma baseado na variável NL CH ₄ /kg DQO removida	114
Figura 67 – Produção média de biogás e consumo para aproveitamento contínuo para ETE A	116
Figura 68 – Produção média de biogás e consumo para aproveitamento contínuo para ETE C.....	116

Figura 69– Produção média de biogás e consumo para aproveitamento contínuo para ETE D.....	117
Figura 70 – Produção média de biogás e consumo para aproveitamento contínuo para ETE F	117
Figura 71– Produção média de biogás e consumo para aproveitamento contínuo para ETE J	118
Figura 72 - Medidas que provovem a melhoria da produção e coleta do biogás	121

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais publicações e suas contribuições nos últimos 10 anos	29
Quadro 2 - Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios	32
Quadro 3 - Resumo dos potenciais problemas e possíveis melhorias no projeto, construção e operação dos reatores UASB	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Desempenho de reatores anaeróbios instalados recentemente no mundo.....	38
Tabela 2 – Composições típicas do biogás.....	43
Tabela 3 - Relações unitárias de produção de metano, de biogás e de energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico	49
Tabela 4 – Relações unitárias da produção de metano, biogás e energia para a ETE Atuba Sul.....	52
Tabela 5 – Estações participantes do projeto de medição	59
Tabela 6 – Principais características das estações monitoradas	60
Tabela 7 – Métodos e faixa de medição para cada componente medido.....	65
Tabela 8 – Períodos de análise selecionados.....	73
Tabela 9 – Dados recebidos durante uma hora de medição da ETE C..	74
Tabela 10 – Estatística descritiva da vazão de esgoto e biogás para as estações monitoradas.....	88
Tabela 11 - Estatísticas descritivas dos dados de composição do biogás	89
Tabela 12 – Estatística descritiva dos parâmetros da ETE A.....	98
Tabela 13 – Matriz de correlações entre as variáveis*	100
Tabela 14 – Valores médios no período analisado.....	108
Tabela 15 – Relação unitária e classificação das ETEs monitoradas ..	114
Tabela 16 - Tabela comparativa dos dados obtidos para as ETEs monitoradas	115
Tabela 17 – Volume mínimo do gasômetro com relação a produção diária de biogás	118
Tabela 18 – Estimativas de geração de energia elétrica e da potência do motorizador para as ETE monitoradas	119
Tabela 19 – Potencial de emissões em tCO ₂ equivalentes	122
Tabela 20 - Relações unitárias obtidas para a ETE A em comparação com o modelo de Lobato (2011)	135
Tabela 21 - Relações unitárias obtidas para a ETE C em comparação com o modelo de Lobato (2011)	136
Tabela 22 - Relações unitárias obtidas para a ETE D em comparação com o modelo de Lobato (2011)	137

Tabela 23 - Relações unitárias obtidas para a ETE F em comparação com o modelo de Lobato (2011).....	138
Tabela 24- Relações unitárias obtidas para a ETE J em comparação com o modelo de Lobato (2011).....	139

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPEX	Despesas de capital ou investimento
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
ETE	Estação de tratamento de esgoto
GEE	Gases de efeito estufa
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
OPEX	Despesas operacionais
PCI	Poder calorífico inferior
RALF	Reator anaeróbio de leito fluidizado
ST	Sólidos totais
STV	Sólidos totais voláteis
TDH	Tempo de detenção hidráulica
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 OBJETIVOS.....	28
1.1.1 Objetivo Geral	28
1.1.2 Objetivos Específicos.....	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1 PROCESSO ANAERÓBIO.....	31
2.2 REATORES UASB NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO	36
2.3 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS	43
2.4 BALANÇO DE MASSA DE DQO.....	45
2.5 GERAÇÃO DE BIOGÁS	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1 PROCESSO DE SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES INTEGRANTES ..	57
3.1.1 Condições da ETE	57
3.1.2 Condições dos reatores anaeróbios.....	57
3.1.3 Condições para instalação da medição online.....	58
3.1.4 Principais características das estações monitoradas	60
3.2 QUANTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS	60
3.2.1 Medidor de Vazão de Esgoto.....	61
3.2.2 Medidor Online de Concentração de DQO.....	62
3.2.3 Medidor de Vazão de Biogás	63
<i>3.2.3.1 Medidor de pressão e de temperatura.....</i>	<i>64</i>
3.2.4 Analisador de Qualidade de Biogás	64
<i>3.2.4.1 Calibração do medidor de composição de biogás e detecção de vazamentos</i>	<i>66</i>
3.2.5 Instalação dos medidores.....	67
3.2.6 Transmissão e Análise dos dados	71
3.3 ESTABELECIMENTO DAS RELAÇÕES UNITÁRIAS.....	76
3.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA, DIMENSIONAMENTO DE GASÔMETRO E MOTOGERADOR.....	77

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1 QUANTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS.....	79
4.1.1 Séries históricas	79
4.1.1.1 ETE A.....	80
4.1.1.2 ETE C.....	81
4.1.1.3 ETE D.....	83
4.1.1.4 ETE E.....	84
4.1.1.5 ETE F.....	84
4.1.1.6 ETE J.....	86
4.1.2 Estatística descritiva dos dados de vazão de esgoto, biogás e composição.....	87
4.1.3 Análise do comportamento da produção horária de biogás... 91	91
4.1.4 Influência da carga orgânica, pluviometria e temperatura na produção de biogás	98
4.1.4.1 ETE A.....	98
4.1.4.2 ETE C.....	101
4.2 RELAÇÕES UNITÁRIAS.....	108
4.3 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE GÁS E DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA	115
4.3.1 Estimativa do volume de armazenamento de gás.....	116
4.3.2 Estimativa do potencial de geração de energia e potência do motogerador	119
5 CONCLUSÕES.....	123
6 RECOMENDAÇÕES.....	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
APÊNDICES A - Tabelas das Relações unitárias	135

1 INTRODUÇÃO

O baixo índice de tratamento de esgoto é um problema que atinge todas as regiões do país, sendo o índice médio de tratamento de 40,8% (BRASIL, 2016). Visando o aumento desse índice, o tratamento deve visar a maior eficiência de remoção da carga poluidora aliada a maior eficiência econômica. Neste contexto, os sistemas anaeróbios de tratamento são de grande aplicabilidade, particularmente os reatores de manta de lodo (reatores UASB) (CHERNICHARO, 2007). O emprego de plantas com reator UASB tem sido considerado um dos responsáveis por parte do aumento da cobertura de tratamento de esgoto na América Latina, considerando o fato de que os custos de uma planta de tratamento com reator UASB seguido por tratamento biológico aeróbio geralmente proporcionam economias de investimento (CAPEX) de 20 a 50% e operacionais (OPEX) acima de 50% em comparação com uma planta de lodo ativado convencional (CHERNICHARO et al., 2015).

O tratamento anaeróbio gera como subproduto o biogás, constituído em sua quase totalidade de metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), apresentando ainda traços de alguns outros elementos tais como CO , N_2 , NH_3 e H_2S . É fato que o aproveitamento energético do biogás oferece importantes benefícios ambientais, econômicos, energéticos e sociais, representando uma fonte alternativa e renovável de energia cada vez mais utilizada em todo o mundo.

No Brasil, a elevada população e sua concentração em grandes centros urbanos indicam um potencial significativo de produção de biogás no tratamento anaeróbio de esgotos (7,3 milhões de $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{dia}$ para o caso de 100% de esgoto tratado) (ZANETTE, 2009).

Entretanto, os reatores UASB ainda apresentam algumas limitações de projeto, construção e operação que devem ser solucionadas para que essa tecnologia não venha a ser desacreditada e a sua aplicação reduzida. Boa parte dos UASB no Brasil não possuem um queimador de gás em funcionamento contínuo, e alguns nem mesmo coleta de gás. Os reatores não foram dimensionados para uma coleta sistemática de biogás e assim as tampas no topo do reator muitas vezes não são bem vedadas, sendo pontos de fugas de gás para a atmosfera. Tendo em vista que o metano tem potencial de aquecimento 25 vezes maior que o CO_2 (IPCC, 2014), esse é um fator preocupante. Na busca pelo desenvolvimento de um sistema de tratamento autossuficiente, é de fundamental importância o gerenciamento integrado dos subprodutos gerados no processo - como o biogás - otimizando os seus benefícios e

minimizando os impactos. Para tanto, busca-se neste trabalho compreender o verdadeiro potencial combustível que se pode esperar destes reatores e formas para maximizá-lo e minimizar fugas de biogás ao ambiente.

Poucos estudos tratam da caracterização quantitativa e qualitativa do biogás para reatores UASB em escala real, principalmente alimentados com esgoto doméstico. Entretanto, recentes avanços tecnológicos desenvolveram ferramentas capazes de medir *in-loco* e em tempo real o biogás produzido, facilitando a realização dessas pesquisas.

Com esses equipamentos foram realizadas medições sistemáticas de biogás em 10 Estações de Tratamento de Esgotos distribuídas pelo país. A partir dos dados de quantidade e qualidade de biogás coletados, foi feita a análise estatística dos dados, relacionando a produção do gás com carga orgânica recebida, a influência do clima e temperatura, e por fim estimativas de geração de energia. A presente pesquisa integra-se a um projeto em andamento do Projeto Probiogás do Ministério das Cidades e da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, executada pela empresa consultora do projeto Rotária do Brasil, em convênio com a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de geração de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tipo UASB/RALF em escala plena a partir de medições.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar em tempo real a vazão e composição do biogás, em reatores em escala plena em relação com as diferentes cargas orgânicas, eficiências e parâmetros operacionais;
- Estabelecer relações unitárias de produção específica de biogás para diferentes estações de tratamento de esgoto sanitário em operação no Brasil, correlacionando-as com as condições operacionais e ambientais; e
- Estimar o potencial de geração de energia para cada caso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a construção de uma base teórica foi realizado um levantamento preliminar das pesquisas sobre o tratamento anaeróbico de efluentes e o potencial de geração de biogás. Entre as bases teóricas mais recentes que estruturaram essa pesquisa cabe destacar aqui os principais temas e autores em ordem cronológica (Quadro 1).

Quadro 1 - Principais publicações e suas contribuições nos últimos 10 anos

Autores (Ano):	Contribuição:
Noyola et al. (2006)	Aborda o tratamento do biogás produzido em reatores anaeróbios a partir de esgoto doméstico. Relevante por descrever tecnologias e aplicações para países em desenvolvimento que enfrentam problemas de infraestrutura similares ao Brasil, principalmente, no que tange saneamento. Aborda desde métodos biológicos e físico-químicos para controle de odor e recuperação de energia/recursos como meios para redução de custos operacionais.
Chernicharo (2007)	Descreve os reatores anaeróbios e relaciona remoção de matéria orgânica (DQO) com o metabolismo anaeróbico e produção de biogás. Por fim, aborda requisitos nutricionais dos organismos anaeróbios e o funcionamento dos reatores anaeróbios.
Campello (2009)	Avalia o desempenho de reatores UASB operando sob condições de temperaturas típicas de regiões de clima temperado. Os resultados de laboratório indicaram que houve influência da temperatura na eficiência da remoção de matéria orgânica, porém não causou uma queda significativa. Em paralelo, acompanhou também um reator em escala real, operando na cidade de Caxias do Sul. Para esse reator as remoções de DQO não seguiram um padrão compatível com a temperatura. Sendo que, as dos meses de verão foram inferiores as dos meses de inverno, contrariando o que foi observado em laboratório. As variações observadas na eficiência do reator em escala real se devem a outras variáveis que desempenharam papel mais importante do que a temperatura.
Souza (2010)	Avalia os processos de formação, movimentação, desprendimento e consumo de metano e sulfeto de hidrogênio, resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB. Apresenta experimentos desenvolvidos em quatro reatores UASB, sendo três em escala piloto (340 L) e um em escala de demonstração (14 m ³). Avalia o metano e sulfeto dissolvidos na fase líquida, metano e sulfeto na fase gasosa, dentre outros.
Lobato (2011)	Avalia alternativas para o aproveitamento energético do biogás gerado em reatores UASB de esgoto doméstico. Apresenta um modelo matemático para estimar a parcela de DQO recuperada como metano no biogás, incluindo rotas de conversão e perdas no reator. Avalia as alternativas de recuperação de energia do biogás gerado em reatores UASB, com ênfase na cogeração de energia elétrica e térmica e na secagem térmica e higienização do lodo.
Donoso-bravo et al. (2013)	Apresenta um modelo matemático de reator UASB baseado em temperatura. Para isso, realiza pesquisa no laboratório e com um modelo em escala tratando o esgoto doméstico em temperatura ambiente.
Possetti, et al. (2013)	Apresenta resultados das medições de vazão, teor de metano, temperatura e pressão do biogás de 4 reatores UASB de grande porte da ETE Atuba Sul (Curitiba – PR) alimentados com esgoto doméstico. Essas medições foram

	realizadas durante 6 meses.
Silva, Possetti, e Coelho (2014)	Apresenta a avaliação de diferentes métodos de determinação das taxas de produção de biogás em reatores anaeróbios com o intuito de identificar a ferramenta mais apropriada para o planejamento de ações voltadas à geração de energia renovável em estações de tratamento de esgotos. Tal avaliação foi realizada a partir dos dados de medição de uma planta de grande porte localizada em Curitiba-PR (ETE Atuba Sul).
Silveira et al. (2015)	O Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto contempla diretrizes para a concepção e para a elaboração de projetos de aproveitamento energético de biogás em ETE no Brasil. O documento aborda desde a origem do biogás e suas características, os processos anaeróbios de tratamento de esgoto e lodo, equipamentos de uma planta de biogás e os potenciais usos do biogás de ETE.
Chernicharo et al. (2015)	Apresenta uma revisão de literatura com foco nos critérios atuais de projeto e opções de pós-tratamento, discutindo a abordagem centralizada e descentralizada. Aborda e discute as limitações de temperatura, nutrientes, remoção de patógenos, restrições operacionais e emissões de metano. Além disso, discute os desafios recentes relacionados ao aproveitamento energético do biogás, ao lodo e a escuma, considerando os avanços relacionados a recuperação do metano dissolvido e estão de lodo.
Khan, Mehrotra e Kazmi (2015)	Avalia o desempenho do processo de tratamento de águas residuárias na Índia utilizando reatores UASB piloto em escala, 60 litros. Quanto aos resultados, relata que a DQO de entrada foi convertida, principalmente em metano (44 e 55%) e a biomassa (1,5 e 2%). A DQO consumida na redução de sulfatos foi 1 e 3% e DQO efluente foi 18 e 45% da DQO afluente. No entanto, de quantificação de gás metano recuperado e perdido com UASB efluente não pode ser alcançado devido à má coleta de biogás e vazamentos.
Rosenfeldt et al. (2015)	Apresenta a viabilidade econômica da instalação de uma unidade de cogeração de energia (CHP de 200kW) a partir do biogás produzido em reator UASB para uma ETE de 100.000 hab. Quantificou o potencial teórico da geração de energia e levantou os custos CAPEX e OPEX. Os dados estão baseados em um projeto P&D que está em fase de implantação em Feira de Santana/BA. O valor referente aos custos evitados relacionados ao menor consumo de energia elétrica, proporcionado por meio de aproveitamento do biogás gerado na própria ETE, superou o somatório de custos de investimento e operação, indicando a viabilidade do empreendimento.
Silva (2015)	Realizou um levantamento das taxas de produção de biogás em uma ETE de grande porte (ETE Atuba Sul), contendo 16 reatores UASB. Os resultados apontam para uma grande variação na vazão de biogás na ETE, sendo influenciadas negativamente por eventos de chuva. Além disso, comparando com as vazões estimadas por modelos a vazão medida foi até 10 vezes menor.
Waiss e Possetti (2015)	Apresentaram a quantificação da influência de chuva nas taxas de produção de biogás na ETE Atuba Sul. A vazão de biogás apresentou um coeficiente de variação de 31,6%. Verificaram que a medida que as precipitações tornam-se mais intensas (acima de 10mm) havia uma tendência de redução das vazões de biogás. Estimaram que os eventos de chuva diminuiriam a vazão média anual de biogás em 3,5%.

Fonte: Autora (2016).

2.1 PROCESSO ANAERÓBIO

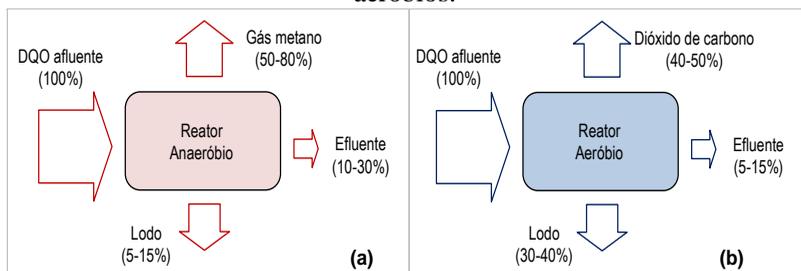
Nos sistemas anaeróbios, verifica-se que a maior parte do material orgânico biodegradável presente no despejo é convertida em metano (cerca de 50 a 70%), que é removido da fase líquida e deixa o reator na forma gasosa. Apenas uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (cerca de 5 a 15%), vindo a se constituir no lodo excedente do sistema (CHERNICHARO, 2007).

Além da pequena quantidade produzida, o lodo excedente apresenta-se, via de regra, mais concentrado e com melhores características de desidratação. O material não convertido em biogás, ou em biomassa, deixa o reator como material não degradado (10 a 30%) (CHERNICHARO, 2007).

Já nos sistemas aeróbios, ocorre somente cerca de 40 a 50% de degradação biológica, com a conseqüente conversão em CO_2 . Verifica-se uma enorme incorporação de matéria orgânica, como biomassa microbiana (cerca de 30 a 40%), que vem a se constituir no lodo excedente do sistema. O material orgânico não convertido em gás carbônico, ou em biomassa, deixa o reator como material não degradado (5 a 15%).

A Figura 1 apresenta as rotas de conversão de matéria orgânica no sistema anaeróbio e no sistema aeróbio, o sistema anaeróbio apresenta vantagens notadamente no que se refere à produção de gás metano e à baixíssima produção de sólidos.

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



Fonte: Chernicharo (2007).

Uma descrição mais detalhada das vantagens e desvantagens do processo anaeróbio está apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Baixa produção de sólidos, cerca de 2 a 8 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios; - Baixo consumo de energia, usualmente associado a uma elevatória de chegada, fazendo com que tenham custos operacionais muito baixos; - Baixa demanda de área; - Baixos custos de implementação, na ordem de 20 a 30 dólares <i>per capita</i>; - Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico; - Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses; - Tolerância a elevadas cargas orgânicas; - Aplicabilidade em pequena e grande escala. 	<ul style="list-style-type: none"> - Remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória; - Produção de efluente com aspecto desagradável e usualmente com qualidade insuficiente para atender os padrões ambientais. Em decorrência, alguma forma de pós-tratamento é normalmente necessária; - Possibilidade de distúrbios devido a choques de carga orgânica e hidráulica, presença de compostos tóxicos ou ausência de nutrientes; - A partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de semente adaptado; - A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas; - Possibilidade de geração de maus odores e de problemas de corrosão, porém controláveis.

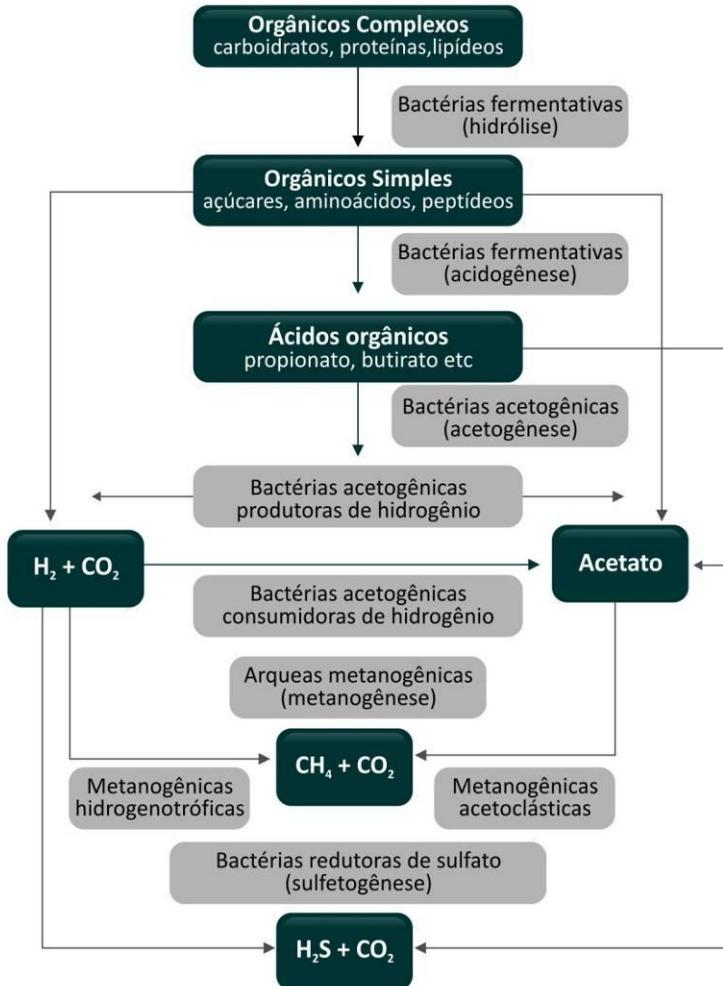
Fonte: adaptado de Chernicharo (2007).

Uma vez que nenhum grupo de microrganismos apresenta condições de transformar diretamente matéria orgânica complexa nos produtos finais do processo anaeróbio, a digestão anaeróbia só se completa pela atuação de vários grupos de microrganismos, ocorrendo à transformação sequencial do substrato.

Na digestão anaeróbia, diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico, amônia, e novas células bacterianas. Para que os processos metabólicos da digestão anaeróbia ocorram é necessária a atividade conjunta de ao menos três grupos de microrganismos distintos: as bactérias fermentativas ou acidogênicas, as bactérias sintróficas acetogênicas e os microrganismos metanogênicos.

Estes grupos microbianos e os processos metabólicos podem ser visualizados na Figura 2.

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



Fonte: adaptado de Lettinga et al. (1996) apud Chernicharo (2007).

As principais etapas envolvidas no processo de digestão anaeróbia são:

1. Hidrólise

Nesta etapa o material orgânico particulado é convertido em compostos solúveis mais simples que serão utilizados pelas bactérias que realizam a fermentação (METCALF; EDDY, 2003).

A hidrólise é a etapa de degradação da matéria orgânica insolúvel e com componentes de alto peso molecular como lipídios, polissacarídeos e ácidos nucleicos em substâncias orgânicas solúveis, como os aminoácidos e ácidos graxos.

2. Acidogênese

Os produtos solúveis da primeira etapa (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos) são fermentados pelos microorganismos acidogênicos em ácidos orgânicos (principalmente acético, butírico e propiônico), alcoóis e compostos minerais (CO_2 , H_2 , NH_3 , H_2S) (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

3. Acetogênese

Os microrganismos acetogênicos convertem compostos orgânicos intermediários, como propionato e butirato, em substratos apropriados para os microrganismos metanogênicos, como acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. É etapa reguladora no processo de digestão anaeróbia, pois 60 a 70% dos elétrons do substrato original são canalizados para a produção de acetato. Em decorrência, a remoção de DQO da fase líquida depende da conversão de acetato em metano, o que é feito pelos microrganismos metanogênicos acetoclásticos. (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

4. Metanogênese

É a última etapa da digestão anaeróbia, na qual ocorre a conversão do acetato e do hidrogênio produzidos nas etapas anteriores em biogás (CH_4 , CO_2 e outros gases) pelas arqueas metanogênicas. Em função de sua fisiologia, as arqueas metanogênicas são divididas em dois grupos principais: i) metanogênicas acetoclásticas e ii) metanogênicas hidrogenotróficas (CHERNICHARO, 2007).

- Metanogênicos acetoclásticos: transformam acetato em CH_4 e CO_2 ;

- Metanogênicos hidrogenotróficos: utilizam H_2 como doador de elétrons e CO_2 como acceptor de elétrons para produção de metano.

Como em todos os processos biológicos, a constância das condições de vida é importante. A mudança de temperatura ou alterações nos substratos ou na concentração de substrato pode levar à paralisação da produção de gás. Esta pode durar até três ou mais semanas, até que o sistema ecológico fique adaptado às novas condições e inicie a produção de biogás novamente sem qualquer intervenção externa.

Os processos de metabolismo microbiano são dependentes de vários parâmetros como temperatura, pH, potencial redox, entre outros. Então, para um processo ideal de fermentação, esses parâmetros devem ser levados em consideração. Além disso, os requisitos ambientais das bactérias fermentativas, pela qual a hidrólise e a acidificação dos substratos ocorrem, diferem dos requisitos dos microorganismos produtores de metano (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

Essas etapas devem ser mantidas em equilíbrio dinâmico para que a metanogênese ocorra à taxa máxima. A manutenção desse equilíbrio está relacionada à natureza do substrato e à intensidade e disponibilidade de H_2 . Essa condição é fundamental para que a fermentação metanogênica prevaleça, sendo H_2 e ácido acético, os mais importantes, responsáveis por aproximadamente 70% do gás metano gerado em reatores anaeróbios (CASSINI, 2003).

Muitos dos compostos intermediários formados durante o processo de digestão anaeróbia passam a ser utilizados pelas Bactérias Redutoras de Sulfato, provocando uma competição delas com as bactérias fermentativas, acetogênicas e metanogênicas, pelos substratos disponíveis. Devido a essa competição dois produtos finais passam a ser formados: metano (através da metanogênese) e sulfeto (através da sulfetogênese), sendo a concentração de sulfato que define qual o processo é predominante. Assim sendo, o excesso de sulfatos pode prejudicar a produção de metano, e a sulfetogênese é, portanto, indesejável neste processo (CHERNICHARO, 2007).

As estações de tratamento de esgoto estão sujeitas a variações de parâmetros que afetam ou definem o desempenho do reator. Algumas dessas variações podem ser previstas e controladas, sendo que o reator pode ser projetado para acomodá-las. Mas para outras variáveis o desempenho do reator pode decair drasticamente, principalmente com

variações repentinas e elevadas na vazão e concentração do esgoto (LEITÃO et al., 2006).

Dois fatores importantes que determinam a susceptibilidade do tratamento anaeróbio à limitações são o tipo de reator e a concentração do esgoto. O tipo de reator influencia a retenção e estratificação da biomassa, características que determinam limitações de ordem cinética e termodinâmica. Já a concentração do esgoto tem influência, principalmente, sobre o regime hidráulico predominante, que, por sua vez, determina limitações de ordem termodinâmica e de transferência de massa (AQUINO; CHERNICHARO, 2005).

Do ponto de vista de uma estação de tratamento alimentada com esgotos domésticos, tipicamente diluídos, a probabilidade de ocorrência de choques de carga orgânica é reduzida. Nesses casos, é provável que distúrbios temporários sejam causados por choques hidráulicos ou ausência das condições ideais de crescimento microbiano. Entretanto, choques de carga orgânica poderiam ocorrer nessas estações de tratamento, se efluentes industriais com elevada carga de matéria orgânica fossem lançados na rede coletora. A ocorrência de tal situação é mais provável em comunidades de pequeno porte onde há indústrias, como laticínios, curtumes e matadouros, que geram efluentes com elevada carga de DBO (AQUINO; CHERNICHARO, 2005).

O impacto de um choque hidráulico é relacionado à limitação cinética dos microrganismos metanogênicos e ao arraste da biomassa. O restabelecimento do equilíbrio, pós-choque hidráulico, depende do aumento da quantidade de biomassa no sistema de tratamento, uma vez que a taxa de conversão de intermediários e a taxa de crescimento dos microrganismos são relativamente pequenas (AQUINO; CHERNICHARO, 2005).

2.2 REATORES UASB NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO

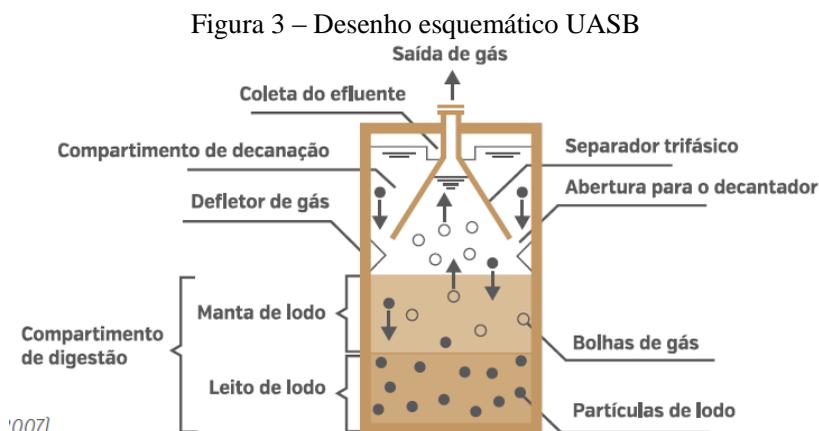
Os reatores UASB são unidades de tratamento anaeróbio que se prestam fundamentalmente à remoção de matéria orgânica carbonácea em suspensão ou dissolvida nas águas residuárias.

O perfil do reator caracteriza-se por uma distribuição do lodo biológico variando de muito denso e com boas condições de sedimentação, próximas ao fundo - leito de lodo, até uma zona de crescimento bacteriano mais disperso (lodo menos concentrado) e com piores condições de sedimentação denominada manta de lodo. A

estabilização da matéria orgânica ocorre em todo o compartimento de digestão (leito e manta de lodo), sendo a mistura do sistema promovida pelo fluxo ascensional do esgoto e das bolhas de gás.

Com o movimento ascensional das bolhas de gás, ocorre o carreamento de lodo, sendo necessária a instalação de um separador trifásico (gases, sólidos e líquidos) na parte superior do reator, de forma a permitir a retenção e o retorno do lodo. No entorno e acima do separador trifásico configura-se o compartimento de decantação, onde o lodo mais pesado é removido da massa líquida e retornado ao compartimento de digestão, enquanto as partículas mais leves são perdidas junto ao efluente final. As bolhas de gás que se formam no compartimento de digestão sobem na fase líquida até encontrarem uma interface líquido-gás, presente abaixo do separador trifásico. Nessa interface as bolhas se desprendem, formando uma fase gasosa. Tal atmosfera apresenta fluxo de saída por meio de tubulações, as quais devem conduzir o biogás a algum tipo de tratamento e/ou aproveitamento. As bolhas de gás que se formam verticalmente abaixo das aberturas do separador trifásico precisam ser desviadas para evitar que passem pelas mesmas aberturas, criando turbulências no compartimento de decantação. Para tanto se colocam obstáculos que funcionam como defletores de gás abaixo das aberturas (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

A Figura 3 apresenta um desenho esquemático do reator UASB com as suas partes constituintes.



'007].

Fonte: Chernicharo (2007).

Depois do UASB convencional ter sido desenvolvido nos anos setenta por Lettinga e seu grupo na Holanda, algumas versões modificadas desses reatores foram propostas, como, por exemplo o “UASB sem compartimento de decantação”, mais conhecido atualmente como RALF – Reator anaeróbico de leiteo fluidizado. Esses reatores se tornaram comuns no Paraná, porém no Brasil o UASB convencional é o mais utilizado (VAN HAANDEL et al., 2006).

O reator UASB tem sido considerado um dos melhores processos de tratamento desenvolvidos até agora (AIYUK et al., 2006), e responsável por parte do aumento da cobertura de tratamento de esgoto na América Latina, considerando o fato de que os custos de uma planta de tratamento com reator UASB seguido por tratamento biológico aeróbico geralmente proporcionam economias de custos de investimento (CAPEX) de 20 a 50% e operacionais (OPEX) acima de 50% em comparação com uma planta de lodo ativado convencional (CHERNICHARO et al., 2015).

Quanto a eficiência de tratamento, Chernicharo et al. (2015) compilaram os recentes dados de literatura sobre o desempenho de estações de tratamento de esgoto sanitário empregando reatores UASB, estes estão apresentados na Tabela 1.

Como se pode observar na Tabela 1 os reatores UASB podem apresentar eficiências de remoção de DQO de até 80%, mesmo para esgotos mais diluídos (menor concentração de DQO), como é o caso dos esgotos domésticos. Porém, apesar do bom desempenho em grande parte das estações, os reatores UASB ainda apresentam algumas limitações, não completamente solucionadas até o momento. Lobato (2011) agrupou de acordo com a experiência brasileira, as melhorias possíveis a respeito do projeto e operação dos reatores UASB tratando esgoto doméstico. Essas são relatadas nos tópicos apresentados na

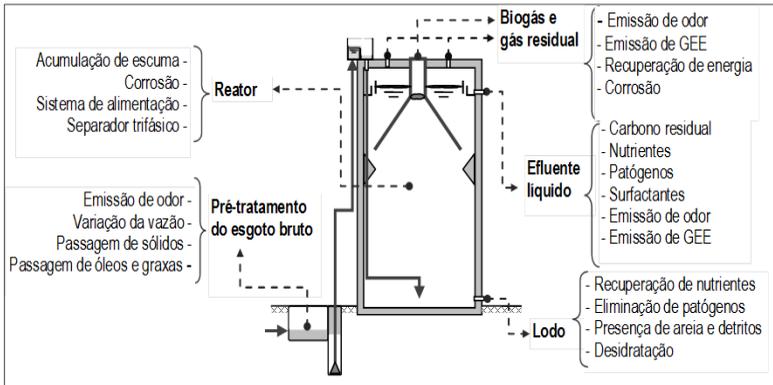
Figura 4, que foram agrupados em: pré-tratamento e bombeamento; biogás e gás residual; efluente líquido; lodo e o próprio reator.

Tabela 1 – Desempenho de reatores anaeróbios instalados recentemente no mundo.

Local	ETE	Concentração de Efluente		Eficiência de Remoção		PE (hab.)	Referência
		DQO mg/l	DBO mg/l	DQO (%)	DBO (%)		
Índia	UASB	202	60	63	67	93.500	Pandey e Dubey (2014)
Índia	UASB	139-567	57-159	29-75	45-79	-	Khan et al. (2014)
Brasil	TS+FAAn	473	-	39	-	2.141	Silva et al. (2013)
Brasil	UASB	283	-	58	-	3.047	Silva et al. (2013)
Brasil	UASB	114	38	79	84	70.000	Rosa et al. (2012)
Brasil	UASB	251	98	65	74	24.000	Oliveira e 39on Sperling (2011)
Índia	UASB	515	115	41	50	-	Mungray e Patel (2011)
Índia	UASB	405	153	44	40	-	Mungray e Patel (2011)
Índia	UASB	145-250	55-75	45	60	-	Walia et al. (2011)
Colombia	UASB	-	60	-	77	320.00	WERF (2010)
Brasil	UASB	170	66	58	68	544.000	Franco (2010)
Brasil	UASB	247	97	62	67	-	Van Lier et al. (2010)
Índia	UASB	285	121	46	41	-	Van Lier et al. (2010)
Brasil	UASB	190	70	60	65	1.000.000	Chernicharo et al. (2009)
Colombia	UASB	144	-	58	-	-	Peña et al. (2006)
Brasil	UASB	181	75	64	74	24.719	Baré e Alem Sobrinho (2006)
Brasil	UASB	106	69	72	72	150.000	Carraro (2006)
Brasil	UASB	161	66	77	78	-	Tachini et al. (2006)
Índia	UASB	403	130	47	50	55.000-570.000	Sato et al. (2006)
Oriente Médio	UASB	221	83	71	70	-	Nada et al. (2006)
Índia	UASB	-	-	61	61	-	Khalil et al. (2006)
Jordânia	UASB	632	-	58	-	-	Halalseh et al. (2005)
Brasil	UASB	237	64	60	69	3.808	Busato (2004)
Brasil	UASB	202	-	67	-	18.000	Florencio et al. (2001)
Colombia	UASB	177	69	66	78	9.000	Peña et al. (2000)
México	UASB	-	-	70-80	-	-	Monroy et al. (2000)

Fonte: adaptado de Chernicharo et al. (2015).

Figura 4 - Tópicos de interesse para possíveis melhorias em reatores UASB



Fonte: Chernicharo e Stuetz (2008 apud LOBATO, 2011).

Já o Quadro 3 apresenta os potenciais problemas relacionados aos tópicos apresentados na figura anterior e as possíveis melhorias no projeto, construção e operação dos reatores UASB.

Quadro 3 - Resumo dos potenciais problemas e possíveis melhorias no projeto, construção e operação dos reatores UASB

Constituintes de interesse	Problemas potenciais	Possíveis melhorias
Biogás	H ₂ S Corrosão Toxicidade	Queima do biogás Tratamento do biogás
	CH ₄ Emissão de GEE Risco de explosão	Recuperação de energia
Gás residual	H ₂ S Corrosão Toxicidade	Coleta do gás residual Tratamento do gás residual
	CH ₄ Emissão de GEE	
	Carbono Depleção de OD	Pós-tratamento
Nutrientes	Eutroficação Toxicidade	Reúso na agricultura Pós-tratamento
	Patógenos	Riscos a saúde Irrigação sub-superficial Recarga de aquífero
Efluente	Surfactantes Espuma	Pós-tratamento aeróbio Redução de turbulências
	H ₂ S dissolvido Corrosão	Pós-tratamento aeróbio Stripping gás / tratamento
	CH ₄ dissolvido Emissão de GEE	Micro-aeração usando biogás Stripping gás / tratamento
		Micro-aeração usando biogás Oxidação biológica
Escuma	Orgânicos Detritos	Bloqueio Gerenciamento
	Orgânicos Detritos	Bloqueio Gerenciamento
Separador trifásico		Melhorias no pré-tratamento Eliminação baffle Manutenção baffle
		Melhorias no pré-tratamento Remoção disposição Aumento da degradação
Sistema de alimentação		Vazamento de gás Falha na estrutura Corrosão
		Uso de materiais adequados Uso de revestimentos adequados Melhorias no projeto
Lodo		Bloqueio Mistura deficiente
	Nutrientes Patógenos Areia Detritos	Acúmulo de lodo Riscos à saúde Desidratação
Cobertura		Melhorias no projeto Melhorias na operação Melhorias no pré-tratamento Higienização
		Uso de materiais adequados Uso de revestimentos adequados
Pré-tratamento e bombeamento		Coleta do gás residual Tratamento do gás residual Uso de peneiras
	H ₂ S dissolvido	Remoção de óleos e graxas Controle de ligações clandestinas
		Mínimo de duas bombas Uso de bomba de velocidade variável
		Estrutura de extravasamento Uso de tanque de equalização

Fonte: Chernicharo e Stuetz (2008 apud LOBATO, 2011).

Os tópicos apresentados acima merecem atenção, pois apontam para problemas enfrentados em diversas companhias de saneamento que possuem reatores UASB. Esses aspectos foram descritos por Miki (2010) e mais recentemente no guia técnico de aproveitamento de biogás

em estações de tratamento de esgoto (SILVEIRA et al., 2015), com destaque para a necessidade de um pré-tratamento eficiente com remoção de sólidos e gordura, através de mecanismos como peneiras com aberturas menores 3 mm e caixas de areia aeradas.

A remoção deficiente dos resíduos sólidos pode ocasionar em obstruções nas tubulações de distribuição de fluxo interna dos reatores anaeróbios, criando fluxos preferenciais e/ou zonas mortas, que interferem significativamente na eficiência dos reatores UASB assim como na produção do biogás.

Além disso, os problemas operacionais ocorridos da remoção insuficiente de gordura podem ser de elevada magnitude, uma vez que esses materiais podem propiciar o acúmulo excessivo de espuma no interior dos coletores de gases, dificultando a liberação destes e exigindo dispositivos especiais para a sua remoção periódica.

A formação da espuma também pode contribuir para a obstrução das válvulas de segurança dos separadores trifásicos, podendo levar à ruptura dos separadores e das tubulações de biogás. Se a espuma não for removida periodicamente, essa torna-se espessa e impermeável, comprometendo a coleta do biogás nas campânulas. A maioria dos reatores UASB já construídos no Brasil não possuem dispositivos de remoção de espuma, sendo que a limpeza é realizada com a interrupção da operação do reator em questão. Algumas ETE preveem a remoção de espuma por meio de tampas de visita na parte superior das campânulas, que acarretam em geração de odores e risco de segurança operacional durante sua abertura (SILVEIRA et al., 2015). Segundo Chernicharo et al. (2015), a falta de dispositivos adequados de remoção de espuma é um problema em diversos UASB existentes pois somente recentemente os reatores estão sendo projetados com dispositivos de remoção de espuma apropriados.

Outro problema relatado é vazamento de gases para a atmosfera, o que preocupa tanto pelas emissões de gás de efeito estufa (metano) como pela geração de odores (gás sulfídrico). Geralmente, a parte superior dos coletores de gases apresenta uma série de aberturas para inspeção e limpeza. Comumente, uma parcela significativa do biogás gerado escapa involuntariamente por esses pontos. A vedação adequada dessas aberturas é fundamental para realizar a coleta eficiente do biogás gerado (SILVEIRA et al., 2015).

Além disso, outra questão está relacionada à coleta do esgoto em si, e não aos aspectos construtivos dos reatores UASB, porém afeta a sua eficiência e a produtividade de biogás, que é a diluição da matéria

orgânica afluyente devido a taxa de infiltração e a ligações clandestinas de água pluvial na rede coletora (SILVEIRA et al., 2015).

2.3 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS

Segundo Noyola et al. (2006), o biogás de reatores que tratam esgotos domésticos apresenta uma composição de metano (70 a 80%), nitrogênio (10 a 25%) devido à parcela de N_2 dissolvida no esgoto doméstico e dióxido de carbono (5 a 10%). Na Tabela 2 pode-se observar a composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico, aterros sanitários e digestores de lodo.

Tabela 2 – Composições típicas do biogás

Parâmetro	Unidade	Composição volumétrica típica		
		Biogás de reatores anaeróbios	Biogás de aterro Sanitário	Digestores de lodo
Metano – CH_4	%	60 a 85	45 a 50	60 a 70
Gás carbônico – CO_2	%	5 a 15	30 a 45	20 a 40
Monóxido de carbono – CO	%	0 a 0,3	0 a 0,2	-
Nitrogênio – N_2	%	10 a 25	0 a 15	< 2
Hidrogênio – H_2	%	0 a 3	Traços a > 1	-
Sulfeto de hidrogênio – H_2S	ppmv	1000 a 2000	10 a 200	até 1000
Oxigênio – O_2	%	Traços	0,8	-

Fonte: adaptado de Lobato (2011).

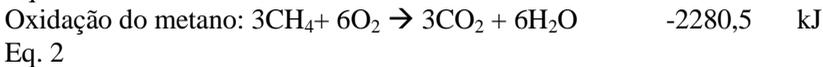
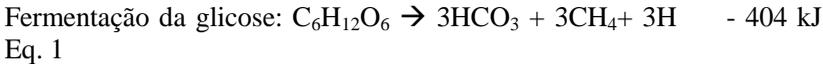
O biogás é constituído por uma mistura de gases como o metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), seguido em menores concentrações por hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2) e gás sulfídrico (H_2S), entre outros. Geralmente, na saída do digestor, o biogás apresenta-se saturado em vapor de água. A composição do biogás depende da natureza do resíduo digerido e das condições em que a digestão anaeróbia se processa (MONTE, 2010).

Recentes estudos em reatores UASB, tem encontrado concentrações de metano na faixa superior indicada na Tabela 2. Grandin (2013) apresentou valores de 79% de CH_4 para a ETE Piçarrão em Campinas – SP, Rosa et al. (2016) 78% para a ETE Laboreaux em Itabira-MG, ambos através de análises cromatográficas e Cabral et al. (2015) de 75 a 85% ao analisar o comportamento de uma semana de medições online.

A proporção de cada gás depende de vários parâmetros, como o tipo de biodigestor e o substrato a digerir, mas a mistura é

essencialmente constituída por metano e dióxido de carbono. Seu poder calorífico está diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa (COSTA, 2006).

A reação de oxidação do metano (CH_4) é altamente exotérmica, capaz de liberar uma quantidade maior de energia que a fermentação da glicose (Equação 1 e Equação 2):



Fonte: Costa (2006).

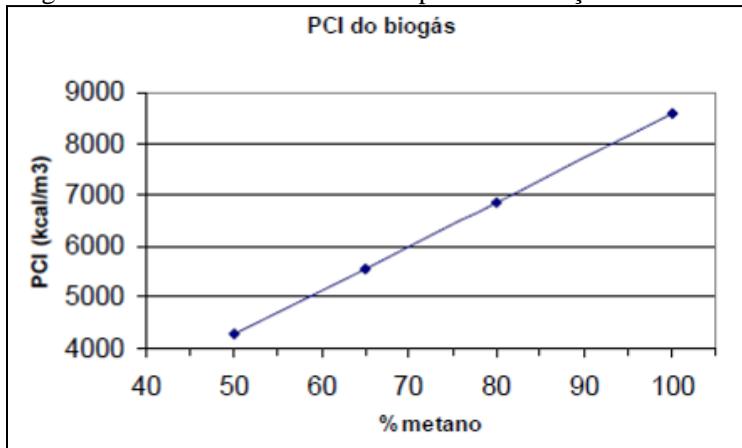
As propriedades energéticas do biogás derivam do seu principal constituinte, o metano. O metano é um gás incolor, inodoro e inflamável, e um dos seis principais gases que contribuem para o aquecimento global (MONTE, 2010)

Os restantes constituintes do biogás, apesar de estarem presentes em quantidades muito limitadas, podem afetar o seu rendimento. Portanto é importante conhecer as propriedades que lhe estão associadas e como estas podem influenciar o seu rendimento. Pela sua importância, destacam-se as seguintes propriedades do biogás (CCE, 2000 apud MONTE, 2010):

- Poder Calorífico Inferior (PCI): corresponde à energia liberada, de uma massa de combustível, sob a forma de calor, não incluindo a energia despendida na vaporização da água presente no combustível. Este parâmetro permite aferir a medida exata do conteúdo energético útil do combustível. O poder calorífico do biogás depende da concentração do metano (Figura 5);

- Limites de inflamabilidade: correspondem aos percentuais mínimos e máximos de um combustível numa mistura ar/combustível para as quais essa mistura se inflama. É um parâmetro crítico na combustão com biogás, devido à diluição do CH_4 com CO_2 e outros gases inertes.

Figura 5 – Poder calorífico inferior por concentração de metano.



Fonte: Lima (2005).

O uso do biogás como fonte de energia em reatores UASB de estações de tratamento de esgoto tem sido alvo de recentes investigações. Os autores Rosa et al. (2016) estimaram um potencial de geração de energia elétrica de 57,6 % do consumo total da estação *Laboreaux* em Minas Gerais. Já Rosenfeldt et al. (2015) demonstraram a viabilidade econômica de instalação de um sistema de aproveitamento de biogás para uma ETE de 100.000 habitantes em Feira de Santana-BA.

2.4 BALANÇO DE MASSA DE DQO

O balanço de massa é fundamentado no princípio da conservação da massa para a análise de sistemas físicos, que consiste no fato de que a matéria não pode desaparecer ou ser criada espontaneamente, apenas transformada, ou seja, consiste na descrição quantitativa de todos os materiais que entram, saem e se acumulam em um sistema com limites físicos definidos.

Segundo Lobato (2011), no balanço de massa da DQO em reatores UASB é necessário considerar todas as seguintes parcelas: as parcelas convertidas a metano, seja aquele presente no biogás ou o que escapa dissolvido no efluente ou junto com o gás residual (perdas), a parcela devida à redução de sulfato, a parcela que é convertida em lodo, a qual pode ser subdividida no lodo retido no reator e no lodo que é

carreado junto com o efluente, e a parcela que sai solubilizada no efluente, de acordo com a seguinte expressão (Equação 3):

$$DQO_{afI} = DQO_{efI\ sol} + DQO_{lodo\ ret} + DQO_{lodo\ efl} + DQO_{CH_4\ biogás} + DQO_{CH_4\ perdas} + DQO_{sulf\ red}$$

Eq.3

em que:

DQO_{afI} = massa diária de material orgânico afluente;

$DQO_{efI\ sol}$ = massa diária de material orgânico solubilizada no efluente;

$DQO_{lodo\ ret}$ = massa diária de material orgânico convertida em lodo retido no sistema;

$DQO_{lodo\ efl}$ = massa diária de material orgânico convertida em lodo e perdida com o efluente;

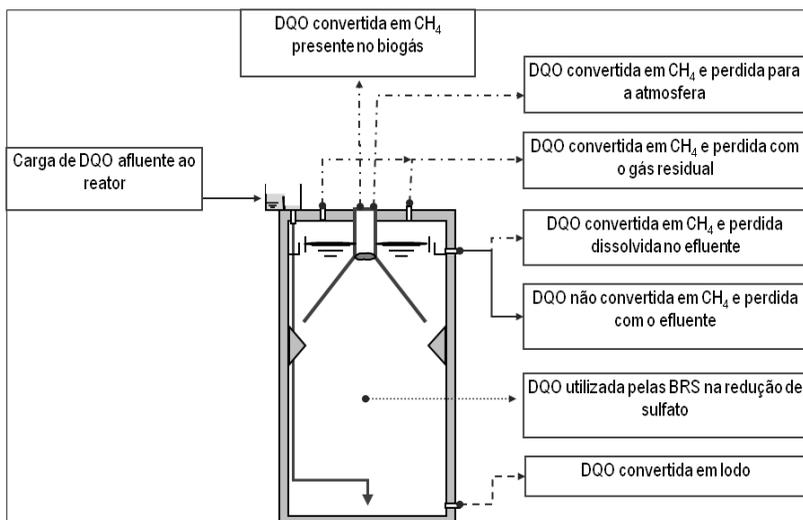
$DQO_{CH_4\ biogás}$ = massa diária de material orgânico convertida em metano e presente no biogás;

$DQO_{CH_4\ perdas}$ = massa diária de material orgânico convertida em metano e perdida dissolvida no efluente ou com o gás residual;

$DQO_{sulf\ red}$ = massa diária de material orgânico utilizada pelas BRS na redução de sulfato.

Portanto, em um reator UASB, o balanço de massa deve considerar todas as parcelas envolvidas na digestão anaeróbia, bem como as perdas possíveis. Assim, as parcelas que devem ser consideradas no balanço de massa da DQO são: (i) parcela convertida a metano presente no biogás; (ii) parcela convertida a metano que escapa dissolvido no efluente e junto ao gás residual (perdas); (iii) parcela devida à redução de sulfato; (iv) parcela que é convertida em lodo e (v) parcela que permanece no efluente. Lobato (2011) ao desenvolver seu modelo de estimativa da produção de biogás em reatores UASB, bem como de seu respectivo potencial de recuperação energética utiliza o balanço descrito acima. A Figura 6 ilustra as rotas de conversão de DQO e os fluxos de metano em um reator UASB.

Figura 6 - Rotas de conversão de DQO e fluxos de metano em reatores UASB



Fonte: Lobato (2011).

2.5 GERAÇÃO DE BIOGÁS

A produção de biogás a partir dos efluentes domésticos depende da quantidade de matéria orgânica presente nos efluentes e das características do processo de tratamento. A quantidade de material biodegradável depende da população atendida pelos serviços de coleta e tratamento de efluentes através de processos anaeróbicos e da produção de matéria orgânica biodegradável por pessoa (expressa na forma de DBO_5 – demanda bioquímica de oxigênio).

O biogás de reatores UASB é geralmente constituído por metano em alto teor (70 a 80 %) e em menor concentração de gás carbônico devido à grande solubilidade deste composto gasoso no líquido.

As emissões de CH_4 a partir do tratamento de águas residuárias variam de país para país, dependendo da tecnologia de tratamento e das práticas de gestão adotadas, bem como das características das águas residuárias e dos métodos de estimativa (LOBATO, 2011).

De acordo com Lobato (2011), os dados de entrada necessários para efetuar estimativa a produção de biogás são: população contribuinte; contribuição *per capita* de esgoto; contribuição *per capita*

de DQO; eficiência de remoção de DQO; concentração de sulfato no afluente; eficiência de redução de sulfato; temperatura operacional do reator; e, percentual de CH_4 no biogás.

Definidos os dados de entrada, primeiramente são estimadas as parcelas de DQO removida no sistema, convertida em lodo e consumida na redução do sulfato. Com essas parcelas calcula-se a DQO máxima convertida em CH_4 e a conseqüente produção volumétrica máxima. A fim de se calcular o volume de CH_4 realmente disponível para o aproveitamento energético, o modelo considera as perdas de CH_4 dissolvido no efluente e na fase gasosa com o gás residual, além de outras perdas eventuais na fase gasosa. Por fim, descontadas essas perdas, o potencial energético disponível é calculado (LOBATO, 2011).

Souza et al. (2010) obtiveram ao considerar os fatores de emissão de metano global (incluindo o metano presente no biogás, nos gases residuais e dissolvido no efluente final) resultados de $0,19 \text{ gCH}_4.\text{gDQOremov}^{-1}$ e $0,12 \text{ gCH}_4.\text{gDQOaf}^{-1}$. As relações unitárias de produção de metano, de biogás e de energia em reatores UASB tratando esgoto tipicamente doméstico, obtidas a partir das simulações efetuadas por Lobato (2011) estão apresentadas na Tabela 3. A autora considerou três situações que acarretam em potenciais de recuperação de metano diferentes: (i) pior situação; (ii) situação típica e (iii) melhor situação. A pior situação, onde o potencial energético é menor, refere-se a sistemas operando com esgoto mais diluído, concentrações de sulfato maiores, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano. A melhor situação, onde o potencial energético é maior, refere-se a sistemas operando com esgoto mais concentrado, menores concentrações de sulfato, maior eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de metano. Para a situação típica são utilizados valores intermediários para os dados de entrada.

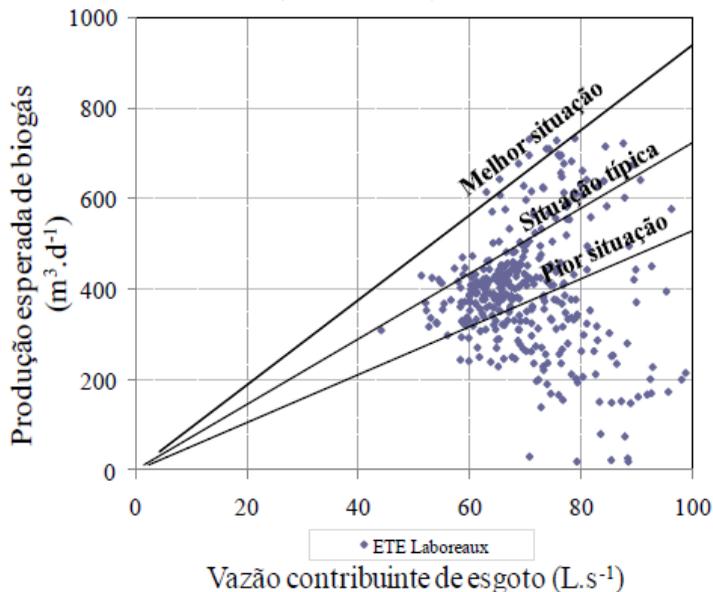
Tabela 3 - Relações unitárias de produção de metano, de biogás e de energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico

Relação unitária	Unidade	Pior situação			Situação típica			Melhor situação		
		Máx.	Min.	Méd.	Máx.	Min.	Méd.	Máx.	Min.	Méd.
Volume unitário de CH ₄	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	9,9	3,6	6,8	13,3	7,4	10,2	16,7	11,1	13,7
	NL.m ³ esgoto	81,7	16,7	42,2	103,7	34,8	64,2	134,6	51,8	81,3
Volume unitário de biogás	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	154,1	66,0	113,4	185,8	124,2	158,3	219,1	173,9	196,0
	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	14,1	5,2	9,8	17,7	9,9	13,6	20,8	13,9	17,1
Potencial energ. unitário	NL.m ³ esgoto	116,7	23,8	60,3	138,3	46,4	85,6	168,3	64,8	101,6
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	220,1	94,3	162,0	247,8	165,6	211,1	273,9	217,4	245,0
Potencial energ. unitário	kWh.m ³ esgoto	0,8	0,2	0,4	1,0	0,3	0,6	1,3	0,5	0,8
	kWh.kgDQO _{remov} ⁻¹	1,5	0,7	1,1	1,9	1,2	1,6	2,2	1,7	2,0
Potencial energ. unitário	kWh.Nm ³ biogás	7,0	7,0	7,0	7,5	7,5	7,5	8,0	8,0	8,0
	kWh.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
Potencial energ. unitário	MJ.m ³ esgoto	2,9	0,6	1,5	3,7	1,2	2,5	4,8	1,9	2,9
	MJ.kgDQO _{remov} ⁻¹	5,5	2,4	4,1	6,7	4,5	5,7	7,9	6,2	7,0
Potencial energ. unitário	MJ.Nm ³ biogás	25,1	25,1	25,1	26,9	26,9	26,9	28,7	28,7	28,7
	MJ.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	0,4	0,1	0,2	0,5	0,3	0,4	0,6	0,4	0,5

Fonte: Lobato (2011).

Para validação do modelo, Lobato (2011) analisou os resultados reais de produção de biogás e composição de metano para reatores UASB em diferentes escalas. Uma das ETE analisadas foi a de Itabira – MG que está na presente pesquisa. As medições de vazão de esgoto e vazão de biogás eram feitas diariamente e as medições de composição do biogás 3 vezes por mês. A maioria dos resultados para a produção de biogás e o consequente potencial de recuperação de energia dos reatores UASB concentraram-se entre as faixas simuladas para a situação típica e pior, no entanto, alguns dados fogem aos limites das linhas de tendência ficando abaixo da linha de tendência referente à pior situação, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 – Validação do modelo a partir dos dados da ETE Laboreuax (Itabira – MG)

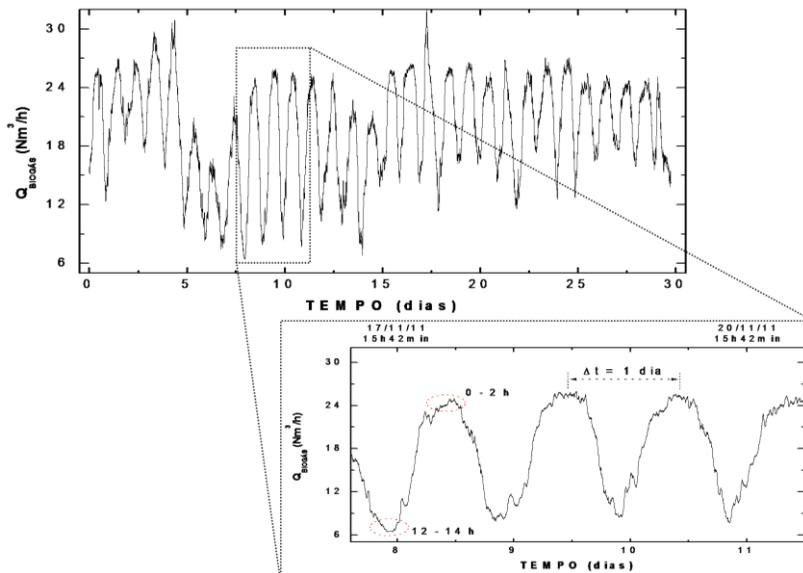


Fonte: Lobato (2011).

Possetti et al. (2013) através de medições realizadas em tempo real identificaram que a produção de biogás segue um comportamento temporal variável, periódico e não estacionário, o qual é criticamente dependente das propriedades físicas e químicas do esgoto e de eventos de chuva. Os exemplos de curvas obtidas estão apresentados na Figura 8.

De modo geral, as medições realizadas evidenciaram um padrão diário ($\Delta t = 1$ dia) de produção e desprendimento de biogás, sendo que as vazões máximas ocorreram tipicamente entre 0 e 2 horas e as vazões mínimas entre 12 e 14 horas.

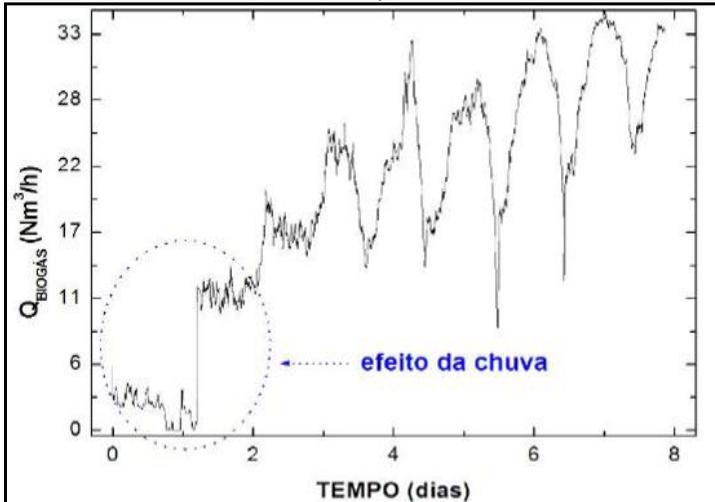
Figura 8 – Curva de vazão de biogás em função do tempo para um intervalo de 30 dias. Em destaque as vazões de biogás para um intervalo de 4 dias.



Fonte: Possetti et al. (2013).

Possetti et al. (2013) observaram ainda que eventos significativos de chuva diminuíram a produção de biogás e atribuíram à diluição da matéria orgânica. A Figura 9 apresenta uma situação em que a chuva induziu modificações na amplitude e no nível médio do padrão de vazão de biogás (no intervalo de 0 a 2 dias a precipitação acumulada foi de aproximadamente 138 mm).

Figura 9 - Curva de vazão de biogás em função do tempo para um intervalo de 8 dias. Eventos de chuva ocorreram durante 2 dias (138 mm).



Fonte: Possetti et al. (2013).

Silva (2015) obteve para a mesma ETE as relações unitárias apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Relações unitárias da produção de metano, biogás e energia para a ETE Atuba Sul

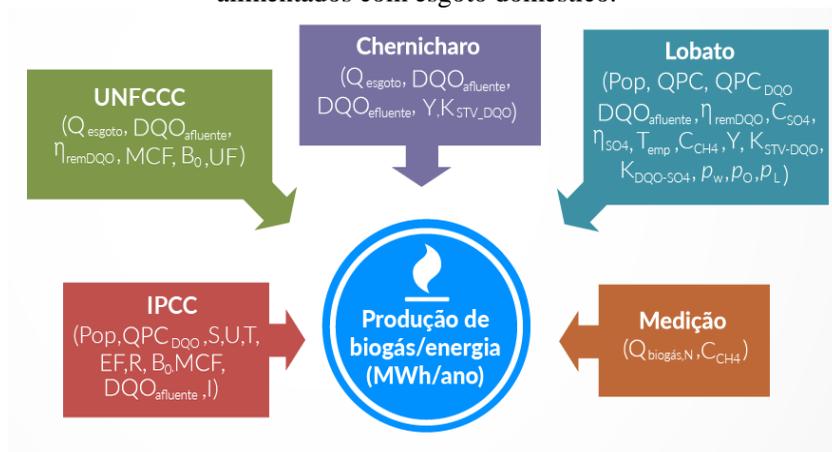
Relação unitária	Unidade	Medido		
		Máximo	Mínimo	Média
Volume unitário de CH ₄ produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	4,64	0,96	2,87
	NL.m ⁻³ esgoto	22,94	4,73	14,16
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	69,21	14,28	42,74
Volume unitário de biogás produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	7,77	1,60	4,80
	NL.m ⁻³ esgoto	38,38	7,92	23,70
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	115,82	23,89	71,52
Potencial químico energético unitário	kWh.m ⁻³ esgoto	0,24	0,05	0,15
	kWh.kgDQO _{remov} ⁻¹	0,72	0,15	0,45
	kWh.Nm ⁻³ biogás	6,24	6,24	6,24
	kWh.hab ⁻¹ .ano ⁻¹	17,70	3,65	10,93

Fonte: Silva (2015).

Percebe-se que os valores obtidos pela medição de Silva (2015) para a ETE Atuba Sul são menores do que o previsto no modelo de Lobato (2011). A autora ressalta que se trata de uma ETE antiga e com ampla rede de atendimento, com taxa de infiltração elevada. Além disso, o UASB apresenta fissuras no concreto, tampões mal selados e conexões da linha de gás não estanques que proporcionam que parte do biogás seja perdido para a atmosfera.

Nessa mesma linha, Silva, Possetti e Coelho (2014), avaliaram diferentes métodos de determinação das taxas de produção de biogás em reatores anaeróbios comparando com os dados de medição de uma ETE localizada em Curitiba-PR (ETE Atuba Sul). A Figura 10 apresenta os métodos que foram comparados.

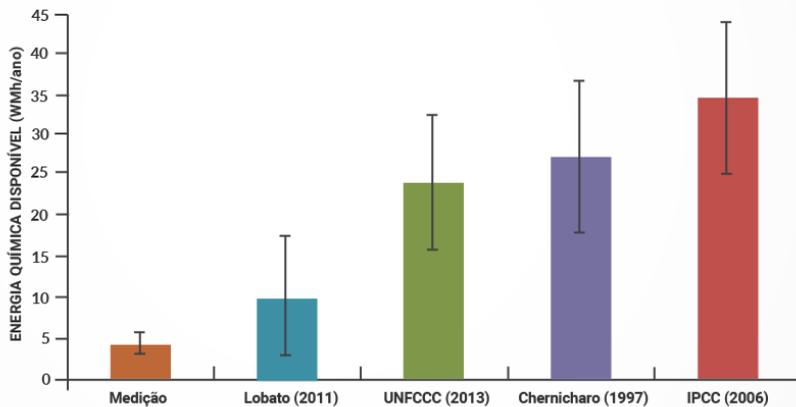
Figura 10 - Métodos de determinação do potencial de produção de energia química associado com o biogás oriundo de reatores UASB alimentados com esgoto doméstico.



Fonte: adaptado de Silva, Possetti e Coelho (2014).

De modo geral, os autores constataram que as quantidades médias de energia estimadas foram maiores que aquelas registradas a partir de medições, como pode-se observar na Figura 11.

Figura 11 – Quantidade de energia disponível por ano (MWh/ano) inerente ao biogás produzido nos reatores UASB da ETE Atuba Sul, de acordo com resultados de medições e de estimativas por diferentes métodos disponíveis na literatura.



Fonte: Silva, Possetti e Coelho (2014).

Segundo Silva, Possetti e Coelho (2014), como o modelo apresentado por Lobato (2011) considera as quantidades de metano dissolvidas no meio líquido, as perdas na forma de gases residuais e as perdas relacionadas com a redução de sulfato, ele expressa de forma mais plausível os fenômenos físicos, químicos e biológicos inerentes aos reatores UASB, fazendo com que os resultados obtidos a partir de sua aplicação apresentem menor desvio em relação aos valores mensurados.

Rosa et al. (2016) ao calcular o potencial de geração de energia a partir de medições na ETE *Laboreaux* em Itabira- MG, também encontrou valores dentro da faixa prevista pelo modelo apresentado em Lobato, Chernicharo e Souza (2012), porém abaixo da situação típica prevista pelo mesmo.

Silva, Possetti e Coelho (2014) confirmaram que as mudanças das condições operacionais da ETE e as variações das propriedades físicas e químicas do esgoto que entra nos reatores UASB fazem com que as taxas de produção de metano e de recuperação de energia oscilem expressivamente, em relação aos valores médios.

Assim, a escolha do método de estimativa da quantidade disponível de energia do biogás produzido em reatores UASB

influenciou significativamente o dimensionamento e a viabilidade de projetos de geração de energia em ETE. Por isso, é importante medir e entender o comportamento da produção de biogás para realizar estimativas acuradas para a tomada de decisão sobre esses investimentos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa está inserida no projeto de medições do PROBIOGÁS¹ que está sendo realizado em 10 estações de tratamento de esgoto no Brasil.

A seguir descreve-se como foram realizadas as medições de vazão de esgoto, da DQO na entrada e na saída do UASB (para determinar a quantidade removida) e da quantidade e da qualidade do biogás gerado.

As estações que serviram de amostra para este estudo possuem em comum o fato de utilizarem reatores UASB/RALF como sistema de tratamento de esgotos e geração de biogás, e estão distribuídas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país.

Na Figura 12 pode-se visualizar um fluxograma das principais etapas da metodologia, que estão mais bem descritas no subcapítulo a seguir.



Fonte: Autora (2016).

¹ Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS, <http://www.cidades.gov.br/saneamento-cidades/probiogas>

3.1 PROCESSO DE SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES INTEGRANTES

Ao todo foram visitadas 20 estações de tratamento de esgoto pré-selecionadas pelo projeto que possuíam reator UASB ou RALF como parte do processo de tratamento. O processo de escolha das ETE levou em consideração: a) as condições da ETE; b) os reatores anaeróbios utilizados; e c) as condições para instalações dos equipamentos de medição.

3.1.1 Condições da ETE

Da categoria condições da ETE os principais critérios considerados para avaliação foram:

- Se a vazão e a carga orgânica de projeto eram muito diferentes da vazão e carga orgânica atual;
- Se a ETE possuía fácil acesso e se encontrava em local seguro, (características dos arredores, se estava em local muito isolado, de difícil acesso, etc.);
- Se era realizado o by-pass de uma parte da vazão de entrada diretamente para o pós-tratamento sem passar pelo UASB. Se houvesse by-pass era importante que existisse uma medição precisa da vazão do mesmo, para que se soubesse exatamente a vazão de entrada no UASB. Essa informação foi importante para que posteriormente fosse possível obter a carga orgânica afluyente no UASB e também foi um critério decisivo para elegibilidade das ETE.

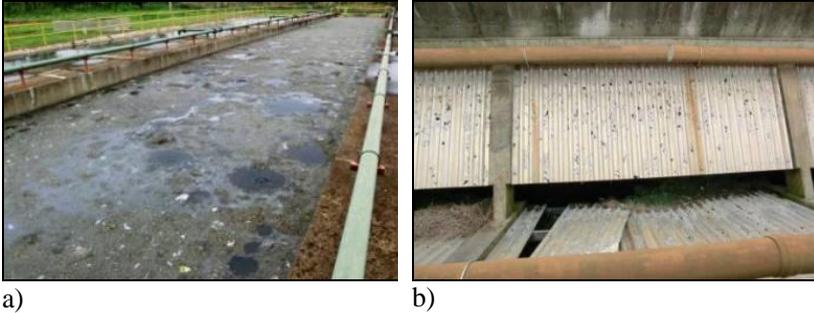
3.1.2 Condições dos reatores anaeróbios

Da categoria reatores anaeróbios os principais critérios considerados para avaliação foram:

- Existência de fuga significativa de gás (Figura 13);
- Se a vazão era constante ou sofria muita influência da chuva e sazonalidade, considerando tanto o aumento da vazão instantânea pelo evento da chuva, quanto a duração deste regime;
- Se a distribuição do esgoto era uniforme, pois dependendo do local das medições da vazão de esgoto e biogás, é importante uma distribuição uniforme da vazão para os módulos de reatores anaeróbios para que se possa obter uma relação confiável entre a DQO removida e a produção de biogás;

- Se existiam muitos problemas com relação a remoção de espuma.

Figura 13 – Exemplo das condições observadas em uma das ETE, com visível fuga de gás: a) Efluente no meio, onde todas as partes sem lodo são bolhas de escape de biogás, b) Defletores furados e deslocados.



Fonte: Rotária do Brasil (2014).

3.1.3 Condições para instalação da medição online

Nessa categoria foram verificadas as condições para se instalar os medidores, quais as adaptações necessárias para uma medição bem sucedida e se estas seriam muito onerosas. Cabe ressaltar que, as informações coletadas nesse item tinham finalidade de reunir as informações necessárias para a instalação dos medidores, caso a ETE fosse escolhida.

Em alguns casos, por exemplo, verificou-se que não havia possibilidade de instalar medidor ultrassônico de vazão de esgoto, por não haver um canal de aproximação ou queda livre.

As estações escolhidas com seus respectivos dados de referência estão listados na Tabela 5. A localização das estações pode ser visualizada no mapa da Figura 14.

Cabe destacar que o nome das estações não foi divulgado por acordo do projeto com as companhias de saneamento. As medições iniciaram na primeira ETE no início de novembro de 2014 e na última delas em março de 2015 para avaliar a variação da produção e qualidade do biogás de acordo com as diferentes cargas, as estações do ano (temperatura, chuvas, etc.) e regiões do país.

3.1.4 Principais características das estações monitoradas

Na Tabela 6 é possível visualizar um resumo das principais características das estações que foram utilizadas para análise na presente pesquisa.

Tabela 6 – Principais características das estações monitoradas

ETE	Reator	Média anual DQO afluente (mg/L)	Média anual vazão de esgoto (l/s)	População de projeto (hab.)	Temp. média anual (°C)	Pluviometria (mm/a)
A	UASB	517,00	371,85	198.000	16,80	1500
B	RALF	585,00	362,69	207.000	20,00	1600
C	RALF	472,56	87,86	64.800	20,00	1400
D	UASB	1099,68	91,49	100.000	18,00	1540
E	UASB	752,00	300,00	200.000	20,00	1350
F	UASB	470,00	433,57	250.000	20,00	1350
J	UASB	398,20	76,44	48.600	23,00	1000

Fonte: Autora (2016).

3.2 QUANTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

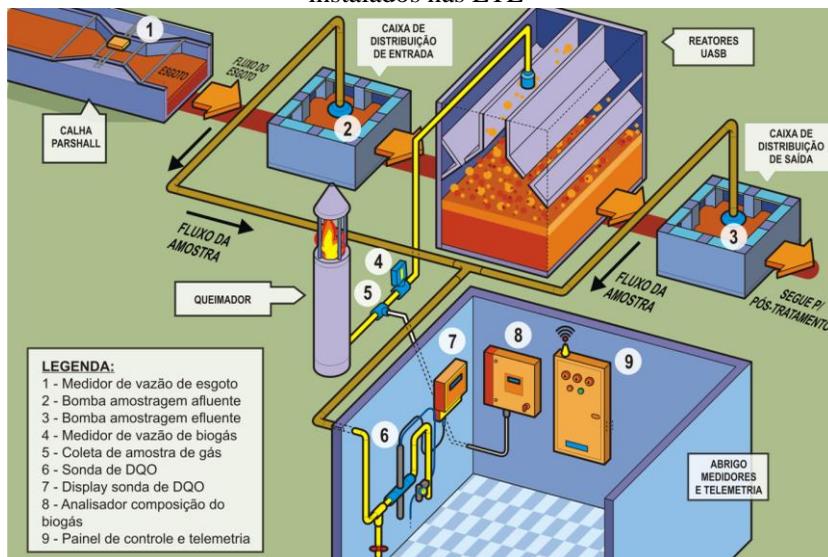
Para que fosse possível a quantificação da carga orgânica removida e da vazão e composição do biogás produzido em cada reator monitorado, de modo a possibilitar o alcance do objetivo específico 1, foram utilizados os seguintes medidores:

- Medidor ultrassônico instalado na Calha Parshall;
- Sonda medidora da concentração de DQO, instalada em um ponto central recebendo esgoto bruto e efluente do UASB alternadamente.

- Medidor de vazão de biogás tipo Vortex na linha de coleta do biogás para queima;
- Medidor de composição do biogás, por meio de equipamento de medição dos teores de CH_4 , CO_2 , H_2S e O_2 , recebendo amostras de biogás coletado da linha do queimador.

A seguir pode-se visualizar a conformação geral dos medidores instalados nas ETE. Salienta-se que houve variações e adaptações de acordo com a característica ou necessidade específica de cada estação, porém em aspectos gerais foi seguida a configuração apresentada na Figura 15.

Figura 15 – Desenho esquemático da configuração geral dos medidores instalados nas ETE



Fonte: Autora (2016).

3.2.1 Medidor de Vazão de Esgoto

Grande parte das ETE já dispunha de medidor de vazão de esgoto instalados na Calha Parshall na entrada da estação. Nesses casos, foi necessário somente passar um cabo de sinal do medidor para o sistema de telemetria. Para as que não possuíam o medidor instalado ou havia by-pass de parte do esgoto sem medição, um medidor de nível foi disponibilizado pelo projeto.

3.2.2 Medidor Online de Concentração de DQO

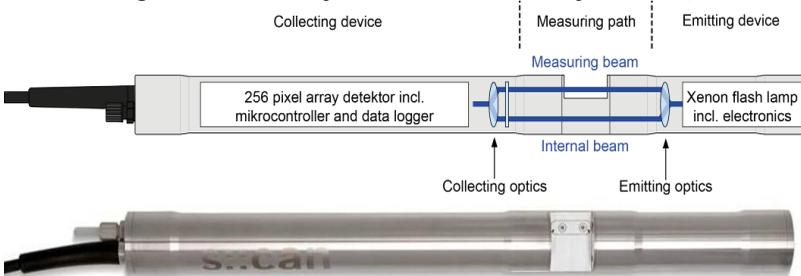
O sistema de medição online da carga orgânica (DQO) - (modelo Carbolysar, marca S::CAN) é composto por sonda e unidade controladora e mede concentrações entre 100 e 3.250 mg DQO/L através de espectrometria UV/VIS.

Princípio do sistema de medição:

As sondas trabalham de acordo com o princípio da espectrometria UV-VIS. Substâncias contidas no meio a ser medido enfraquecem um feixe de luz que se move através deste meio. O feixe de luz é emitido por uma lâmpada, e após contato com o meio a sua intensidade é medida por um detector ao longo de uma gama de comprimentos de onda. Cada molécula de uma substância dissolvida absorve radiação num determinado e conhecido comprimento de onda. A concentração das substâncias contidas determina o tamanho da absorção da amostra - quanto maior for a concentração de uma determinada substância, mais ela vai enfraquecer o feixe de luz. Uma medição demora aproximadamente 30 segundos.

Um esquema do funcionamento da sonda pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Ilustrações da sonda de medição de DQO



Fonte: SCAN (2015).

A medição se dá diretamente *in situ* sem necessidade de tratamento da amostra, assim os erros de medição devido à amostragem, transporte, armazenamento, diluição da amostra, etc. não são relevantes. O equipamento utiliza um sistema de autolimpeza utilizando ar pressurizado, com as seguintes condições operacionais: limpeza com duração de 5 s e ativada a cada três ciclos de medições, cada um com

duração de 1 min. A medição pela sonda é inativada durante 20 s após a conclusão da limpeza. O compressor de ar é do tipo Ferrari MEGA AIR C-6L, com um motor de 750 W, tensão nominal de 220 V, vazão máxima de 150 L/min, pressão máxima de 8 bar e reservatório de ar com volume de 6 L.

3.2.3 Medidor de Vazão de Biogás

Para medição da vazão de biogás foi utilizado um sistema de medição composto por unidade de medição de vazão tipo Vortex (marca Höntzsch), medição de temperatura e medição de pressão, com controlador.

Princípio do sistema de medição:

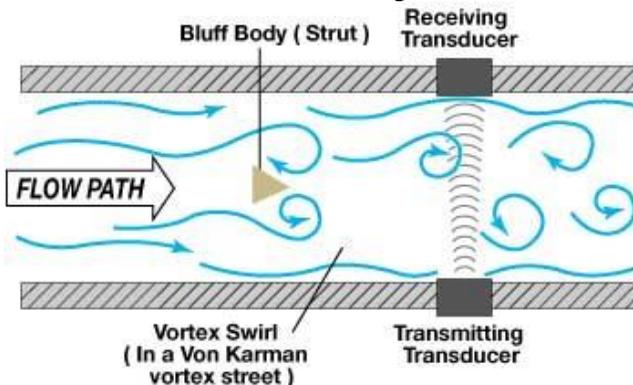
Quando fluídos passam através de uma restrição introduzida no duto, vórtices são formados pelos lados. A frequência do vórtice é proporcional ao fluxo médio e, desta forma, ao fluxo volumétrico. Variações de pressão causadas pelos vórtices são transmitidas via alguns orifícios introduzidos nas laterais. Os sensores são colocados dentro do duto e são protegidos contra choques, temperaturas e desgaste pela passagem do fluído. Os sensores capacitivos detectam os pulsos de pressão e os convertem em pulsos elétricos (Figuras 17 e 18).

Figura 17 – Medidores de vazão de biogás



Fonte: Höntzsch (2014).

Figura 18 – Figura demonstrativa do princípio de medição do medidor de vazão de biogás



Fonte: Höntzsch (2014).

3.2.3.1 Medidor de pressão e de temperatura

Na linha de gás, a jusante do medidor de vazão, foram instalados também medidores de pressão e de temperatura do gás, para que fosse possível calcular a vazão normal.

3.2.4 Analisador de Qualidade de Biogás

Para a medição da qualidade do biogás foi utilizado um analisador fixo de gases (modelo Inca 4001 da marca Union Instruments), capaz de medir os seguintes componentes do biogás: CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S .

Princípio do sistema de medição:

Sensores NDIR - Infravermelho Não Dispersivo:

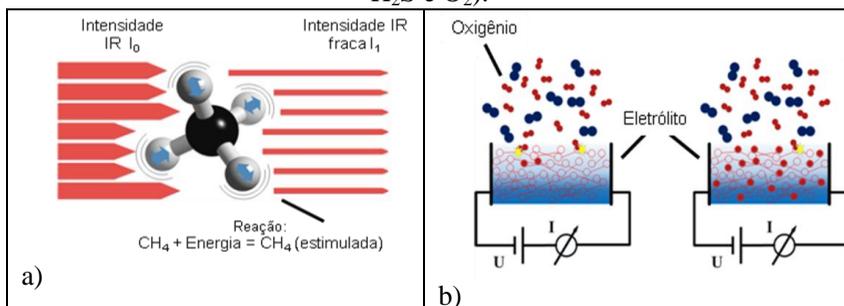
A tecnologia NDIR (Infravermelho Não Dispersivo) utiliza as propriedades absorventes dos gases para a radiação de luz no comprimento de onda infravermelho. Filtros adequados selecionam uma radiação do espectro de uma fonte de luz que mostra um comportamento típico de absorção do gás em questão. Essa radiação passa por uma célula de medição cheia de gás de amostra. A atenuação da radiação que ocorre neste processo mostra o grau de concentração do gás. Detectores térmicos (por ex., termopilhas) são usados como evidência de radiação.

Sensores eletroquímicos:

Muitos gases reagem com outras substâncias sob condições específicas. Se a reação causa a liberação de elétrons, e, portanto uma corrente mensurável, o arranjo correspondente é chamado de célula eletroquímica. Ela consiste em pelo menos dois eletrodos que agem cataliticamente conectados por um meio condutor de eletricidade (eletrólito) e um circuito. Na borda do eletrodo, gás e eletrólito, há uma reação que gera uma corrente, e sua amperagem mostra o grau de concentração do gás.

A Figura 19 apresenta os princípios do funcionamento dos sensores supracitados.

Figura 19 – Princípio de funcionamento dos Sensores: a) Infravermelho Não Dispersivo (medição de CO_2 e CH_4) b) Eletroquímicos (medição de H_2S e O_2).



Fonte: UNION (2014).

A Tabela 7 apresenta os métodos e a faixa de medição para cada componente.

Tabela 7 – Métodos e faixa de medição para cada componente medido

Componente medido	Método de medição	Faixa de medição	Precisão	Ciclo de medição
CH_4	Infravermelho	0-100 Vol.-%	+/- 1 % MBE	Descontínuo
H_2S	Eletroquímico	0-10.000 ppm	+/- 3 ppm (≤ 25 ppm)	Descontínuo
O_2	Eletroquímico	0-25 Vol.-%	+/- 3 % MW	Descontínuo
CO_2	Infravermelho	0-100 Vol.-%	+/- 1 % MBE	Descontínuo

Fonte: adaptado de UNION (2014).

3.2.4.1 Calibração do medidor de composição de biogás e detecção de vazamentos

Os medidores de composição de biogás precisam ser calibrados periodicamente com amostra padrão de 99,9% de CH_4 e 25 ppm de H_2S , que calibra o ponto zero do CO_2 e do O_2 e o ponto alto do metano e do H_2S . Já o ponto zero desses dois últimos é calibrado com ar ambiente (Figura 20).

Figura 20– Calibração dos sensores



Fonte: Rotária do Brasil (2015).

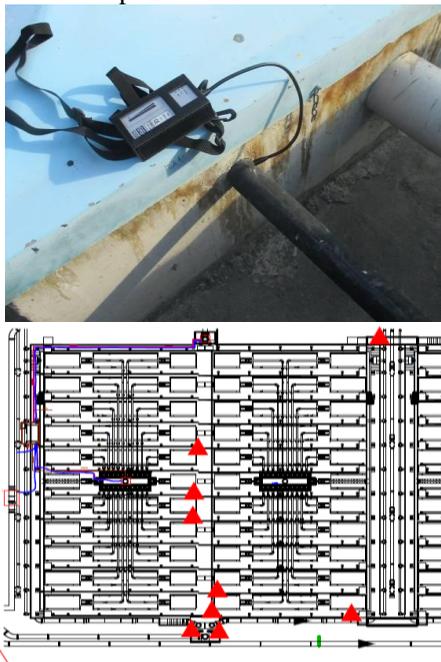
Destaca-se que, no momento da calibração, foi detectado o mau funcionamento de algumas peças do medidor. O conserto de alguns foi realizado imediatamente, porém, para outros foi necessária a aquisição de peças de reposição com o fornecedor estrangeiro. Isto fez com que determinados equipamentos permanecessem desligados até que fosse realizada a troca dos componentes.

O tempo de espera para chegada e substituição das peças, aliado ao período em que os equipamentos estavam com *drifts* devido a necessidade de calibração, fez com que algumas estações ficassem sem dados confiáveis de composição de gás por longos períodos.

Nessa mesma visita para a realização da calibração dos medidores foi realizada a detecção de vazamentos nos reatores UASB. Sendo que os pontos com maior vazamento foram mapeados conforme a Figura 21.

Destaca-se que essa análise é somente qualitativa, sem medição da vazão fugitiva de biogás.

Figura 21 – Detecção dos principais pontos de vazamento em reatores UASB: a) Detector de metano; b) Exemplo de desenho entregue com os pontos detectados.



Fonte: Rotária do Brasil (2015).

3.2.5 Instalação dos medidores

Foram elaborados projetos indicando o local de instalação dos medidores e as adaptações necessárias para fazê-lo. Além da especificação do material a ser utilizado, foram selecionadas as bombas mais adequadas para que o esgoto afluente e efluente fosse transportado até a sonda medidora de DQO, tendo em vista que a velocidade da amostra de esgoto na entrada da sonda não pode ultrapassar 3 m/s conforme recomendado pelo fabricante (SCAN, 2015).

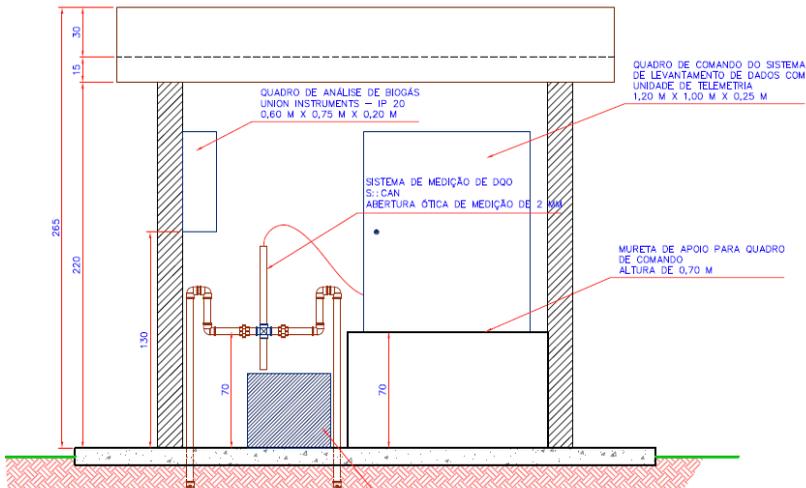
Para a escolha do local de instalação dos medidores foram observadas as exigências mínimas dos equipamentos, a exemplo do medidor de vazão de biogás tipo Vortex, que requer uma distância mínima em trecho reto e sem interferências (curvas, redução, etc.) de no

mínimo 15 vezes o diâmetro interno do medidor a montante e 5 vezes a jusante.

Outro ponto observado foi a escolha do local de instalação da mangueira de amostragem de biogás e do quadro de medição da composição. A distância máxima entre eles deve ser de 100 m, distância máxima com a qual a bomba do equipamento consegue trabalhar segundo o fabricante (UNION, 2015). Atentou-se também para o descarte dessa amostra de gás, sendo necessária a instalação de uma mangueira de saída que transporte o gás para fora do local de instalação do quadro.

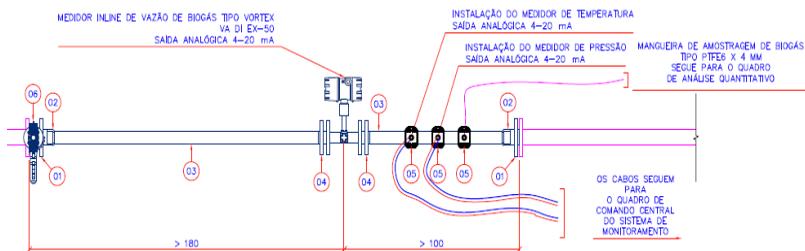
Nas figuras 22 a 26 pode-se visualizar os detalhes de instalação dos medidores de DQO, vazão de biogás e composição de biogás.

Figura 22 - Parte do desenho de indicação de instalação da sonda de DQO, do quadro de análises da composição do gás, e do quadro de comando



Fonte: Rotária do Brasil (2014).

Figura 23 – Parte do desenho de instalação do medidor de vazão de biogás e da coleta de amostra de biogás



Fonte: Rotária do Brasil (2014).

Figura 24 – Medição da composição de biogás: a) Quadro de medição da Union; b) Tomada da amostra de gás



a)



b)

Fonte: Rotária do Brasil (2015).

Figura 25 – Medição da vazão de biogás: a) Linha de gás com os medidores; b) Flange com medidor de pressão e temperatura; c) Medidor de vazão de biogás



a)



b)



c)

Fonte: Rotária do Brasil (2015).

Figura 26 – Medição da DQO - Sonda e seu controlador: a) Instalação dentro da casa de operação; b) Instalação ao ar livre com caixa de proteção



a)



b)

Fonte: Rotária do Brasil (2015).

Depois de instalados os equipamentos, além do monitoramento online dos valores que estes estão transmitindo, foi realizado também o acompanhamento in loco pelos operadores das companhias. Estes foram responsáveis por realizar a calibração do equipamento de DQO, na qual os parâmetros foram adaptados para as condições existentes. A calibração foi realizada diretamente no local, sem necessidade de desmontar a sonda. Os dados utilizados para cada calibração local vêm de análises laboratoriais e de medições realizadas com a sonda em campo, ou seja, com a mesma amostra foi realizada a leitura em campo e em laboratório. É recomendada uma calibração de dois pontos, com o uso de duas amostras, uma com concentração baixa e uma alta. Desta forma, as amostras foram escolhidas de forma que cobrissem a faixa de variação de valores de concentração do esgoto.

Além disso, as sondas devem ser limpas semanalmente de forma manual para que a sujeira não interfira nas medições.

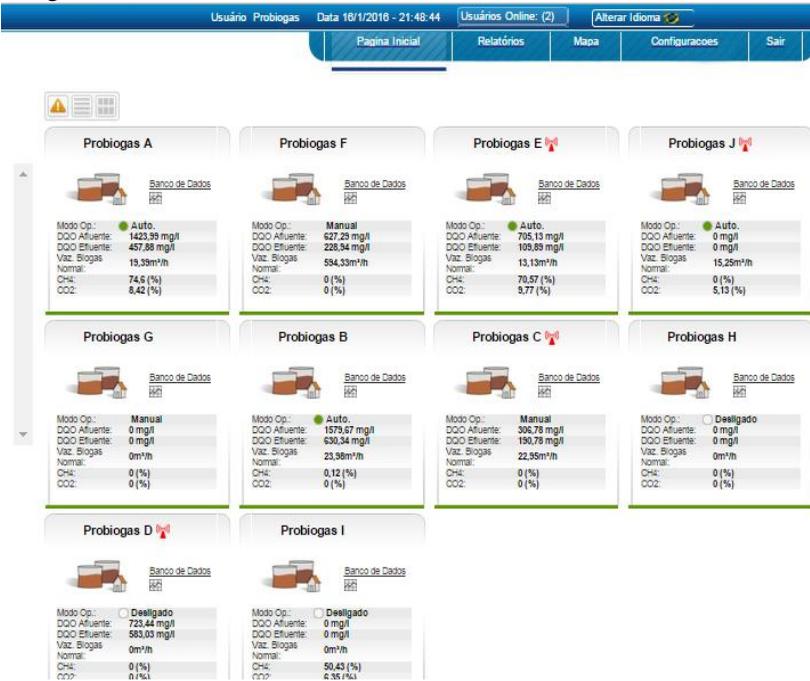
Como a sonda de DQO apresenta custo elevado, buscou-se uma solução para medir a DQO afluente e efluente com uma única sonda. A alternância foi feita por meio de bombas automatizadas que são acionadas de 15 em 15 minutos. É importante observar que o ponto de captação das bombas por vezes se encontra em uma cota acima do analisador de DQO, o que pode ocasionar a formação de sifão em algumas situações, acarretando na mistura dos efluentes no momento da análise, já que não ocorre a interrupção total de uma das linhas com o desligamento de sua respectiva bomba. Através de uma furação no ponto alto da linha é possível "quebrar" o sifão e solucionar esse problema. Algumas companhias optaram por solucionar a questão com a instalação de válvulas solenoides ou também válvulas atuadas pneumaticamente.

Devido a essa alternância na medição da DQO de entrada e saída, para evitar valores nulos no banco de dados, foi adotado que nos 15 minutos seguintes ao desligamento da bomba o valor permaneceria igual ao último valor medido.

3.2.6 Transmissão e Análise dos dados

Um sistema de telemetria com sinal GPRS foi instalado em todas as estações monitoradas. Os dados foram transmitidos por um módulo de comunicação de 5 em 5 minutos e ficam armazenados em um banco de dados online (www.komvex-scada.com) apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Banco de dados online com monitoramento das 10 ETEs



Fonte: Rotária do Brasil (2016).

Dentre as ETE selecionadas, foram analisados os períodos de maior acurácia, plausibilidade e confiabilidade dos dados e estes foram então as amostras de pesquisa. A Tabela 8 apresenta os períodos que foram utilizados para análise de cada parâmetro no presente trabalho.

Tabela 8 – Períodos de análise selecionados

ETE	PARÂMETRO	2014	2015												2016			
		dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	
A	Comp. do biogás																	dia 22
	Qesgoto e Qbiogás																	dia 22
	DQO lab																	dia 22
C	Comp. do biogás				dia 26													dia 20
	Qesgoto e Qbiogás						dia 30											dia 12
	DQO lab																	dia 22
D	Comp. do biogás																	
	Qesgoto e Qbiogás																	dia 06
	DQO lab																	dia 01
E	Comp. do biogás																	dia 17
	Qesgoto e Qbiogás																	dia 22
	DQO lab																	
F	Comp. do biogás																	dia 15
	Qesgoto e Qbiogás																	dia 18
	DQO lab																	dia 18
J	Comp. do biogás																	dia 03
	Qesgoto e Qbiogás																	dia 01
	DQO lab																	dia 01

Fonte: Autora (2016).

Quanto à vazão de biogás, a partir dos dados da vazão medida, temperatura e pressão do biogás, foi aplicada a Equação 4 para obter a vazão normal:

$$Q_N = \frac{Q_{GAS} * P_{GAS} * T_N}{T * P_N} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

Q_N = Vazão normal (Nm³/h)

Q_{GAS} = Vazão de gás no medidor (m³/h)

P_{GAS} = Pressão na linha de gás (sobrepessão + pressão atmosférica)
(mbar)

T_N = Temperatura normal (213,5 K)

T = Temperatura do gás (K)

P_N = Pressão normal (1013,25 mbar)

A Tabela 9 é uma extração do período de 1 hora de medição da ETE C e exemplifica a frequência das medições e transmissões dos dados brutos.

Tabela 9 – Dados recebidos durante uma hora de medição da ETE C

13.03.2015 Hora	Q _{esg} (L/s)	DQO A (mg/l)	DQO E (mg/l)	Q _{biogás} (m ³ /h)	T (C°)	P (mbar)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	O ₂ (%)
22:37	78,9	682,2	261,0	26,4	34,1	974,4	82,4	9,5	1636,1	0,0
22:42	77,5	682,2	256,4	26,4	34,1	975,1	82,4	9,5	1636,1	0,0
22:47	70,8	641,0	256,4	25,9	34,1	974,4	82,4	9,5	1623,9	0,0
22:52	73,5	686,8	256,4	25,9	34,1	974,4	82,4	9,5	1623,9	0,0
22:57	62,7	700,6	256,4	25,9	34,1	974,4	82,4	9,5	1623,9	0,0
23:02	71,8	700,6	257,9	25,6	34,1	974,4	82,4	9,7	1636,1	0,0
23:07	64,1	700,6	256,4	25,4	34,1	974,4	82,4	9,7	1636,1	0,0
23:12	65,4	700,6	247,3	25,4	34,1	974,4	82,4	9,7	1636,1	0,0
23:17	57,0	641,0	247,3	24,9	34,3	974,4	82,4	9,4	1538,5	0,0
23:22	59,8	631,9	247,3	24,3	34,3	973,6	82,4	9,4	1575,1	0,0
23:27	71,1	618,1	247,3	24,6	34,3	974,4	82,4	9,4	1575,1	0,0
23:32	66,5	618,1	239,6	23,6	34,3	974,4	82,4	9,4	1575,1	0,0
23:37	65,4	618,1	236,6	23,6	34,3	974,4	82,4	9,5	1562,9	0,0
23:42	58,7	618,1	225,9	23,6	34,3	975,1	82,4	9,5	1562,9	0,0
23:47	60,0	613,6	225,9	23,0	34,3	975,1	82,4	9,5	1562,9	0,0

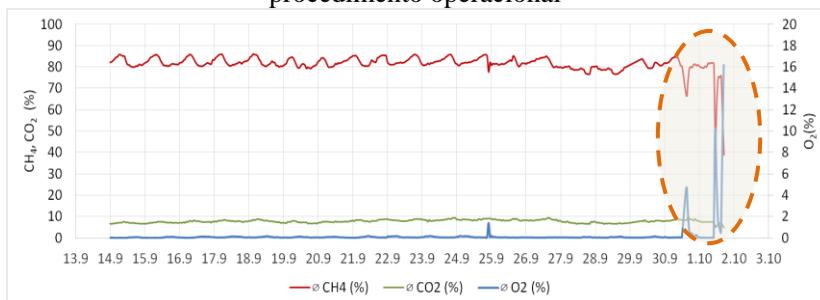
Fonte: Autora (2016).

As companhias de saneamento que integram o projeto ficaram responsáveis pelo monitoramento dos equipamentos e por informar a existência de mensagens de erro ou não conformidades nos aparelhos. Os operadores foram instruídos sobre quais procedimentos deveriam ser tomados para resolver diferentes tipos de problemas. Caso o problema fosse mais grave e fosse necessária a troca de componentes dos medidores, o fornecedor era contatado e era realizada a reposição.

Além disso, as companhias foram instruídas a enviar semanalmente o resultado de suas análises laboratoriais e a comunicação de atividades operacionais relevantes, como retirada de lodo ou de espuma. Assim, foi possível comparar os valores de laboratório com os valores da medição para garantir que estão funcionando bem e calibrados. As atividades operacionais foram utilizadas para auxílio na

interpretação dos dados. Na Figura 28 é possível visualizar o efeito da retirada de espuma sem o isolamento da linha de gás, proporcionando a entrada de ar na tubulação de coleta.

Figura 28 – Efeito da entrada de ar na tubulação de coleta devido a um procedimento operacional



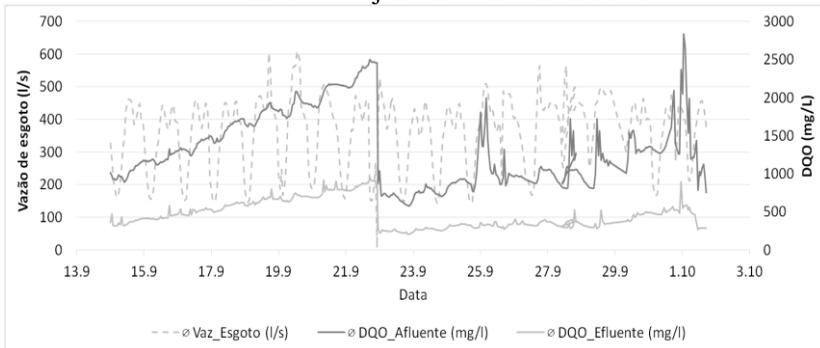
Fonte: Autora (2016).

Como se pode observar na área destacada os valores de metano baixaram para cerca de 40 – 50% e o oxigênio aumentou até 16% devido a entrada de ar na tubulação. Esse é um exemplo de um episódio em que os valores foram excluídos da análise das taxas de produção de gás e relações unitárias. Esse tipo de interpretação só foi possível através da troca de informação com as companhias, que neste caso informou que a entrada de ar foi devido a abertura para procedimento de remoção de espuma.

Cabe destacar que inicialmente as sondas de DQO apresentaram um problema de fábrica e tiveram de ser enviadas de volta ao fornecedor para troca, o que atrasou a coleta de dados de DQO em tempo real. Além disso, as bombas utilizadas para levar a amostra de esgoto até a sonda queimaram algumas vezes o que também acarretou em períodos sem medição de DQO.

Já o acúmulo de sujeira nas sondas ocasionou no surgimento de *drifts* em algumas estações, dependendo das características do esgoto, conforme a Figura 29 a seguir.

Figura 29 – Exemplo de período com drift dos valores de DQO devido ao acúmulo de sujeira na sonda na ETE A



Fonte: Autora (2016).

Os picos de DQO devido ao acúmulo de sujeira momentâneo na sonda também foram excluídos da análise.

Assim, os dados das análises de laboratório enviados pelas companhias foram imprescindíveis, pois foi realizada uma análise comparativa sobre as medições incluindo análise de fatores influentes na produção de biogás, caracterizando a produção de biogás em reatores anaeróbios tipo UASB em termos de vazão e composição, e sua variação de acordo com as diferentes cargas, condições climáticas e fatores operacionais.

3.3 ESTABELECIMENTO DAS RELAÇÕES UNITÁRIAS

De posse dos resultados das medições e de modo a possibilitar o alcance do objetivo específico 2, foram calculadas as seguintes relações unitárias:

- NL biogás/kg DQO removida
- NL biogás/m³ esgoto tratado
- NL biogás/hab.d
- NL CH₄/kg DQO removida
- NL CH₄/m³ esgoto tratado
- NL CH₄/hab.d

A análise detalhada e o cálculo com as relações unitárias foram apresentados somente para as ETEs em que houve o envio dos dados operacionais para conferência da confiabilidade dos valores e

interpretação dos mesmos. Além disso, cinco estações receberam a sonda de DQO do conserto somente em dezembro de 2015.

As ETE B, G, H e I tiveram uma baixa quantidade de dados confiáveis e por esse motivo foram excluídas da análise.

Para análise estatística dos dados foi empregado o programa “Statistica” versão 12. Este foi utilizado para a estatística descritiva, gráficos *Box-plot* e *scatterplot*, exclusão de *outliers*, identificar e verificar hipóteses de agrupamento (*cluster analysis*) e análise de variância para testar a hipótese de agrupamento identificada na *cluster analysis*. Além disso, foi utilizado o método de Spearman para elaborar a matriz de correlações entre as diferentes variáveis, com nível de significância de 5%.

3.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA, DIMENSIONAMENTO DE GASÔMETRO E MOTOGERADOR

De modo a possibilitar o alcance do objetivo específico 3, o potencial de geração de energia foi estimado com base na vazão de metano, calculada multiplicando-se a vazão de biogás medida pela concentração de metano média de cada ETE. Assim, com um teor energético de $10 \text{ kWh/m}^3 \text{CH}_4$ e a eficiência elétrica do conjunto motogerador de 36 % (SILVEIRA, et al.,2015), foi possível obter a energia elétrica a ser gerada pela Equação 5:

$$P = Q_{\text{CH}_4, \text{disponível}} \cdot EA_{\text{específica}} \cdot \eta_{\text{elétrico}} = Q_{\text{CH}_4, \text{disponível}} \cdot 10 \text{ kWh/m}^3 \cdot 36\%$$

Eq. 5

Onde,

P= potencial de geração de energia elétrica (kWh/d)

Q_{CH_4} = vazão de metano (m^3/d)

EA= energia específica do metano (10 kWh/m^3)

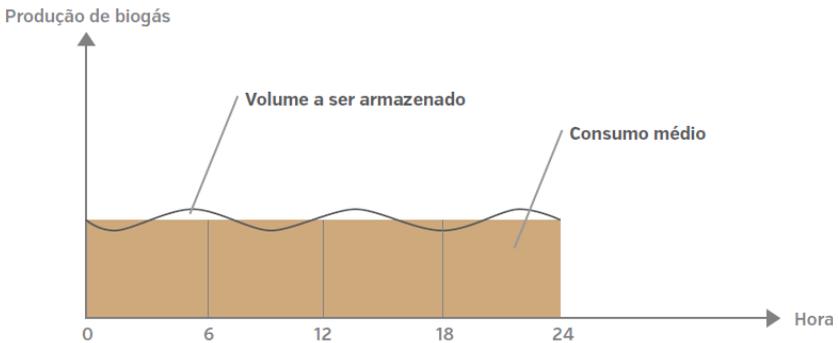
$\eta_{\text{elétrico}}$ = eficiência elétrica do motogerador (36%)

A potência elétrica do motor calcula-se dividindo por 24h, no caso de utilização contínua. Para cada ETE, além do tamanho de motor para a quantidade de biogás coletada e medida, foi estimado também o potencial de geração de energia adicional caso sejam realizadas melhorias nas instalações existentes, como correção de vazamentos. A estação com a melhor taxa de produção de biogás por quilograma de

DQO removida foi utilizada como modelo de situação atingível por todas as outras ETE.

O dimensionamento do gasômetro foi realizado com base no gráfico de geração e consumo médio de biogás, conforme indicado no Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em ETEs (SILVEIRA et al., 2015) e na norma alemã DWA M 363 (2010). A Figura 30 exemplifica a metodologia de dimensionamento no caso de digestores anaeróbios de lodo com alimentação contínua, ou seja, com produção de biogás mais estável e maior equivalência com relação à demanda de consumo de biogás. Como a alimentação de reatores UASB também é contínua, adotou-se a mesma metodologia.

Figura 30 – Padrão de produção e consumo de biogás com alimentação e utilização contínua



Fonte: DWA M 363 (2010).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo primeiramente apresenta-se o comportamento geral das ETE analisadas com relação a vazão de esgoto, DQO, vazão e composição de biogás. Em seguida, estão apresentadas as relações unitárias obtidas e a comparação com o modelo de Lobato (2011). Por último são realizadas estimativas do tamanho de motor-gerador, gasômetro e discussão sobre a viabilidade do aproveitamento energético em face dos valores expostos anteriormente.

Dos dados brutos foram extraídos os períodos de maior estabilidade nas medições e mais confiáveis (por exemplo, períodos após a limpeza e calibração dos equipamentos de medição). Cabe destacar que as ETE B, I, G e H foram excluídas da análise pela baixa quantidade de dados confiáveis.

4.1 QUANTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

De modo a alcançar o objetivo específico 1, nesse subcapítulo primeiramente apresenta-se a série histórica da vazão e composição de biogás do período analisado para cada estação. Os gráficos de série histórica serviram também para identificação prévia de alguma alteração significativa da produção de gás em algum período específico que pudesse ser justificada pelas demais variáveis. Em seguida, de maneira a agrupar os valores encontrados são apresentadas as estatísticas descritivas, incluindo gráficos Box-plot. Na sequência, foi analisado o comportamento horário da vazão de biogás durante períodos de aproximadamente uma semana para cada estação e, por fim, realizada a análise do comportamento da produção de biogás considerando a carga orgânica removida e fatores de influência como pluviometria e temperatura.

Optou-se por realizar a interpretação dos dados da série histórica em conjunto a estatística descritiva, de maneira a encontrar e destacar os pontos comuns entre as estações e para que a análise não se tornasse repetitiva.

4.1.1 Séries históricas

Nos subitens 4.1.1.1 a 4.1.1.6 são apresentadas as séries históricas das médias horárias de vazão de esgoto, biogás e composição

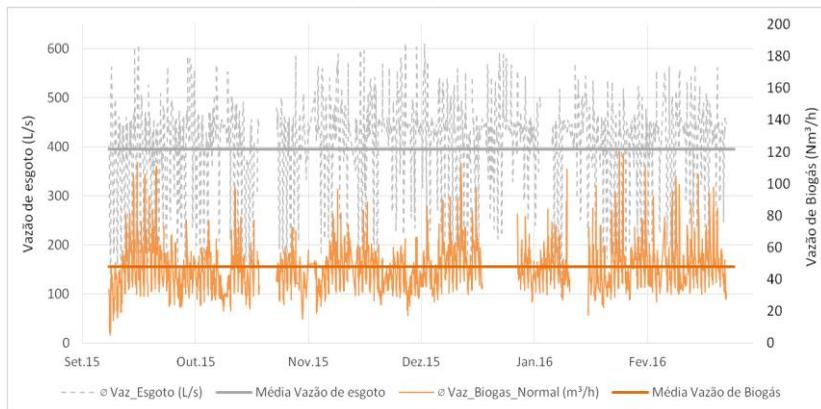
para cada estação. Ao observar as séries percebe-se que o conjunto de dados transmitidos é extremamente elevado (288 dados por dia de cada parâmetro) e que existem variações tanto de estação para estação, como na própria ETE ao longo do tempo. Os trechos em branco (vazio) são períodos que foram excluídos da análise por mau funcionamento dos medidores, falta de calibração ou ausência de transmissão para o banco de dados.

Observa-se que abaixo dos gráficos de série histórica foram apresentados os valores encontrados para cada estação separadamente, sem interpretá-los com relação aos valores obtidos pelas demais. A análise de maneira conjunta de todas as estações é realizada posteriormente no capítulo de estatística descritiva (4.1.2).

4.1.1.1 ETE A

Na Figura 31 pode-se visualizar as médias horárias da vazão de esgoto e biogás de setembro de 2015 a fevereiro de 2016.

Figura 31 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 12/09/2015 a 22/02/2016 na ETE A



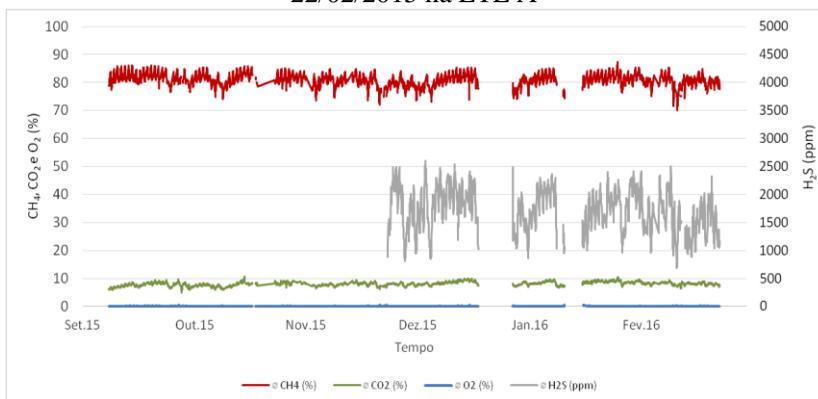
Fonte: Autora (2016).

Destaca-se que existe uma grande variação horária dos valores de vazão de esgoto e biogás. A média da vazão de esgoto foi de $395 (\pm 45)$ L/s, com mínimo de 279 L/s e máximo de 506 l/s. A vazão média de biogás foi de $48 (\pm 9,6)$ Nm³/h, com mínimo e máximo de 27,6 e 83,9 Nm³/h, respectivamente, sendo que 50% dos valores ficaram entre 41 e

53 Nm³/h. Pode-se observar também que existem picos diários dos dois parâmetros, sendo que o comportamento horário foi analisado em maior detalhe no item 4.1.3.

Na Figura 32 pode-se visualizar como se comportou a composição do biogás para o mesmo período.

Figura 32 – Médias horárias da composição do biogás de 12/09/2015 a 22/02/2015 na ETE A



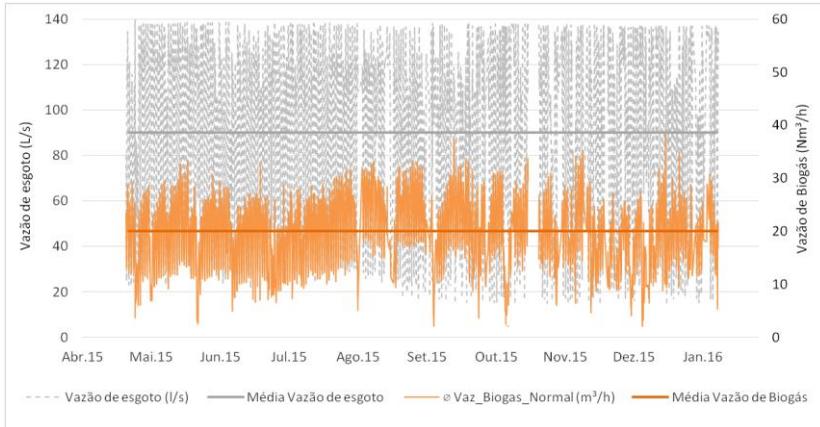
Fonte: Autora (2016).

Ao analisar a Figura 32 percebe-se que os valores de O₂, CO₂ e CH₄ não apresentaram variações muito elevadas, com média em 0,04 ($\pm 0,02$) %, 8,3 ($\pm 0,7$) % e 80,5 ($\pm 2,4$) % respectivamente. Destaca-se que 50% dos valores de concentração de metano ficaram entre 79,1 e 82,2 %. O H₂S apresentou maior variação, com média de 1746 (± 410) e mínimo de 376ppm e máximo de 2604ppm.

4.1.1.2 ETE C

Na Figura 33 a seguir pode-se visualizar as médias horárias da vazão de esgoto e biogás de abril de 2015 a janeiro de 2016.

Figura 33 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 30/04/2015 a 12/01/2016 na ETE C

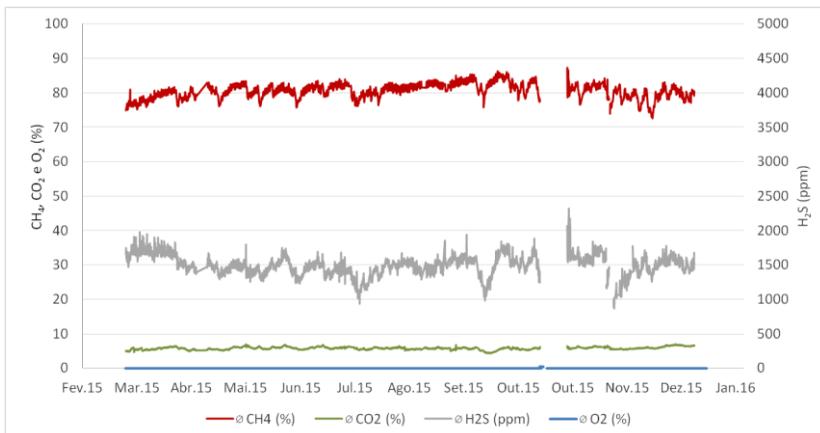


Fonte: Autora (2016).

A média da vazão de esgoto foi de $90 (\pm 15)$ L/s, com mínimo de 41 L/s e máximo de 137 L/s. A de biogás foi de $20,1 (\pm 3,8)$ Nm³/h, com mínimo e máximo de 8,7 e 30,9 Nm³/h, respectivamente, sendo que 50% dos valores ficaram entre 17,8 e 22,4 Nm³/h.

Para a composição de biogás foi possível utilizar os dados de fevereiro a dezembro de 2015, conforme a Figura 34.

Figura 34– Médias horárias da composição do biogás 26/02/2015 a 20/12/2015 na ETE C



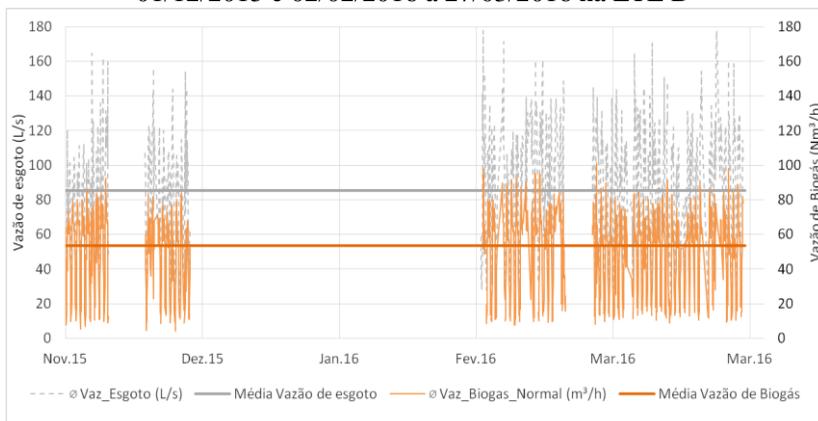
Fonte: Autora (2016).

Observa-se que os valores de O_2 , CO_2 e CH_4 não apresentaram variações significativas, com média de 0,03 ($\pm 0,04$) %, 6,2 ($\pm 1,0$) % e 80,7% ($\pm 2,6$), respectivamente. Destaca-se que 50% dos valores de concentração de metano ficaram entre 79,0 e 82,5 %. O H_2S apresentou maior variação, com média de 1494 (± 192) e mínimo 224 ppm e máximo 2460 ppm.

4.1.1.3 ETE D

Na Figura 35 pode-se visualizar as médias horárias da vazão de esgoto e biogás de novembro de 2015 a março de 2016.

Figura 35 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 06/11 a 01/12/2015 e 02/02/2016 a 27/03/2016 na ETE D



Fonte: Autora (2016).

Observa-se que em dezembro e janeiro houve uma falha de transmissão dos dados, retornando a normalidade em fevereiro. A média da vazão de esgoto foi de 85,2 ($\pm 18,8$) L/s, com mínimo de 42,2 L/s e máximo de 130,4 L/s. A de biogás foi de 53,6 ($\pm 11,3$) Nm^3/h , com mínimo e máximo em 9,6 e 85,6 Nm^3/h , respectivamente, sendo que 50% dos valores ficaram entre 49,6 e 59,9 Nm^3/h .

Para a composição de biogás cabe destacar que o momento da calibração detectou-se o defeito em uma das peças do medidor de composição e por esse motivo não foi possível apresentar os dados para a ETE D. Foi realizada uma medição com o medidor portátil de gases, que apresentou o valor de 73,4 % de metano. Para os cálculos

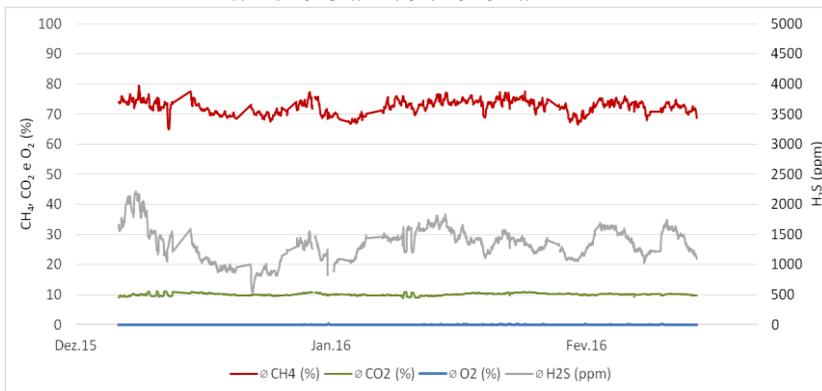
posteriores em que o teor de metano foi necessário, adotou-se o valor de 70%, de modo a situar-se na faixa conservadora.

4.1.1.4 ETE E

Para a ETE E, os valores para vazão de biogás durante grande parte do dia encontravam-se abaixo do limite de confiabilidade do medidor e, portanto, não puderam ser apresentados.

Para a composição de biogás foi possível utilizar os dados de dezembro de 2015 a fevereiro de 2016, conforme a Figura 36.

Figura 36 – Médias horárias da composição do biogás de 17/12/2015 a 22/02/2016 na ETE E



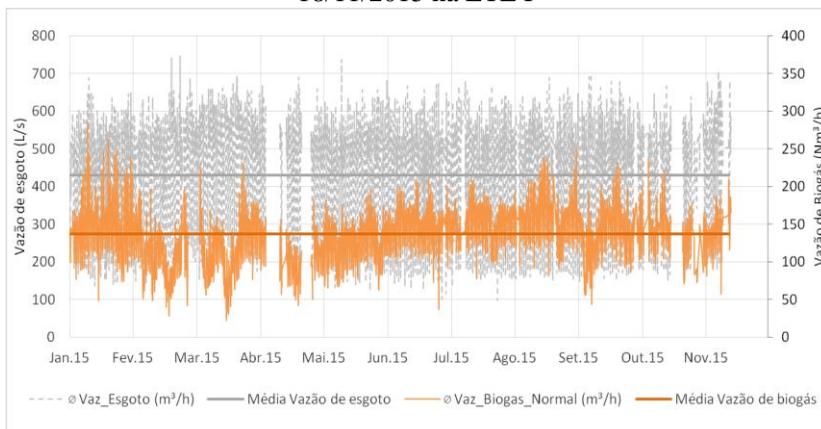
Fonte: Autora (2016).

Observa-se que os valores de O₂ praticamente não tiveram variação, sendo a média 0,01%, e o máximo 0,14%. O CO₂ e CH₄ apresentaram maior variação que o O₂, porém ainda pequena, sendo a média do CO₂ de 10,1 (±0,4) % e do CH₄ de 72,5% (± 2,5). Destaca-se que 50% dos valores de concentração de metano ficaram entre 70,4 e 74,5 %. O H₂S apresentou maior variação, com média em 1330,5 (±321,7) ppm, e valores mínimo e máximo de 293 ppm e 2217 ppm, respectivamente.

4.1.1.5 ETE F

Na Figura 37 pode-se visualizar as médias horárias da vazão de esgoto e biogás de dezembro de 2014 a novembro de 2015.

Figura 37 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 11/12/2014 a 18/11/2015 na ETE F

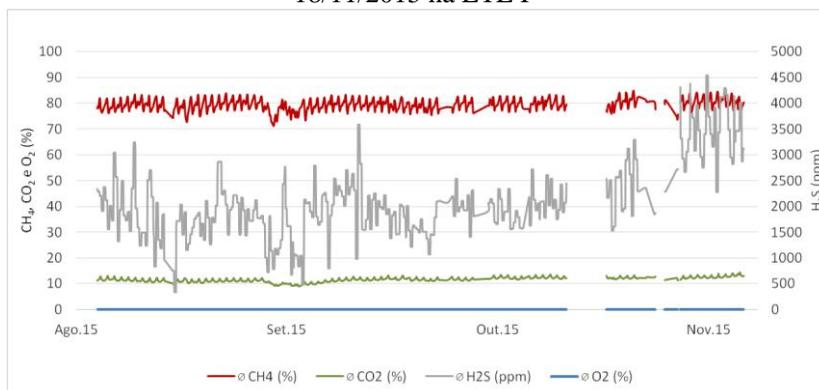


Fonte: Autora (2016).

Para a ETE F, a média da vazão de esgoto foi de $430 (\pm 27,6)$ L/s, com mínimo de 344 L/s e máximo de 526 L/s. A de biogás foi de $137,2 (\pm 24,8)$ Nm^3/h , com mínimo e máximo em 63,5 e 201,4 Nm^3/h , respectivamente, sendo que 50% dos valores ficaram entre 122,7 e 155,3 Nm^3/h .

Para a composição de biogás foi possível utilizar os dados de agosto a novembro de 2015, conforme a Figura 38.

Figura 38 – Médias horárias da composição do biogás de 15/08/2015 a 18/11/2015 na ETE F



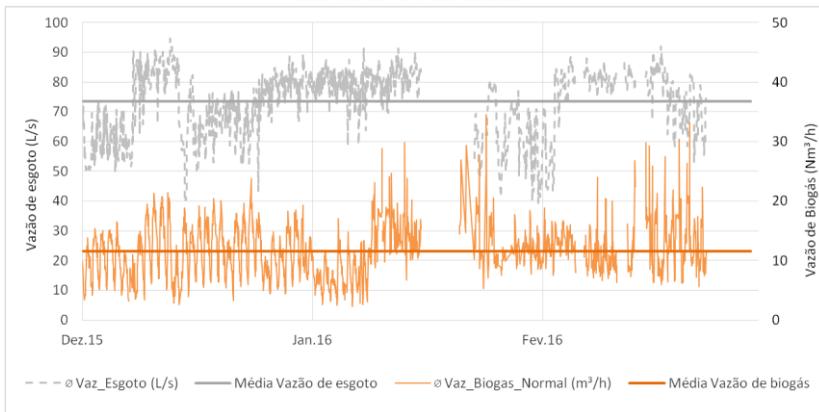
Fonte: Autora (2016).

Observa-se que os valores de O_2 praticamente não tiveram variação, sendo a média 0,00%, e o máximo 0,11%. O CO_2 e CH_4 apresentaram maior variação que o O_2 , porém ainda pequena, sendo a média do CO_2 de 11,6 ($\pm 1,0$) % e do CH_4 de 79,5% ($\pm 2,2$). Destaca-se que 50% dos valores de concentração de metano ficaram entre 78,2 e 81,0 %. O H_2S apresentou maior variação, com média em 2066 (± 698), mínimo 342 ppm e máximo 4383 ppm.

4.1.1.6 ETE J

Na Figura 39 pode-se visualizar as médias horárias da vazão de esgoto e biogás de dezembro de 2015 a fevereiro de 2016.

Figura 39 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 01/12/2015 a 22/02/2016 na ETE J

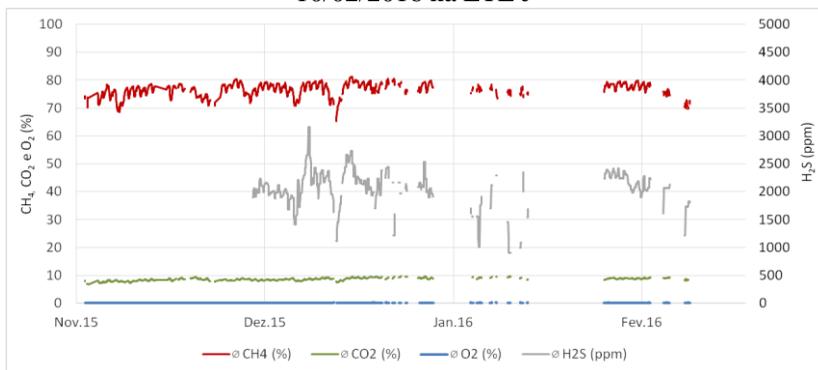


Fonte: Autora (2016).

Para a ETE J, a média da vazão de esgoto foi de 73,6 ($\pm 9,6$) L/s, com mínimo de 53,3 L/s e máximo de 85,6 L/s. Destaca-se que 50% dos valores ficaram entre 66,2 e 81,2 L/s. A média da vazão de biogás foi de 11,6 ($\pm 2,8$) Nm^3/h , com mínimo e máximo de 6,1 e 23,5 Nm^3/h , respectivamente, sendo que 50% dos valores ficaram entre 10,2 e 13,2 Nm^3/h .

Para a composição de biogás foi possível utilizar os dados de novembro de 2015 a fevereiro de 2016, conforme a Figura 40.

Figura 40 – Médias horárias da composição do biogás de 03/11/2015 a 10/02/2016 na ETE J



Fonte: Autora (2016).

Observa-se que os valores de O_2 , CO_2 e CH_4 não apresentaram variações muito elevadas nos dados aqui apresentados, com média de $0,03 (\pm 0,04) \%$, $8,8 (\pm 0,4) \%$ e $77,2\% (\pm 2,5)$ respectivamente. Nos períodos que estão em branco em dezembro, janeiro e fevereiro houve uma falha no sensor de composição em parte do período e na outra entrada de ar na tubulação de coleta, causando um aumento da concentração de oxigênio e decaimento da de metano e sulfeto de hidrogênio. Destaca-se que 50% dos valores de concentração de metano ficaram entre 76,3 e 78,9 %. O H_2S apresentou maior variação, com média em 2099 (± 335) ppm, com mínimo e máximo de 476 ppm e 3162 ppm, respectivamente.

4.1.2 Estatística descritiva dos dados de vazão de esgoto, biogás e composição

Com o objetivo de integrar os resultados apresentados no capítulo 4.1.1, na Tabela 10 apresenta-se a estatística descritiva para os parâmetros de vazão de esgoto e vazão de biogás obtidos durante o período de monitoramento para cada ETE.

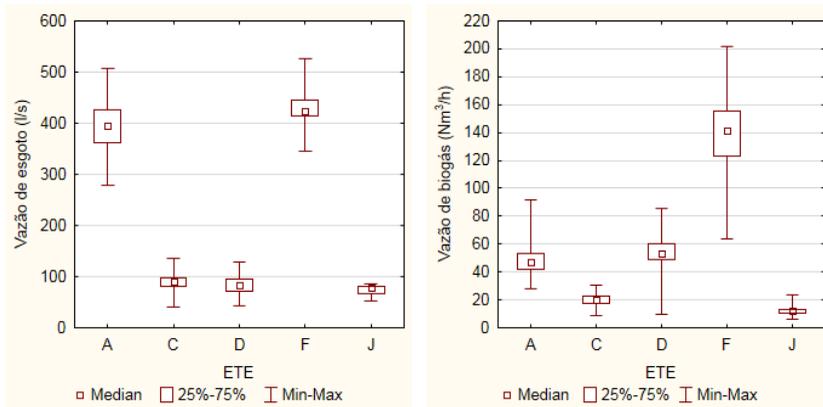
Tabela 10 – Estatística descritiva da vazão de esgoto e biogás para as estações monitoradas

ETE	Parâmetro	Média	Mínimo	Máximo	25%	75%	DP
A	Vazão de esgoto (L/s)	395,0	279,2	506,1	360,6	426,1	45,1
	Vazão de biogás (Nm ³ /h)	47,9	27,6	83,9	41,5	53,0	9,6
C	Vazão de esgoto (L/s)	90,2	41,3	136,3	81,8	98,1	15,4
	Vazão de biogás (Nm ³ /h)	20,1	8,7	30,9	17,8	22,4	3,8
D	Vazão de esgoto (L/s)	85,2	42,2	130,4	72,4	93,9	18,8
	Vazão de biogás (Nm ³ /h)	53,6	9,6	85,6	49,6	59,9	11,3
F	Vazão de esgoto (L/s)	429,8	344,4	525,7	413,4	446,2	27,6
	Vazão de biogás (Nm ³ /h)	137,2	63,5	201,4	122,7	155,3	24,8
J	Vazão de esgoto (L/s)	73,6	53,3	85,6	66,2	81,2	9,6
	Vazão de biogás (Nm ³ /h)	11,6	6,1	23,5	10,2	13,2	2,8

Fonte: Autora (2016).

Para visualizar e interpretar os valores de maneira conjunta foram elaborados os gráficos Box-plot apresentados na Figura 41.

Figura 41 – Gráficos Box-Plot das Vazões de esgoto e biogás para as ETEs analisadas



Fonte: Autora (2016).

A partir da observação dos gráficos da Figura 41, constata-se que não existe uma correspondência clara entre a vazão de esgoto que está sendo tratada e a vazão de biogás, a exemplo dos valores obtidos para esses parâmetros nas estações A e F. Ou seja, de maneira geral

observou-se uma variação grande na produção de gás para estações de porte similares.

Essas diferenças são atribuídas a diversos fatores como concentração do esgoto afluente, diferentes cargas orgânicas volumétricas, diferentes eficiências de remoção de matéria orgânica (devido a fatores como temperatura, controle e rotina operacional, projeto dos reatores, etc.) e estado atual das instalações possibilitando a ocorrências de vazamentos para a atmosfera, por exemplo. Os fatores supracitados são discutidos, em maior detalhe, para as estações A e C no item 4.1.4 e de maneira geral para todas as estações na comparação das relações unitárias de cada estação (item 4.2).

As estatísticas descritivas referentes aos dados de composição do biogás extraídos dos períodos confiáveis de medição apresentados no item 4.1.1 são apresentadas na Tabela 11.

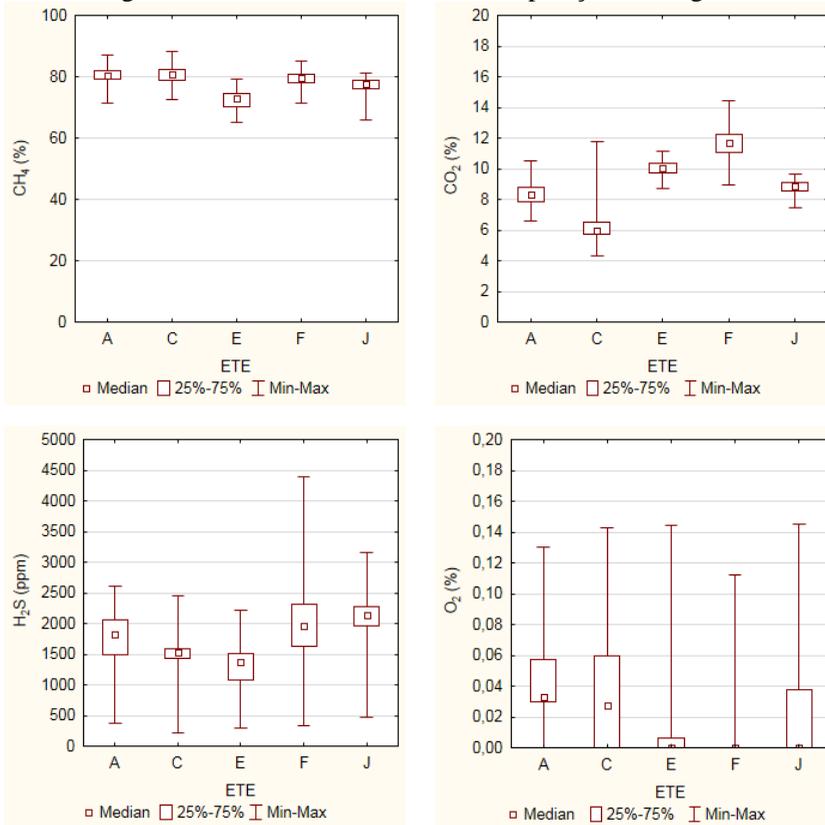
Tabela 11 - Estatísticas descritivas dos dados de composição do biogás

	Parâmetros	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	25%	75%	DP
ETE A	CH ₄ (%)	1450	80,5	80,6	71,5	87,2	79,1	82,2	2,4
	CO ₂ (%)	1450	8,3	8,3	6,6	10,5	7,9	8,8	0,7
	H ₂ S (ppm)	1450	1746	1817	376	2604	1486	2057	410
	O ₂ (%)	1450	0,04	0,03	0,00	0,13	0,03	0,06	0,02
ETE C	CH ₄ (%)	2579	80,7	80,7	72,6	88,4	79,0	82,5	2,6
	CO ₂ (%)	2579	6,2	6,0	4,3	11,8	5,7	6,6	1,0
	H ₂ S (ppm)	2579	1494	1521	224	2460	1428	1595	192
	O ₂ (%)	2579	0,03	0,03	0,00	0,14	0,00	0,06	0,04
ETE E	CH ₄ (%)	910	72,5	73,0	65,0	79,4	70,4	74,5	2,5
	CO ₂ (%)	910	10,1	10,0	8,7	11,1	9,7	10,4	0,4
	H ₂ S (ppm)	910	1330	1375	293	2217	1084	1516	322
	O ₂ (%)	914	0,01	0,00	0,00	0,14	0,00	0,01	0,02
ETE F	CH ₄ (%)	1787	79,5	79,6	71,3	84,9	78,2	81,0	2,1
	CO ₂ (%)	1787	11,6	11,7	8,9	14,5	11,0	12,2	0,9
	H ₂ S (ppm)	1787	2066	1954	342	4383	1636	2324	698
	O ₂ (%)	1787	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,01
ETE J	CH ₄ (%)	704	77,2	77,7	65,8	81,2	76,3	78,9	2,5
	CO ₂ (%)	704	8,8	8,8	7,5	9,6	8,6	9,1	0,4
	H ₂ S (ppm)	704	2099	2137	476	3162	1966	2283	335
	O ₂ (%)	704	0,03	0,00	0,00	0,15	0,00	0,04	0,04

Fonte: Autora (2016).

Para melhor visualização dos resultados foram elaborados os gráficos “Box-plot” apresentados na Figura 42.

Figura 42 – Gráficos Box-Plot da composição de biogás



Fonte: Autora (2016).

O biogás apresentou elevadas concentrações de metano (de 65% a 88%), sendo que as médias variaram entre 72 e 81%. O CO₂ variou de 4 a 14%, com média em torno de 8% e O₂ ficou próximo a 0%. Os valores confirmam a faixa reportada na literatura para biogás de reatores UASB (SILVEIRA et al., 2015; DWA-M 361, 2011), sendo que a concentração de metano está no limite superior. Já no caso dos valores do H₂S observa-se uma variação grande (225 a 440 ppm), com médias variando entre 1500 e 2000 ppm, sendo necessário tratamento para sua

remoção antes do componente de aproveitamento energético, principalmente no caso de utilização de motogeradores, que exigem um teor de H_2S abaixo de 130 ppm devido ao alto potencial corrosivo desta substância (SOREANU et al., 2011); DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008 apud CRISTIANO, 2015). Uma observação importante é que mesmo na ETE F, que teve a maior variação de concentrações, o valor de 75% não passou de 2.400 ppm, indicando que o tratamento principal (remoção grosseira) pode ser dimensionado para 2500 ppm e sendo que a remoção fina, carvão ativado, por exemplo, seria responsável pelo tratamento do restante (concentrações traço e eventuais picos). Assim, como reportado por Cabral et al. (2015), a soma do CH_4 com o CO_2 é menor que 100%. Portanto, conforme os autores Noyola et al. (2006) apresentam, o biogás de reatores UASB pode possuir concentrações de N_2 de 10 a 25%, que é, provavelmente, o gás complementar para atingir os 100%.

Em 2013, a ETE F realizou uma análise de amostras durante algumas horas do dia que resultou em valores de CH_4 de 74 a 78%, CO_2 de 9 a 11% e 11 a 14% de N_2 . Esse fato auxilia a confirmar os valores expostos no parágrafo anterior e também a confirmar a hipótese de que a porcentagem restante para atingir os 100% seja do gás N_2 .

Além disso, na visita para realização de calibração desse medidor foram realizadas medições nas ETE com um medidor de gases portátil (marca Landtec) que apresentou valores próximos (variação de 2 a 3 %) aos medidos pelo medidor online.

4.1.3 Análise do comportamento da produção horária de biogás

Para visualizar e entender o comportamento horário da produção de biogás apresentado nas séries históricas do item 4.1.1, foram selecionados períodos com transmissão regular de uma semana de cada estação e elaborados os gráficos apresentados nas Figuras 43 a 47.

Figura 43 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 01/10/2015 a 07/10/2015 na ETE A

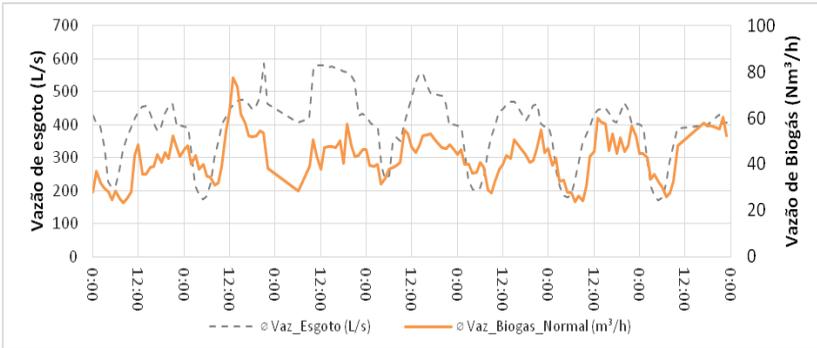


Figura 44– Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 16/07/2015 a 22/07/2015 na ETE C

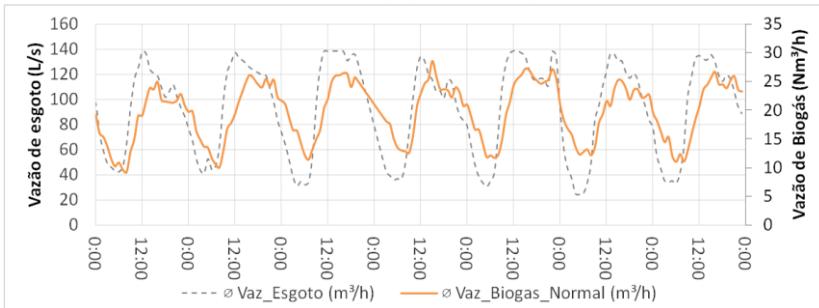
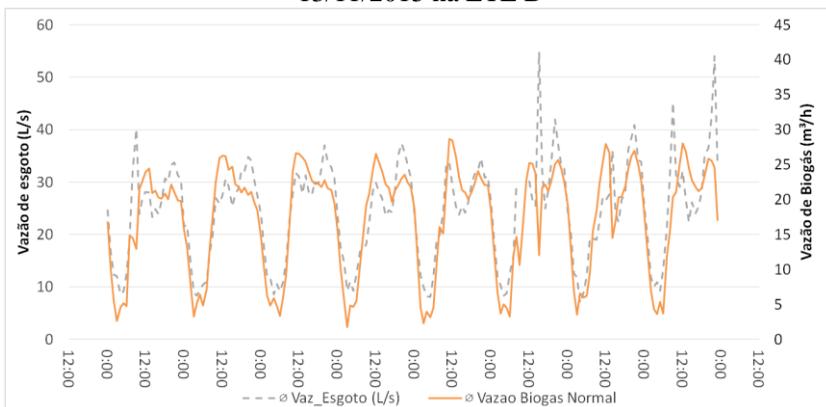
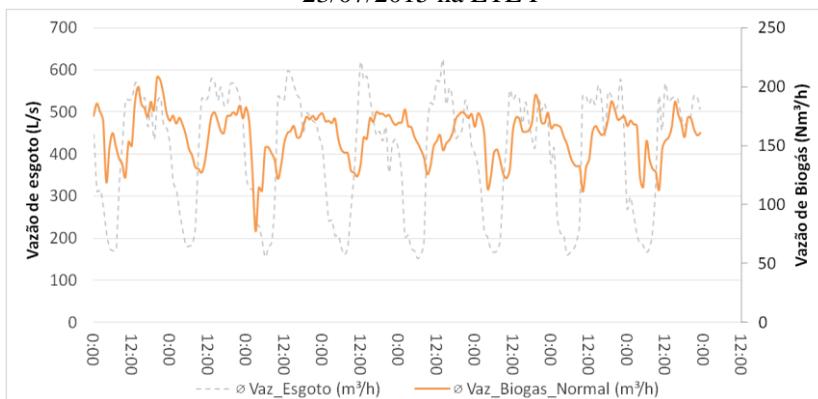


Figura 45– Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 06/11/2015 a 13/11/2015 na ETE D



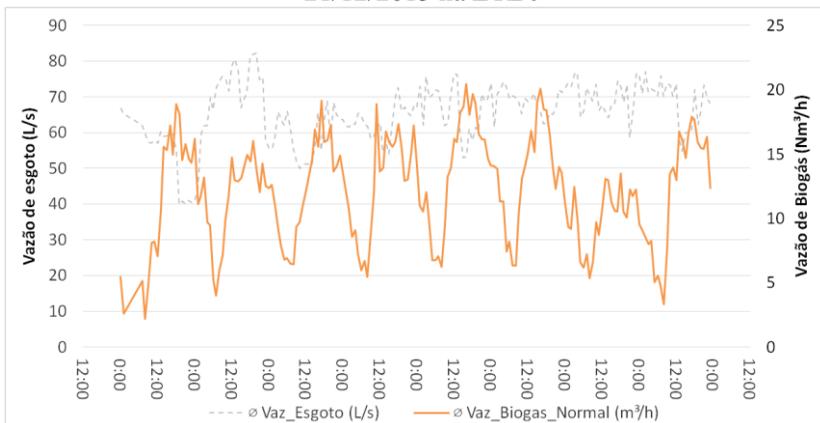
Fonte: Autora (2016).

Figura 46– Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 16/07/2015 a 23/07/2015 na ETE F



Fonte: Autora (2016).

Figura 47 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 14/12/2015 a 21/12/2015 na ETE J



Fonte: Autora (2016).

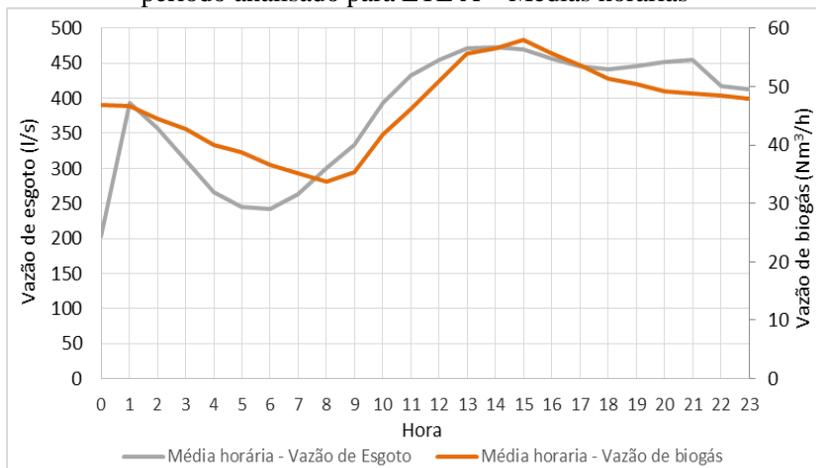
Assim como identificado por Possetti et al. (2013) através de medições realizadas em escala real, a produção de biogás seguiu um comportamento temporal variável, periódico e não estacionário. De modo geral, as medições também evidenciaram um padrão diário ($\Delta t = 1$ dia) de produção e desprendimento de biogás.

Na ETE C percebe-se que os valores de vazão de biogás acompanharam o comportamento da vazão de esgoto de maneira mais evidente que as demais. Os valores máximos de biogás são observados no período de 15 a 18 horas e mínimos de 07 a 10 horas, aproximadamente 3 horas após os máximos e mínimos da vazão de esgoto.

Na ETE J há um by-pass do esgoto bruto para tratamento aeróbio que faz com que a vazão de esgoto para o reator anaeróbio não sofra variações tão grandes quanto às demais. A vazão de biogás varia, pois há uma variação da concentração de DQO durante o dia.

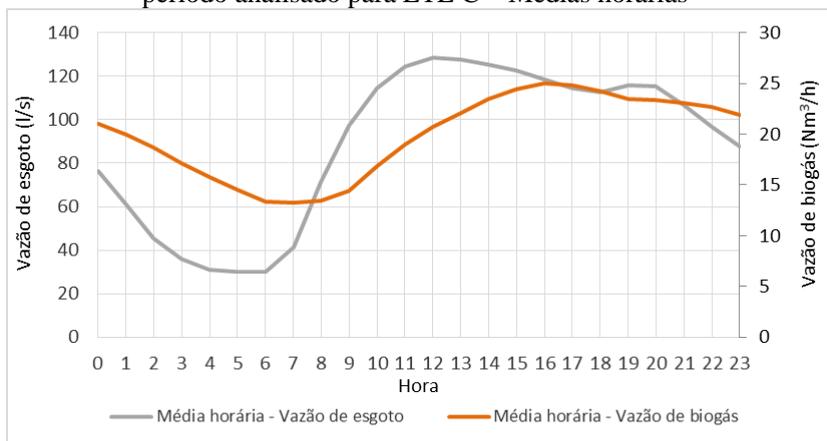
Para resumir o comportamento de cada ETE durante as 24 horas do dia foram elaborados os gráficos de média horária para todo o período analisado, apresentados nas Figuras 48 a 52.

Figura 48 - Comportamento horário da produção média de biogás no período analisado para ETE A – Médias horárias



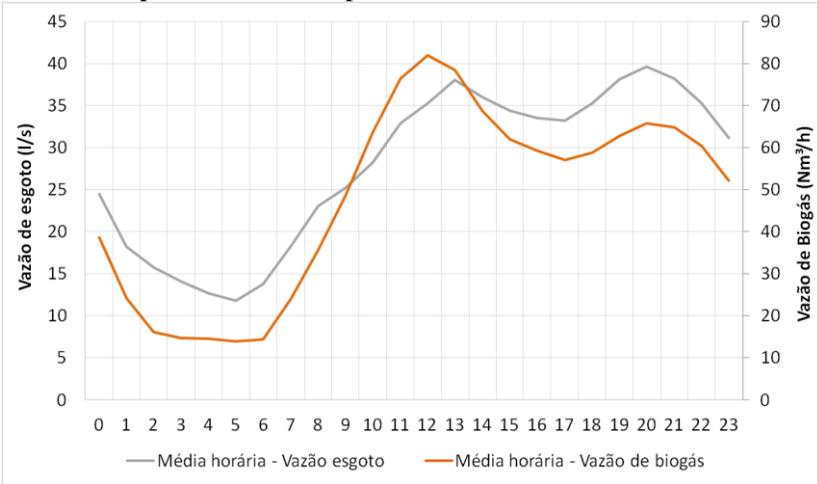
Fonte: Autora (2016).

Figura 49 - Comportamento horário da produção média de biogás no período analisado para ETE C – Médias horárias



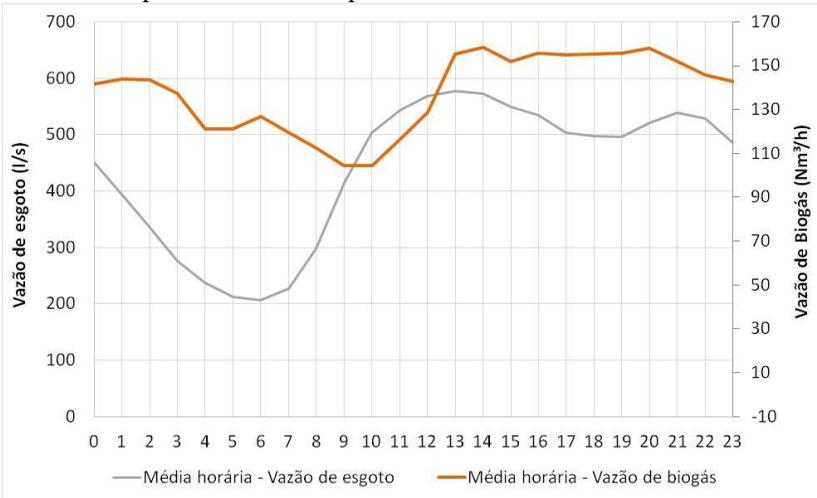
Fonte: Autora (2016).

Figura 50- Comportamento horário da produção média de biogás no período analisado para ETE D- Médias horárias



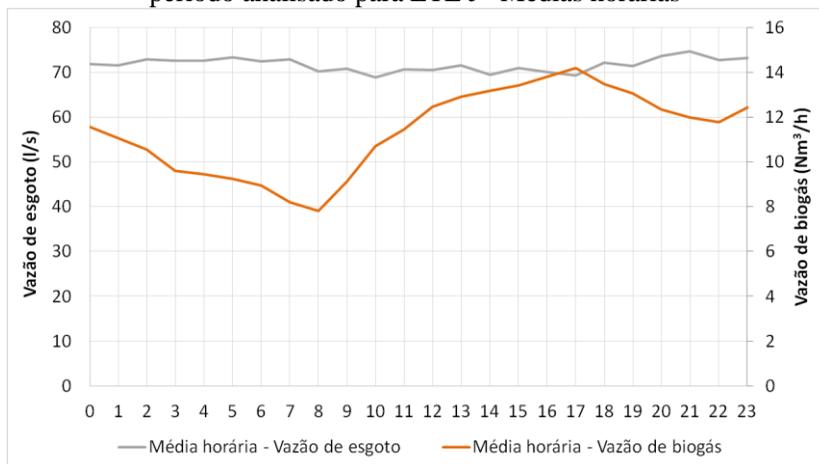
Fonte: Autora (2016).

Figura 51 - Comportamento horário da produção média de biogás no período analisado para ETE F- Médias horárias



Fonte: Autora (2016).

Figura 52- Comportamento horário da produção média de biogás no período analisado para ETE J– Médias horárias



Fonte: Autora (2016).

Percebe-se que a produção máxima de biogás nas estações ocorre, em geral, no período da tarde, sendo que as ETE A, C e F possuem um comportamento similar, sendo o pico de produção às 15, 16 e 14 horas, respectivamente. Essas estações possuem características parecidas no que tange a qualidade do esgoto e hidrograma de vazão. Já a ETE D apresentou o pico de vazão de biogás ao meio dia. Esta ETE possui concentrações de esgoto elevadas e atípicas para as estações brasileiras, com DQO afluente em torno de 1100 mg/L. Além disso conta com um by-pass para vazões maiores de 210 L/s diretamente para a primeira lagoa e um segundo by-pass (no canal do tratamento preliminar) que desvia parte do fluxo diretamente para as lagoas no caso de vazões elevadas. Nesse caso, portanto, evita-se que o reator UASB sofra com choques hidráulicos em eventos de chuva, por exemplo, já que os mesmos já estão funcionando com a capacidade total.

No caso da ETE J, a vazão máxima de biogás ocorreu em média às 17 horas. Sua variação deve-se a variação da concentração de matéria orgânica, já que a vazão de esgoto permanece aproximadamente constante devido a um desvio que envia o restante da vazão para o tratamento aeróbio.

O gráfico da produção média de biogás em cada hora do dia foi utilizado também para o dimensionamento do gasômetro, conforme capítulo 5.3.

Para melhor interpretar o comportamento da produção de gás é necessário considerar as demais variáveis influentes, além de vazão de esgoto, tais como DQO, temperatura e eficiência do reator.

4.1.4 Influência da carga orgânica, pluviometria e temperatura na produção de biogás

4.1.4.1 ETE A

Para que fosse possível relacionar as variáveis que influenciam na produção de biogás e diante da baixa quantidade de resultados de DQO da sonda, buscou-se uma maior quantidade de dados operacionais fornecidos pelas estações. Nesse sentido, na estação A foi realizado, durante todo o período da presente pesquisa, um acompanhamento operacional com análises de amostras compostas diárias de DQO e DQO filtrada, de 3 em 3 dias, aproximadamente. Além disso, foram proporcionados os valores de medição de temperatura do esgoto, dados de pluviometria e outras informações operacionais.

Com base nesses dados foi possível fazer uma interpretação mais aprofundada das variáveis que influenciaram a geração de biogás para o período de 12/09/2015 a 22/02/2016.

A estatística descritiva dos dados diários em questão está apresentada na Tabela 12 a seguir:

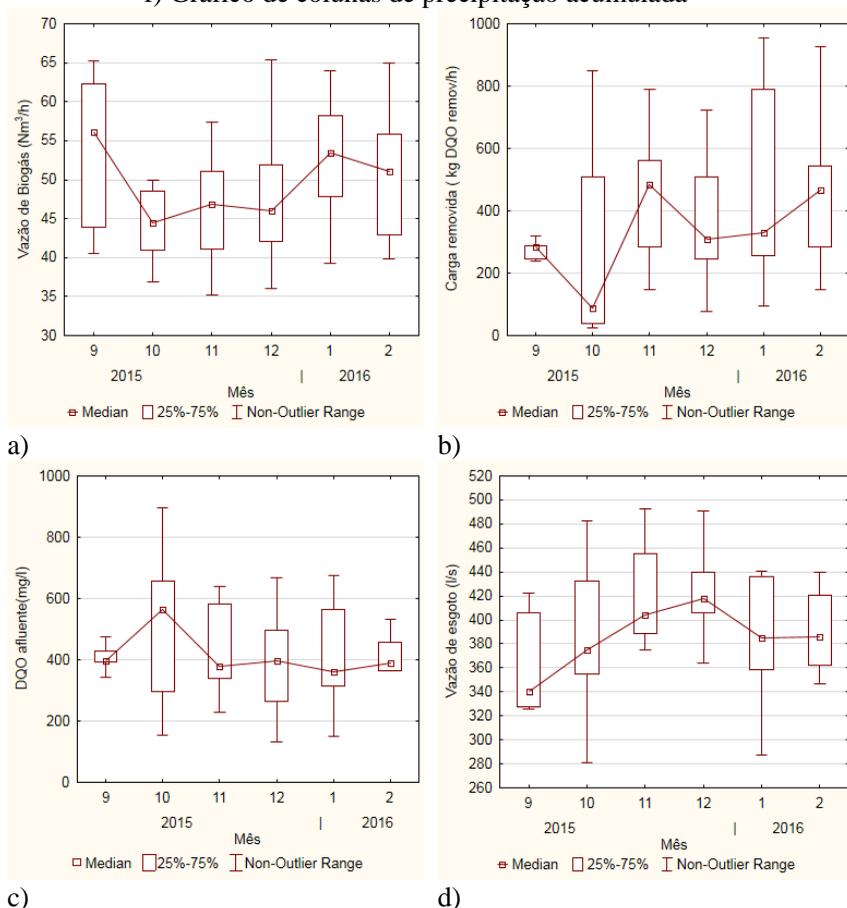
Tabela 12 – Estatística descritiva dos parâmetros da ETE A

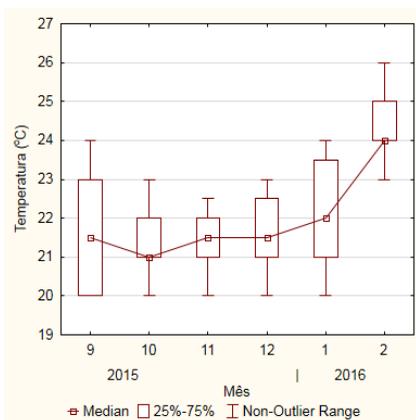
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	DP
Vazão de esgoto (l/s)	64	397,40	280,87	492,67	46,76
DQO afluente (mg/l)	68	453,72	132,00	1244,00	225,14
DQO removida (mg/l)	56	298,57	19,00	1144,00	198,61
Carga removida (kg DQO remov/h)	56	417,03	24,51	1473,23	276,59
Temperatura (°C)	68	21,87	20,00	26,00	1,43
Precipitação (mm/d)	68	7,88	0,00	45,00	10,70
Vazão de Biogás (Nm ³ /h)	60	48,83	35,14	65,41	8,04

Fonte: Autora (2016).

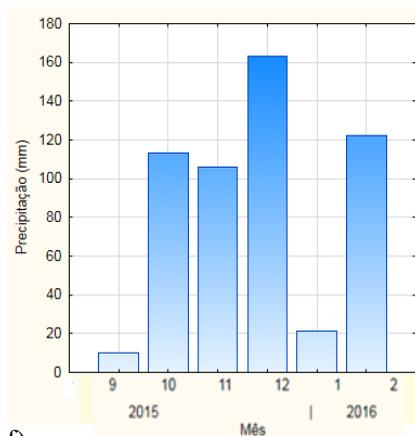
Para avaliar a variação temporal desses itens em conjunto foram elaborados os gráficos Box-plot apresentados na Figura 53.

Figura 53 - Gráficos Box-plot das variáveis: a) Vazão de biogás, b) Carga removida, c) DQO afluente, d) Vazão de esgoto, e) temperatura. f) Gráfico de colunas de precipitação acumulada





e)



f)

Fonte: Autora (2016).

Observando os gráficos não é possível, apenas visualmente, explicar a relação das variáveis com a produção de biogás, devido a sobreposição do efeito de cada uma.

Para verificar a relação entre as variáveis foram elaboradas matrizes de correlações pelos métodos de Gamma, Kendall Tau e Spearman. Eles apresentaram resultados próximos e, portanto, optou-se por apresentar a tabela obtida pelo método de Spearman, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 – Matriz de correlações entre as variáveis*

Variável	Vazão de Biogás	Vazão de esgoto	DQO afluente	Carga removida	Precipitação	Temperatura
Vazão de Biogás	1,000000	-0,268449	0,305117	0,313709	-0,353712	0,224307
Vazão de esgoto	-0,268449	1,000000	-0,330136	-0,268992	0,376632	-0,164344
DQO afluente	0,305117	-0,330136	1,000000	0,933304	-0,077856	0,042798
Carga removida	0,313709	-0,268992	0,933304	1,000000	-0,134246	0,105031
Precipitação	-0,353712	0,376632	-0,077856	-0,134246	1,000000	0,142206
Temperatura	0,224307	-0,164344	0,042798	0,105031	0,142206	1,000000

* Correlações marcadas em vermelho tem significância ao nível $p < 0,05000$ (5%).

Fonte: Autora (2016).

O nível de significância adotado foi de 5%, e confirmou que a vazão de biogás está correlacionada positivamente com DQO afluente e carga removida e inversamente com precipitação e vazão de esgoto. Já a relação com temperatura não atingiu o nível de significância estatístico pretendido. Destaca-se que o intervalo analisado, de 12/09 a 22/02, engloba dois períodos com chuva e dessa maneira a pluviometria teve uma influência negativa significativa.

Destaca-se assim que parâmetros como vazão de esgoto, DQO e pluviometria foram mais determinantes na variação da produção de DQO do que temperatura, o que foi verificado também por Campello (2009) ao monitorar um reator em escala real, concluindo que outras variáveis desempenharam papel mais importante do que a temperatura. Esse comportamento com temperaturas entre 20 e 25 graus foi também reportado por Van Haandel e Lettinga (1994).

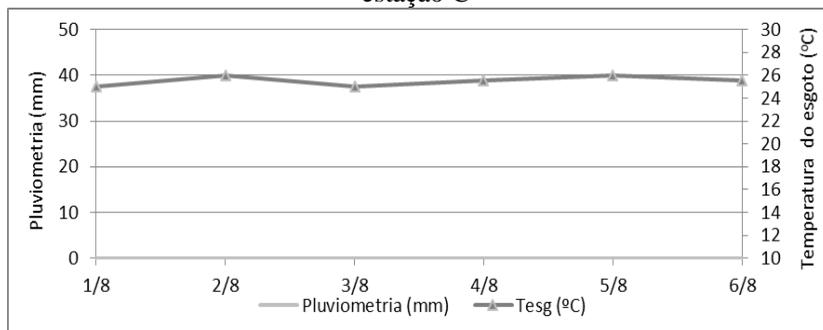
4.1.4.2 ETE C

Para a ETE C foi possível extrair dois períodos confiáveis de funcionamento da sonda de DQO.

Com o intuito de comparação foram selecionados dois períodos com características climáticas distintas, um de seca e temperatura estável, tendo então influência climática mínima e outro de chuvas e maior variação de temperatura.

Na Figura 54 pode-se visualizar as variáveis de precipitação acumulada e temperatura para o período de estiagem de 01/08 a 06/08/2015.

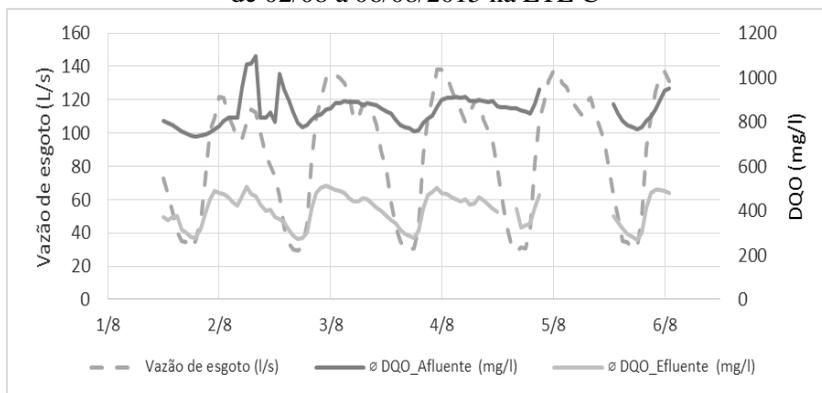
Figura 54 – Pluviometria e temperatura do esgoto de 01/08 a 06/08 na estação C



Fonte: Autora (2016).

O comportamento da DQO de entrada e saída do UASB e a vazão de esgoto para o período em questão está apresentado na Figura 55.

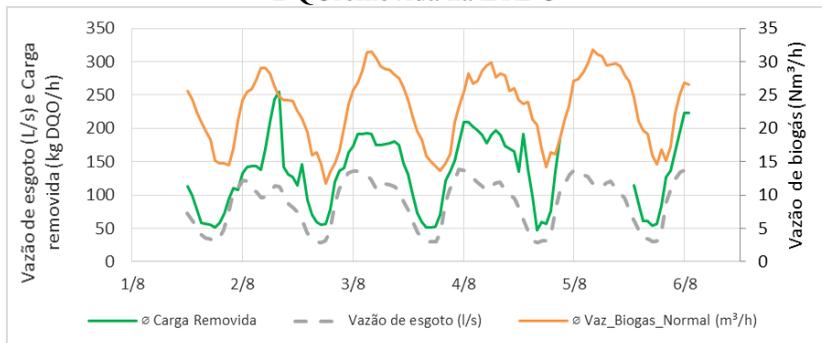
Figura 55– Médias horárias da vazão de esgoto e concentração de DQO de 02/08 a 06/08/2015 na ETE C



Fonte: Autora (2016).

Relacionando os parâmetros acima, é possível chegar ao comportamento da carga removida e observar o comportamento da produção de biogás a partir desta, conforme apresentado na Figura 56.

Figura 56 – Médias horárias da vazão de esgoto e biogás e carga de DQOremovida na ETE C

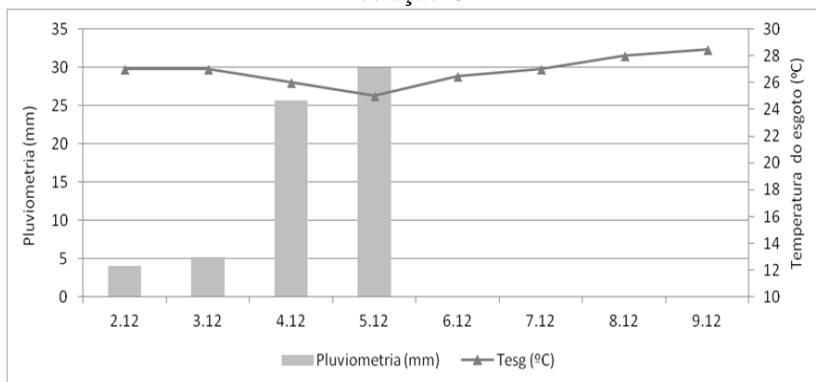


Fonte: Autora (2016).

Destaca-se que a época em questão era de estiagem, sendo que no período apresentado no gráfico e nos seis dias que o antecederam não ocorreram precipitações no local, sendo o volume acumulado de 0 mm. Percebe-se também que não ocorreram grandes variações de temperatura, com a temperatura média do esgoto de 25,5 °C e a temperatura média ambiente 23,5 °C. Por conseguinte, pode-se afirmar que essa amostra selecionada representa um período de estabilidade climática e, portanto, o comportamento apresentado foi guiado pela vazão de esgoto, DQO afluente e eficiência do reator, sem influência significativa de temperatura ou precipitação que causassem uma mudança do comportamento da produção de gás. Fica evidente o comportamento temporal variável e periódico dos parâmetros vazão de esgoto, DQO de entrada e saída e, conseqüentemente, carga removida, assim como produção de biogás, o que confere com o reportado por Possetti et al. (2013). O intervalo entre os picos e entre os mínimos é de aproximadamente 1 dia. Nesse período a vazão de biogás em média foi de 23,00 Nm³/h, já a máxima de 31,76 Nm³/h e mínima 11,75 Nm³/h.

Já para um período com chuvas (Figura 57) os parâmetros do meio líquido e a produção de biogás se comportaram conforme apresentado nas Figuras 58 e 59.

Figura 57 - Pluviometria e temperatura do esgoto de 02/12 a 09/12 na estação C



Fonte: Autora (2016).

Figura 58 - Médias horárias da vazão de esgoto e concentração de DQO de 02/12 a 08/12/2015 na ETE C

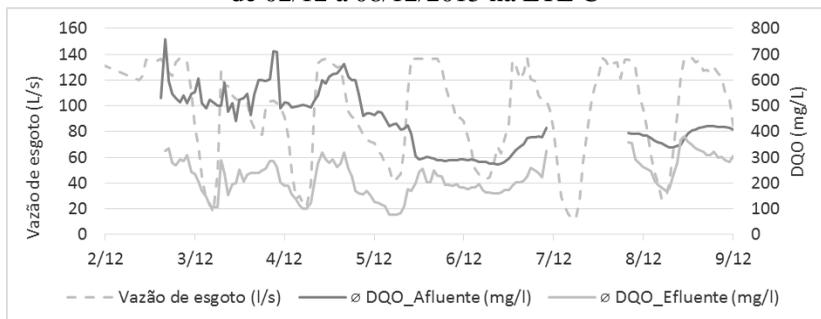
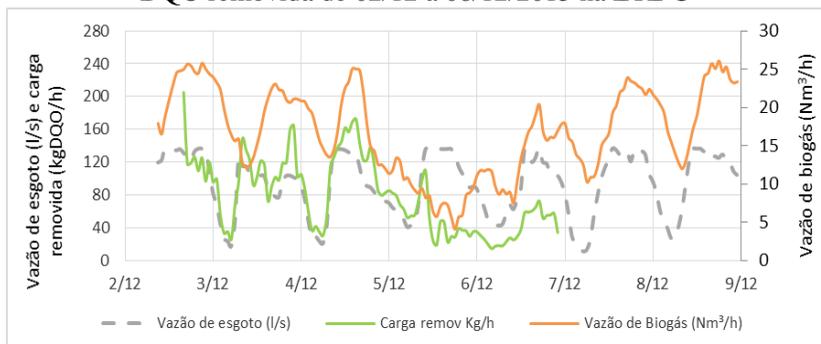


Figura 59 - Médias horárias da vazão de esgoto e biogás e carga de DQO removida de 02/12 a 08/12/2015 na ETE C



Observando a Figura 57 percebe-se que nos dias 04 e 05 houve uma diminuição da temperatura do esgoto e um aumento da precipitação, sendo a precipitação acumulada dos dias 04 e 05 de aproximadamente 57 mm. Comparando o mesmo período apresentado nas Figuras 58 e 59, pode-se inferir que estes eventos acarretaram em um aumento na vazão de entrada da estação, na diluição da matéria orgânica disponível para digestão anaeróbia e diminuição da eficiência do reator.

Observa-se que a vazão afluente aumenta devido às precipitações e, em decorrência, ocorre a diluição do esgoto e a redução do aporte de matéria orgânica a ser digerida no reator UASB, ocasionando assim a

diminuição da produção de biogás. Muitas vezes, a água de chuva ocasiona o extravasamento de estações elevatórias do esgoto bruto, ocasionando em uma perda de matéria orgânica, que não chega à estação. Além disso, o aumento da vazão de esgoto causa a diminuição do tempo de detenção hidráulica e, por vezes, pode ocasionar também a perda de sólidos (lodo) juntamente com o efluente do reator, ocasionando a diminuição da eficiência do reator (menor atividade metanogênica), impactando inclusive na produção de gás nos períodos consecutivos às chuvas.

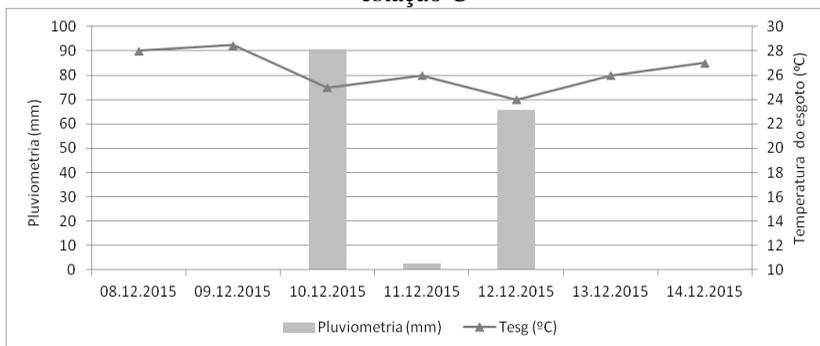
No caso em análise, houve uma mudança significativa no padrão da produção de biogás, modificando sua amplitude, sendo que o valor mínimo que antes se encontrava na faixa de $13,00 \text{ Nm}^3/\text{h}$, passou para $4,08 \text{ Nm}^3/\text{h}$. No dia 06, seguinte ao evento, as consequências dessa mudança ainda são visíveis e o restabelecimento do padrão ocorre no segundo dia sem precipitação (0 mm) e se normaliza no terceiro dia. Infelizmente os dados de DQO transmitidos pela sonda ao final do dia 06/12 em diante não puderam ser apresentados devido à necessidade de limpeza periódica.

Outro possível motivo é que, com o aumento da vazão devido às chuvas, a quantidade de metano dissolvido no meio líquido também tende a aumentar, diminuindo, assim, a quantidade de gás coletada e medida.

A diluição da matéria orgânica pelos eventos de chuva como um provável motivo para diminuição da produção de biogás já havia sido levantada por Possetti et al. (2013) e por Waiss e Possetti (2015) ao monitorar a vazão de biogás em um reator UASB em escala real e de grande porte durante eventos significativos de chuva (138mm, conforme Figura 9 do capítulo 2). Porém, em sua pesquisa não ficou evidente como se comportaram a vazão de esgoto e DQO no mesmo período e também não havia evidências do comportamento do biogás anterior ao evento de chuva.

No intuito de comparação com o estudo supracitado buscou-se um evento de precipitação mais significativa. Foi encontrado o período do dia 10 a 12/12 com precipitação acumulada de 159 mm, sendo 90,6 no dia 10, 2,6 no dia 11 e 65,8 no dia 12, conforme a Figura 60.

Figura 60 - Pluviometria e temperatura do esgoto de 08/12 a 14/12 na estação C



Fonte: Autora (2016).

Figura 61 - Médias horárias da vazão de esgoto e biogás de 08/12 a 14/12/2015 na ETE C



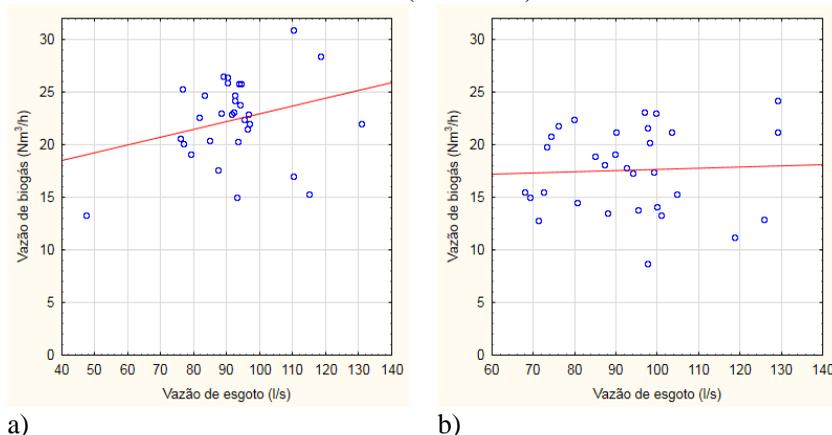
Fonte: Autora (2016).

Para esse período os dados de DQO não estão disponíveis, portanto apenas foi possível elaborar o gráfico de vazão de esgoto e vazão de biogás, e houve uma falha na transmissão dos dados do dia 12/12 pela manhã até a primeira hora do dia 13/12. Portanto, foi possível apresentar o efeito do evento de chuva do dia 10/12, maior precipitação diária de todo o período monitorado, porém não foi possível mostrar o comportamento para o dia 12/12. Não obstante, optou-se por apresentar o gráfico até o dia 14/12 para que se observe o comportamento nos dias seguintes a precipitações elevadas.

Observa-se que devido ao evento de chuva no dia 10 houve também uma queda da temperatura do esgoto com relação ao dia anterior, de $28,5^{\circ}\text{C}$ para 25°C . Esse evento ocasionou a queda brusca na produção de biogás observada no gráfico até uma vazão mínima de $2,13 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Percebe-se que o dia seguinte ao evento de chuva também apresentou vazões de biogás menores do que o padrão que antecedeu o evento. Os dias 13 e 14 que sucederam o evento de chuva de $65,8 \text{ mm}$ iniciaram a retomada do padrão de produção de biogás, porém ainda com vazões mínimas e máximas menores do que o padrão dos períodos secos.

Devido aos motivos supracitados, nos meses de chuva, a relação da produção de biogás por m^3 de esgoto tenderia a apresentar um comportamento diferente do verificado nos meses mais secos. A comparação da produção de biogás entre os meses de estiagem e de chuva é apresentada nos gráficos de distribuição (*scatterplots*) da Figura 62 a seguir.

Figura 62 - Gráficos de distribuição da vazão média diária de biogás com relação a vazão de esgoto para a) Mês de estiagem (agosto) b) Mês de chuva (dezembro)



Fonte: Autora (2016).

No mês de estiagem (Figura 62a) a vazão média de biogás foi de $22,4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e observa-se uma tendência de aumento com o aumento da vazão de esgoto. Enquanto no mês de chuva a vazão média ficou em $17,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e não aumentou com o aumento da vazão de esgoto.

Ficou evidente que os eventos de chuva e as alterações dos parâmetros do meio líquido consequentes fizeram com que houvesse uma diminuição significativa na produção de biogás. Devido ao baixo número de dias em que foi possível extrair os valores horários de DQO com confiança, não foi elaborada uma matriz de correlações e tampouco realizada uma regressão multivariada com significado estatístico para quantificar as influências.

4.2 RELAÇÕES UNITÁRIAS

Visando cumprir o objetivo 2 proposto e com base nos valores obtidos para os parâmetros vazão de esgoto, vazão de biogás, teor de metano e DQO total de entrada e DQO filtrada de saída do reator UASB, foram calculadas as relações unitárias.

Os períodos analisados para obtenção das relações unitárias as estações apresentaram os valores médios da Tabela 14. Para permitir a mesma base de comparação entre as ETE foi adotada a contribuição per capita de 110 g DQO/hab.d e calculada a população equivalente pela DQO média de entrada e vazão média de esgoto.

Tabela 14 – Valores médios no período analisado

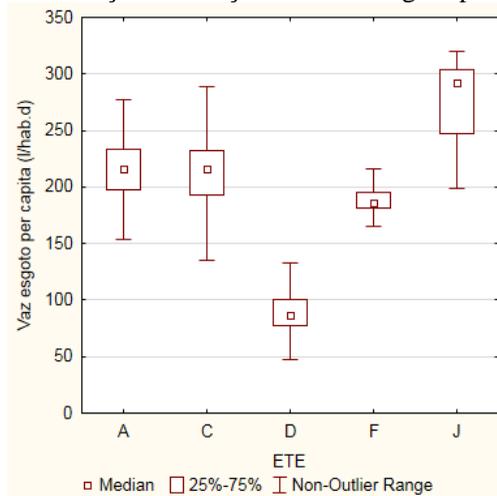
ETE	Período	DQO _{afil} (mg/L)	Q esgoto (l/s)	PE(hab.)	Q esgoto per capita (L/hab.d)	%CH ₄	Q biogás (Nm ³ /h)	Temp. amb (°C)
A	12.09.2015 a 22.02.2016	504	398,0	157.447	218	80,8	47,9	20,3
C	26.02.2015 a 12.01.2016	520	87,9	36.516	208	80,8	20,1	29,0
D	01.11.2015 a 31.12.2015 02.02.2016 a 28.03.2016	1270	85,2	84.612	87	70,0 ¹	53,6	23,7
F	11.12.2014 a 18.11.2015	575	433,6	195.817	191	79,5	137,1	22,7
J	01.12.2015 a 22.02.2016	398	74,0	23.145	276	78,2	11,6	27,7

¹ Foi adotado o valor de 70%, sendo um pouco abaixo do valor medido com o medidor portátil.

Fonte: Autora (2016).

A variação da relação de vazão de esgoto por habitante pode ser visualizada no gráfico na Figura 63.

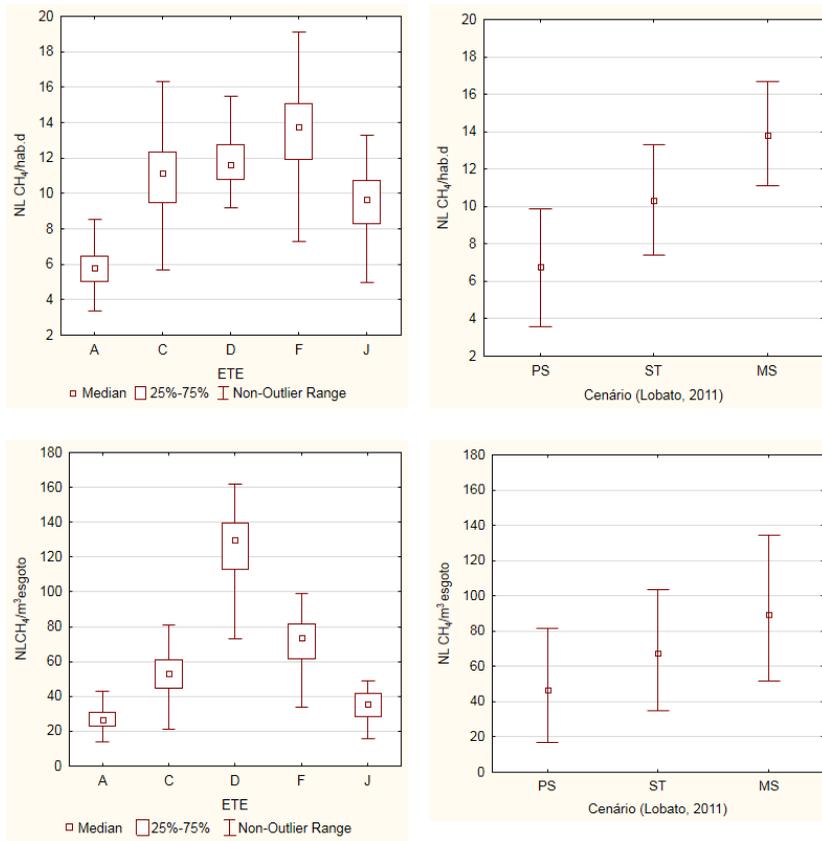
Figura 63 – Variação da relação vazão de esgoto por habitante

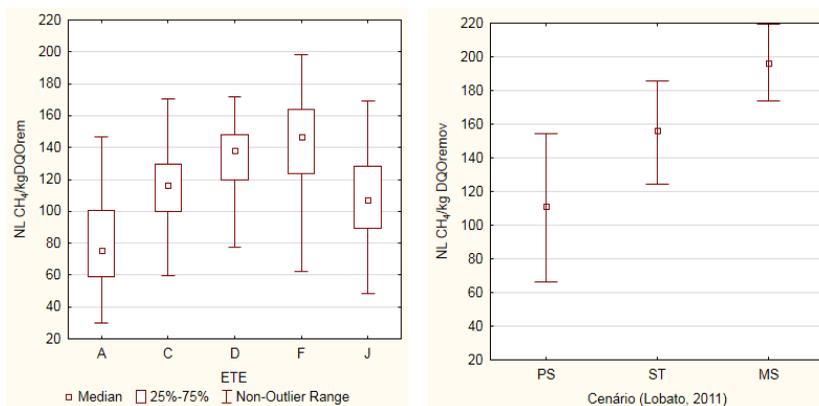


Fonte: Autora (2016).

Nos gráficos Box-plot da Figura 64 é possível visualizar a variação da relação unitária para cada estação e compará-la com o modelo de Lobato (2011), descrito no capítulo 3. Observa-se que as tabelas com o valor de cada relação unitária, incluindo os valores máximos e mínimos estão disponíveis no Apêndice.

Figura 64– Box plot das relações unitárias obtidas e dos cenários do Modelo de Lobato





Cenários: PS = Pior situação; ST = Situação Típica e MS = Melhor Situação.

Fonte: Autora (2016).

Em comparação com o modelo de Lobato (2011), pode-se observar que as relações unitárias calculadas para a ETE A ficaram abaixo da pior situação. Destaca-se que na detecção de vazamentos de biogás na superfície do reator foram constatadas fugas para a atmosfera através de fissuras e também de tubulações mal seladas, ocasionando uma maior perda de gás do que o estimado no modelo.

Já a ETE C se aproximou do cenário “pior situação” do modelo. Nesta ETE também foram detectados vazamentos, porém em menos pontos que a ETE A e a eficiência de remoção de DQO é mais elevada, conforme observa-se na Tabela 16.

Para a ETE D, as relações de produção de metano por habitante e por m³ de esgoto ficaram próximos aos valores do melhor cenário do modelo de Lobato, porém essa estação tem valores superiores de DQO do que as demais estações devido ao baixo consumo per capita de água potável da região. A concentração média de DQO no ano de 2014 foi de 1135 mg/L e nos meses analisados (novembro de 2015 a fevereiro de 2016) foi de 1270 mg/L. O reator possui alta eficiência de remoção de DQO, sendo a DQO de saída para o período analisado em média 405 mg/L. Assim, considerando o valor de produção de gás por kg de DQO removida, essa estação fica entre a pior situação e a situação típica do modelo de Lobato. Devido aos demais indicadores elevados e para comparação optou-se por classificá-la como situação típica.

Evidencia-se a importância de utilizar a relação por DQO removida para os cálculos estimativos de produção de biogás, já que os parâmetros de concentração do esgoto, eficiência do reator, entre outros,

variam consideravelmente de estação para estação e influenciam diretamente na produção do biogás.

Observa-se que a estação F também se encaixou na situação típica reportada por Lobato (2011), que é a situação intermediária entre a pior situação, onde o potencial energético é menor (sistemas operando com esgoto mais diluído, concentrações de sulfato maiores, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano) e a melhor situação (potencial energético é maior, sistemas operando com esgoto mais concentrado, menores concentrações de sulfato, maior eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de metano).

Destaca-se que a ETE F passou por reformas, detecção de vazamentos de biogás e medidas de vedação do reator UASB nos últimos 2 anos, conforme descrito na metodologia. Sendo este o motivo mais provável pelo qual esta estação está em melhor posição do que as outras estações de características de esgoto semelhantes.

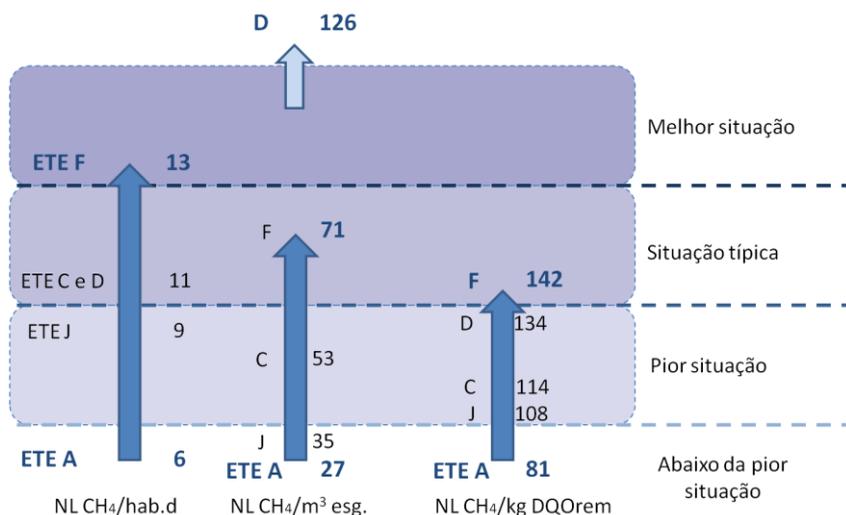
A ETE J apresentou valores próximos da pior situação para o período analisado. Destaca-se que a vazão média diária da estação não sofre grandes variações e tende a não sofrer choques de carga hidráulica em eventos de chuva, pois todo o volume de esgoto que excede a vazão de 90 l/s é conduzido ao tratamento aeróbio. Foram detectados alguns vazamentos de gás na estação, sendo estes em maior quantidade do que na ETE F, porém em menor quantidade do que a ETE A e próximo a ETE C.

Os valores médios de DQO obtidos para o período foram de 398 mg DQO/L na entrada e 56 mg/L de DQO filtrada na saída.

Agrupando as estações para resumir os valores encontrados, pode-se afirmar que as ETE com contribuição per capita de esgoto entre 190 a 280 L/hab.d (ETE A, C, F e J) a produção de metano por m³ de esgoto em média ficou entre 27 e 71 L/m³ esgoto. Por sua vez, a ETE D que possui concentrações de DQO mais elevadas e, portanto, uma baixa contribuição de esgoto per capita, com média de 87 L/hab.d, apresentou um valor de produção de metano de 126 L/m³ esgoto.

Para a produção de metano por DQO removida a variação entre as médias das estações foi de 81 L/kgDQOremov a 143 L/kgDQOremov. A seguir na Figura 65 apresenta-se um resumo com as principais informações que podem ser extraídas da presente análise de maneira geral.

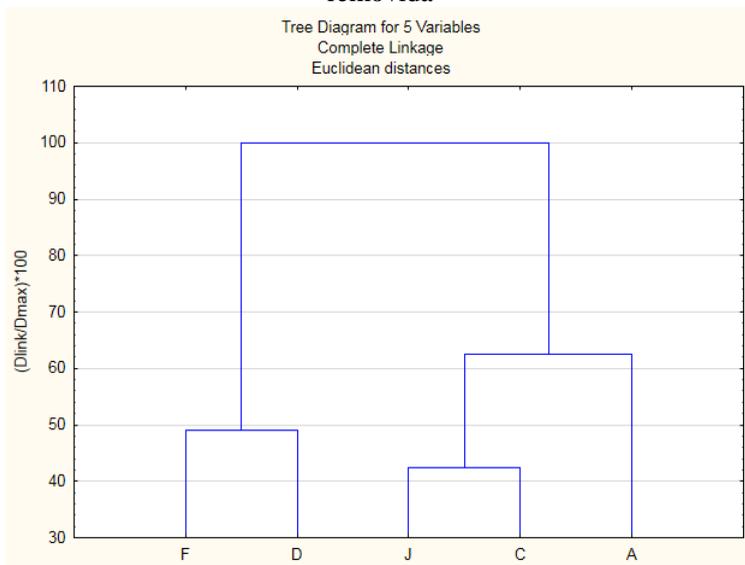
Figura 65– Infográfico com as informações a nível macro das relações unitárias obtidas



Fonte: Autora (2016).

Visualmente pode-se realizar o agrupamento de determinadas estações de acordo com os valores de suas relações unitárias. Para verificar esse agrupamento foi realizada uma análise de Cluster, conforme a Figura 66.

Figura 66 – Dendrograma baseado na variável NL CH₄/kg DQO removida



Fonte: Autora (2016).

Assim detecta-se que a divisão pode ser realizada em 3 grupos: F e D, J e C, e A. Essa hipótese de corte foi verificada pelo método de K-means.

Considerando o valor da relação unitária m³ de metano/kg DQO removida obtida para cada ETE e comparando com os valores de Lobato (2011), obteve-se a classificação apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Relação unitária e classificação das ETEs monitoradas

ETE	NL CH ₄ .kgDQO _{remov} ⁻¹	Classificação	Sigla
F	142,4	Situação típica	ST
D	133,8	Situação típica	
C	114,5	Pior situação	PS
J	108	Pior situação	
A	80,8	Abaixo da pior situação	APS

Fonte: Autora (2016).

Para garantir que realmente há diferença estatística entre os grupos selecionados acima, foi realizada a análise da variância. Primeiramente foi constatado que existe diferença significativa entre as médias dos grupos escolhidos e em seguida foi aplicado o teste de Tukey que determinou que todos os grupos possuem diferenças significativas entre si e, portanto, provou-se que a classificação dos grupos dessa maneira possui respaldo estatístico.

A comparação entre as ETE, suas eficiências, DQO de entrada, situação quanto a estanqueidade e demais observações pode ser observada na Tabela 16 a seguir.

Tabela 16 - Tabela comparativa dos dados obtidos para as ETEs monitoradas

ETE	NL CH4. kgDQO _{remov} ⁻¹	Classif. 1	Reator	Deteção de vazamento	DQO mg/l	Eficiência de remoção de DQO ²	Temp (°C)
F	142,4	ST	UASB	Baixa	720	DQOf =88%	23
D	133,8		UASB	Baixa	1270	DQOf =80%	24
C	114,5	PS	RALF	Média	520	DQOf =85%	29
J	108		UASB	Média	400	DQOf =85%	28
A	80,8	APS	UASB	Elevada	504	DQOf =63%	20

¹ Classificação: ST = Situação típica, PS = Pior Situação, APS = Abaixo da pior situação

² DQOf = eficiência calculada com DQO_{total} de entrada e DQO_{filtrada} de saída.

Fonte: Autora (2016).

Assim, destaca-se que além da remoção de carga orgânica, o outro fator que aparece como determinante para a classificação das estações é a quantidade de vazamentos para a atmosfera. É importante observar que apresentar valores baixos de vazão de biogás não significa necessariamente que a produção de biogás esteja comprometida, sendo que as estações que teoricamente deveriam apresentar um valor alto de vazão de biogás, pois possuem alta eficiência de remoção de DQO, provavelmente não o fizeram devido a grande quantidade de vazamentos que foi detectada nas tubulações de coleta e no topo do reator.

4.3 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE GÁS E DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA

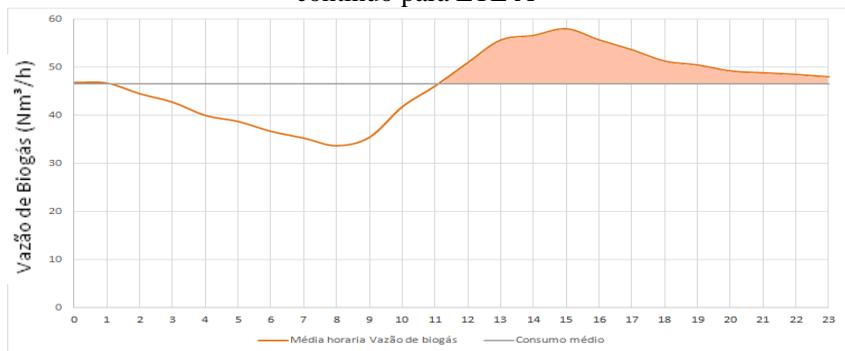
De modo a atender ao objetivo três, foram realizadas as

estimativas do armazenamento de gás e de seu aproveitamento para geração de energia elétrica em unidade motogerador Ciclo Otto. Os resultados são apresentados nos itens 4.3.1 e 4.3.2 a seguir.

4.3.1 Estimativa do volume de armazenamento de gás

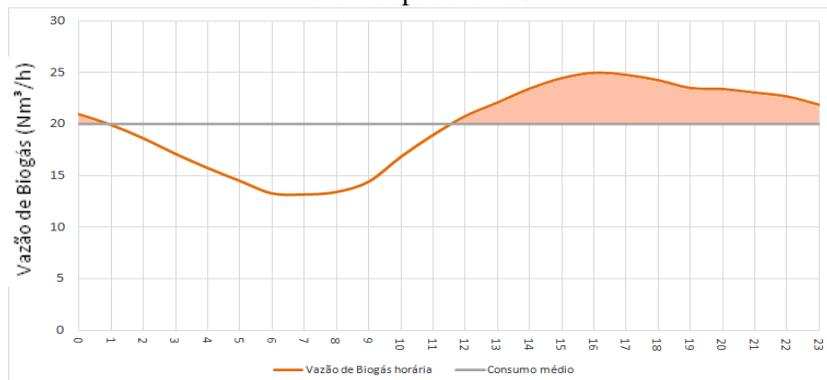
O volume mínimo necessário para o gasômetro foi calculado com base no gráfico de produção de gás e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na unidade de geração de energia elétrica. Os gráficos em questão podem ser visualizados nas Figuras 69 a 73.

Figura 67 – Produção média de biogás e consumo para aproveitamento contínuo para ETE A



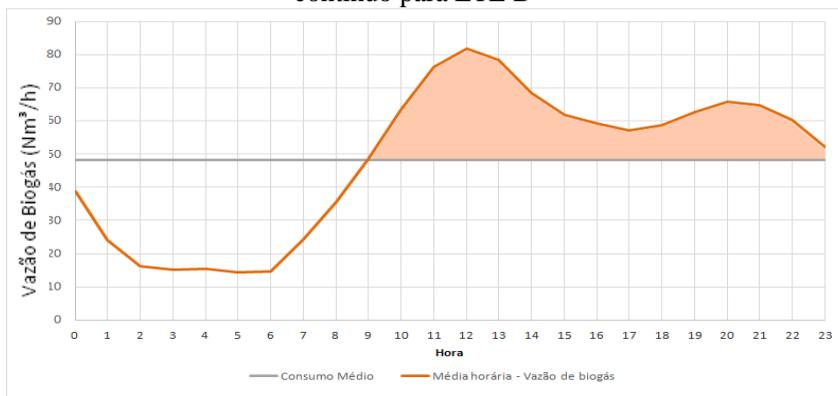
Fonte: Autora (2016).

Figura 68 – Produção média de biogás e consumo para aproveitamento contínuo para ETE C



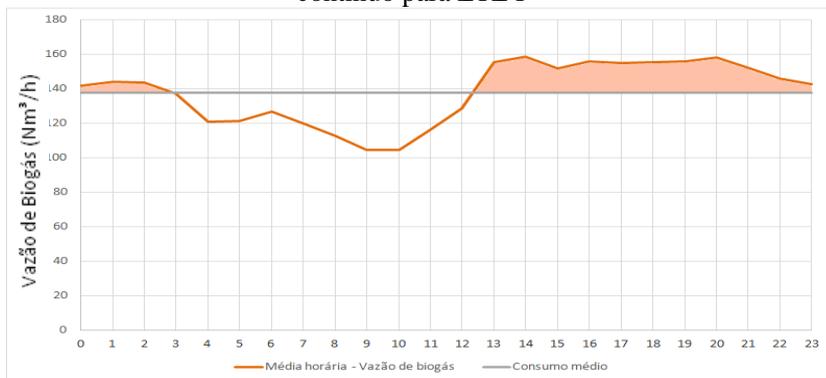
Fonte: Autora (2016).

Figura 69– Produção média de biogás e consumo para aproveitamento contínuo para ETE D



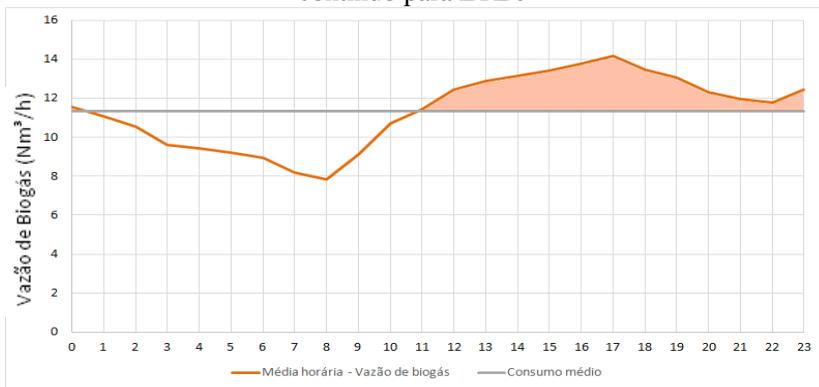
Fonte: Autora (2016).

Figura 70 – Produção média de biogás e consumo para aproveitamento contínuo para ETE F



Fonte: Autora (2016).

Figura 71– Produção média de biogás e consumo para aproveitamento contínuo para ETE J



Fonte: Autora (2016).

A área destacada abaixo de cada curva representa a quantidade mínima de gás a ser armazenada. Os resultados do cálculo de volume de armazenamento estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Volume mínimo do gasômetro com relação a produção diária de biogás

ETE	Vazão de biogás (Nm ³ /d)	Volume calculado (m ³)	% da produção diária
A	1116,00	68,12	6%
C	476,88	38,65	8%
D	1158,48	235,87	20%
F	3307,20	178,26	5%
J	272,40	17,31	6%

Fonte: Autora (2016).

Percebe-se que em quatro ETE o volume mínimo necessário ficou abaixo de 10% da vazão média diária e em uma delas ficou em 20%, devido a maior variação da produção de biogás durante o dia.

Portanto, assim como afirma a norma alemã DWA M 363 (2010), quanto mais a característica de produção se aproximar daquela de consumo, menor o volume necessário de armazenamento do gasômetro. Além disso, para digestores de lodo com alimentação contínua e semicontínua, a norma indica que o volume de armazenamento deve corresponder de 30 a 50% do volume diário de biogás gerado.

Como o reator UASB possui alimentação contínua, e considerando os valores encontrados para a produção média e que o volume de armazenamento deve permitir que as oscilações de produção de biogás sejam compensadas, considera-se que 30% do volume diário de biogás gerado seja apropriado para reatores UASB.

4.3.2 Estimativa do potencial de geração de energia e potência do motogerador

Com base nos valores de vazão média de biogás e teor de metano encontrados durante o período de monitoramento de cada ETE, foi possível estimar a quantidade de energia elétrica a ser gerada e a potência da unidade de aproveitamento energético (motor Ciclo Otto). Para efeitos de comparação, foram estimados também os valores caso a estação realizasse medidas de vedação do reator, consertando os principais pontos de vazamento, para atingir a situação típica (situação atingida por duas das estações monitoradas e, portanto, considerada uma meta factível para as demais).

A Tabela 18 apresenta os resultados dos cálculos supracitados.

Tabela 18 – Estimativas de geração de energia elétrica e da potência do motogerador para as ETE monitoradas

ETE	Parâmetro	Situação atual	Situação típica	Diferença	Diferença (%)
A	Pot. Instalada (kWel)	134	302	168	125%
	Geração de En. Elétrica (kWh/d)	3216	7248	4032	
C	Pot. Instalada (kWel)	57	88	31	54%
	Geração de En. Elétrica (kWh/d)	1368	2112	744	
D	Pot. Instalada (kWel)	122	-	-	0%
	Geração de En. Elétrica (kWh/d)	3360	-	-	
F	Pot. Instalada (kWel)	397	-	-	0%
	Geração de En. Elétrica (kWh/d)	9525	-	-	
J	Pot. Instalada (kWel)	33	52	19	58%
	Geração de En. Elétrica (kWh/d)	792	1248	456	

Fonte: Autora (2016).

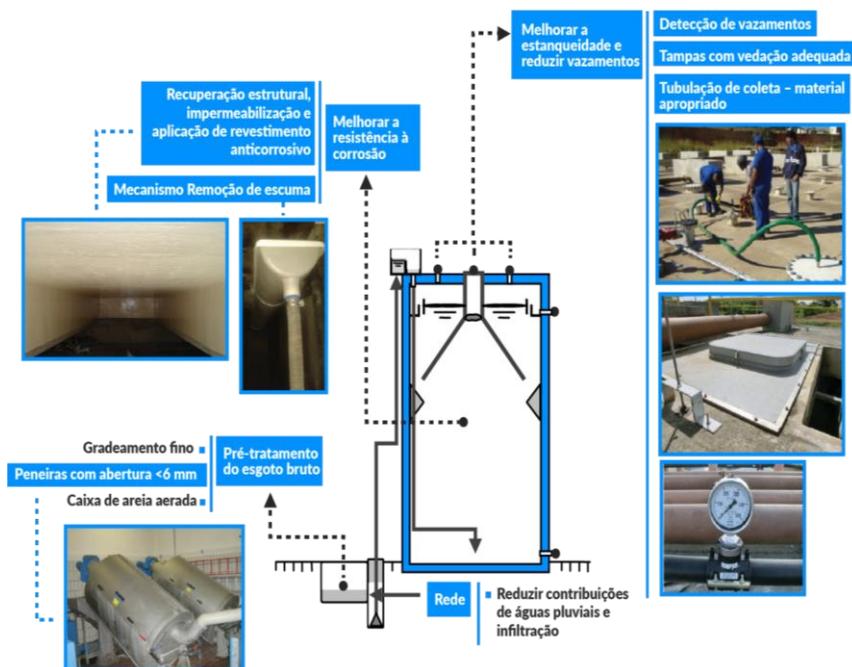
Considerando as indicações recentes de porte da unidade de geração de energia para a viabilidade de um projeto de aproveitamento de biogás de UASB, de 200 kW (ROSENFELDT et al., 2015), percebe-se que na situação encontrada durante o monitoramento somente a ETE F estaria acima da escala mínima.

Considerando o dado de consumo de energia elétrica de 2013 dessa estação, equivalente a 473.000 kWh/mês, destaca-se que a energia a ser gerada pelo biogás atualmente poderia fornecer aproximadamente 60% do consumo total da estação.

Destaca-se que essa ETE passou por reformas e impermeabilização do reator, e, principalmente, pela detecção e conserto de vazamentos de biogás. Esse é um indicativo de que é possível para as demais estações realizarem melhorias físicas e operacionais nos reatores, a fim de minimizar as fugas de biogás para a atmosfera e também de maximizar a sua produção. Caso essas medidas sejam implementadas, os cálculos apontam que a ETE A passaria a ter viabilidade acima da escala mínima indicada em estudos recentes, sendo 200kW indicada por Rosenfeldt et al. (2015) e 255kW por Valente (2015).

Portanto, considerando que a maioria dos reatores UASB no Brasil foi projetada quando ainda não se pensava no aproveitamento do biogás, e também que não foram levadas em consideração todas as suas particularidades operacionais, estima-se que estes apresentem características similares aos reatores monitorados na presente pesquisa, com produção de biogás captado provavelmente próxima da pior situação. Para reatores UASB reformados (ETE F) ou com características de esgoto e operacionais mais favoráveis (elevadas concentrações de DQO e temperatura e minimização dos efeitos da chuva) (ETE D), considera-se que estariam na situação típica de produção de biogás. Por último, para novos reatores que já considerem na fase de projeto a maximização da eficiência do reator e consequentemente da geração de gás, sua coleta e transporte eficientes, prevê-se que estes atinjam produção de biogás próxima da melhor situação. Algumas das medidas para a otimização da produção e coleta do biogás estão apresentadas na Figura 72.

Figura 72 – Medidas que provêm a melhoria da produção e coleta do biogás



Fonte: Autora (2016).

Mesmo para as estações de menor porte, onde realizar as melhorias, minimizando as perdas de biogás para atingir a situação típica, por exemplo, não irá trazer viabilidade econômica para o aproveitamento do gás, é importante que estas sejam realizadas tendo em vista que estão sendo emitidas quantidades significativas de gás de efeito estufa (CH_4) e de gás odorante (H_2S) para a atmosfera, trazendo impactos ambientais, sociais e até econômicos.

Na tentativa de mensurar parte destes impactos, estimou-se o potencial em tCO_2 equivalente considerando que a diferença entre a quantidade de gás encontrada e a quantidade estimada na situação típica é devido a perdas de biogás. Os resultados estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Potencial de emissões em tCO₂ equivalentes

ETE	PE(hab.)	tCO ₂ eq/a	tCO ₂ eq/hab.ano
A	157.447	7340	0,047
C	36.516	1357	0,037
J	23.145	840	0,036

Fonte: Autora (2016).

Considerando que os reatores foram selecionados por estarem em melhor condições entre os 20 visitados e que estes já haviam sido indicados pelas companhias como os reatores com menores perdas de gás estima-se que essas emissões estejam ocorrendo na maioria dos reatores UASB no Brasil. A partir da média obtida de 0,04 tCO₂eq/hab.a e da população atendida por reatores UASB no Brasil segundo levantamento de Chernicharo et al. (2015) de 22.973.017 habitantes, estima-se que 918.920,68 tCO₂ equivalente estão sendo emitidas ao ano no país por esses reatores.

5 CONCLUSÕES

Este estudo buscou avaliar a produção de biogás produzido em reatores anaeróbios tipo UASB e RALF visando o seu aproveitamento energético. A partir dos resultados obtidos no monitoramento de reatores em escala real, em seis estações de tratamento de esgoto no Brasil, foram obtidas as seguintes conclusões:

Em relação ao objetivo específico número 1, a partir dos valores temporais variáveis de vazão de esgoto, DQO, eficiência do reator, pluviometria e temperatura e analisando os valores correspondentes ao mesmo período para vazão e composição de biogás, pode-se concluir que:

- A produção de biogás apresentou variação espacial (de local para local, dependendo das condições construtivas e operacionais de cada reator) e temporal (de acordo com as variações do clima e das características do meio líquido). Além disso, os eventos de chuva significativa diminuíram a produção de biogás por alterarem as características do meio líquido.

- O teor de metano encontrado no biogás não variou de forma significativa ao longo do período de monitoramento, nem de uma ETE para outra, sendo que a concentração média variou de 70 a 79% de ETE para ETE, com 50% dos resultados compreendidos entre 77 e 82%). Os resultados desta pesquisa confirmam que a concentração de metano no biogás produzido em reatores UASB tratando esgoto doméstico é própria para o aproveitamento em unidades de cogeração (CHP) de energia.

- O teor de sulfeto de hidrogênio encontrado no biogás apresentou variação diária e de ETE para ETE, sendo que 75% dos resultados apresentaram valores até 2000ppm. Os resultados desta pesquisa indicam a necessidade de tratamento do biogás para remoção de H_2S .

Em relação ao objetivo específico número 2, ao relacionar a produção de biogás com a carga orgânica removida em cada estação, conclui-se que:

- As relações unitárias de produção de metano encontradas variaram de 81 a 142 NL de $CH_4/kgDQO_{remov}$, e as eficiências de remoção de DQO 63 a 88%. Para estações com boa vedação do compartimento e da linha de gás, as relações unitárias se aproximaram do cenário típico do modelo de Lobato (2011), sendo que a maioria se aproximou da pior situação prevista pelo referido modelo. A boa

aderência dos resultados desta pesquisa às diferentes faixas de produção de biogás e energia estimadas pelo modelo, indica que este pode ser utilizado como ferramenta inicial para se estimar a produção de gás e energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico.

- As possíveis perdas de biogás indicadas por Lobato (2011) (metano dissolvido no efluente, vazamentos por meio de fissuras para a atmosfera) aparentemente estão presentes nos reatores das estações em questão, mesmo nos reformados recentemente. Esses aspectos são importantes e não podem ser negligenciados na análise de viabilidade econômica do investimento em uma unidade de aproveitamento energético de biogás de reatores UASB.

Em relação ao objetivo específico número 3, ao calcular a potência do conjunto motogerador para aproveitamento de biogás a partir dos valores de produção que foram obtidos para cada uma das ETE, pode-se concluir que:

- Com a produção de biogás atual nas ETE monitoradas, a única que apresentou valores acima do considerado viável foi a ETE F com potência do conjunto de cogeração estimada em 397 kW. Constatou-se que estações em operação que não foram projetadas de forma a otimizar a produção e coleta do biogás, porém com boa vedação dos reatores, podem atingir valores de produção específica de biogás de 17 L/hab.d, 89 L/m³ de esgoto e 179 L/kg DQOremovida. Esses indicadores resultam em uma geração de energia elétrica específica de 17,8 kWh/hab.a, o que equivale a uma potência instalada de 20,4 kW a cada 10 mil habitantes equivalentes.

- A grande parcela de perda de gás para a atmosfera na maioria das estações fez com que o potencial energético de aproveitamento do gás fosse reduzido, reduzindo assim a receita a ser obtida e consequentemente a viabilidade econômica. Esse fato reforça a necessidade de reformas nos reatores existentes no Brasil e de mudanças nos novos projetos. Evidencia-se que este fato não pode ser negligenciado, pois além do desperdício de um potencial energético, está se emitindo um gás de efeito estufa (metano) e um gás de efeito odorante (H₂S), causando impactos negativos de efeito imediato e médio e longo prazo.

- O potencial calculado em tCO₂ equivalente de redução das emissões caso sejam realizadas reformas nos reatores existentes no Brasil para que atinjam a situação típica foi de 918.920,68 tCO₂.

6 RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista as constatações efetuadas na presente pesquisa, sugerem-se algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Que seja realizada uma investigação detalhada dos parâmetros do meio líquido de entrada e saída dos reatores UASB em questão, visando comprovar claramente a existência de perda de sólidos e a diminuição de eficiência do reator durante uma maior quantidade de eventos de chuva.

- Caso possível a obtenção dos valores horários de concentração de DQO de entrada e saída do reator, além dos parâmetros já obtidos, recomenda-se a realização de uma regressão multivariada de forma a obter equações que modelem o comportamento desses reatores.

- Como a tipologia dos reatores também é variada sugere-se uma comparação para quantificar a influência dos aspectos construtivos com relação produção de biogás.

- Além disso, sugere-se uma análise de viabilidade econômica considerando os valores de investimento (CAPEX), de operação (OPEX) e de receitas, considerando os valores de tarifa de energia em cada local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIYUK, Sunny et al. Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates—A review. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 97, n. 17, p.2225-2241, nov. 2006.

ALVES, J. W. S.; VIERA, S. M. M. **Inventário Nacional Emissão de Metano pelo Manejo de Resíduos**: Enabling Brazil to fulfill its commitments to the United Nations Conventions on Climate Change. São Paulo: CETESB, 1998.

ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: Lodos de esgoto: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 2010.

AQUINO, Sérgio F.; CHERNICHARO, Carlos A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 10, n.2, p.152-161, abr/jun. 2005.

BARBOSA, Vera L.; STUETZ, Richard M. Treatment of hydrogen sulfide in biofuels. In: LENS, P.; WESTERMANN, Peter; HABERBAUER, M.; MORENO, A. (Ed.). **Biofuels for fuel cells:renewable energy from biomass fermentation**. Londres: IWA Publishing, 2005, 524 p.

BELLI FILHO, Paulo et al. Aplicação de reatores UASB para tratar dejetos de suínos com baixas e altas concentrações de DQO e sólidos. In: IX SILUBESA, **Anais...** Porto Seguro, 2000.

BELLI FILHO, Paulo et al. Tecnologias para o tratamento de dejetos de suínos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 166-170, 2000.

BELLI FILHO, Paulo et al. Tratamento de odores em sistemas de esgotos sanitários. In: CHERNICHARO, C. A. L (Coord.). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: PROSAB 2, 2001. p. 455-490.

BISCHOFBERGER, W. et al. **Anaerobtechnik**. Springerverlag, Berlin: 2 Auflage, 2005.

BRASIL - Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2016.

BRASIL - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília, DF. Ministério das Cidades, 2015. 183 p.

CABRAL, C. B. G. et al. Caracterização do biogás gerado no tratamento de efluentes domésticos em reatores UASB no Brasil. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais...**, 2015.

CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos Sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES – PROSAB, 1999.

CASSINI, S. T. (Coord.). **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás**. Rio de Janeiro: ABES – PROSAB, 2003.

CENBIO. **Geração de energia elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto**. USP/IEE/CENBIO – SABESP. Relatório técnico final. São Paulo, Junho de 2004.

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

CHERNICHARO, C. A. L.; STUETZ, R. M. Improving the design and operation of UASB reactors for treating domestic wastewater: management of gaseous emissions. In: IX Latin American Workshop and Seminar on Anaerobic Digestion, 2008, Eastern Island - Chile. **Anais...** Eastern Island - Chile: IWA, 2008. p. 504-512.

CHERNICHARO, C. A. L. et al. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Reviews In Environmental Science And Bio/technology*, [s.l.], v. 14, n. 4, p.649-679, 21 set. 2015. Springer Science + Business Media. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11157-015-9377-3>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194 p. Dissertação (Mestrado em Energia)- Programa de Interunidades de Pós-graduação em Energia – PIPGE (EP/FEA/IEE/IF), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

DONOSO-BRAVO, A. et al. Explicit temperature-based model for anaerobic digestion: Application in domestic wastewater treatment in a UASB reactor. *Bioresource Technology*, [s.l.], v. 133, p.437-442, abr. 2013. Elsevier BV.

DWA-M 363. **Origem, Tratamento e Utilização do Biogás**. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef 2010.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.

DÖHLER, H. et al. **Faustzahlen Biogas**. 3. ed. Darmstadt: Kuratorium Für Technik Und Bauwesen In Der Landwirtschaft e.V. (KTBL), 2013. 360 p.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia**. Rio de Janeiro: EPE, 2010.

GRANDIN, S. R. **Experiências com Biogás e UASB**: principais desafios Caso SANASA. Workshop “Melhorias em Reatores Anaeróbios visando o aproveitamento do Biogás”. Maringá, 2013.

HÖNTZSCH. **Vortex VA**. Disponível em: <<http://www.hoentzsch.com/en/products/categories/m/vortex-va/>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

IPCC. Climate change 2014. Synthesis Report. 2014.

KHAN, Abid Ali; MEHROTRA, Indu; KAZMI, A.a.. Sludge profiling at varied organic loadings and performance evaluation of UASB reactor treating sewage. **Biosystems Engineering**, [s.l.], v. 131, p.32-40, mar. 2015. Elsevier BV.

KOLISCH, G. et al. Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen – eine Ergebnisbetrachtung zu durchgeführten Energieanalysen. **Korrespondenz Abwasser**, v. 10, 2010.

LANGERGRABER, G. et al. Monitoring of a paper mill wastewater treatment plant using UV/VIS spectroscopy. **Water Science and Technology**, v. 49, n. 1, p. 9–14, 2004.

LEITAO, R et al. The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 97, n. 9, p.1105-1118, jun. 2006.

LOBATO, Lívia C. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico**. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)- Universidade Federal de Minas Gerais UFMG, Minas Gerais, 2011.

LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUZA, C. L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. **Water Science and Technology**, v. 66, p. 2745-2753, 2012.

LIMA, Felipe Plama. **Energia no Tratamento de Esgoto: Análise Tecnológica e Institucional para conservação de energia e uso do biogás**. 2005. 139 f. Dissertação (Mestrado em Energia)- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MARIANI, L. et al. Políticas públicas e privadas de incentivo ao uso do biogás na matriz energética brasileira. In: IX CBPE – Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, **Anais...** Florianópolis, 2014.

METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MIKI, M. K. Dilemas do UASB. **Revista DAE**, São Paulo, n. 183, p. 25-37, maio 2010.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Brasília: MME, 2011.

MONTE, Margarida Marecos. **Contributo para o Estudo da Valorização Energética de Biogás em Estações de Tratamento de Águas Residuais**. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010. Disponível em: <www.scielo.org>. Acesso em: 31 mar. 2011.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology**, v. 5, p. 93-114, 2006.

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

PAUSS, A.; NAVEAU, H.; NYNS, E. J. Biogas production. In: HALL, D. O.; OVEREND, R. P. **Biomass**. Brisbane: Wiley-Interscience publication, 1987. p. 273-291.

POSSETTI, G. R. C. et al. **Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), Curitiba, 2013.

PROSAB - Programa de Pesquisa em saneamento básico. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: PROSAB, 2001.

ROSA, A. P. et al. Acumulação e remoção de espuma em reatores UASB: Estudo de Caso ETE Laboreaux – Itabira/MG. In: 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais** 2013.

ROSA, A. P. et al. Energy potential and alternative usages of biogas and sludge from UASB reactors: case study of the Laboreaux wastewater treatment plant. **Water Science And Technology**, [s.l.], v. 73, n. 7, p. 1680-1690, 29 dez. 2015. IWA Publishing. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2166/wst.2015.643>>. Acesso em: 31 mar. 2011.

ROSENFELDT, S. et al. Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais** 2015.

ROTARIA DO BRASIL. Acervo interno da empresa. 2014

ROTARIA DO BRASIL. Acervo interno da empresa. 2015

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

S::CAN (Austria) (Org.). **Spectrometer probes**. Disponível em: <<http://s-can.at/>>. Acesso em: 30 mar. 2015.

SILVA, T. C. F. **Utilização de Biogás de Estações de Tratamento de Esgoto para Fins Energéticos**. 2015. 152p. Dissertação (Mestrado em Energia)- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SILVA, T. C. F.; POSSETTI, G. R. C.; COELHO, S. Avaliação do Potencial de Produção de Energia a partir do Biogás Gerado no Tratamento de Esgotos Domésticos. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, **Anais...** Florianópolis, ago. 2014.

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.

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 (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)- UFMG, Belo Horizonte – MG, 2010.

SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. A. L.; MELO, G. C. M. Methane and hydrogen sulfide emissions in UASB reactors treating domestic wastewater. In: 12th World Congress on Anaerobic Digestion, **Anais...** 2010, Guadalajara, Jalisco – México. IWA, 2010.

UNION. **INCA 4000**. Disponível em: <<http://union-instruments.com/inca4000-serie.html>>. Acesso em: 26 mar. 2015.

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético)- UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2015.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgoto: um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994.

VAN HAANDEL, Adrianus et al. Anaerobic Reactor Design Concepts for the Treatment of Domestic Wastewater. **Reviews In Environmental Science And Bio/technology**, [s.l.], v. 5, n. 1, p.21-38, fev. 2006. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s11157-005-4888-y>.

VIEIRA, S. M. M.; SILVA, J. W. Emissões de metano no tratamento e na disposição de resíduos. In: BRASIL - Ministério da Ciência e Tecnologia. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**: relatórios de referência. Brasília, DF.: MCT, 2006. 86 p.

VON SPERLING, M. E.; CHERNICHARO, C. A. L. **Biological wastewater treatment in warm climate regions**. London: IWA Publishing, 2005. 1452 p.

VON SPERLING, M. E. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: V. 1: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 2009.

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

WEILAND, Peter. Biogas Production: Current State and Perspectives. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 85. p. 849-860, 2009.

WELLINGER, A.; LINDBERG, A. **Proceedings of Biogas Event 2000**: Kick-Off for a Future Deployment of Biogas Technology 22-24. Sweden: Eskilstuna, 2000.

ZANETTE, A. L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético)- UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2009.

APÊNDICES A - Tabelas das Relações unitárias

Relações Unitárias para a ETE A

Tabela 20 - Relações unitárias obtidas para a ETE A em comparação com o modelo de Lobato (2011)

Relação unitária	Unidade	ETE A – Valores medidos			Pior situação (LOBATO, 2011)		
		Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
Volume unitário de CH ₄ produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	8,7	3,4	5,8	9,9	3,6	6,8
	NL.m ⁻³ esgoto	49,2	13,8	27,3	81,7	16,7	42,2
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	170,4	30,1	80,8	154,1	66,0	113,4
Volume unitário de biogás produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	10,6	4,2	7,4	14,1	5,2	9,8
	NL.m ⁻³ esgoto	61,5	17,2	34,4	116,7	23,8	60,3
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	217,8	37,6	102,6	220,1	94,3	162,0
Potencial energético unitário	kWh.m ⁻³ esgoto	0,5	0,1	0,3	0,8	0,2	0,4
	kWh.kgDQO _{remov} ⁻¹	1,7	0,2	0,7	1,5	0,7	1,1
	kWh.Nm ⁻³ biogás	8,0	8,0	8,0	7,0	7,0	7,0

Fonte: Autora (2016).

Relações unitárias para ETE C

Tabela 21 - Relações unitárias obtidas para a ETE C em comparação com o modelo de Lobato (2011)

Relação unitária	Unidade	ETE C – Valores medidos			Pior situação (LOBATO, 2011)		
		Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
Volume unitário de CH ₄ produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	17,6	4,5	10,9	9,9	3,6	6,8
	NL.m ⁻³ esgoto	104,2	19,3	52,9	81,7	16,7	42,2
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	183,9	46,6	114,5	154,1	66,0	113,4
Volume unitário de biogás produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	20,3	5,7	13,2	14,1	5,2	9,8
	NL.m ⁻³ esgoto	126,9	24,8	63,7	116,7	23,8	60,3
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	212,7	59,9	138,5	220,1	94,3	162,0
Potencial energético unitário	kWh.m ⁻³ esgoto	1,0	0,1	0,5	0,8	0,2	0,4
	kWh.kgDQO _{remov} ⁻¹	2,0	0,2	1,0	1,5	0,7	1,1
	kWh.Nm ⁻³ biogás	8,0	8,0	8,0	7,0	7,0	7,0

Fonte: Autora (2016).

Relações unitárias para ETE D

Tabela 22 - Relações unitárias obtidas para a ETE D em comparação com o modelo de Lobato (2011)

Relação unitária	Unidade	ETE D – Valores medidos			Situação típica (LOBATO, 2011)		
		Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
Volume unitário de CH ₄ produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	18,1	2,0	11,5	13,3	7,4	10,2
	NL.m ⁻³ esgoto	161,7	32,1	126,0	103,7	34,8	64,2
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	171,9	34,2	133,8	185,8	124,2	158,3
Volume unitário de biogás produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	25,9	2,9	16,4	17,7	9,9	13,6
	NL.m ⁻³ esgoto	231,0	45,9	179,9	138,3	46,4	85,6
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	245,5	48,8	268,6	247,8	165,6	211,1
Potencial energético unitário	kWh.m ⁻³ esgoto	1,6	0,3	1,2	1	0,3	0,6
	kWh.kgDQO _{1remov} ⁻¹	1,8	0,4	1,4	1,9	1,2	1,6
	kWh.Nm ⁻³ biogás	7,0	7,0	7,0	7,5	7,5	7,5

Fonte: Autora (2016).

Relações unitárias para ETE F

Tabela 23 - Relações unitárias obtidas para a ETE F em comparação com o modelo de Lobato (2011)

Relação unitária	Unidade	ETE F – Valores medidos			Situação típica (LOBATO, 2011)		
		Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
Volume unitário de CH ₄ produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	19,1	6,2	13,3	13,3	7,4	10,2
	NL.m ⁻³ esgoto	99,2	28,9	71,2	103,7	34,8	64,2
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	198,4	57,9	142,4	185,8	124,2	158,3
Volume unitário de biogás produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	24,5	7,7	16,7	17,7	9,9	13,6
	NL.m ⁻³ esgoto	124,9	36,2	89,3	138,3	46,4	85,6
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	249,7	72,4	178,6	247,8	165,6	211,1
Potencial energético unitário	kWh.m ⁻³ esgoto	1,0	0,3	0,7	1	0,3	0,6
	kWh.kgDQO _{remov} ⁻¹	1,9	0,6	1,4	1,9	1,2	1,6
	kWh.Nm ⁻³ biogás	8,0	8,0	8,0	7,5	7,5	7,5

Fonte: Autora (2016).

Relações unitárias para ETE J

Tabela 24 - Relações unitárias obtidas para a ETE J em comparação com o modelo de Lobato (2011)

Relação unitária	Unidade	ETE J – Valores medidos			Pior situação (LOBATO, 2011)		
		Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
Volume unitário de CH ₄ produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	19,1	5,0	9,5	9,9	3,6	6,8
	NL.m ⁻³ esgoto	62,1	15,6	34,9	81,7	16,7	42,2
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	198,2	48,6	108,0	154,1	66,0	113,4
Volume unitário de biogás produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	24,4	6,4	12,1	14,1	5,2	9,8
	NL.m ⁻³ esgoto	79,4	19,9	44,6	116,7	23,8	60,3
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	253,4	62,1	138,1	220,1	94,3	162,0
Potencial energético unitário	kWh.m ⁻³ esgoto	0,6	0,2	0,4	0,8	0,2	0,4
	kWh.kgDQO _{1remov} ⁻¹	1,9	0,5	1,1	1,5	0,7	1,1
	kWh.Nm ⁻³ biogás	7,8	7,8	7,8	7,0	7,0	7,0

Fonte: Autora (2016).