



UNILAB

**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA**

**INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU EM GESTÃO DE RECURSOS
HÍDRICOS, AMBIENTAIS E ENERGÉTICOS**

ANDERSON BARBOSA ARAÚJO

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM BIOGÁS PRODUZIDO EM REATOR UASB
OPERANDO EM ESCALA REAL**

REDENÇÃO

2018

ANDERSON BARBOSA ARAÚJO

POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM BIOGÁS PRODUZIDO EM REATOR UASB
OPERANDO EM ESCALA REAL

Monografia apresentada ao Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos.

Orientador: Profa. Dra. Rita Karoliny Chaves de Lima.

REDENÇÃO

2018

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Araújo, Anderson Barbosa.

A687p

Potencial energético de um biogás produzido em reator UASB operando em escala real / Anderson Barbosa Araújo. - Redenção, 2018.

42f: il.

Monografia - Curso de Gestão De Recursos Hídricos, Ambientais E Energéticos - 2016.2, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2018.

Orientador: Profa. Dra. Rita Karolinny Chaves de Lima.

1. Biogás. 2. Energia Renovável. 3. Reator anaeróbio. I.
Título

CE/UF/BSP

CDD 665.776

UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA

ANDERSON BARBOSA ARAÚJO

POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM BIOGÁS PRODUZIDO EM REATOR UASB
OPERANDO EM ESCALA REAL

Monografia julgada e aprovada para obtenção do título de Especialista em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira.

Data: ____/____/____

Nota: _____

Banca Examinadora:

Dra. Rita Karoliny Chaves de Lima (Orientadora)
IEDS/UNILAB

Dr. José Cleiton Sousa dos Santos
IEDS/UNILAB

Dra. Regilany Paulo Colares
ICEN/UNILAB

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Francisco Josinete e Ana Beatriz, que constantemente não só me lembram do quão importante é estudar, mas também proporcionam as melhores condições para que eu pudesse ser quem sou hoje.

À minha irmã, Josiana Beatriz, que consegue, árdua e brilhantemente, aturar minha falta de paciência.

À minha orientadora, Karolinny Chaves, por ter acompanhado o desenvolvimento desse trabalho e sugerido alterações essenciais para a melhoria do resultado apresentado.

Aos meus amigos, que me fizeram rir nos momentos em que mais precisei, bem como entenderam quando nem eles o podia fazer.

À Cagece, por ter disponibilizado o espaço para realização da pesquisa abordada nesse trabalho.

Por fim, à Unilab e aos componentes do curso de Pós-Graduação em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos, que, entendendo os problemas da nossa primeira turma, vêm tentando aprimorar a metodologia do ensino à distância para as turmas subsequentes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de digestão anaeróbia e redução de sulfato.	15
Figura 2 - Efeitos do sulfeto de hidrogênio.	18
Figura 3 - Exemplo de uma usina CHP.	23
Figura 4 - Planta de situação identificada da ETE Aracapé III.	26
Figura 5 - Medidor de nível instalado.	28
Figura 6 - (a) Bolsa para coleta de biogás; (b) Medidor de concentração e bomba da marca <i>Dräger</i>	29
Figura 7 - Vazão horária média de biogás gerado.	31
Figura 8 - Análise da DQO total e filtrada do sistema.	32
Figura 9 - Balanço da DQO total no sistema microaerado.	34
Figura 10 - Balanço da DQO degradada no sistema microaerado.	34
Figura 11 - Teor de metano instantâneo no biogás produzido.	35
Figura 12 - Variação do teor de metano, ar e CO ₂ no biogás.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição do biogás originário de diferentes fontes.	16
Tabela 2- Comparação do poder calorífico de alguns combustíveis.	19

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Metodologias de análise físico-química laboratorial utilizadas.	27
Quadro 2 - Metodologias de análise do biogás.	29

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
BMELV	Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha.
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará.
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão.
CHP	<i>Combined Heat and Power.</i>
DQO	Demanda Química de Oxigênio.
ETA	Estação de Tratamento de Água.
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto.
GEE	Gases de Efeito Estufa.
GECOQ	Gerência de Controle da Qualidade de Produto.
LABOSAN	Laboratório de Saneamento.
ORC	Organic Rankine Cycle.
PCI	Poder Calorífico Inferior.
PCS	Poder Calorífico Superior.
TCD	<i>Thermal Conductivity Detector.</i>
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket.</i>
US EPA	United States Environmental Protection Agency.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1	Biomassa e Produção de Biogás	13
2.2	Composição do Biogás.....	14
2.3	Potencial Energético do Biogás.....	19
2.4	Aproveitamento do Biogás.....	22
2.5	Tratamentos para Purificação do Biogás	25
3	METODOLOGIA.....	25
3.1	Local e Período das Análises	25
3.2	Descrição da ETE Aracapé III.....	26
3.3	Monitoramento da Fase Líquida	26
3.4	Monitoramento da Fase Gasosa.....	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1	Produção de Biogás ao Longo do Dia	31
4.2	Avaliação da Remoção de DQO.....	32
4.3	Qualidade do Biogás	35
4.4	Potencial Energético da ETE Aracapé III.....	37
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
	REFERÊNCIAS.....	40

POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM BIOGÁS PRODUZIDO EM REATOR UASB OPERANDO EM ESCALA REAL

Anderson Barbosa Araújo¹

Rita Karolinny Chaves de Lima²

RESUMO

Mundialmente, as consequências do consumo desmedido de combustíveis fósseis culminaram na necessidade de prospecção de energia renovável, incluindo o reaproveitamento de biogás para geração de energia elétrica. Em se tratando do Brasil, a prioridade por tratamento de efluentes por reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) tornou essa alternativa energética mais atrativa, já que um dos principais produtos desse método é um biogás de alto teor de metano e considerável poder calorífico. Dessa forma, com o intuito de avaliar o potencial energético da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Aracapé III, localizada no município de Fortaleza – CE e operada pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece), nesse estudo foram realizadas análises laboratoriais e em campo quanto às concentrações de metano e demais constituintes do biogás produzido nos reatores dessa estação, bem como de alguns parâmetros físico-químicos do efluente, como DQO, e físicos da estação, como vazão de entrada, a fim de melhor monitorar a produção de biogás da ETE em questão. Os resultados mostraram que o biogás produzido conferiu autossuficiência para a ETE e ainda forneceu saldo energético a outros setores da companhia, uma vez que este apresentou taxas de metano de aproximadamente 76%.

Palavras-chave: Biogás. Energia Renovável. Reator UASB. Potencial Energético. ETE.

ABSTRACT

Worldwide, the consequences of a reckless fossil fuel consumption has culminated in the need of renewable energy prospection, including the reuse of biogas to generate electricity. On the other hand, on a national basis in Brazil, there is a common habit of prioritizing UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) reactors as a sewage treatment option, which has made this energetic alternative more attractive, once biogas with high levels of methane and great calorific value is one of its main products. On this regard, this paper aimed on evaluating the energetic potential of the wastewater treatment plant (WWTP) Aracape III, located in the city of Fortaleza – CE and operated by the water and wastewater utility of Ceara (Cagece). Therefore, this study performed laboratory and in field tests, such as methane and other elements concentrations, as well as other physical-chemical effluent parameters, e.g. COD, and WWTP physical ones, e.g.: effluent inflow, in order to monitor the biogas production at Aracape III. It was possible to notice that the reuse of the WWTP biogas promoted a self-sufficient plant and, on top of that, provided energy surplus to other plants in the water and wastewater utility's network, hence its methane ratios of approximately 76%.

Keywords: Biogas. Renewable Energy. UASB Reactor. Energetic Potential. WWTP.

¹Estudante do Curso de Especialização em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos pela Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira e Universidade Aberta do Brasil, polo Redenção.

²Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos.

1 INTRODUÇÃO

É indiscutível que a geração de energia representa o fator preponderante quando se pensa em desenvolvimento tecnológico da humanidade, que, na busca de sustentar padrões de vida cada vez mais elevados, disparou em uma empreitada incansável por fontes energéticas capazes de atender ao que é demandado pelas civilizações. Isso desencadeou o consumo negligente dos recursos naturais, impulsionado pela descoberta revolucionária do uso de combustíveis fósseis, cujos derivados finais apresentam alto valor energético, mas que são considerados, atualmente, os maiores culpados pelas emissões de gases poluentes e aceleração do efeito estufa (SANTANA; COHIM, 2011).

Entretanto, nas últimas décadas, o aumento dos preços do barril de petróleo, a possibilidade de desabastecimento energético e o maior crescimento da preocupação ambiental da população vêm forçando uma mudança na forma de pensar dos grandes exploradores de fontes energéticas não-renováveis, para que seja dado maior ênfase à prospecção de tecnologias renováveis, como a solar, eólica, marítima e biomassa (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011; FREITAS et al., 2013).

Nesse contexto, diversos países, a exemplo da Alemanha, legislaram em favor dos produtores de energia por meio de fontes renováveis, proporcionando um aumento das usinas de biogás e, conseqüentemente, demandando mais experiência profissional no ramo e maior otimização no processo de digestão anaeróbia, fenômeno responsável pela produção do metano (CH_4), o principal constituinte do biogás e o responsável pelo seu poder de queima (BMELV, 2010; DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011). Contudo, outros compostos indesejáveis, tais como amônia (NH_3) e sulfeto de hidrogênio (H_2S), também podem estar presentes, o que diminui a eficiência energética desse biocombustível e, possivelmente, o torna corrosivo. A composição e a quantidade do biogás gerado dependerão, sobretudo, do tipo de biomassa utilizada como matéria-prima, da atividade biológica dos microrganismos que promoverão a digestão e das condições de processo (SOUZA, 2005).

O biogás, de fato, como indicam Santana e Cohim (2011), é considerado uma alternativa de fonte de energia alternativa de baixo custo, dado que é um subproduto da biodigestão, com valor econômico agregado, oriundo do tratamento de elementos sem qualquer atrativo comercial, como os encontrados em estações

de tratamento de esgoto e em aterros sanitários. Além disso, particularmente para o Brasil, Freitas et al. (2013) sugerem que a vantagem da utilização de biogás para geração de energia é ainda maior em virtude da crescente escolha de tratamento de esgotos por meio de reatores anaeróbios, indicando que, futuramente, essa seja uma tecnologia renovável bastante conveniente.

Segundo os autores Deublein e Steinhauser (2011) e Lobato et al. (2009), o biogás, de uma forma geral, pode ser utilizado para os seguintes fins, a depender de sua qualidade: geração de calor, pela utilização de vapor quente oriundo de sua combustão e consequente rotação de turbinas a vapor; coprodução de energia elétrica e térmica; funcionamento de motores, geradores e moto-picadeiras; resfriamento de leite; aquecimento de água; substituição de outros combustíveis em fornos de fabricação de cerâmica ou vidro; entre outros.

Contudo, se, sem o devido tratamento prévio, for lançado na atmosfera ou queimado, leva a formação de dióxido de enxofre (SO_2), composto associado à poluição atmosférica e perturbações pulmonares nocivas (ANDREOLI et al., 2003), bem como agrava o efeito estufa mais severamente do que o gás carbônico, além de liberar odores que incomodam a vizinhança, podendo, ainda, causar problemas de saúde adicionais devido à presença de H_2S e outras substâncias (OLIVEIRA, 2011). Vale destacar que o H_2S é também o agente principal na corrosão dos componentes internos de geradores de energia elétrica e, por isso, tem-se buscado tecnologias eficientes para remoção desse composto do biogás (JANSSEN et al., 1995).

As técnicas tradicionais de purificação do biogás são do tipo *ex-situ*, ou seja, o biogás é inicialmente retirado do digestor anaeróbio e, em seguida, é aplicado um tipo de tratamento conforme o poluente que se deseja remover. Pode-se fazer uso, por exemplo, de aplicação de soluções com pH elevado ou mesmo de uma solução ou leite à base de ferro. Por outro lado, a purificação também pode ser do tipo *in-situ*, como quando pequenas doses de oxigênio são aplicadas no digestor anaeróbio, em um processo denominado microaeróbio.

Diante do cenário exposto, o presente trabalho teve como principal objetivo quantificar as concentrações de metano e gás carbônico presentes no biogás produzido por meio da digestão anaeróbia de esgotos urbanos, usando, para tal, os resultados das análises obtidas em uma Estação de Tratamento de Esgoto – ETE em escala real, Aracapé III, operada pela Companhia de Água e Esgoto do

Ceará – Cagece; avaliar a autossuficiência dessa ETE e apresentar diferentes possibilidades para o tratamento do biogás antes de sua utilização para geração de energia.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Biomassa e Produção de Biogás

Em um contexto geral, Higman e Van der Burgt (2003) definem biomassa como qualquer combustível ou matéria bruta derivados de organismos que estiveram vivos recentemente. Abrange, portanto, tanto matéria orgânica do tipo vegetal, como animal. Pode ter origem natural, gerada exclusivamente pela natureza, ou ser cultivada em plantações para os mais diversos fins. A biomassa residual, por outro lado, é resultante de várias atividades humanas. Nesse grupo estão as sobras de vegetais impróprios para consumo ou plantio, como grãos, sementes e palhas, bem como efluentes sólidos e líquidos que possam ser biodegradados, como dejetos e esterco (BLEY Júnior et. al., 2009; COUTO et. al., 2004;).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2008), os diversos tipos de biomassa, seja natural, residual ou produzida em plantações, encontram grande utilização na produção de energia, gerando eletricidade, calor ou biocombustíveis. O aproveitamento pode ser feito basicamente através de processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação), termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou combustão direta, fazendo ou não uso de processos físicos como secagem, classificação e compressão (CORTEZ et al., 2008).

Uma das formas mais comuns de aplicação da biomassa é o seu processamento em biodigestores; equipamentos utilizados para realizar a decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio, em um processo denominado de digestão anaeróbia, obtendo, como produto energético, o biogás. Três etapas distintas caracterizam o processo (SOUZA, 2005):

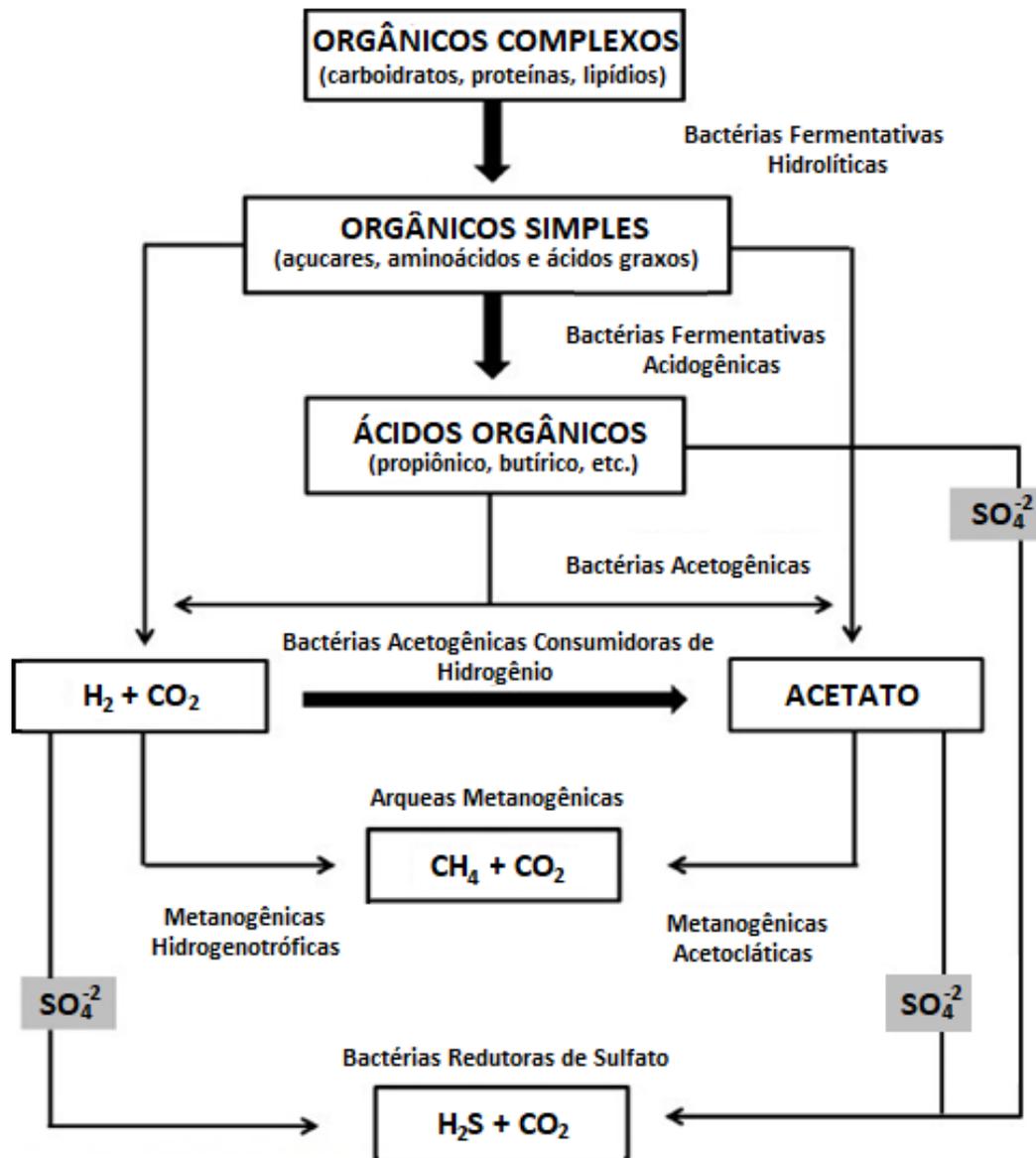
- (i) hidrólise do material orgânico complexo, transformando-o em compostos dissolvidos ou voláteis;
- (ii) gaseificação, que se dá pela fermentação ácida (acidogênese), gerando ácidos orgânicos voláteis (fórmico, acético, propiônico, butírico e valérico) e pela fermentação acetogênica (acetogênese), que resulta em acetato, hidrogênio e monóxido de carbono;

(iii) metanogênese, na qual os produtos da acetogênese são transformados predominantemente em metano (CH_4), além de outros gases.

2.2 Composição do Biogás

O produto da digestão anaeróbia, como mostrado na Figura 1, é uma mistura gasosa composta principalmente de metano e dióxido de carbono, mais conhecida como biogás. Entretanto, como descrito por Ben et al. (2013), ainda fazem parte dessa mistura: sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), vapor d'água em estado de saturação e outros gases traços, como oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2), siloxanos, mercaptanas e alguns compostos halogenados.

Figura 1- Processo de digestão anaeróbia e redução de sulfato.



Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997).

Deve-se ressaltar que a produção do biogás ocorre não apenas em biodigestores, mas também em ambientes como aterros sanitários e na natureza, e.g., pântanos, esterqueiras, fundo de lagoas e rúmen de bovinos, ovinos e caprinos, além de outros animais (BEN et al., 2013; BMELV, 2010). Fatores como tipo de biomassa utilizada como matéria-prima, atividade biológica dos microrganismos que promoverão a digestão e condições de processo (como pH, temperatura, agitação, tempo de retenção e uso ou não de sistema de tratamento) determinarão a quantidade e a composição final do biogás produzido (SOUZA, 2005). A Tabela 1 mostra como há variação nas proporções dos compostos presentes no biogás formado, conforme o tipo de resíduo utilizado.

Tabela 1- Composição do biogás originário de diferentes fontes.

Componentes	Tipo de Rejeito			
	Agropecuário	Esgoto sanitário	Industrial	Aterro sanitário
CH ₄	50 – 80%	65 – 75%	50 – 70%	45 – 65%
CO ₂	30 – 50%	20 – 35%	30 – 50%	34 – 55%
H ₂ S	100 – 700 ppm	< 8000 ppm	0 – 8%	0,5 – 100 ppm
NH ₃	Traços	Traços	Traços	Traços
H ₂	0 – 2%	Traços	0 – 2%	0 – 1%

Fonte: Adaptado de Ben et al. (2013); Deublein; Steinhauser, (2011).

Para fins de aumentar a abrangência das informações relatadas, a seguir serão descritas algumas características importantes dos principais compostos presentes na composição do biogás bruto (sem tratamento para purificação).

2.2.1 Metano

O composto que garante o poder de queima do biogás, e é o seu principal constituinte, é o metano (CH₄); gás de baixa toxicidade, que não possui coloração, cheiro ou sabor. Altamente combustível, apresenta chama azul-lilás, com pequenas manchas vermelhas em alguns casos, mas sem geração de fuligem (OLIVEIRA et al., 2006, apud ZILOTTI, 2012). Por causa disso, ainda que possa ser asfixiante em concentrações muito elevadas (500.000 ppm), não é necessária grande preocupação em termos de danos à saúde, mas sim devido aos riscos de acidentes, pois quando adicionado ao ar, torna-se altamente explosivo. (SAMPAIO et al., 2005).

Adicionalmente, assim como o vapor d'água e o gás carbônico, o metano faz parte dos mais conhecidos Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo também o gás traço mais abundante e reativo na atmosfera, cuja concentração mais que dobrou desde a era pré-industrial. É tido como um dos compostos que mais agrava o aquecimento global na Terra (BEN et al., 2013); para se ter ideia, sua contribuição no efeito estufa é cerca de 21 vezes maior que a do dióxido de carbono (SANTANTA; COHIM, 2011).

2.2.2 Gás Carbônico

Esse gás não é o mais potente causador do efeito estufa, mas, como está presente em maiores concentrações, é o mais conhecido GEE existente. Além desse

problema, o CO₂ ainda causa: diluição do metano no biogás, diminuindo seu poder calorífico e potencial energético; aumento do *knocking* de motores a biogás, causando a detonação do combustível fora do tempo correto, o que implica na deterioração do motor e diminuição de sua eficiência; e corrosão nas partes metálicas das máquinas, devido à formação do ácido carbônico (H₂CO₃), quando na presença de umidade (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

Nos casos em que a combustão não ocorre completamente, por causa de baixa concentração de oxigênio, há a formação de monóxido de carbono (CO). Esse derivado é considerado um gás asfíxiante, pois apresenta maior afinidade à hemoglobina do sangue do que o próprio O₂, impedindo o transporte deste no organismo. Ademais, altas concentrações de CO no ambiente causam cefaleias, danos no sistema nervoso e paralisção de membros, podendo levar a óbito (SAMPAIO et al., 2013).

2.2.3 Gás Sulfídrico

Embora esteja presente em quantidades bem inferiores às dos demais compostos já apresentados, o H₂S, além de outros derivados do enxofre, é o que apresenta mais problemas e custos extras para melhoria da qualidade do biogás. Dentre alguns dos problemas causados por compostos derivados do enxofre no biogás, pode-se citar depleção da camada de ozônio da estratosfera, efeito estufa e chuva ácida (BEN et al., 2011).

Esse gás confere aos coletores e estações de tratamento de esgotos o forte odor característico de ovo podre e é responsável pelas inúmeras e crescentes reclamações em concessionárias de saneamento (AZEVEDO et al., 1999). Isso se dá devido ao fato de que o nariz humano, como descrito por Castro et al. (1985), é capaz de detectar esse composto em concentrações na faixa de 0,01 a 0,2 ppm. Além disso, o sulfeto de hidrogênio, ou gás sulfídrico, é caracterizado por sua ausência de cor e alta toxicidade, agravada pelo fato de ser mais denso do que o ar atmosférico, dificultando sua dispersão vertical, para longe das pessoas e demais seres vivos. Concentrações entre 50 e 200 ppm causam, em humanos e animais, perda da sensibilidade olfativa, redução no desenvolvimento corporal, perda de apetite, vômitos, fotofobia e diarreia (LE DIVIDICH, 1982, apud SAMPAIO et al., 2013; PRESOTTO, 2014). A Figura 2 apresenta a toxicidade de tal componente de acordo com a concentração encontrada.

2.3 Potencial Energético do Biogás

A quantidade de energia por unidade de massa ou de volume liberada, na forma de calor, na oxidação de um determinado combustível define o seu poder calorífico. Garcia (2002) explica que se essa quantidade de calor for medida com a água gerada na queima na fase gasosa, tem-se o que é definido como Poder Calorífico Inferior (PCI); no caso da água ser considerada na fase líquida, o que se tem é o Poder Calorífico Superior (PCS). O autor relata, ainda, que o valor que mais se usa é o PCI, pois na maioria dos processos, os gases de combustão são liberados em temperaturas altas, estando a água na fase gasosa. O PCI do biogás produzido dependerá de sua composição, principalmente no que diz respeito a razão de CH₄ e CO₂ presente na mistura. A Tabela 2 apresenta os valores de PCI de alguns combustíveis, incluindo diferentes composições de biogás.

Tabela 2- Comparação do poder calorífico de alguns combustíveis.

Combustível	Peso Específico (kg/Nm ³)	PCI (kcal/kg)
Biogás (40% CH ₄ , 60% CO ₂)	1,4643	2.338,52
Biogás (60% CH ₄ , 40% CO ₂)	1,2143	4.229,98
Biogás (75% CH ₄ , 25% CO ₂)	1,0268	6.253,01
Biogás (95% CH ₄ , 5% CO ₂)	0,7768	10.469,60
GLP	552(líq.) 2,29(gás)	11.026
Propano	Não disponível	22.000
Gás Natural	Não disponível	8.554
Lenha	390	2.530

Fonte: Adaptado de Alves (2000); Avellar (2001), apud Costa (2006).

Pode-se concluir, então, que a quantidade de metano estabelece uma relação de proporcionalidade direta com o poder calorífico do biogás. Isso permite afirmar que, quanto maior a concentração de impurezas, *i.e.*, de qualquer gás que não seja CH₄, mais diluído estará o biogás, e menor será seu potencial energético. Em um tópico mais adiante serão discutidas formas de purificação dessa mistura gasosa proveniente de reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), reator anaeróbico de fluxo ascendente, para maior aproveitamento energético.

De acordo com Chernicharo (1997), existem duas formas de se quantificar a geração de metano em um reator UASB: (i) a partir da composição química do despejo ou (ii) a partir da Demanda Química de Oxigênio – DQO degradada ou removida. Esta, por sua vez, corresponde a uma parcela da DQO total

ou aplicada que entra no sistema, sendo a outra parcela correspondente à DQO não degradada ou não removida e que, portanto, permanece no reator. Pode-se achar o valor de remoção de DQO utilizando a Equação 1.

$$DQO_{remov} = Q \times (S_0 - S) \quad (1)$$

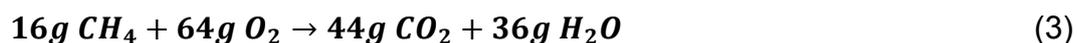
Nessa equação (Eq. 1), tem-se que:

- DQO_{remov} = carga de DQO removida no reator (kg DQO/dia);
- Q = vazão do esgoto afluyente (m^3 /dia);
- S = concentração de DQO efluente ao sistema (kg DQO/ m^3), a qual também pode ser calculada com base na eficiência, E , observada do reator, $S = (1 - E) \cdot S_0$.
- S_0 = concentração de DQO afluyente ao sistema (kg DQO/ m^3);

Conforme mostra a reação representada na Equação 2, um mol de metano reage com dois mols de oxigênio para que ocorra sua completa oxidação a gás carbônico (CO_2) e água (H_2O). Dessa forma, em termos de massa, é necessário haver a degradação de 64 g de DQO para que sejam formados 16 g de CH_4 . Ainda é possível, em se tratando de gases, prever que, nas Condições Normais de Temperatura e Pressão – CNTP, há a formação de 350 mL de metano para cada grama de DQO degradada.



Ou ainda:



Para determinação teórica da produção de metano por grama de DQO degradada, em um reator anaeróbio, Chernicharo (1997) complementa com a Equação 4.

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(T)} \quad (4)$$

Nessa equação (Eq. 4), tem-se que:

- Q_{CH_4} = vazão de metano produzido (m^3/dia);
- DQO_{CH_4} = carga de DQO removida no reator e convertida em metano ($kg\ DQO/dia$);
- $K(T)$ = fator de correção para a temperatura operacional do reator.

O fator $K(T)$, por sua vez, pode ser calculado usando a Equação 5.

$$K(T) = \frac{P \times K}{R \times (273,15 + T)} \quad (5)$$

Nessa equação (Eq. 5), tem-se que:

- P = pressão atmosférica (1 atm);
- K = concentração de oxigênio dissolvido (COD) para remoção de um mol de CH_4 (64 g DQO/mol);
- R = constante dos gases (0,08206 atm.L/mol.K);
- T = temperatura operacional do reator ($^{\circ}C$).

No caso particular do tratamento de efluentes domésticos, entende-se que a DQO removida corresponde ao somatório da DQO transformada em metano (DQO_{CH_4}) – expressa em $kg\ DQO_{CH_4}/dia$ – com a DQO convertida em biomassa (DQO_{lodo}) – expressa em $kg\ DQO_{lodo}/dia$ – (CHERNICHARO, 1997). Tem-se, assim, a Equação 6.

$$DQO_{remov} = DQO_{CH_4} + DQO_{lodo} \quad (6)$$

A DQO_{lodo} , por sua vez, pode ser estimada usando a Equação 7.

$$DQO_{lodo} = Y_{obs} \times DQO_{apl} \quad (7)$$

Nessa equação (Eq. 7), tem-se que:

- Y_{obs} = coeficiente observado de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO ($\text{kgDQO}_{\text{lodo}}/\text{kgDQO}_{\text{apl}}$), variando, no Brasil, entre 0,11 a 0,23 $\text{kgDQO}_{\text{lodo}}/\text{kgDQO}_{\text{apl}}$;
- DQO_{apl} = carga de DQO total aplicada ao sistema (kgDQO/dia).

Em síntese, encontrados os valores da Equação 1, da Equação 7 e manipulando-se a Equação 6, pode-se determinar a quantidade de DQO transformada em metano. Finalmente, esse valor é substituído na Equação 4, juntamente ao resultado da Equação 5, para que seja estimada a vazão de produção de metano. Além disso, como o biogás produzido não é 100% CH_4 , deve-se ainda realizar a operação representada na Equação 8.

$$Q_{\text{biogás}} = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{\% \text{CH}_4} \quad (8)$$

Nessa equação (Eq. 8), tem-se que:

- $Q_{\text{biogás}}$ = vazão estimada de produção de biogás (m^3/dia);

$\% \text{CH}_4$ = teor de metano presente no biogás produzido no reator, que, segundo Chernicharo (1997), varia de 70-80% para efluente doméstico.

Por fim, para se estimar o potencial elétrico do biogás, como sugerem Santana et al. (2011), deve-se efetuar o cálculo da Equação 9.

$$PE = \frac{Q_{\text{biogás}} \times PCI_{\text{biogás}} \times \eta_{\text{gerador}} \times 4,1868}{86.400} \quad (9)$$

Nessa equação (Eq. 9), tem-se que:

- PE = potência elétrica (kW);
- $PCI_{\text{biogás}}$ = poder calorífico inferior do biogás (kcal/m^3);
- $\eta_{\text{gerador}} = 30\%$, eficiência baseada no valor médio das tecnologias de conversão;
- 4,1868 = fator de conversão de kcal para kJ, em que $1 \text{ kJ}/\text{s} = 1 \text{ kW}$.

2.4 Aproveitamento do Biogás

Embora a prática no Brasil ainda seja, em sua maioria, a simples queima do biogás produzido em ETEs para minimizar o efeito estufa, muitos países já vêm observando esses números apresentados na Tabela 2 e realizando o reaproveitamento do biogás para geração de energia limpa e renovável, aliando desenvolvimento e preservação do meio ambiente (LOBATO et al., 2009).

Para Deublein e Steinhauser (2011), o biogás pode ser reaproveitado para geração de calor, devido ao seu alto poder de queima. Isso se dá pela utilização do vapor quente, proveniente da combustão, para movimentação de turbinas, como no ciclo orgânico de Rankine (do inglês *Organic Rankine Cycle* – ORC), no ciclo de Cheng, em turbinas a vapor e em sistemas de pistão.

Ainda segundo os autores, há uma alternativa de coprodução de energia elétrica e térmica, na geração de corrente elétrica, em usinas de geração combinada de calor e eletricidade, do inglês *Combined Heat and Power* (CHP) plants, mostrada na Figura 3. Outras opções consistem nas microturbinas a gás, motores *Stirling* e células de combustível (Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha – BMELV, 2010).

Figura 3 - Exemplo de uma usina CHP.



Fonte: Deublein; Steinhauser (2011).

Em complemento, além de ser usado no funcionamento de motores, geradores e moto-picadeiras, o biogás pode também ser aproveitado no processo de resfriamento de leite, aquecimento de água, na iluminação e em eletrodomésticos, como geladeira e fogão (COSTA, 2006).

Para maior facilidade, Lobato et al. (2009) dividiram os diversos usos nas classes apresentadas a seguir:

Uso direto: método de menor complexidade e que apresenta melhor relação *custo x benefício*. Consiste na utilização do biogás para substituir ou complementar outros combustíveis, como o gás natural, carvão e óleo diesel, em processos industriais em geral, envolvendo, entre outros, aquecedores de água na piscicultura, secadores de lixiviados, fornos para fabricação de cerâmica ou vidro e estufas.

Geração de eletricidade: por meio de motores de combustão interna, turbinas e micro-turbinas, além de uma maior gama de tecnologias para conversão do biogás em eletricidade, a fim de ser consumida *in loco* ou vendida à concessionária de energia elétrica da região.

Cogeração: produção concomitante de eletricidade e calor (vapor ou água quente), o que aumenta a eficiência de tais sistemas, conferindo, a essa classe, a característica de ser uma das mais economicamente interessantes.

Combustíveis alternativos: consiste na opção que requer maior tratamento do biogás quanto à remoção de substâncias corrosivas, como o sulfeto de hidrogênio, pois prevê sua utilização como combustível veicular, bem como sua injeção nas redes de gás natural de uma região. Contudo, na Alemanha, por exemplo, em 2010, já existiam cerca de 40 usinas injetando biogás no sistema de distribuição de gás e uma espera de, até 2020, estar substituindo cerca seis bilhões de metros cúbicos de gás natural por ano (Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha – BMELV, 2010), reduzindo consideravelmente os impactos ambientais causados pela extração e queima indiscriminadas desse combustível.

Com relação ao Brasil, Lobato et al. (2009) ainda concluem que se espera, no futuro, um maior reaproveitamento do biogás, principalmente devido à crescente onda de implementação de reatores anaeróbios no tratamento de efluentes industriais, bem como de aterros sanitários com sistema de biogás, para fins de secagem térmica de lodo, geração de vapor em agroindústrias, fornecimento de eletricidade para uso local e distribuição de biogás para pequenas populações vizinhas usarem no cozimento de alimentos.

2.5 Tratamentos para Purificação do Biogás

Geralmente o uso do biogás bruto, ou seja, sem qualquer tratamento, é prejudicial. Tal fato deve-se a elevada concentração de substâncias corrosivas, como o gás sulfídrico (Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha – BMELV, 2010). Um outro problema que pode ser comum é a alta diluição do metano com o gás carbônico, implicando na diminuição de seu potencial energético (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

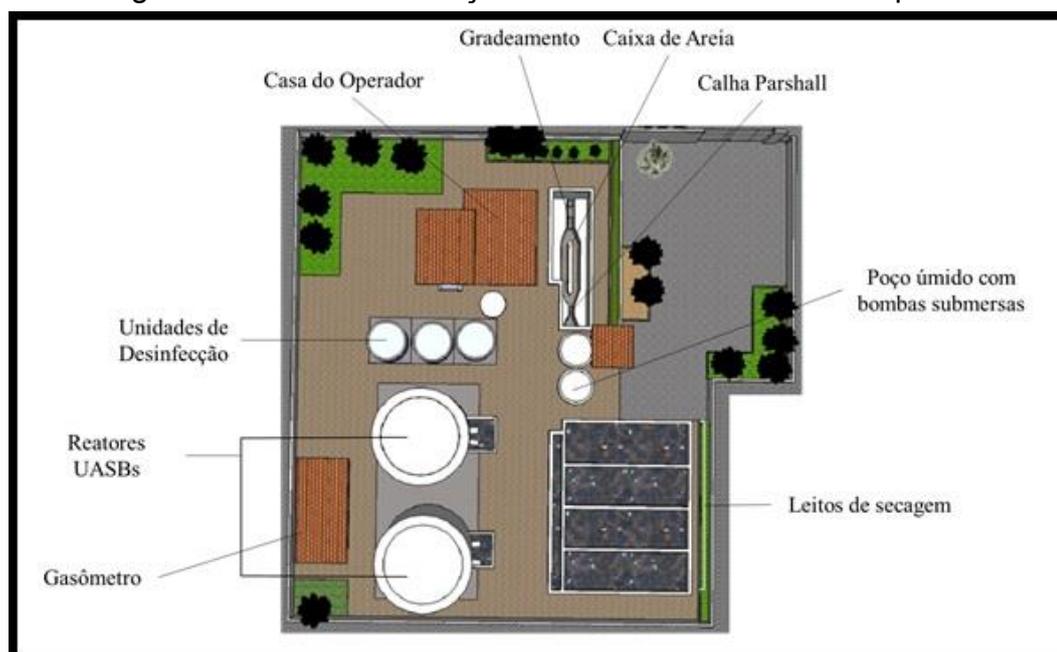
Por consequência disso, inúmeros métodos de purificação do biogás foram desenvolvidos, envolvendo processos físicos, químicos e/ou biológicos, em busca da melhor relação *custo x benefício*. Uma preocupação extra deve ser dada ao processo de sulfetogênese, e, por isso, faz-se necessário o uso de diversos métodos para inibir tal fenômeno (técnicas preventivas), bem como agir na neutralização dos seus produtos finais, a fim de evitar os problemas já descritos. Algumas técnicas mais interessantes são: absorção, biofiltração, adição de substâncias químicas e microaeração.

3 METODOLOGIA

3.1 Local e Período das Análises

Os dados relativos ao presente trabalho foram obtidos na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) Aracapé III, localizada no município de Fortaleza – CE, Brasil, com coordenadas 3°50'2,29"S; 38°35'1,99"O, no bairro Aracapé, durante três meses (abril a junho). Entretanto, para complementar os dados coletados e para efeitos de discussão, foram analisados os resultados obtidos em pesquisas anteriores no mesmo local, bem como nos laudos de monitoramento realizados pela equipe da Gerência de Controle da Qualidade de Produto (GECOQ) da Cagece, englobando, em sua totalidade, dados de três anos. Uma representação em planta baixa colorida da ETE Aracapé III é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Planta de situação identificada da ETE Aracapé III.



Fonte: disponibilizada pela Cagece.

3.2 Descrição da ETE Aracapé III

Com o intuito de receber a contribuição do Conjunto Habitacional do Aracapé, a referida ETE, com capacidade média de tratamento de até 32 m³/h, conta com dois reatores idênticos do tipo UASB, operados em paralelo, com eficiência estimada de 80% na remoção de DQO e sólidos suspensos.

Adicionalmente, a estação ainda apresenta dois *scrubbers*, um para cada reator, com solução de hipoclorito de cálcio, Ca(ClO)₂, para lavagem do biogás gerado; casa elétrica, abrigando um grupo gerador a diesel, com potência de 25 CV; bem como uma estrutura para abrigo de um pulmão armazenador de biogás.

A ETE, por fim, possui uma Estação Elevatória de Esgoto (EEE) para recalque do esgoto até os reatores, composta por um poço de sucção e duas bombas centrífugas submersíveis (1A+1R), controladas por nível do tipo boia e cujas tubulações foram projetadas para permitir a passagem de sólidos de até 50 mm.

3.3 Monitoramento da Fase Líquida

Foram realizadas coletas semanais, em um período de três meses (abril a junho), e realizadas análises laboratoriais para a fase líquida na entrada e na saída do reator referentes a DQO total e DQO filtrada. As amostras, imediatamente após

serem coletadas, foram levadas para o Laboratório de Saneamento da UFC (Labosan) e conservadas para posterior avaliação, conforme mostrado no Quadro 1. Com isso, pôde-se monitorar a qualidade do esgoto afluente e efluente quanto sua carga orgânica.

Quadro 1 - Metodologias de análise físico-química laboratorial utilizadas.

Parâmetro	Método
DQO total	Titulométrico Refluxação Fechada
DQO filtrada	Titulométrico Refluxação Fechada

Fonte: Adaptado de Apha et al. (2012); Buchauer (1998).

É importante salientar que, para o parâmetro DQO total, fez-se uso também de dados coletados em outros trabalhos realizados para o mesmo reator, bem como de laudos de monitoramento emitidos pela própria equipe da Cagece, somando uma amostragem referente ao período três anos.

A vazão instantânea foi aferida por meio do medidor de nível ultrassônico, modelo SEP-392 *Echotrek*, da marca Nivetec. Por problemas operacionais, o registrador de dados não estava armazenando os valores do nível de esgoto, sendo necessário que o operador da estação anotasse os valores lidos no visor do medidor durante seu expediente (8-17h) para subsequente trabalho estatístico.

As principais vantagens de se usar esse medidor, em detrimento da direta leitura na calha *Parshall*, são o maior distanciamento das águas residuais insalubres, evitando contaminações do operador e incrustações no aparelho; bem como o registro instantâneo e contínuo dos dados de vazão. Além disso, é possível obter resultados mais precisos, visto que a calha está mais sujeita a problemas de fábrica ou de instalação, podendo também sofrer desgaste da régua de leitura devido ao contato com o esgoto, incorrendo em erros na verificação do nível.

Figura 5 - Medidor de nível instalado.



Fonte: O autor.

Por meio da utilização da Equação 10 (aproximação polinomial de grau dois), deduzida após tratamento estatístico dos dados referentes a um trabalho à parte, cujos detalhes fogem ao escopo deste, o nível de esgoto (em metros) pode ser convertido em vazão horária (em m³/h).

$$Q_{esgoto} = 185,7 * (nível)^2 + 185,7 * (nível) - 1,2 \quad (10)$$

3.4 Monitoramento da Fase Gasosa

Os parâmetros analisados da fase gasosa foram: %CH₄, %CO₂, %Ar, %O₂ e concentração de H₂S, e os métodos usados podem ser observados no Quadro 2.

Quadro 2 - Metodologias de análise do biogás.

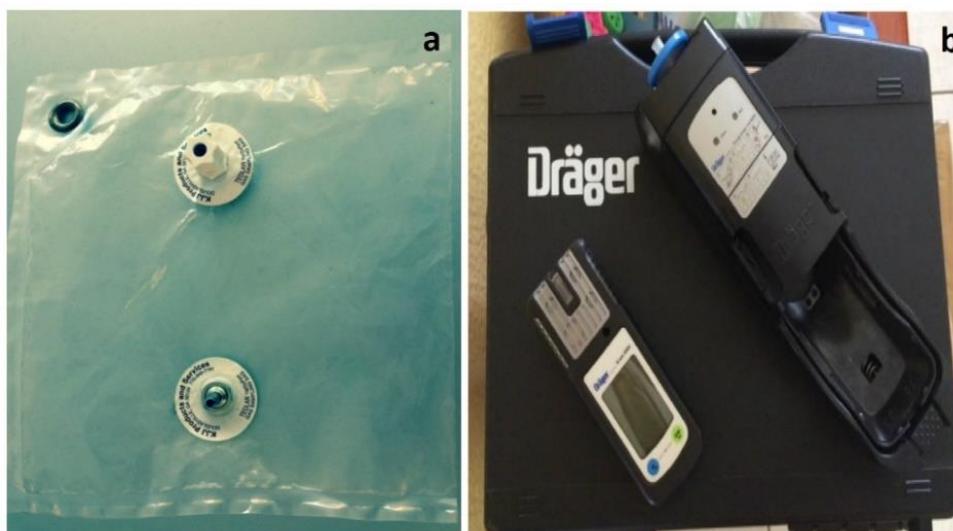
Parâmetro	Método
%CH ₄ instantâneo	Medidor de concentração <i>Dräger</i>
%CH ₄ laboratorial	Cromatógrafo gasoso com TCD
%O ₂	Medidor de concentração <i>Dräger</i>
H ₂ S	Medidor de concentração <i>Dräger</i>
%Ar (N ₂ + O ₂)	Cromatógrafo gasoso com TCD
%CO ₂	Cromatógrafo gasoso com TCD

Fonte: O autor.

A cada minuto, também foi realizada e armazenada, automaticamente, a contagem do volume de produção do biogás por meio da instalação de um medidor volumétrico do tipo diafragma da marca LAO, modelo G4, cujos contadores são conectados ao *data logger* citado anteriormente.

Para inspeção do biogás produzido, foram realizadas coletas em bolsas de 500 mL, do tipo *Tedlar* (Figura 6a), imediatamente antes de o biogás passar pelo *scrubber*. No mesmo ponto, também foram medidas as concentrações de H₂S e as porcentagens de CH₄ instantâneas, lançando mão do uso do medidor de concentração *Dräger*, modelo X-AM 5600 (*Drägerwerk AG & Co. KGaA*, Figura 6b), acoplado à bomba *Dräger Pump X-AM 1/2/5000*, capaz de medir porcentagens de 0 a 100% de metano, bem como de 0 a 1.000 ppm de gás sulfídrico.

Figura 6 - (a) Bolsa para coleta de biogás; (b) Medidor de concentração e bomba da marca *Dräger*.



Fonte: O autor.

As bolsas coletadas foram também levadas ao Labosan, para análise de %O₂ e concentração de H₂S. Devido à alta vazão de produção de biogás, o limite máximo de detecção do sulfeto de hidrogênio do medidor era extrapolado, impossibilitando a medição da concentração desse composto em campo. Por isso, foi necessária sua diluição, a partir do fracionamento da amostra da bolsa, por meio de uma seringa de vidro de 1,0 mL e posterior diluição em bulbo, também de vidro, de 125 mL, da Supelco, conectado ao medidor *Dräger*.

Com o intuito de se obter a concentração dos demais constituintes do biogás, foram retiradas alíquotas da bolsa e inseridas no aparelho de cromatografia gasosa, equipado com detector de condutividade térmica (TCD, do inglês *Thermal Conductivity Detector*). As análises se deram em um cromatógrafo da marca *Shimadzu Corporation*, modelo GC-17A, em que 1,0 mL da amostra era injetada em modo *splitless*, com separação cromatográfica realizada em coluna Rt-QPLOT (polímero poroso de divinilbenzeno, 30 m de comprimento e 0,53 mm de diâmetro interno) da *Restek Corporation*. As condições cromatográficas do GC/TCD utilizadas na análise do biogás são mostradas no Quadro 3.

Após análise no cromatógrafo no medidor de concentração, os resultados foram adicionados em uma planilha de normalização para interpretação e adequação dos dados à realidade.

Quadro 3 - Condições cromatográficas do GC/TCD utilizadas na análise do biogás.

Parâmetros GC-TCD	
Modo de injeção	<i>Splitless</i>
Volume de injeção (mL)	1
Temperatura do injetor (°C)	40
Gás de arraste	He
Fluxo na coluna (mL/min)	0,7
Temperatura do forno (°C)*	50
Temperatura do detector (°C)	200
Tempo de corrida (min)	5

Nota: * Programação de temperatura isotérmica.

Fonte: O autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Produção de Biogás ao Longo do Dia

Com uma produção média de $33,41 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$, o comportamento da produção horária de biogás é mostrado na Figura 7, em que se verificou pico máximo de produção correspondente aos picos de vazão de esgoto e temperatura ambiente, permitindo-se traçar um paralelo entre essas três curvas. Isso ficou mais evidente ao se comparar os demais pontos das curvas de produção de biogás e vazão horária de esgoto afluente à estação, visualizando-se oscilações diretamente similares em ambas as curvas.

Figura 7 - Vazão horária média de biogás gerado.



Fonte: O autor.

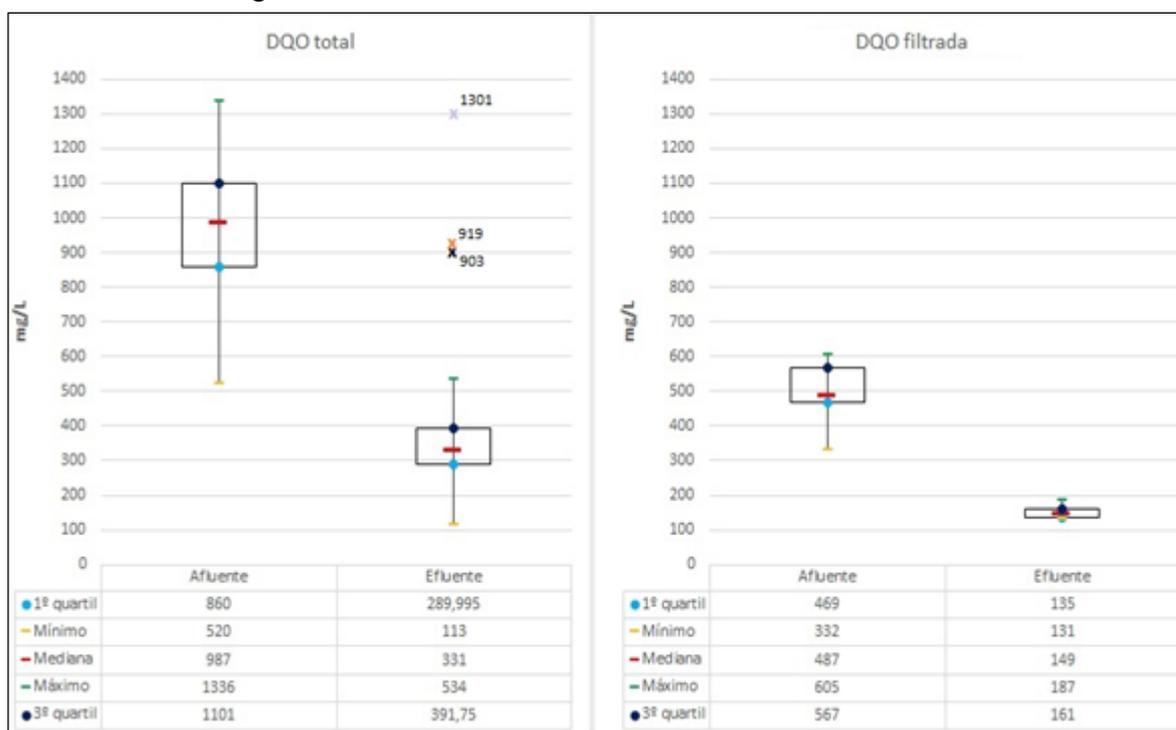
Como destaque, teve-se que a produção mínima de biogás ocorreu por volta das 5h, com uma vazão média de $0,94 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Em contrapartida, a partir desse horário, a curva apresentou praticamente apenas ascensão bastante acentuada, atingindo o pico máximo em aproximadamente 11h, com uma produção de $1,70 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Por fim, após esse período, ao contrário do descrito anteriormente, constatou-se que a vazão de biogás reduziu levemente na medida em que as horas se passaram.

4.2 Avaliação da Remoção de DQO

Para o reator em questão, no que compete às análises de DQO total das amostras coletadas (Figura 8), verificou-se que, para o afluente, o valor mínimo obtido foi de 520 mg.L^{-1} ; o valor máximo, 1.336 mg.L^{-1} , representando uma variação máxima de 816 mg.L^{-1} . A mediana se manteve levemente mais próxima do 3º quartil (1.101 mg.L^{-1}), indicando que os resultados se aproximaram mais desse valor. Essa grande amplitude interquartil representou a variabilidade das concentrações que chegaram à estação, devendo esta estar projetada para valores altos e baixos de carga orgânica.

Quanto à DQO total no efluente (Figura 8), notou-se que o valor médio foi de $340,23 \text{ mg.L}^{-1}$; a mediana, 331 mg.L^{-1} , a qual, por sua vez, se apresentou levemente mais próxima do 1º quartil (290 mg.L^{-1}), ao contrário do discutido no parágrafo anterior, sinalizando que a maioria dos valores das amostras se aproximou desse valor. Esses dados permitem definir que a eficiência média de remoção de DQO total desse reator foi de 56%, ou seja, o UASB não está trabalhando a contento, uma vez que sua remoção de carga orgânica foi definida, em projeto, para atingir 80% de redução.

Figura 8 - Análise da DQO total e filtrada do sistema.

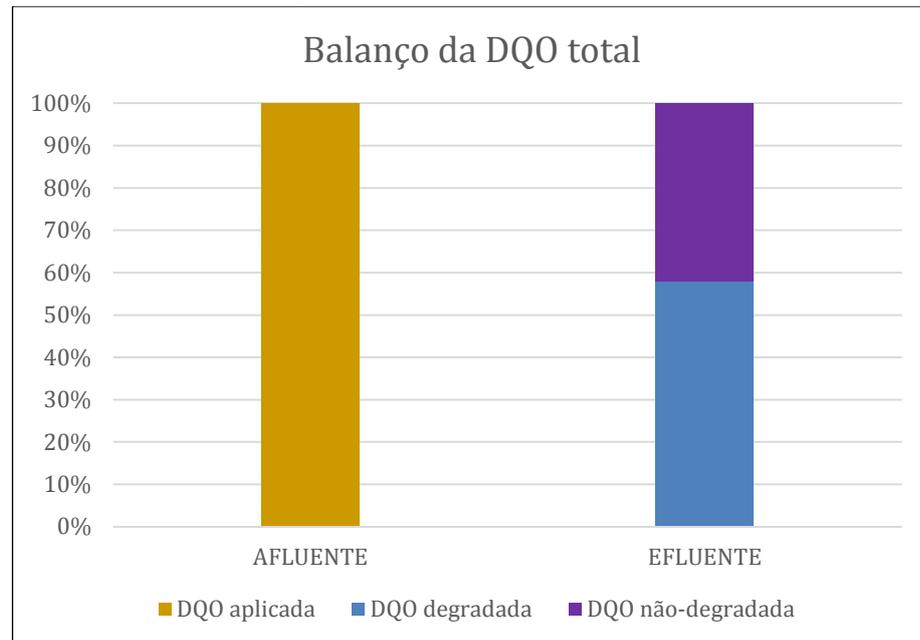


Fonte: O autor.

Em contrapartida, para os *box plots* que representam os valores de DQO filtrada, notou-se que não houve grandes variações, devido ao fato de que esse parâmetro não leva em consideração a quantidade de lodo presente na amostra, visto que o líquido é percolado por um filtro para retenção dessa DQO particulada. Na verdade, a diferença entre o valor máximo e mínimo (605 mg.L^{-1} e 332 mg.L^{-1} , respectivamente) está indicada pelo intervalo interquartil do afluente (273 mg.L^{-1}), que se mostrou menor do que o apresentado para a DQO total do efluente. Esse intervalo se torna ainda menor ao se comparar os valores máximo (187 mg.L^{-1}) e mínimo (131 mg.L^{-1}) para a DQO filtrada do efluente, resultando em uma amplitude interquartil de apenas 56 mg.L^{-1} ; média igual a $152,22 \text{ mg.L}^{-1}$ e mediana 149 mg.L^{-1} .

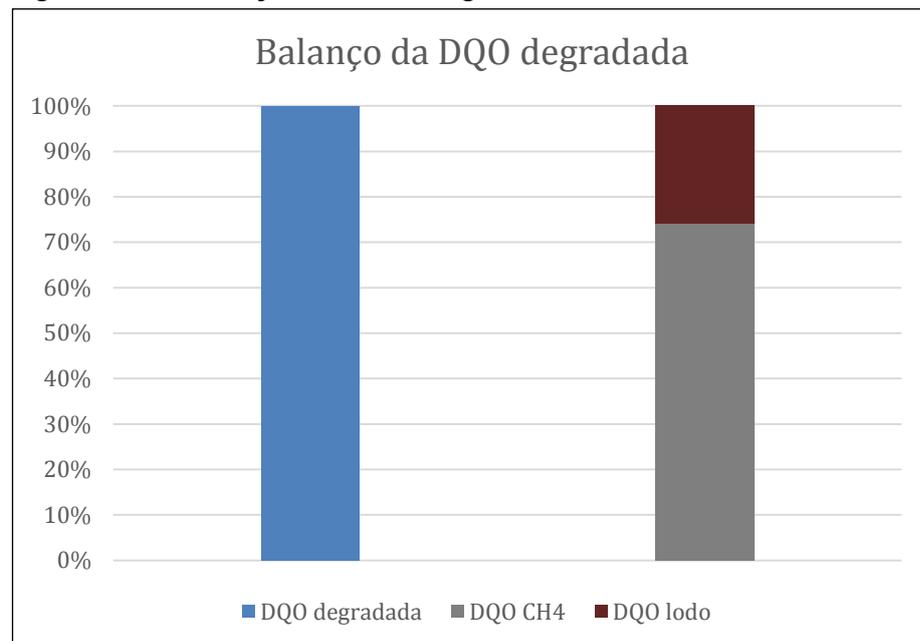
A produção real de metano pode ser calculada confrontando o teor desse gás no biogás e a vazão diária de biogás na estação. Como a cromatografia indicou que o biogás produzido continha 76,35% de CH_4 em sua composição, e a produção diária média de biogás foi de $33,41 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$, obteve-se a vazão real de metano igual a $25,51 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$. Entretanto, para comparação com a produção teórica de metano baseada na estequiometria da reação (Equação 3), em que se é necessário degradar um grama de DQO para produção de 0,35 L de CH_4 , calculou-se que a vazão teórica correspondia ao valor de, aproximadamente, $69,00 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de CH_4 ; ou seja, 63% a mais do que a vazão real. Uma outra forma teórica de calcular a produção de metano se dá por meio do balanço da DQO do sistema, apresentado nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 - Balanço da DQO total no sistema microaerado.



Fonte: O autor.

Figura 10 - Balanço da DQO degradada no sistema microaerado.



Fonte: O autor.

A carga orgânica afluyente e efluente média, respectivamente, foram $0,9695 \text{ kg.m}^{-3}$ e $0,4080 \text{ kg.m}^{-3}$. Calculou-se, então, a DQO degradada ($197,14 \text{ kg.dia}^{-1}$) por meio da Equação 1, sabendo que a vazão de esgoto aferida foi de $14,63 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, equivalente a $351,09 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$. Esse valor representou uma eficiência do reator de 57,92%, devido à parcela de $143,24 \text{ kg.dia}^{-1}$ (42,08% da DQO aplicada) que não foi removida, sendo detectada nas análises laboratoriais.

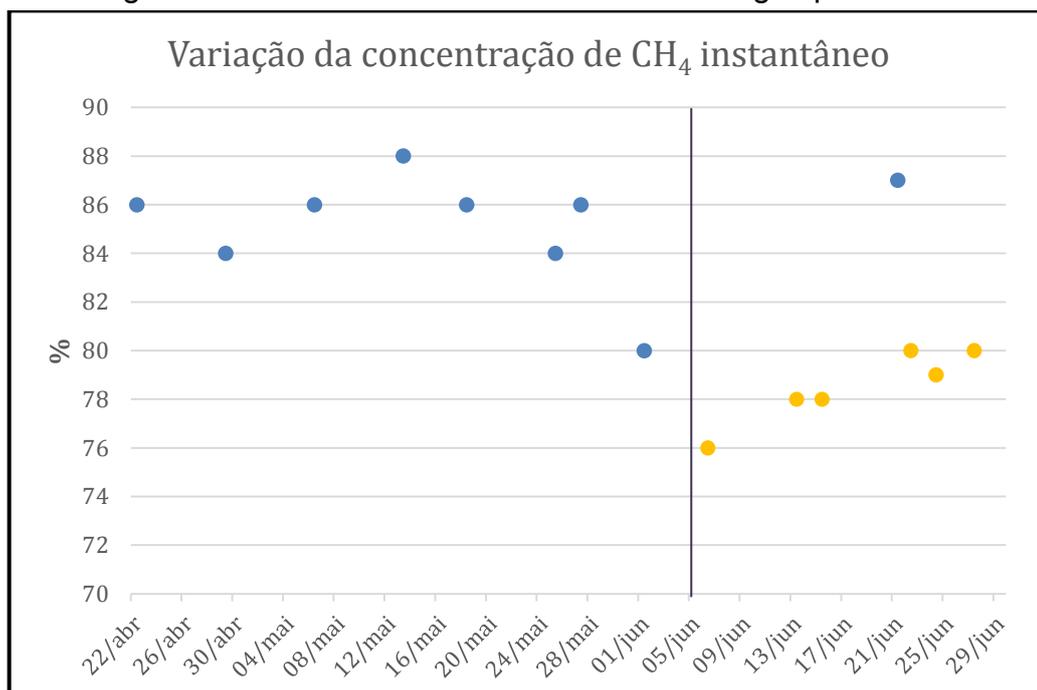
Por tratar-se de efluente doméstico, torna-se válida a aplicação da Equação 6, adotando Y_{obs} igual a $0,15 \text{ kgDQO}_{\text{lodo}} \cdot (\text{kgDQO}_{\text{apl}})^{-1}$, permitindo achar que o total de DQO convertida em biomassa (DQO_{lodo}) foi igual a $51,06 \text{ kg} \cdot \text{dia}^{-1}$ (25,90% da DQO degradada). Em continuidade, baseado na Equação 7, percebeu-se que a parcela referente à DQO convertida em metano (DQO_{CH_4}) representou cerca de 74,10% do total de DQO removida, ou seja, $146,08 \text{ kg} \cdot \text{dia}^{-1}$.

Finalmente, calculou-se que a vazão de metano, por meio das equações 4 e 5, em teoria, era para apresentar valor igual a $56,62 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ (55% a mais do que a real). Esses valores teóricos altos, entre outros motivos, se apresentaram maior do que o real por desconsiderarem uma parcela de metano que se dissolve na fase líquida e não é determinada (SOUZA, 2010), bem como pela parcela utilizada na sulfetogênese.

4.3 Qualidade do Biogás

Os valores encontrados para o percentual de metano instantâneo, por meio do uso do medidor de concentração, são representados nas Figuras 11 e 12. Os pontos em azul indicam que o sistema estava em anaerobiose, enquanto que os pontos em amarelo representam as amostras realizadas enquanto o sistema estava sob microaeração.

Figura 11 - Teor de metano instantâneo no biogás produzido.

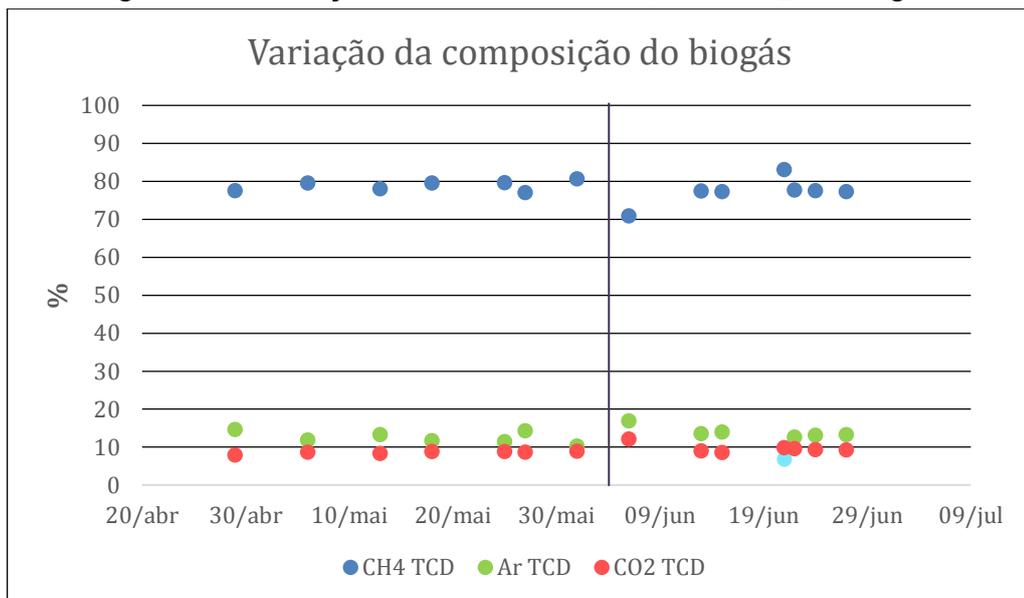


Fonte: O autor.

Enquanto anaeróbio, os valores de metano no biogás foram expressivamente altos, atingindo um máximo de 88% de CH_4 , e mínimo de 80%, faixa superior à média de 75% da literatura em geral (Tabela 4). Entretanto, para os resultados microaerados, percebeu-se que a maioria foi inferior aos 80%, com valor mínimo de 76%. Essa diminuição do teor de metano no gás se deve, provavelmente, à diluição do biogás em maiores concentrações de nitrogênio gasoso (N_2), gás carbônico e oxigênio. Todavia, os elevados valores de metano foram percebidos para amostras em que existiam maiores concentrações de gás sulfídrico concomitantemente, indicando a má qualidade do biogás, que, embora apresentasse maior poder calorífico, não é de uso recomendável em virtude dos potenciais estragos atribuídos ao H_2S .

Complementarmente, por meio da análise do biogás em cromatógrafo, percebeu-se que os valores de metano enquanto havia o processo de microaeração (média de 76,35% de CH_4) foram menores do que durante a anaerobiose do reator (média de 79,40%), acompanhado por maiores percentuais médios de ar (13,89% vs. 11,75%) e de gás carbônico (9,61% vs. 8,73%). Os valores individuais para cada dia são apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Variação do teor de metano, ar e CO_2 no biogás.



Fonte: O autor.

Ainda em referência ao dia 21/junho, percebeu-se um maior teor de metano (83,07%), para um menor teor de ar (9,82%), representado pelo único ponto azul claro na curva Ar TCD %, bem abaixo da média de seus pontos adjacentes microaerados, mais uma vez reiterando a diluição do biogás enquanto o sistema estava em microaerobiose, já que houve a interrupção da alimentação de ar ao reator, devido ao rompimento da mangueira.

4.4 Potencial Energético da ETE Aracapé III

Por apresentar um percentual médio de 76,35%, pode-se assumir que o biogás produzido na estação apresentou características similares ao explicitado na terceira linha da Tabela 2, ou seja, seu peso específico e poder calorífico inferior são, respectivamente, $1,0268 \text{ kg.m}^{-3}$ e $6.253,01 \text{ kcal.kg}^{-1}$. Em decorrência disso, devido à vazão média de produção de biogás de $33,41 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$, utilizando a Equação 9, conclui-se que a estação Aracapé III apresentou potência elétrica igual a 3,12 kW.

Adicionalmente, presumindo que um biogás a 80% de CH_4 apresente valores intermediários de peso específico e PCI de um biogás a 75 e 95%, ainda seguindo a Tabela 2, tem-se que seus valores são, respectivamente, $0,9018 \text{ kg.m}^{-3}$ e $8361,31 \text{ kcal.kg}^{-1}$. Conseqüentemente, utilizando o biogás anterior à microaeração, cujo teor de metano médio medido foi igual a 79,40%, a ETE em questão produziria uma potência energética de, aproximadamente, 3,66 kW. Logo, representando um aumento de apenas 14,8% em relação ao biogás microaerado. Esse pequeno incremento na potência elétrica produzida não justificaria sua escolha, dado que o biogás contendo elevados teores de H_2S danificaria o gerador elétrico severamente.

Finalmente, com a potência elétrica de 3,12 kW, tem-se que a produção de energia elétrica diária por meio do biogás tratado é de 74,88 kWh, isto é, 2.246,4 kWh acumulado mensal. Isso retrata 59,16% a mais do consumo mensal da ETE Aracapé III, que, no intervalo de janeiro a maio/2016, consumiu uma média de 917,40 kWh mensais, representando um faturamento de R\$ 605,48 mensais, ao assumir uma tarifa média de $0,66 \text{ R}.\text{(kWh)}^{-1}$.

Por conseguinte, pode-se dizer que, além da ETE Aracapé ser considerada autossuficiente, a Cagece ainda poderia injetar o excedente gerado de volta na rede de abastecimento de energia elétrica, gerando um crédito energético

mensal de 1.329 kWh, *i.e.*, R\$ 877,14 que poderiam ser redirecionados para abatimento na conta de energia de outros empreendimentos da companhia, como estações de tratamento de água (ETA), prédios administrativos ou demais ETEs que não possuem tecnologia para coleta de biogás. Os incisos III e VI, Art. 7º da Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, segundo redação alterada pelo Art. 6º da Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, preveem que:

III – para o caso de unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída a que se refere o inciso II do art. 6º, o faturamento deve considerar a energia consumida, deduzidos o percentual de energia excedente alocado a essa unidade consumidora e eventual crédito de energia acumulado em ciclos de faturamentos anteriores, por posto tarifário, quando for o caso, sobre os quais deverão incidir todas as componentes de tarifa em R\$/MWh;

VI – o excedente de energia que não tenha sido compensado na própria unidade consumidora pode ser utilizado para compensar o consumo de outras unidades consumidoras, observando o enquadramento como empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada ou autoconsumo remoto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De uma forma geral, pôde-se concluir que, devido ao percentual de metano médio observado, o biogás gerado, baseado em seu poder calorífico interno, é capaz de produzir uma potência energética suficiente para ultrapassar a demanda energética da ETE Aracapé III, podendo, portanto, constituir créditos de energia para alimentação de outros empreendimentos da Cagece e, conseqüentemente, gerar economia para a companhia.

Também foi notado que, em condições de microaeração, o biogás tratado apresentou menor percentual de metano, indicando que a alimentação de ar ao reator, por conter alto teor de nitrogênio, deve ter diluído o biogás, causando essa redução de CH₄, em comparação ao biogás proveniente da fase anaeróbia. Todavia, isso não foi fator relevante quanto à produção de energia a partir do biogás após a microaeração, visto que a diferença no potencial elétrico diário foi desprezível, somado ao fato de que, sem tratamento, o biogás bruto danificaria o gerador.

Sugere-se, para investigações futuras, que seja realizado um estudo com a utilização de oxigênio puro para microaeração do sistema, o que eliminaria o problema de diluição do biogás, principalmente com nitrogênio gasoso, além de pesquisas mais aprofundadas quanto a melhores formas de purificação e remoção de vapor de água do biogás.

Por fim, torna-se interessante também a aplicação em linha do biogás proveniente de um reator UASB operando em escala real em um gerador elétrico para mensuração do seu potencial energético real, bem como dos impactos na máquina, *e.g.*, corrosão, *knocking* e eficiência.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília: [s.n.], 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL – ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3a ed., 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Portaria Nº104**. Brasília. 2002.

ANDREOLI, C. V. et al. Secagem e higienização de lodos com aproveitamento de biogás. In: CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Vitória: PROSAB – ABES, 2003. p. 121-166.

AZEVEDO, A. D. P. et al. Eliminação de H₂S (sulfeto) dos esgotos de Pereira Barreto - SP. **20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 1999.

BEN, M.; KENNES, C.; VEIGA, M. C. Biogas. In: KENNES, C.; VEIGA, M. C. **Air Pollution Prevention and Control: Bioreactors and Bioenergy**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd., 2013. p. 322-339.

BLEY JÚNIOR, C. et al. **Agroenergia da Biomassa Residual: Perspectivas Energéticas, Socioeconômicas e Ambientais**. Revista Itaipu Binacional/FAO, 2ª. Ed., Technopolitik Editora, Foz do Iguaçu/Brasília, 2009.

CASTRO, N. D. et al. Controle químico da formação de gás sulfídrico em coletores de esgotos domésticos. **DAE**, p. 302-307, 1985.

CHERNICHARO, C. A. D. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

CORTEZ, L. A. B; LORA, E. E. S.; GOMEZ, E.O. (org). **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

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

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction**. Weinheim: WILEY-VHC Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011.

FREITAS, E. P. et al. **Indicadores ambientais para áreas de preservação permanente**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.17, n.4, p.443–449, 2013. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662013000400013>. Acesso em: 06 abr, 2018.

GARCIA, R. **Combustíveis e Combustão Industrial**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012.

HIGMAN, C.; VAN DER BURGT, M. **Gasification**. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2nd ed., 2008.

JANSSEN, A. J. H. et al. Biological sulphide oxidation in a fed-batch reactor. **Biotechnology and Bioengineering**, p. 327-333, 1995.

LOBATO, L. C. D. S. et al. Aproveitamento energético do biogás gerado em reatores UASB tratando esgotos domésticos: estudo de caso da ETE Laboreaux - Itabira MG. **25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2009.

LÓPEZ, M. E. et al. Biogas Upgrading. In: KENNES, C.; VEIGA, M. C. **Air Pollution Prevention and Control: Bioreactors and Bioenergy**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd., 2013. p. 293-320.

MINISTÉRIO DA NUTRIÇÃO, AGRICULTURA E DEFESA DO CONSUMIDOR DA ALEMANHA – BMELV. **Guia Prático do Biogás**. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2010.

OLIVEIRA, V. V. D. Estudos sobre as emissões e o impacto dos odores da ETE Jarivatuba em Joinville - SC. **26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2011.

PRESOTTO, A. B. T.; CALHEIROS, H. C. Estudo sobre controle de odor liberado em estação de tratamento de esgoto através de adsorção de sulfeto de hidrogênio em carvão ativado granular e refugo de carvão vegetal. **27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2014.

SAMPAIO, C. A. D. P.; NÄÄS, I. D. A.; SALGADO, D. D. Amônia, gas sulfídrico, metano e monóxido de carbono na produção de suínos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, p. 156-164, 2006.

SANTANA, N.; COHIM, E. Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na estação de tratamento de esgotos de Madre Deus - BA. **26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2011.

SOUZA, C. F. **Produção de biogás e tratamento de resíduos: Biodigestão anaeróbia**. Ação Ambiental, Viçosa, n. 34, p.26-29, nov./dez. 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - US EPA. **Process design manual for sulfide control in sanitary sewerage systems**. Washington (DC). 1995.