



Universidade Federal de Sergipe
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Taísa Andrade Barbosa

Produção de energia renovável a partir do biogás em empreendimentos habitacionais: análise técnica, econômica e ambiental visando o desenvolvimento urbano sustentável

São Cristóvão – SE

2019

Taísa Andrade Barbosa

Produção de energia renovável a partir do biogás em empreendimentos habitacionais: análise técnica, econômica e ambiental visando o desenvolvimento urbano sustentável

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe, como requisito necessário à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na subárea Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.
Orientador: Prof. Dr. Daniel Moureira Fontes Lima
Coorientador: Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes
Linha de pesquisa: Aproveitamento energético do biogás

São Cristóvão – SE

2019

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

Assinatura

BARBOSA, Taísa Andrade.

PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL A PARTIR DO
BIOGÁS EM EMPREENDIMENTOS HABITACIONAIS:
ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL
VISANDO O DESENVOLVIMENTO URBANO
SUSTENTÁVEL/ Taísa Andrade Barbosa – São Cristóvão:
UFS/PROEC, 2019

118 p. : il.

Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São
Cristóvão.

I. Universidade Federal de Sergipe/Sergipe. PROEC

II. Título.

Taísa Andrade Barbosa

Produção de energia renovável a partir do biogás em empreendimentos habitacionais: análise técnica, econômica e ambiental visando o desenvolvimento urbano sustentável

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na subárea Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovado em: 07/02/2019

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Daniel Moureira Fontes Lima – Universidade Federal de Sergipe
(Presidente – Orientador) Nota: _____

Profa. Dra. Luciana Coelho Mendonça - UFS
(Examinador 1) Nota: _____

Prof. Dr. Wilson Luciano de Souza- UFS
(Examinador 2) Nota: _____

Agradecimentos

Mais uma etapa se encerra na caminhada para a realização do sonho de se tornar professora e pesquisadora. O aprendizado e experiência alcançados foram de grande importância pessoal e profissional. Por isso, gostaria de agradecer a todos que contribuíram para essa conquista.

Agradeço a Deus por todas as bênçãos que já recebi.

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe, Iraneide, por todo apoio, dedicação, incentivo e amor, você é meu porto seguro. E ao meu namorado, Wyll, pelo companheirismo, incentivo, compreensão e amor. Amo vocês!

Agradeço ao meu orientador, professor Daniel M. F. Lima, pela atenção, confiança, conhecimentos compartilhados e, principalmente, por me inspirar ainda mais através do seu amor e dedicação com a profissão.

Aos professores Luciana C. Mendonça, Denise C. G. S. Michelan e Ludmilson A. Mendes por todo suporte durante o mestrado. Vocês também são uma inspiração para mim.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PROEC), pelos ensinamentos e por me acolherem tão bem durante as reuniões do colegiado no período em que fui representante discente.

A Tamires, pela ajuda, disponibilidade e amizade durante os ensaios no Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente (SAMA).

Ao professor Wilson L. Souza, pelo tempo dedicado à orientação com relação aos equipamentos mecânicos da pesquisa.

Aos amigos do PROEC, pela troca de ideias e experiências durante a obtenção de créditos das disciplinas.

Aos amigos que fiz ainda no colégio (Txucos), pelos momentos essenciais de descontração e desconstrução; a Rafaella e Rafael, pela amizade e por me inspirarem a estudar cada vez mais, e a Ilan, pela amizade e ajuda incondicionais.

A Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe, FAPITEC/SE, pela bolsa de mestrado.

Obrigada a todos!

Resumo

BARBOSA, T. A. **Produção de energia renovável a partir do biogás em empreendimentos habitacionais: análise técnica, econômica e ambiental visando o desenvolvimento urbano sustentável**. 2019. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão. p. 118.

No Brasil, uma parcela significativa dos esgotos domésticos é tratada através de processos anaeróbios, os quais possibilitam o aproveitamento energético do biogás produzido. Nesse sentido, essa dissertação buscou estudar o potencial de produção e utilização de biogás para geração de energia elétrica descentralizada em sistemas compactos de tratamento de esgotos em empreendimentos habitacionais. Para isso, três condomínios modelos com características sócio-econômicas distintas foram adotados e as viabilidades técnica e econômica dos sistemas projetados foram analisadas, assim como seus impactos ambientais. O volume de biogás produzido nos condomínios ($8,7 - 21,6 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$) possibilitaria o funcionamento do motor gerador durante algumas horas do dia, o qual deveria ocorrer preferencialmente nos horários de ponta (quando a tarifa de energia é mais alta). Dessa maneira, detectou-se que a geração de energia não seria suficiente para suprir toda a demanda da área comum dos empreendimentos, porém possibilitaria uma economia equivalente a aproximadamente um mês de energia por ano. Os resultados do estudo de viabilidade econômica, com VPLs de R\$ 4.460,51 (RMO) e R\$ 590,97 (RSV) para a situação onde o custo integral do projeto foi levado em conta e de R\$ 45.473,83 (RMO), R\$ 33.639,05 (RSV) e R\$ 88.959,44 (PAG) para a situação considerando apenas os custos com o sistema de biogás, mostraram que as receitas geradas com o aproveitamento do biogás foram suficientes para suprir os custos de implantação, operação e manutenção em cinco das seis condições analisadas. Além disso, uma vez que os benefícios ambientais são motivos suficientes para incluir processos sustentáveis em novas construções e os projetos resultaram em gastos *per capita* baixos (R\$ 49,91 – R\$ 85,80 com o CAPEX e R\$ 3,96 – R\$ 4,91 com o OPEX anualmente), entendeu-se que o sistema apresentou grande potencial de aplicação. Finalmente, a análise de viabilidade técnica permitiu concluir que os principais entraves estariam relacionados com o desenvolvimento da tecnologia do biogás na região, principalmente com relação à disponibilidade de equipamentos adequados às baixas vazões de biogás e à falta de normatizações com orientações para execução de projetos. Logo, destacou-se a necessidade de estudos complementares para o incentivo desse setor, tendo em vista que as condições ambientais e econômicas são vantajosas.

Palavras-chave: Biogás, tratamento anaeróbio, geração de energia renovável, UASB.

Abstract

In Brazil, a significant portion of domestic sewage is treated through anaerobic processes, which allows biogas energy recovery. In this context, this dissertation aimed to study biogas production and usage potential for decentralised energy generation in compact sewage treatment systems placed in residential buildings. For this, three establishments with distinct socio-economic characteristics were adopted and a technical and economic viability of the systems' designed were analysed, as well as their environmental impacts. The volume of biogas produced in each building (8.7 to 21.6 m³.day⁻¹) would allow generator to operate during some hours per day, which should preferably occur at peak times (when energy tariff is more expensive). Thus, it was detected that energy generation would not be enough to supply all demand of buildings' common area, yet, the project would allow savings of approximately one month expenditures in a year. Results from economic feasibility analysis, with NPV of R\$ 4,460.51 (RMo) and R\$ 590.97 (RSv) for the situation where all projects' expenses were accounted and of R\$ 45,473.83 (RMo), R\$ 33,639.05 (RSv) and R\$ 88,959.44 (PAg) for the situation considering only biogas system costs, showed that savings from biogas use were sufficient to cover implementation, operation and maintenance expenditures in five of the six conditions evaluated. Moreover, since environmental benefits are plenty motives to include sustainable processes in new constructions and projects resulted in low per capita costs (R\$ 49.91 to R\$ 85.80 with CAPEX and R\$ 3.96 – R\$ 4.91 with OPEX annually), it was understood that the system presented great potential of application. Finally, technical feasibility analysis permitted do conclude that the main obstacles would be related to biogas technology development in the region, specially about availability of adequate equipments for small biogas volumes and the lack of guidelines for project designing. Therefore, it was highlighted the need for complementary studies in order to encourage this sector, considering that environmental and economic conditions are advantageous.

Keywords: Biogas, anaerobic treatment, renewable energy generation, UASB.

Lista de figuras

Figura 1 - Fases da digestão anaeróbia e micro-organismos envolvidos.....	24
Figura 2 - Estrutura esquemática de um reator UASB.....	30
Figura 3 - Modelo do biodigestor Indiano e Chinês.....	30
Figura 4 - Conversão da matéria orgânica nos processos anaeróbios.....	32
Figura 5 - Tratamento do biogás conforme uso final.....	34
Figura 6 - Grupo gerador (motor a combustão + gerador elétrico).....	37
Figura 7 - Rotas de conversão de DQO e fluxos de metano em reatores UASB.....	46
Figura 8 - Comportamento da DQO total e filtrada segundo turno de coleta do RMo.	62
Figura 9 - Comportamento da DQO total e filtrada segundo turno de coleta do RSv..	62
Figura 10 - Comportamento da DQO total e filtrada segundo turno de coleta do PAg..	62
Figura 11 - <i>Box-plot</i> DQO total (mg.L^{-1}).....	64
Figura 12 - <i>Box-plot</i> DQO filtrada (mg.L^{-1}).....	64
Figura 13 - <i>Box-plot</i> pH.....	64
Figura 14 - <i>Box-plot</i> temperatura ($^{\circ}\text{C}$).....	64
Figura 15 - Balanço de massa de DQO para o cenário típico do RMo.....	69
Figura 16 - Balanço de massa de DQO para o cenário típico do RSv.....	69
Figura 17 - Balanço de massa de DQO para o cenário típico do PAg.....	69
Figura 18 - Porcentagens de DQO convertida em CH_4 no RMo.....	70
Figura 19 - Porcentagens de DQO convertida em CH_4 no RSv.....	70
Figura 20 - Porcentagens de DQO convertida em CH_4 no PAg.....	71
Figura 21 - Modelo de filtro de H_2S – (a) desenho esquemático, (b) vista geral.....	75
Figura 22 - Modelo de reservatório pulmão.....	76
Figura 23 - Modelos de motogeradores à biogás: (a) CC5000-MG, (b) B4T-5000 Bio	77
Figura 24 - Adaptações realizadas no motogerador modelo B4T-5000 Bio.....	78
Figura 25 - a) Potência efetiva x eficiência do motogerador, (b) Potência efetiva x consumo específico de combustível.....	78
Figura 26 - Desenho esquemático do sistema de tratamento de esgoto com aproveitamento energético do biogás proposto para os empreendimentos habitacionais.....	80
Figura 27 - Frações do CAPEX segundo etapa do tratamento (RMo, RSv e PAg).....	85

Lista de quadros

Quadro 1 - Principais características físicas do esgoto doméstico.....	21
Quadro 2 - Principais micro-organismos presentes no esgoto doméstico.....	21
Quadro 3 - Principais características químicas do esgoto doméstico.....	22
Quadro 4 - Principais regulamentações existentes e suas disposições quanto à regularização ambiental e uso do biogás para gerar energia elétrica e térmica.....	40
Quadro 5 - Parâmetros físicos e químicos utilizados para caracterização do esgoto doméstico gerado nos condomínios selecionados.....	44
Quadro 6 - Tarifas de modalidade tarifária branca TUSD + TE (baixa tensão).....	90

Lista de tabelas

Tabela 1	- Composição volumétrica típica do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto doméstico, aterros sanitários e digestores de lodo...	32
Tabela 2	- Dados de entrada para a estimativa de biogás.....	48
Tabela 3	- Resultado dos ensaios laboratoriais (DQO total e filtrada, pH e temperatura).....	60
Tabela 4	- Estatísticas W do teste de Shapiro-Wilk aplicados aos dados de DQO bruta dos condomínios.....	63
Tabela 5	- Variáveis estatísticas dos gráficos <i>box-plot</i> (DQO bruta e filtrada, pH e temperatura).....	63
Tabela 6	- Resultado dos ensaios laboratoriais (série de sólidos).....	66
Tabela 7	- Concentrações típicas de frações de sólidos em esgotos domésticos.....	66
Tabela 8	- Dados de entrada utilizados no <i>software</i> Probio 1.0.....	67
Tabela 9	- Estimativa de produção de biogás e potencial energético.....	68
Tabela 10	- Dados de entrada para o dimensionamento dos reatores UASBs.....	72
Tabela 11	- Resultados do dimensionamento do reator UASB para o RMo.....	73
Tabela 12	- Resultados do dimensionamento do reator UASB para o RSv.....	73
Tabela 13	- Resultados do dimensionamento do reator UASB para o PAg.....	74
Tabela 14	- Principais características do reservatório pulmão.....	77
Tabela 15	- Principais características dos motogeradores.....	78
Tabela 16	- Estimativa do potencial energético do RMo.....	82
Tabela 17	- Estimativa do potencial energético do RSv.....	82
Tabela 18	- Estimativa do potencial energético do PAg.....	83
Tabela 19	- CAPEX do sistema completo do RMo.....	85
Tabela 20	- CAPEX do sistema completo do RSv.....	86
Tabela 21	- CAPEX do sistema completo do PAg.....	86
Tabela 22	- OPEX anual do sistema completo do RMo.....	88
Tabela 23	- OPEX anual do sistema completo do RSv.....	88
Tabela 24	- OPEX anual do sistema completo do PAg.....	88
Tabela 25	- Resumos do CAPEX e OPEX dos empreendimentos habitacionais.....	89
Tabela 26	- Economia mensal de energia do RMo.....	91
Tabela 27	- Economia mensal de energia do RSv.....	92

Tabela 28 -	Economia mensal de energia do PAg.....	92
Tabela 29 -	Resumo da análise energética e economia após aproveitamento energético do biogás (cenário otimista).....	93
Tabela 30 -	VPL, TIR e <i>payback</i> descontado do RMo, RSv e PAg (cenário otimista) considerando os custos de todo o sistema.....	94
Tabela 31 -	VPL, TIR e <i>payback</i> descontado do RMo, RSv e PAg (cenário otimista) considerando apenas os custos com o sistema de biogás.....	96

Lista de abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BRS	Bactérias Redutoras de Sulfato
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases do Efeito Estufa
MMA	Ministério do Meio Ambiente
PAg	Condomínio Porto das Águas
PV	Poço de visita
RMo	Residencial Monticello
RSv	Residencial Sunville
SAMA	Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis
TIR	Taxa Interna de Retorno
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Bed reactor</i>
VPL	Valor Presente Líquido

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	17
1.2	JUSTIFICATIVA	18
1.3	PRESSUPOSTO	19
1.4	OBJETIVOS	20
1.4.1	OBJETIVO GERAL	20
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	CARACTERÍSTICAS DO ESGOTO DOMÉSTICO	21
2.2	PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	22
2.1.1	FUNDAMENTOS DO TRATAMENTO ANAERÓBIO	23
2.1.2	FATORES QUE INTERFEREM NO TRATAMENTO ANAERÓBIO	25
2.1.2.1	Temperatura	25
2.1.2.2	Potencial hidrogeniônico (pH) e alcalinidade	26
2.1.2.3	Nutrientes	27
2.1.2.4	Substâncias tóxicas	27
2.3	TIPOS DE REATORES PARA TRATAMENTO ANAERÓBIO	28
2.4	O BIOGÁS	31
2.4.1	CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS	31
2.4.2	PRODUÇÃO DO BIOGÁS	32
2.4.3	TRATAMENTO E UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS	33
2.5	DISPOSITIVOS PARA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SISTEMA DE BIOGÁS GERANDO ENERGIA ELÉTRICA	35
2.6	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS NO BRASIL	37
2.6.1	BARREIRAS E PROPOSTAS PARA O MERCADO DO BIOGÁS NO BRASIL	37
2.6.2	REGULAMENTAÇÕES	38
3	MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1	ÁREA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DOS ESGOTOS	42
3.1.1	ÁREA DE ESTUDO	42
3.1.2	CARACTERIZAÇÃO DOS ESGOTOS	43
3.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA	44
3.3	ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E DO POTENCIAL ENERGÉTICO	45
3.3.1	DADOS DE ENTRADA PARA A ESTIMATIVA DO BIOGÁS	46
3.3.2	CÁLCULO DAS PARCELAS DO BALANÇO DE MASSA DE DQO	48
3.3.3	CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DISPONÍVEL E DA POTÊNCIA ELÉTRICA DO SISTEMA DE BIOGÁS	51
3.4	ELABORAÇÃO DO PROJETO	51
3.4.1	TRATAMENTO PRELIMINAR E SISTEMA DE RECALQUE	52
3.4.2	UASB	52
3.4.2.1	Dimensionamento do reator	52
3.4.2.2	Sistema de distribuição e de descarga	54
3.4.2.4	Produção de lodo	55
3.4.3	SISTEMA DE BIOGÁS	56
3.5	ESTUDO DE VIABILIDADE	56
3.3.1	VIABILIDADE TÉCNICA	56

3.3.2 VIABILIDADE ECONÔMICA	57
3.3.2.1 Estimativa dos custos	57
3.3.2.2 VPL - Valor Presente Líquido	58
3.3.2.3 TIR – Taxa Interna de Retorno	58
3.3.2.4 Payback descontado – tempo de retorno	59
3.3.3 IMPACTO AMBIENTAL	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ESGOTOS DOS CONDOMÍNIOS	60
4.1.1 ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS	60
4.1.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	63
4.2 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	66
4.3 DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO	71
4.3.1 TRATAMENTO PRELIMINAR E SISTEMA DE RECALQUE	71
4.3.2 UASB	72
4.3.3 SISTEMA DE BIOGÁS	74
4.3.3.1 Filtro de H ₂ S	74
4.3.3.2 Reservatório pulmão	75
4.3.3.3 Compressor	76
4.3.3.4 Motogerador	76
4.3.3.5 Sistema de transporte, segurança e manutenção	79
4.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DISPONÍVEL	80
4.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA	82
4.6 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	83
4.6.1 ESTIMATIVA DE CUSTOS	83
4.6.1.1 Capital Expenditure - CAPEX	83
4.6.1.2 Operation Expenditure - OPEX	86
4.6.2 ECONOMIA ANUAL APÓS APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS	88
4.6.3 VPL, TIR E PAYBACK DESCONTADO	92
4.7 IMPACTOS AMBIENTAIS	95
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	98
REFERÊNCIAS	101
APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO DETALHADA DO CAPEX DO RMO	110
APÊNDICE B – COMPOSIÇÃO DETALHADA DO CAPEX DO RSV	111
APÊNDICE C – COMPOSIÇÃO DETALHADA DO CAPEX DO PAG	112
APÊNDICE D – FLUXO DE CAIXA DESCONTADO DO RMO (SISTEMA COMPLETO)	113
APÊNDICE E – FLUXO DE CAIXA DESCONTADO DO RSV (SISTEMA COMPLETO)	114
APÊNDICE F – FLUXO DE CAIXA DESCONTADO DO PAG (SISTEMA COMPLETO)	115

<u>APÊNDICE G – FLUXO DE CAIXA DESCONTADO DO RMO (SISTEMA DE BIOGÁS)</u>	116
<u>APÊNDICE H – FLUXO DE CAIXA DESCONTADO DO RSV (SISTEMA DE BIOGÁS)</u>	117
<u>APÊNDICE I – FLUXO DE CAIXA DESCONTADO DO PAG (SISTEMA DE BIOGÁS)</u>	118

1 Introdução

Uma parcela considerável da matriz energética no Brasil é composta por fontes renováveis – mais de 41%, segundo BRASIL (2016b), destacando-se o aproveitamento da energia hidráulica e dos produtos da cana-de-açúcar. Entretanto, a dependência de tais recursos torna o mercado vulnerável às variações climáticas, que pode ser fortemente afetado por secas prolongadas ou por interrupções no cultivo da cana. Dessa forma, a diversificação das fontes de energia se mostra uma alternativa interessante para a segurança energética do país.

Segundo Mendonça e Mendonça (2016), a proteção ambiental e a utilização racional dos recursos naturais renováveis são aspectos fundamentais do desenvolvimento no novo milênio. Isto é, as políticas de gestão de recursos hídricos dos países visam proteger o ambiente e a saúde pública apoiando iniciativas para coleta, tratamento e reuso dos esgotos. O esgotamento sanitário é significativamente diferenciado entre países de diferentes níveis econômicos, sendo a incidência de mortes por consequência de doenças infecciosas e parasitárias muito superior em países em desenvolvimento quando comparada a países desenvolvidos.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2017), em 2016, o Brasil concluiu o processo de ratificação do Acordo de Paris, o qual foi aprovado pelos 195 países da UNFCCC (Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas) e prevê a diminuição da emissão de gases do efeito estufa (GEE). O Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025; e em 43% no ano de 2030. Dentre outras alternativas para alcançar a meta, o Brasil propôs o aumento da participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030.

Na conjuntura atual de crescente demanda por energia e desenvolvimento urbano sustentável, o aproveitamento do biogás desempenhará um papel importante no futuro. Além da produção de calor e energia, o biogás pode ser aproveitado de outras formas quando purificado a elevados índices de metano, o que já acontece em muitos países, sendo utilizado como combustível para automóveis ou em substituição ao gás natural para produção de materiais e produtos químicos. O desenvolvimento desse setor é importante devido ao enorme potencial e facilidade tecnológica, abrindo novos horizontes para a integração de diferentes formas de energia renovável (ANGELIDAKI *et al.*, 2018).

A produção de biogás, também chamada de metanização (devido à elevada presença do gás metano), ocorre através da digestão de matéria orgânica em processos anaeróbios

(DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008). Segundo Holm-Nielsen, Al Seadi e Oleskowicz-Popiel (2009), o biogás pode ser produzido a partir de quase todos os tipos de matéria-prima biológica (esgotos, substratos agrícolas, estrume animal, etc), e o seu aproveitamento como combustível renovável influencia na redução de impactos negativos do aquecimento global.

BRASIL (2016c) defende que “no contexto de tratamento de esgoto, o biogás se promove como combustível para a sustentabilidade na prestação desse serviço e precisa ser observado como uma receita, que atualmente está sendo desperdiçada”. Essa sustentabilidade é consolidada em virtude de três aspectos: i) econômico, uma vez que há redução de custos operacionais, ii) ambiental, devido à redução das emissões de GEE, e iii) social, pois o desenvolvimento dessa tecnologia tem impacto positivo direto no bem-estar dos operadores e da população do entorno de estações de tratamento de esgoto (ETE), evitando a sua exposição aos gases produzidos, além do crescimento profissional dos trabalhadores das ETES.

De acordo com Bauer, Mosle e Schwarz (2010), o crescimento da conscientização ambiental, o aumento dos preços de energia e medidas de subvenção atrativas levaram à exploração e desenvolvimentos de outras formas de geração de energia, estimulando a descentralização desse serviço. Todos os edificios devem ser abastecidos com eletricidade, que geralmente é fornecida por fonte externa. No entanto, esta energia pode ser parcialmente gerada em pequenas estações construídas no próprio empreendimento, fazendo-se uso de recursos limpos e renováveis como a energia solar, eólica e/ou biomassa.

Buscando estimular a pesquisa sobre a produção de energia renovável e o desenvolvimento sustentável no tratamento dos esgotos em sistemas descentralizados de pequeno porte, esse trabalho procura estudar o potencial de utilização de biogás para geração de energia elétrica em empreendimentos habitacionais, propondo-se um projeto modelo e analisando-se a sua viabilidade do ponto de vista técnico, ambiental e econômico.

1.1 Problema de Pesquisa

Segundo Schnürer e Jarvis (2010), os constituintes básicos do biogás são o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4). Globalmente, os principais gases emitidos pelas atividades humanas e que estão relacionados com o efeito estufa são esses dois gases, sendo o CO_2 responsável por 65% das emissões e o CH_4 correspondente a 16% (EPA, 2017). Ou seja, trata-se de gás poluente que não deve ser lançado na atmosfera ou simplesmente queimado, como acontece em boa parte das ETES no Brasil que utilizam processos de tratamento anaeróbio (TSAGARAKIS, 2007).

De acordo com Royá *et al.* (2011), a queima do biogás é feita com o intuito de diminuir os impactos negativos do seu lançamento, já que o metano (maior constituinte) é transformado em vapor d'água e gás carbônico quando queimado, não anulando, no entanto, o impacto negativo de sua emissão.

Além disso, conforme Rodrigues e Batistela (2013), comparativamente com o resto do mundo, o Brasil possui uma elevada disponibilidade hídrica, o que contribuiu para uma cultura do uso indiscriminado dos rios e lagos. Entretanto, embora abundante, esse recurso é mal distribuído no território brasileiro e muitos cursos d'água encontram-se poluídos e não podem ser utilizados para fins mais nobres, ressaltando-se a importância do tratamento de efluentes antes do despejo em mananciais. Essa escassez está também relacionada à geração de energia, uma vez que a maior parte da energia gerada no Brasil é por meio de hidrelétricas (CERQUEIRA *et al.*, 2015).

1.2 Justificativa

Landim e Azevedo (2008) revelam que a progressiva agressão ao meio ambiente e a exploração excessiva dos recursos naturais são os principais fatores para o desequilíbrio do ecossistema. Todavia, está ocorrendo uma reorganização no modelo de desenvolvimento da economia mundial, que passa a incluir a sustentabilidade nos processos. Conforme Vanzin (2006) apud Landim e Azevedo (2008), o crescimento populacional e as atividades industriais culminaram não somente na demanda cada vez maior de energia, como também no aumento do descarte de resíduos sólidos, os quais causam problemas referentes à oferta e aos custos da energia.

Morandi *et al.* (2017) destacam que o aproveitamento dos subprodutos do esgoto é um pré-requisito importante para a sustentabilidade no tratamento das águas residuárias e deve ser incluído em sistemas atuais e futuros. O Brasil tem considerável experiência com processos anaeróbios, os quais poderiam utilizar o biogás como combustível para geração de calor (secagem de lodos) ou para geração de energia elétrica. Além disso, os resíduos sólidos e os rejeitos do setor agropecuário brasileiro também se apresentam como potenciais fontes de biogás (BRASIL, 2015b). Contudo, BRASIL (2016c) salienta que o maior desafio para o desenvolvimento desse setor é de ordem cultural, uma vez que ainda não está consolidado o entendimento de que a gestão integrada e sustentável é imprescindível para gerar valor no tratamento do esgoto.

Segundo Angelidaki *et al.* (2018), embora a produção de energia a partir do biogás geralmente não seja capaz de substituir completamente a geração de energia convencional, esta

pode ser uma alternativa para reduzir a susceptibilidade da população com relação à variabilidade dos custos de geração de energia por parte das distribuidoras. Além disso, o aproveitamento do biogás como combustível renovável se justifica por questões ambientais. Segundo o SNIS (2018), o serviço de coleta de esgotos no Brasil é muito baixo (apenas 51,9% em 2016) e o tratamento distribuído poderia ajudar a reduzir a poluição dos corpos hídricos.

1.3 Pressuposto

As tecnologias para o aproveitamento do biogás já estão consideravelmente difundidas ao redor do mundo, inclusive com relação a sistemas de pequeno porte, que fazem o uso desse gás para gerar energia com construções simples, de alto nível de segurança e de fácil operação; contribuindo para redução de gastos e de impactos ambientais (BIOGAS, 2014). Ademais, Bogte *et al.* (1993) destacam que o tratamento anaeróbico de esgotos domésticos em regiões de clima tropical ou subtropical é promissora devido à elevada produção de biogás esperada, sendo a construção de reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Bed reactor*) simplificados e de pequena escala viáveis para comunidades rurais ou ainda para residências individualmente.

Pressupõe-se, nesse estudo, que o tratamento anaeróbico em condomínios tem um potencial de produção de biogás capaz de viabilizar a instalação desse tipo de sistema, com benefícios diretos para os residentes (redução de gastos com a conta de energia do condomínio), para o meio ambiente (através do uso do biogás como fonte de energia renovável) e para as companhias de saneamento (tratamento do esgoto descentralizado).

Por outro lado, prevê-se a existência de algumas barreiras, principalmente de caráter cultural, como aversão inicial dos moradores para a instalação da tecnologia e insegurança quanto à operação e manutenção do sistema. Essas dificuldades são comuns quando se trata de projetos inovadores. No entanto, a discussão, capacitação e aprofundamento sobre o tema são fundamentais para que esses receios sejam superados.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Estudar o potencial de aproveitamento de biogás produzido em sistema de tratamento anaeróbio de esgoto de pequeno porte (empreendimentos habitacionais) para geração de energia elétrica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estimar a produção do biogás em condomínios multifamiliares;
- Analisar as tecnologias de aproveitamento de biogás para geração de energia elétrica em pequena escala e propor um sistema para condomínios;
- Verificar a viabilidade técnica e econômica do sistema proposto;
- Identificar os principais impactos ambientais do projeto.

2 Revisão de literatura

2.1 Características do esgoto doméstico

De acordo com a NBR 9.648 (ABNT, 1986), o esgoto doméstico é definido como “despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas”. Logo, é formado pelos despejos de residências, edifícios comerciais, instituições ou quaisquer edificações que contenham banheiros, cozinhas ou áreas de lavagem (LIMA, 2013).

Von Sperling (2007) afirma que os esgotos domésticos são compostos por aproximadamente 99,9% de água, e o 0,1% restante é uma mistura de micro-organismos e matéria orgânica e inorgânica, as quais podem estar dissolvidas ou suspensas. A caracterização dos esgotos domésticos é feita segundo parâmetros físicos (Quadro 1), biológicos (Quadro 2) e químicos (Quadro 3).

Quadro 1 – Principais características físicas do esgoto doméstico

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO
Temperatura	- Levemente mais alta do que a água de consumo - Variável de acordo com as estações do ano - Influencia a atividade metabólica microbiana - Influencia a solubilidade dos gases - Influencia a viscosidade do líquido
Cor	- Esgoto fresco: levemente acinzentado - Esgoto séptico: cinza escuro ou preto
Odor	- Esgoto fresco: odor relativamente desagradável - Esgoto séptico: odor desagradável devido ao gás sulfídrico e outros subprodutos da decomposição
Turbidez	- Causada pela grande variedade de sólidos suspensos

Fonte: Von Sperling (2007)

Quadro 2 – Principais micro-organismos presentes no esgoto doméstico

MICRO-ORGANISMO	DESCRIÇÃO
Bactérias	- Organismos unicelulares, responsáveis pela estabilização da matéria orgânica (alguns são patogênicos)
Arqueas	- Similares às bactérias em tamanho e componentes celulares, diferentes quanto à parede celular e RNA. Responsáveis pelo processo de metanização.
Algas	- Podem se proliferar em excesso em lagos e reservatórios, deteriorando a qualidade da água
Protozoários	- Essencial no tratamento biológico, pois ajuda a manter o equilíbrio entre vários grupos
Helmintos	- Os ovos de helmintos são potenciais causadores de doenças

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2007)

Quadro 3 – Principais características químicas do esgoto doméstico

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO
<p>Sólidos totais</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sólidos suspensos (SS) <ul style="list-style-type: none"> • Fixos • Voláteis • Sólidos dissolvidos (SD) <ul style="list-style-type: none"> • Fixos • Voláteis • Sólidos sedimentáveis 	<p>- Sólidos suspensos+dissolvidos+sedimentáveis (orgânico e inorgânico)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Parte orgânica e inorgânica dos sólidos que não são filtráveis <ul style="list-style-type: none"> - Compostos minerais, inertes, que são parte dos SS - Compostos orgânicos, oxidável pelo calor, são parte dos SS - Parte orgânica e inorgânica dos sólidos que são filtráveis <ul style="list-style-type: none"> - Compostos minerais dos SD - Compostos orgânicos dos SD - Parte orgânica e inorgânica dos sólidos que sedimentam em 1 hora no cone de Imhoff
<p>Matéria orgânica</p> <p><i>Determinação indireta</i></p> <p><i>DBO</i></p> <p><i>DQO</i></p> <p><i>COT</i></p>	<p>- Mistura heterogênea de vários compostos orgânicos (proteínas, lipídeos, carboidratos, etc.)</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Demanda Bioquímica de Oxigênio</i>: associada à fração biodegradável dos compostos orgânicos carbonáceos - <i>Demanda Química de Oxigênio</i>: representa a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar quimicamente a matéria orgânica carbonácea - <i>Carbono Orgânico Total</i>: medição direta da matéria orgânica carbonácea
Nitrogênio total	- É um nutriente essencial para o crescimento biológico dos micro-organismos. Inclui nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato
Fósforo total	- É um nutriente essencial para o crescimento biológico dos micro-organismos. Existe na forma orgânica e inorgânica
pH	- Os processos de oxidação biológica normalmente tendem a reduzir o pH
Alcalinidade	- Indicador da capacidade tampão do meio, causada pela presença de íons de bicarbonato, carbonato e hidroxila

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2007)

2.2 Processo de digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é o processo de degradação da matéria orgânica envolvendo micro-organismos que se desenvolvem na ausência do oxigênio. Consiste em um processo microbiológico natural onde organismos de diferentes espécies estão em simbiose, proporcionando interações enzimáticas e metabólicas sobre o substrato que é convertido em lodo e biogás (TCHOBANOGLIOUS, THEISEN e VIGIL, 1993; CHERNICHARO, 2007).

Os sistemas anaeróbios para tratamento de águas residuárias podem ser classificados como convencionais ou de alta taxa. As lagoas anaeróbias e tanques sépticos são exemplos de processos convencionais, enquanto o UASB e o filtro anaeróbio são os principais sistemas de alta taxa (VALENTE, 2015).

Segundo Chernicharo (1997), as principais características que diferenciam os procedimentos de alta taxa em comparação com os convencionais são a existência de

mecanismos que retêm os sólidos no sistema, havendo a imobilização e crescimento da biomassa, além da possibilidade de absorver elevada carga orgânica volumétrica e o baixo tempo de detenção hidráulica.

2.1.1 Fundamentos do tratamento anaeróbio

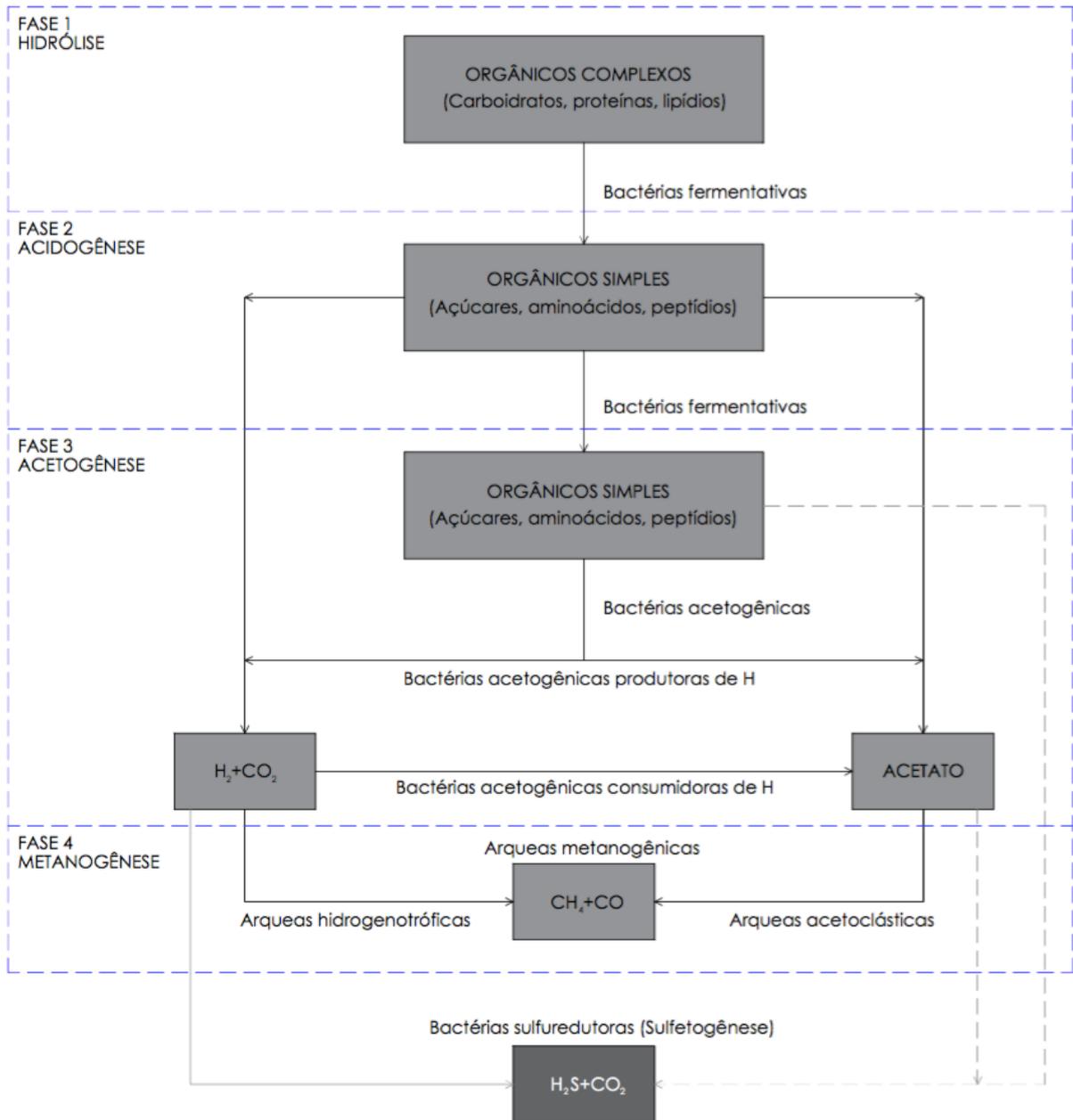
Segundo Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993), os micro-organismos responsáveis pela digestão anaeróbia da matéria orgânica atuam em um sistema ecologicamente balanceado. Organismos de espécies diferentes interagem entre si por longos períodos formando as duas grandes etapas desse tipo de tratamento, a digestão ácida e a digestão metanogênica, nas quais estão presentes ao menos três grupos de micro-organismos (bactérias fermentativas, bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas).

Zieminski e Frac (2012) afirmam que as etapas de digestão ácida e metanogênica são subdivididas em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Essas etapas representam a degradação de diferentes tipos de compostos, sendo a etapa final a responsável pela formação do metano e dióxido de carbono (principais componentes do biogás). Diferentes grupos de bactérias atuam nesses processos, tornando-os complexos e variáveis com relação às características do substrato. As etapas da digestão anaeróbia da matéria orgânica e os micro-organismos envolvidos podem ser visualizados na Figura 1.

Na primeira etapa (hidrólise), surgem os monômeros simples, os quais são resultantes de material particulado que foi convertido em compostos solúveis; por exemplo, é nesta etapa que os lipídeos e proteínas são convertidos em ácidos graxos e aminoácidos, respectivamente (ZANETE, 2009). A etapa seguinte (acidogênese) é responsável, simploriamente, pela conversão dos compostos químicos solúveis produzidos na etapa anterior em ácidos orgânicos, álcoois, aldeídos, dióxido de carbono e hidrogênio. Desses produtos, o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato são utilizados na última etapa, ou seja, pulam o estágio de acetogênese. (ZIEMINSKI e FRAC, 2012; SERNA, 2017).

Conforme Mata-Alvarez (2003), na terceira etapa do processo anaeróbio de digestão (acetogênese), de forma resumida, converte-se o restante dos compostos da segunda fase em hidrogênio, dióxido de carbono e acetato. Por fim, na última etapa (metanogênese), dois grupos de micro-organismos atuam produzindo metano através de duas rotas metabólicas. Trata-se das arqueas metanogênicas acetoclásticas, as quais convertem o acetato em CH_4 e CO_2 , e as metanogênicas hidrogenotróficas, as quais utilizam o hidrogênio (doador de elétrons) e o dióxido de carbono (receptor de elétrons) na produção de CH_4 (ZANETE, 2009).

Figura 1 – Fases da digestão anaeróbia e micro-organismos envolvidos



Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997)

Ainda, para Postgate (1984) apud Peruzzo (2017), as bactérias redutoras de sulfato (BRS) estão presentes na digestão anaeróbia, ocorrendo a oxidação de composto orgânicos e formação de sulfetos (sulfetogênese). As BRS possuem crescimento relativamente lento se comparado com os outros micro-organismos. Chernicharo (2007) ressalta que as BRS são concorrentes dos micro-organismos responsáveis pelas quatro etapas da digestão anaeróbia, uma vez que competem pelo mesmo substrato (ácidos graxos voláteis, metanol, hidrogênio, acetato, etc) para o seu metabolismo. Dessa forma, acabam perturbando a relação de equilíbrio

que há entre os micro-organismos das quatro etapas da digestão, reduzindo a eficiência do tratamento e a produção de metano.

2.1.2. Fatores que interferem no tratamento anaeróbio

De acordo com Gueri, Souza e Kuczman (2018), o processo de digestão anaeróbia pode ser afetado por alguns fatores como a temperatura, pH, alcalinidade, nutrientes e a presença ou não de substâncias tóxicas. A influência de cada um desses fatores é detalhada a seguir.

2.1.2.1 Temperatura

De acordo com Rittmann e McCarty (2001), a temperatura é um dos parâmetros mais influentes nos processos biológicos da digestão anaeróbia. Isso acontece porque a temperatura tem efeitos sobre a velocidade do metabolismo das bactérias e arqueas, taxas de hidrólise, desnaturação proteica e sobre as propriedades físicas e químicas da água. Ainda, segundo Sousa (2016), as taxas de qualquer reação química são influenciadas por variações de temperatura, sendo que essas taxas tendem a elevar com o seu aumento até um certo limite, conforme pode ser observado na Equação 2.1 (equação de Arrhenius sobre cinéticas das reações).

$$k_v = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (2.1)$$

Onde,

k_v = constante de velocidade da reação;

A = constante conhecida como fator de frequência;

E_a = energia de ativação;

R = constante dos gases (8,314 J/Kmol);

T = temperatura (Kelvin)

Com relação às atividades metabólicas das bactérias e arqueas, Van Haandel e Lettinga (1994) destacam que existe um intervalo de temperatura no qual os micro-organismos possuem taxa de crescimento ótima, sendo que o ponto ótimo de uma espécie pode ser diferente do ponto ótimo de outra espécie. Existem três grupos clássicos por faixas de temperaturas nas quais as espécies são capazes de crescer e metabolizar: psicrófilos, mesófilos e termófilos.

A faixa denominada psicrófila corresponde à digestão que ocorre em temperaturas mais baixas. De acordo com Chaves (2015), as reações químicas e biológicas sob condições psicrófilas ocorrem lentamente. Segundo Ganghis e Pestana (sd), embora se tenham registros

de experimentos que possibilitaram o tratamento anaeróbio nessa zona, com temperaturas variando entre 10 e 15 °C, as eficiências atingidas foram apenas levemente superiores àquelas obtidas em unidades de tratamento primário. Ou seja, sendo economicamente viável apenas o tratamento para temperaturas superiores a 20 °C.

Dentro da faixa mesofílica, porém, as taxas de crescimento são geralmente mais conhecidas, percebendo-se que para cada aumento de 10 °C, as taxas de crescimento são duplicadas. O ganho significativo da população microbiana comparando-se as faixas psicrófilicas e mesofílicas pode ser notado quando analisado o tempo de retenção do efluente, o qual varia de 2 dias a 35 °C para 10 dias a 20 °C, segundo Van Haandel e Lettinga (1994).

No que se refere à faixa termofílica, os organismos termófilos possuem taxas de crescimento de 50 a 100% maior que os organismos da faixa mesofílica. Conseqüentemente, a degradação da matéria orgânica ocorrerá com velocidades ainda maiores, requerendo-se menores volumes de reatores. Por outro lado, os micro-organismos termófilos não possuem uma facilidade de adaptação às temperaturas da faixa mesofílica, e a manutenção de temperaturas mais altas nos digestores torna-se mais complexa, uma vez que o biogás gerado a temperatura ambiente geralmente não é suficiente para aquecer os reatores acima de 55 °C (RITTMANN e MCCARTY, 2001; METCALF e EDDY, 2003 apud SANTOS, 2010).

Logo, Sousa (2016) destaca que o clima de uma cidade possui impactos consideráveis na escolha da tecnologia de tratamento devido às variações de temperatura. Em regiões de clima mais quente, a digestão anaeróbia é favorecida; já em regiões de clima temperado e com invernos rigorosos, muitas vezes é necessário que os efluentes sejam aquecidos, havendo um maior gasto energético, além de necessitar de um maior controle na operação e manutenção com a estanqueidade dos reatores.

2.1.2.2 Potencial hidrogeniônico (pH) e alcalinidade

Segundo Lema e Méndez (1997), o pH influencia diretamente a digestão anaeróbia dos substratos porque influencia o nível de atividade metabólica dos micro-organismos. Na fase fermentativa (digestão ácida), as bactérias suportam maiores variações de pH se comparado com os micro-organismos da digestão metanogênica. As arqueas metanogênicas podem ter as suas atividades cessadas com valores fora da faixa de 6,3 a 7,8. Um pH abaixo de 4,5, porém, cessa as atividades de todos os micro-organismos envolvidos nesse tipo de tratamento. Além disso, a qualidade do biogás também é influenciada, resultando em um biogás pobre em metano quando o pH está abaixo de 6.

Para Souza (1984), o pH ótimo das bactérias acidogênicas é cerca de 5,5 a 6,0, enquanto o ponto ótimo das arqueas metanogênicas é cerca de 6,8 a 7,2. Por serem as arqueas os micro-organismos mais sensíveis às variações dos fatores ambientais e as que se reproduzem mais lentamente, o passo limitante do processo acaba sendo a geração de metano.

Paes (2003) destaca que a principal razão para a instabilidade da fermentação é o desequilíbrio entre a produção de ácidos e de bicarbonatos na primeira fase da digestão, quando os ácidos formados não são suficientemente neutralizados pela alcalinidade proporcionada pelos bicarbonatos, ocorrendo a fermentação ácida. Dessa maneira, o pH do meio pode se tornar muito ácido e comprometer o desenvolvimento dos micro-organismos das fases seguintes.

No caso do tratamento anaeróbico de esgotos domésticos, não é necessário o controle de pH e alcalinidade, diferentemente do que geralmente acontece com as águas residuárias industriais. Isso acontece porque a degradação dos substratos do esgoto doméstico ocorre de forma significativamente lenta, favorecendo a simbiose dos micro-organismos e a permanência de pH e alcalinidade favoráveis ao seu desenvolvimento (BRASIL, 2016a).

2.1.2.3 Nutrientes

Os micro-organismos digestores precisam de nutrientes para o seu crescimento e metabolismo. De acordo com Chernicharo (1997), é fundamental a presença de macronutrientes como o carbono, nitrogênio e fósforo; de micronutrientes como potássio, cálcio, magnésio, ferro, etc; além de vitaminas. Gueri, Souza e Kuczman (2018) sobressaltam que esses nutrientes, quando devidamente balanceados, influenciam positivamente a eficiência do tratamento do esgoto e, conseqüentemente, a produção de biogás. Entretanto, a ausência desses nutrientes afeta primeiramente as arqueas metanogênicas, levando à redução da qualidade do biogás devido ao acúmulo excessivo de ácidos orgânicos.

Segundo Souza (1984), o substrato orgânico deve, preferencialmente, satisfazer à relação ≤ 30 para C/N, e ≤ 150 para C/P. No entanto, esses valores referem-se ao nitrogênio e fósforo efetivamente disponíveis para as bactérias, como o nitrogênio amoniacal e o ortofosfato. Quando não se pode garantir essa disponibilidade, deve-se considerar a relação ≤ 20 para C/N e ≤ 100 para C/P.

2.1.2.4 Substâncias tóxicas

Existem algumas substâncias que podem ser benéficas para a vida microbiana na digestão anaeróbia. Por outro lado, à medida que a concentração dessas substâncias vai aumentando, estas passam a ter um efeito tóxico. São exemplos de substâncias potencialmente tóxicas:

minerais (sódio, potássio, cálcio, magnésio e enxofre), metais pesados (cobre, níquel, cromo, zinco e chumbo), sabão, antibióticos e solventes orgânicos (ZAHER *et al.*, 2007).

Segundo Yenigun e Demirel (2013), a amônia é produzida através da degradação biológica da matéria nitrogenada e mesmo sendo um nutriente essencial para o crescimento bacteriano, pode inibir a metanogênese se estiver em altas concentrações. A amônia se apresenta como potencial inibidor da digestão anaeróbia, principalmente quando o substrato a ser tratado contém altos teores de matéria nitrogenada, como o esterco ou a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.

De acordo com PROSAB (1999), a sensibilidade dos processos anaeróbios às cargas tóxicas depende, consideravelmente, do tempo de retenção celular, sendo a capacidade de assimilação maior quanto maior for esse tempo. De modo geral, as substâncias potencialmente tóxicas sobre as arqueas metanogênicas normalmente não são encontradas em concentrações elevadas nos esgotos domésticos, ou seja, o desempenho de reatores tratando esgotos com tais características não costuma ser significativamente afetado.

Quando o substrato apresenta potencial de toxicidade, algumas medidas podem ser tomadas para minimizar os efeitos negativos. Rittmann e McCarty (2001) resumem algumas técnicas que podem ajudar a manter as concentrações de substâncias tóxicas a níveis aceitáveis, como controlar o pH, remover a substância tóxica antes de começar a digestão nos reatores, provocar a precipitação do material tóxico, fazer a diluição do efluente (que pode ser através da codigestão) ou adicionar material antagônico à substância tóxica.

2.3 Tipos de reatores para tratamento anaeróbio

Conforme BRASIL (2015b), as tecnologias mais empregadas para o tratamento anaeróbio são: i) os reatores de mistura contínua (CSTR – *Continuous Flow Stirred Tank Reactor*), utilizados quando há substratos com maior concentração de sólidos totais, porém, com possibilidade para bombeamentos e mistura; ii) as lagoas anaeróbias, que embora sejam de fácil construção e operação possuem alto risco de vazamento de gás (quando a lagoa é coberta) e poluem a atmosfera pela liberação do biogás (quando a lagoa não é coberta); iii) os reatores de digestão anaeróbia seca, que são importantes no tratamento de grandes volumes secos de efluentes, principalmente resíduos sólidos municipais e industriais, e iv) os reatores UASB, que são mais compactos e possuem baixo tempo de retenção hidráulica, geralmente utilizados no tratamento de efluentes industriais e de esgotos domésticos.

O Brasil é um dos países que mais utiliza a tecnologia UASB para o tratamento de esgotos domésticos e, portanto, tem adquirido vasta experiência nesse setor (BRASIL, 2015b). A grande capacidade instalada dessa tecnologia é evidenciada por Chernicharo em BRASIL (2016c), o qual relatou que, de uma amostra de 74 milhões de habitantes, aproximadamente 23 milhões são atendidos por UASBs em 637 ETEs no Brasil. Outro fator importante é que, segundo o SNIS (2018), o qual se refere ao ano de 2016, apenas 51,9% dos esgotos domésticos produzidos são coletados, e apenas 44,9% são tratados. Logo, tornando-se o UASB uma tecnologia que ainda tem grande potencial de utilização.

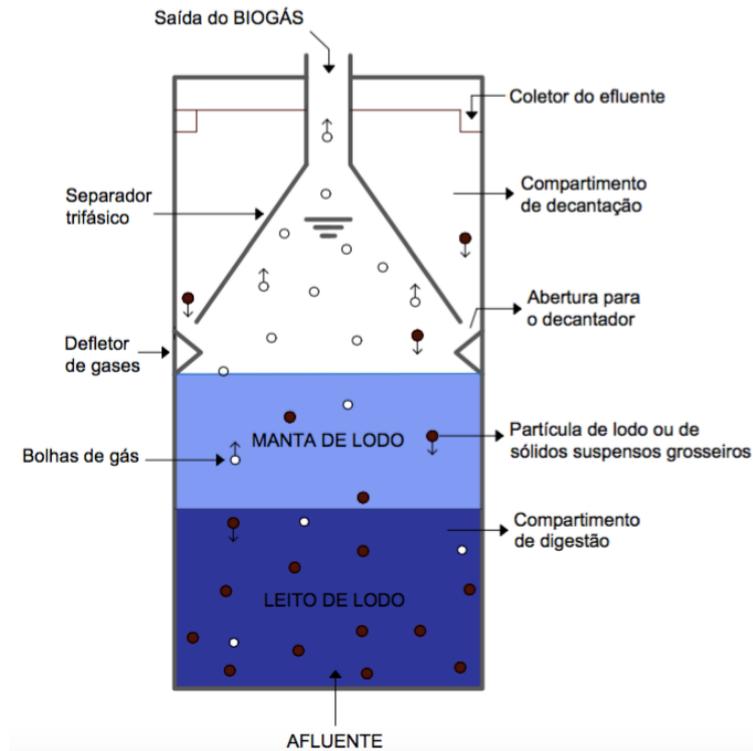
Segundo Van Haandel e Lettinga (1994), o elemento diferencial e mais característico do UASB é o separador trifásico, o qual permite a separação do efluente tratado, do biogás e do lodo, formando a zona de digestão, a zona de decantação e a zona de convergência do biogás. Na zona de digestão são formados o leito e a manta de lodo (biomassa), o qual deve ter elevada atividade metanogênica e sedimentabilidade; é nessa região que a matéria orgânica é degradada.

Uma vez que o esgoto é distribuído no fundo do reator e o fluxo é ascendente, após passar pela zona de digestão o efluente segue para a zona de decantação, onde as partículas remanescentes sedimentam e o efluente tratado é coletado na parte superior (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994). BRASIL (2015a) destaca que micro-organismos de baixa densidade não sedimentam tão rapidamente e acabam sendo carregados junto com o efluente tratado. Por fim, os gases gerados nas reações de digestão são coletados na zona de convergência, conforme Figura 2.

Há ainda digestores de pequeno porte que são geralmente utilizados em propriedades rurais. Esses biodigestores são adequados para essas localidades na medida em que propiciam o desenvolvimento sustentável do meio rural, através do suprimento de energia elétrica (muitas vezes dificultadas pelas grandes distâncias que encarecem a implantação de redes de transmissão), geração de biofertilizantes (para pequenos produtores rurais), prevenção da poluição do ar e preservação dos recursos hídricos (ANDRADE *et al.*, 2002).

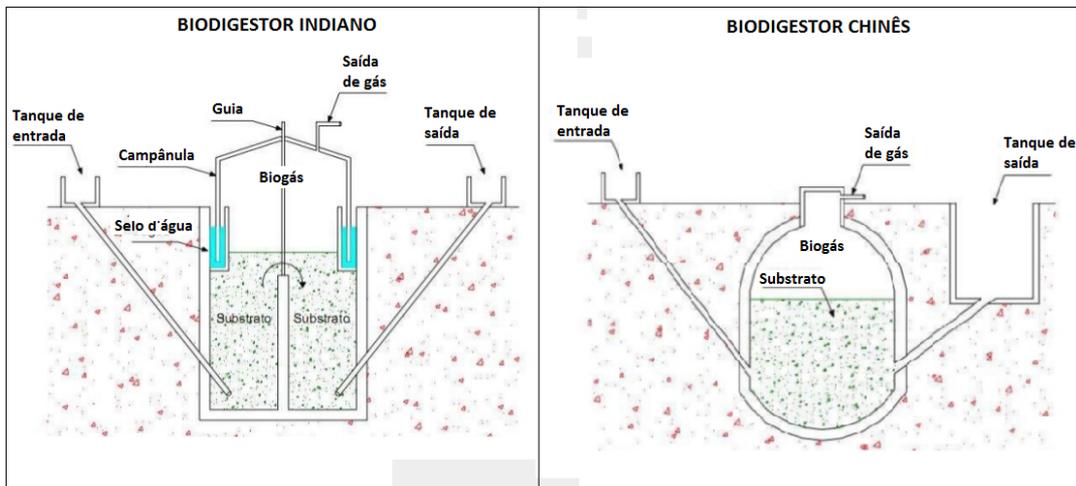
De acordo com Nishimura (2009), os biodigestores rurais possuem três modelos mais conhecidos, que são: modelo Indiano, Chinês e Batelada; sendo os modelos Indiano e Chinês os mais utilizados (Figura 3). Constituem-se, essencialmente, de câmaras fechadas onde são colocados os substratos (solução aquosa), os quais produzem biogás que se acumula na parte superior, de onde pode ser retirado e aproveitado. Além disso, segundo Deganutti *et al.* (2002), há uma grande quantidade de biodigestores sendo utilizados no mundo.

Figura 2 – Estrutura esquemática de um reator UASB



Fonte: BRASIL (2015a)

Figura 3 – Modelo do biodigestor Indiano e Chinês



Fonte: Adaptado de Júnior (2013)

Em partes da Índia, China, Vietnã, Etiópia, Colômbia e outros países, o aproveitamento do biogás a partir de estruturas de pequeno porte já é feito a bastante tempo, utilizando-se substratos de pequenas atividades agrícolas, estrumes e excretas humanas. Estudos tem analisado o impacto desses biodigestores de baixo custo e identificado benefícios ambientais

devido à redução da emissão de metano e da poluição do solo e mananciais (Lansche e Muller, 2017; Sfez, Meester e Dewulf, 2017; Wang, *et al.*; 2018; Garfi *et al.*, 2019).

2.4 O Biogás

2.4.1 Características do biogás

De acordo com Deublein e Steinhauser (2008), a formação do biogás também é chamada de metanização, já que, normalmente, o maior componente desse gás é o metano (CH_4); sendo o segundo maior constituinte o dióxido carbônico (CO_2). O metano varia, em média, entre 55 a 70% do volume total do biogás, e o gás carbônico entre 30 a 45%; o restante é constituído de uma possível mistura de sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), gás nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), monóxido de carbono (CO), vapor d'água, entre outros.

Segundo Deganutti *et al.* (2002), o metano é um gás incolor que, quando queimado, produz chamas azuis lilás e não produz fuligem. De forma a facilitar a compreensão sobre o poder energético do biogás, de maneira prática, os autores apresentam uma relação comparativa entre o biogás e combustíveis comuns. Por exemplo, 1 m^3 de biogás seria correspondente a 0,61 litros de gasolina, ou a 0,55 litros de óleo diesel, ou a 0,79 litros de álcool combustível, ou a 1,428 kWh de energia elétrica, etc.

Schnürer e Jarvis (2010) afirmam que o substrato do qual o biogás é gerado influencia diretamente na sua composição. Lobato (2011) traz a composição típica do biogás produzido em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico, matéria orgânica de aterros sanitários e no tratamento do lodo (Tabela 1).

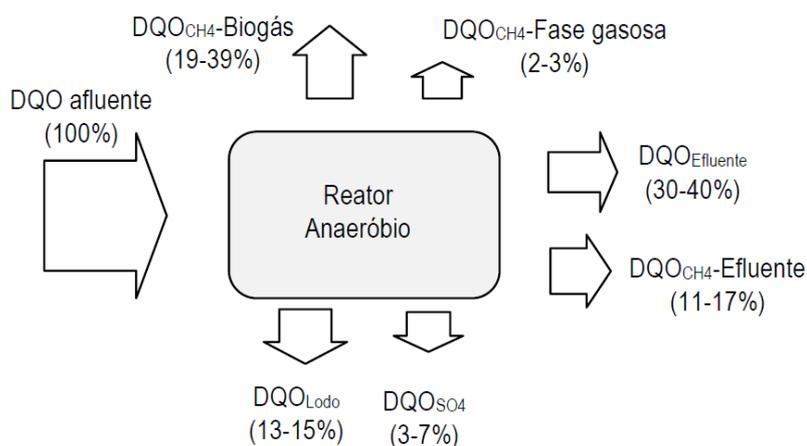
Além disso, Lobato (2011) elaborou uma pesquisa que buscava, entre outros aspectos, realizar o balanço de massa de DQO em reatores UASB. Isto é, identificar e quantificar as parcelas de DQO que não são convertidas em metano e capturadas no biogás. Constatou-se que há perdas de metano dissolvido no efluente e junto com o gás residual, além das parcelas devido às BRS e no crescimento celular da biomassa (convertida em lodo e retida no reator ou convertida em lodo e perdida no efluente). Pela Figura 4 é possível visualizar o balanço de massa de DQO nos processos anaeróbios obtido pela autora considerando a melhor e a pior situação.

Tabela 1 – Composição volumétrica típica do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto doméstico, aterros sanitários e digestores de lodo.

Parâmetro	Unidade	Composição volumétrica típica		
		Biogás de ETE (esgoto doméstico)	Biogás de aterro sanitário	Digestores de lodo
Metano (CH ₄)	%	60 a 85	45 a 50	60 a 70
Gás carbônico (CO ₂)	%	5 a 15	30 a 45	20 a 40
Monóxido de carbono (CO)	%	0 a 0,3	0 a 0,2	-
Nitrogênio (N ₂)	%	10 a 25	0 a 15	< 2
Hidrogênio (H ₂)	%	0 a 3	Traços a > 1	-
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	ppmv	1000 a 2000	10 a 200	Até 1000
Oxigênio (O ₂)	%	traços	0,8	-

Fonte: Rands *et al.* (1981); Noyola *et al.* (1988); Agrawal *et al.* (1997); Bohn (2001); Pagliuso *et al.* (2002); Barbosa e Stuetz (2005); USEPA (2005); Noyola *et al.* (2006); Rasi *et al.* (2007) apud Lobato (2011)

Figura 4 – Conversão da matéria orgânica nos processos anaeróbios



Fonte: Lobato (2011)

2.4.2 Produção do biogás

Devido à presença do metano, o biogás é considerado um biocombustível. O aproveitamento deste gás como combustível renovável torna-se favorável por duas razões principais: primeiro, a redução de impactos ambientais negativos, pois o metano é um gás altamente poluente e causador do efeito estufa, sendo, segundo Roy *et al.* (2011), o gás metano é 20 vezes mais poluidor do que o CO₂; segundo, a utilização do biogás se torna atrativa por ser fonte de geração de energia descentralizada (BRASIL, 2015a).

De acordo com BRASIL (2016a), a eficiência na produção do biogás e a sua valorização energética está diretamente relacionada com as particularidades de cada empreendimento. A composição dos substratos orgânicos que serão digeridos, a quantidade de substâncias inorgânicas e a disponibilidade de fornecimento de biomassa (sazonalidade) são exemplos de aspectos que podem potencializar ou inibir a produção do biogás.

Embora em quantidade suficiente, a composição do biogás deve ser determinada quando do seu aproveitamento, uma vez que o poder energético do biogás é afetado principalmente pela qualidade do gás gerado. Dessa forma, pode-se agir com mais segurança e eficiência, definindo-se se haverá necessidade de algum tratamento prévio ou qual o destino mais adequado para o biogás produzido (LINS, MITO e FERNANDES, 2015). Além disso, Von Sperling e Chernicharo (2005) observam que há diferença na caracterização dos esgotos em função dos hábitos da população, contribuição de indústria e classe social e econômica.

Um estudo realizado por Salomon e Lora (2005) buscou, através de publicações feitas por diversas entidades nacionais, determinar o potencial de produção do biogás no Brasil analisando-se diferentes fontes (resíduos sólidos urbanos, esgotos domésticos, vinhaça e resíduos animais provenientes de suínos e bovinos). Verificou-se, neste estudo, a importância do incremento do biogás na produção de energia elétrica em diversos setores, os quais obteriam uma economia considerável, além da redução do impacto ambiental.

2.4.3 Tratamento e utilização do biogás

A implantação de um sistema de aproveitamento de biogás está diretamente ligada à sua finalidade. Isso quer dizer que o biogás deve ser compatível com a tecnologia de conversão utilizada, sendo muitas vezes necessária à sua purificação.

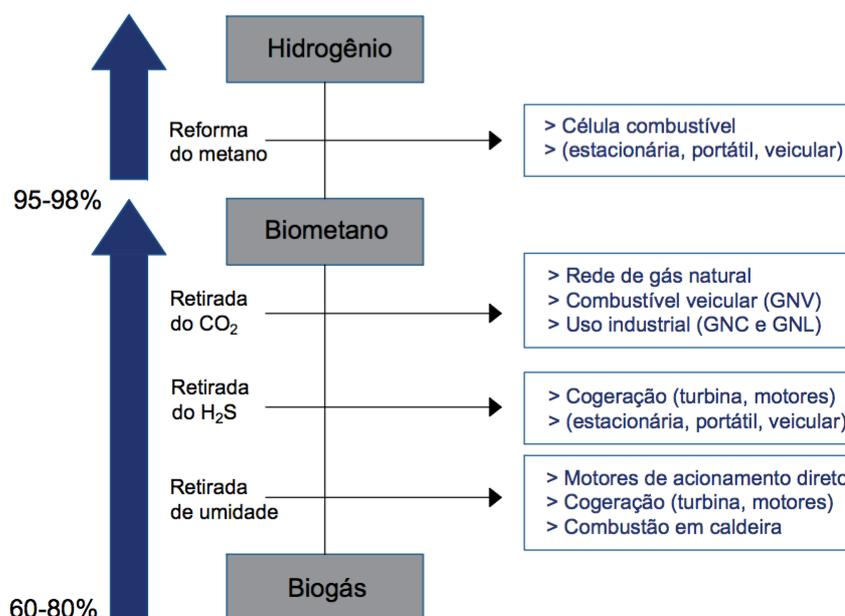
Segundo Hullu *et al.* (2008), o CH_4 apresenta uma combustão bastante limpa (com quase nenhuma partícula de fuligem ou outros poluentes). No entanto, a presença do CO_2 diminui o poder calorífico do biogás, ou seja, quanto maiores os teores de metano no biogás, melhor será o seu aproveitamento. Os autores revelam que o biogás contendo 60% de CH_4 possui um poder calorífico inferior de $21,5 \text{ MJ/Nm}^3$ enquanto o CH_4 puro tem um poder calorífico inferior de $35,8 \text{ MJ/Nm}^3$.

Além do CO_2 , o biogás geralmente contém pequenas quantidades de H_2S , que na presença de água formam o ácido sulfúrico (H_2SO_4). O ácido sulfúrico é altamente corrosivo e resulta em custos extras com a manutenção dos equipamentos. Outros poluentes normalmente encontrados no biogás são o vapor d'água, amônia e siloxanos que, quando combinados formam

um solvente corrosivo. Além disso, quando os siloxanos são queimados é formada a sílica (SiO_2), a qual pode causar sérios danos aos equipamentos (HULLU *et al*, 2008).

Conforme BRASIL (2015b), o biogás deve ser tratado de acordo com a sua finalidade, sendo alguns usos mais nobres do que outros. Através da Figura 5 é possível observar o tratamento recomendado para cada situação.

Figura 5 – Tratamento do biogás conforme uso final



Fonte: BRASIL (2015b)

Dentre os tratamentos apontados por BRASIL (2015b) estão a remoção de umidade, a dessulfurização, a eliminação dos siloxanos e a eliminação de CO_2 . É importante destacar que alguns processos utilizados nesses tratamentos são eficientes na remoção de diversos componentes simultaneamente. Abaixo seguem as principais técnicas utilizadas:

i) Remoção de umidade:

A remoção da umidade pode ser feita por resfriamento (tubulação inclinada, com o gás sendo conduzido através de um trocador de calor, provocando a condensação da umidade que posteriormente é removida por purgadores localizados nos pontos mais baixos), adsorção (gel de sílica, carvão ativado) ou absorção (desidratação por glicol), sendo o processo por resfriamento o mais utilizado.

ii) Dessulfurização

Para a dessulfurização existem processos químicos, físicos ou biológicos. Os processos mais conhecidos são: reator de filtro biológico percolador (com bactérias quimio-litotróficas que oxidam os componentes de enxofre a sulfato), injeção de ar no digestor (bactérias oxidam

o H₂S em enxofre elementar ou ácido sulforoso), dosagem de ferro simultânea (adição de compostos de ferro que reagem com o H₂S formando sulfetos não solúveis), e a adsorção em carvão ativado (oxidação catalítica na estrutura porosa do carvão, onde o H₂S é convertido em enxofre elementar).

iii) Eliminação dos siloxanos

A eliminação dos siloxanos é geralmente realizada através de adsorção com carvão ativado. Nesse caso, deve ser observado o grau de saturação do carvão ativado, retardando-se a manutenção com a utilização de dois filtros em sequência.

iv) Eliminação de CO₂

Para a remoção do CO₂ existem, atualmente, métodos químicos e físicos. Dentre eles: adsorção com modulação de pressão (aplica-se alternância de pressão no substrato, ocasionando a aderência dos contaminantes do biogás na superfície dos sólidos adsorventes), lavagem com água pressurizada (o CO₂ é absorvido na água por meio de ligações físicas ocasionadas pelo aumento de pressão), absorção química com solventes orgânicos, adsorção física com solventes químicos e o método da membrana (por meio de pressão e da diferença de permeabilidade entre as membranas de polímero que separam o CH₄ das impurezas indesejáveis.).

2.5 Dispositivos para operação e manutenção de sistema de biogás gerando energia elétrica

Existem diversas recomendações para a instalação de sistemas de biogás que visam, principalmente, garantir a segurança dos indivíduos e do meio ambiente, devendo-se proceder com maiores cuidados quanto maior for o volume de biogás produzido, como pode ser minuciosamente observado em FNR (2010), Bontempo *et al.* (2016) e BRASIL (2015a).

Como visto anteriormente, o aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica pode ser uma alternativa economicamente, ambientalmente e socialmente interessante. Para que a energia seja gerada e injetada na rede elétrica é necessária a instalação de alguns equipamentos, como transformadores, reservatórios de biogás (gasômetros) ou armazenadores de energia elétrica, equipamentos para o tratamento do biogás, queimadores e dispositivos de segurança (BRASIL, 2015a).

Segundo Bontempo *et al.* (2016), o biogás deve ser mantido afastado do calor, fontes de ignição, chamas abertas e de superfícies quentes, já que se trata de um gás extremamente inflamável. A tubulação de transporte do biogás (incluindo conexões, válvulas, flanges,

vedações, etc) deve ter resistência contra os impactos mecânicos, químicos e térmicos. Quanto aos purgadores, os autores ressaltam que o projeto deve prever facilidade de acesso e evitar o escapamento do biogás, assim como devem ser instalados aparelhos de segurança, como dispositivos contra sobrepressão e subpressão, protetor contra chamas, válvula de corte, etc.

Além disso, a NBR 12.209 (ABNT, 2011) recomenda a instalação de *by-pass*, redirecionando o biogás para o queimador quando necessário. De acordo com BRASIL (2016a), a utilização do queimador é necessária quando há produção de biogás em excesso ou que não possa ser imediatamente utilizado, em casos de manutenções, falhas operacionais ou redução de consumo, por exemplo.

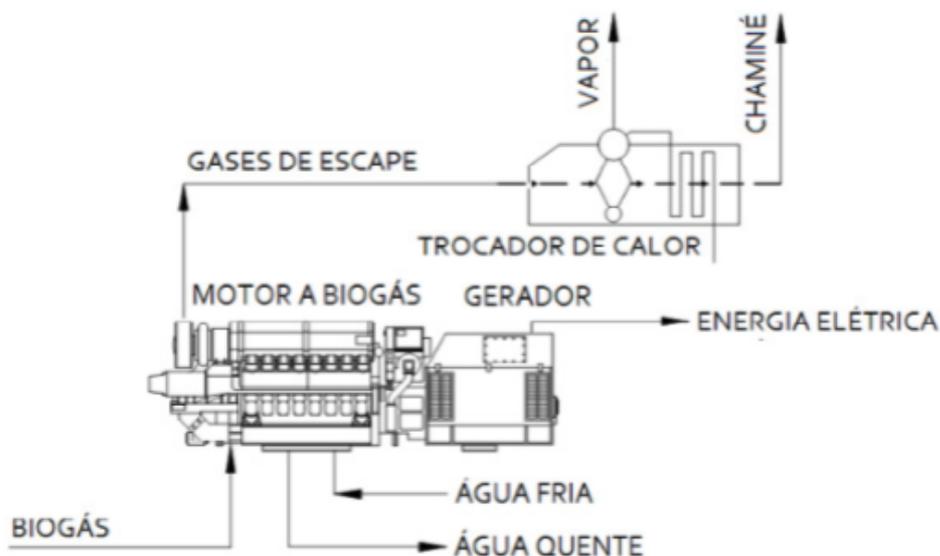
A vista dos riscos associados com o armazenamento do biogás em gasômetros, BRASIL (2015a) evidencia a possibilidade de armazenamento de eletricidade, evitando-se, dessa maneira, o acúmulo de grandes volumes de biogás. A eletricidade pode ser armazenada em reservatórios de forma direta, com condensadores ou bobinas, ou de forma indireta, com pilhas e baterias.

Analisando-se reatores em pequena escala, como os modelos indiano e chinês, BIOGAS (ca, 2014) alega que os riscos são muito inferiores quando comparados com sistemas de biogás aplicados em ETEs, devido ao volume de biogás produzido. Portanto, considera-se que esses sistemas possuem alto nível de segurança, não havendo a necessidade de instalação de equipamentos complexos.

Segundo BRASIL (2016a), o aproveitamento de biogás para gerar energia elétrica é considerado pouco nobre, ou seja, apenas a remoção da umidade e gás sulfídrico é suficiente para o funcionamento do sistema. Os grupos geradores, que são compostos por motor a combustão acoplado a gerador elétrico, são os equipamentos mais utilizados para esse objetivo. Normalmente esses motores são de ciclo Otto (compressão e expansão de fluidos gasosos para gerar força e movimento rotativo (ROCHA, 2009)), e os geradores elétricos são de corrente alternada. Na Figura 6 é possível observar o esquema de um grupo gerador.

BRASIL (2016a) afirma também que a eficiência elétrica desses motores varia no mercado de 30 a 45%, o teor de metano no biogás deve ser de pelo menos 45%, e a potência elétrica alterna entre 100 kW a 2MW. Adicionalmente, a combustão do biogás gera calor, o que possibilita a utilização desses equipamentos em sistemas de cogeração.

Figura 6 – Grupo gerador (motor a combustão + gerador elétrico)



Fonte: BRASIL (2016a)

Outra forma de gerar energia a partir do biogás em sistemas de pequeno porte é através de microturbinas a gás. Esses equipamentos são pouco utilizados quando o combustível é o biogás, pois necessitam de adaptações nas câmaras de combustão e nos injetores de combustível para o seu funcionamento, além de terem potência limitada a 200 kW. No entanto, estes apresentam algumas vantagens em comparação aos grupos geradores, como menores custos de operação e manutenção, baixa emissão de ruídos, possibilidade de utilização de gás com qualidade inferior e maior vida útil (BRASIL, 2016a).

2.6 Aproveitamento energético do biogás no Brasil

2.6.1 Barreiras e propostas para o mercado do biogás no Brasil

Embora a tecnologia para o aproveitamento do biogás tenha se desenvolvido consideravelmente nos últimos anos ao redor do mundo, e o Brasil possua elevada aplicação de sistemas anaeróbios e clima oportuno, apresentando-se como um mercado bastante promissor, o uso do biogás ainda é incipiente nesse país. Buscando entender os motivos desse cenário, BRASIL (2016b) desenvolveu uma ampla pesquisa identificando as principais barreiras e implicações existentes e apresentou propostas para impulsionar este setor.

As principais barreiras identificadas estão ligadas à relação incerta sobre o custo-benefício dos projetos de biogás, à reduzida quantidade de projetos de referência bem-sucedidos em escala comercial, à dificuldade de acesso a informações e à inexistência de políticas

específicas relacionadas ao biogás. Essas dificuldades acabam culminando no desinteresse de empresas em realizar investimentos, na insegurança para operação de plantas, no aumento de custos, etc; impedindo as oportunidades de geração de energia descentralizada através de combustível renovável (BRASIL, 2016b).

Entretanto, mesmo com as barreiras citadas acima, diversos estudos no Brasil vêm demonstrando a viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás, seja para o biogás produzido em ETEs como para àquele oriundo de resíduos orgânicos municipais ou efluentes de indústrias, por exemplo (LANDIN e AZEVEDO, 2008; OLIVEIRA, 2009; ZANETTE, 2009; SILVA e SOEIRO, 2014; VALENTE, 2015; BRASIL, 2016c; BRASIL, 2017a).

Para projetos de menor escala, algumas propostas sugeridas por BRASIL (2016b) poderiam ter um impacto significativo no sentido de promover essa tecnologia, como as listadas a seguir:

- Redução de impostos no nível federal (IPI, PIS-CONFINS) e isenção de ICMS sobre equipamentos para geração de biogás no nível estadual;
- Introdução da temática do biogás nos cursos técnicos e acadêmicos;
- Tradução e disponibilização de manuais técnicos, normas, guias, e estudos internacionais relevantes;
- Definição de piso mínimo da tarifa de energia gerada a partir do biogás (médio prazo), e;
- Redução das cargas tributárias de produtos importados, estimulando, dessa maneira, a concorrência e o desenvolvimento da oferta no mercado.

Por fim, a pesquisa desenvolvida por BRASIL (2016b) concluiu que há um interesse muito grande de diversos setores para que o mercado do biogás se desenvolva no Brasil. Logo, tem-se a expectativa de que esse setor será fortemente impulsionado quando forem criadas políticas públicas que estimulem o seu papel na matriz energética do país, a qual depende fortemente da energia hidráulica e, portanto, das condições climáticas.

2.6.2 Regulamentações

De acordo com BRASIL (2016a), não existem ainda Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBRs) que disponham exclusivamente sobre o biogás, porém, algumas normas que tratam sobre o gás natural podem ser consultadas em partes, observando-se as especificidades de cada componente; do mesmo modo, as Normas Regulamentadoras (NRs)

dispostas pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) podem servir como guia para os requisitos de projeto, segurança e condições de operação e manutenção de gases inflamáveis.

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) regulamentou, em 2015, o uso do biometano, sendo este tratado de maneira análoga ao gás natural. Portanto, uma vez que o biogás seja tratado, alcançando teores de metano acima de 95%, a sua valoração econômica será tal qual a do gás natural. Em 2013, foi lançado o projeto Tecnologias para produção e aproveitamento do biogás e fertilizantes gerados a partir de dejetos de animais, com o objetivo de alcançar as metas estabelecidas pelo projeto Agricultura de Baixo Carbono (ABC) do Governo Federal (EMBRAPA, 2015).

Existem regulamentações que incluem parâmetros relacionados à produção de biogás, e normativas que se referem sobre a regularização ambiental (licenciamento ambiental, cadastro técnico federal, remoção de vegetação e uso de recursos hídricos), e sobre o aproveitamento energético do biogás como energia térmica ou elétrica. Como pode ser observado no Quadro 4.

Destaca-se, aqui, a Resolução Normativa nº 482 de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que se refere à produção de biogás em pequena escala. Nessa resolução são definidos como microgeração distribuída a central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia, conectada a rede de distribuição por unidades consumidoras; e como minigeração distribuída aquela de mesmas características, mas com potência instalada variando entre 75 kW e 5 MW. É possível, então, o sistema de compensação de energia nesses casos, onde a energia ativa injetada é cedida à distribuidora local por meio de empréstimo gratuito, e posteriormente, compensa-se o consumo de energia elétrica ativa (passando a unidade consumidora a ter um crédito por um prazo de 60 meses) (ANEEL, 2012).

Além disso, segundo BRASIL (2016a), esse modelo de sistema de compensação energética teve o seu processo para a conexão da geração distribuída simplificado, isto é, a ANEEL concebeu formulários padrão para solicitação de acesso pelo consumidor, reduziu o prazo total para a distribuidora conectar microgerações (34 dias), e estabeleceu que a solicitação e acompanhamento de pedido podem ser realizado pela internet desde 2017. Dessa forma, estimulou-se a implementação de geração distribuída em condomínios e a formação de cooperativas ou consórcios que utilizem energia gerada para reduzir suas faturas de energia.

Quadro 4 – Principais regulamentações existentes e suas disposições quanto à regularização ambiental e uso do biogás para gerar energia elétrica e térmica

REGULAMENTAÇÕES	DISPOSIÇÕES
Regularização ambiental	
<p>Lei nº 11.445/07 (PLANSAB)</p> <p>Lei nº 12.305/10 (PNRS)</p> <p>CONAMA nº 382/2006 (Anexos II e V) e nº 436/2011 (Anexos II e V).</p> <p>CONAMA 237/1997</p> <p>CONAMA 430/2011</p>	<p>Plano Nacional do Saneamento Básico - estabelece, dentre outros aspectos, as regras aplicáveis à gestão dos esgotos sanitários e dos Resíduos Sólidos Urbanos</p> <p>Política Nacional de Resíduos Sólidos - define que só poderão ser encaminhados para aterramento os rejeitos, devendo os resíduos ser destinados a processos de tratamento</p> <p>Estabelecem os limites máximos para emissões atmosféricas</p> <p>Regulamenta os aspectos de licenciamento ambiental estabelecidos na Política Nacional de Meio Ambiente, inclusive estabelecendo as competências de licenciamento do IBAMA e dos órgãos estaduais de meio ambiente</p> <p>Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes</p>
Aproveitamento energético do biogás	
<p>Lei nº 9.074/1995</p> <p>Resolução Normativa ANEEL no 390/09</p> <p>Lei no 10.848/2004, Decretos no 5.163/2004 e no 5.177/2004 e Resolução Normativa ANEEL no 109/2004</p> <p>Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012</p>	<p>Define o marco regulatório do setor elétrico e estabelece as formas de comercialização de energia elétrica no Sistema Integrado Nacional (SIN)</p> <p>Estabelece os requisitos necessários à outorga de autorização de centrais geradoras de energia elétrica para que uma usina possa ter acesso ao SIN</p> <p>Regulamentam os procedimentos de comercialização de energia elétrica junto à Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)</p> <p>Possibilita que as centrais geradoras de micro e minigeração injetem a energia gerada à distribuidora local, para que depois compensem o seu consumo de energia elétrica</p>

Fonte: BRASIL (2016a)

3 Material e Métodos

Esse estudo se enquadra no delineamento de pesquisa bibliográfica e estudo de caso. Trata-se de uma pesquisa exploratória (nova visão do problema) e explicativa (busca associar o porquê dos acontecimentos).

Previamente, foi feita uma revisão de literatura, na qual alguns aspectos relevantes para o desenvolvimento da pesquisa foram investigados. Pretendeu-se, portanto, conhecer as características dos esgotos gerados nos empreendimentos habitacionais, as técnicas existentes para o tratamento anaeróbio de esgotos e aproveitamento do biogás, bem como os impactos sociais, ambientais e econômicos desse tipo de tecnologia.

A primeira etapa metodológica consistiu em definir os objetos da área de estudo, nesse caso, definir os critérios para selecionar os condomínios onde seriam feitas as coletas. A partir dessa definição, realizou-se a caracterização dos esgotos gerados nesses imóveis, selecionando-se os parâmetros mais importantes no processo de metanização, e que poderiam ser medidos no laboratório de Saneamento e Meio Ambiente (SAMA) da Universidade Federal de Sergipe.

A segunda etapa envolveu o tratamento estatístico dos dados obtidos em laboratório. Segundo Torman, Coster e Riboldi (2012), “os principais testes estatísticos têm como suposição a normalidade dos dados, que deve ser verificada antes da realização das análises principais”. Dessa maneira, procedeu-se com o teste de Shapiro-Wilk para verificação da normalidade dos dados de DQO bruto obtidos no laboratório. Em seguida, realizou-se a análise estatística através da ferramenta *box-plot* (gráfico de caixa), procedendo com a identificação visual e interpretação dos conjuntos de dados.

A terceira etapa compreendeu os cálculos para a estimativa de produção de biogás e do potencial energético, utilizando-se o *software* Probio 1.0 (Programa de Estimativa de Produção de Biogás em Reatores UASB), o qual foi concebido com base no modelo matemático desenvolvido por Lobato (2011). Esse método é o que melhor representa a realidade atualmente, pois todas as perdas de metano identificadas nos processos são quantificadas.

Na quarta etapa, foram elaborados projetos para o tratamento dos esgotos de cada condomínio, incluindo os itens necessários à utilização do biogás para geração de energia elétrica. Esses projetos foram formulados de acordo com as noções expostas na revisão de literatura, recomendações sugeridas por PROSAB (1999) e diretrizes da NBR 12.209 (ABNT, 2011).

Finalmente, na última etapa da pesquisa, realizou-se um estudo de viabilidade técnica e econômica dos projetos sugeridos para os condomínios, realizando-se uma estimativa da eficiência do tratamento de esgoto. Além disso, o aspecto ambiental foi avaliado, identificando os principais impactos positivos e negativos do sistema proposto.

3.1 Área de estudo e caracterização dos esgotos

3.1.1 Área de estudo

Aracaju é a capital de Sergipe e está localizada na porção leste do estado (litoral). Segundo o IBGE (2010), a capital teve uma população estimada de 650.106 pessoas em 2017 e uma área de 182 km². Com relação ao clima, Aracaju se encontra em uma região de clima quente e úmido, com dois períodos bem característicos: o mais seco, com a presença de chuvas torrenciais localizadas, de curta duração e pouco frequentes, entre os meses de setembro a fevereiro; e o chuvoso, com chuvas constantes e menos intensas, durante os meses de março a agosto. A amplitude térmica é pequena durante o ano, com temperaturas variando entre 24 a 30 °C na primavera/verão, e 22 a 29 °C no outono/inverno (CLIMATEMPO, 2018).

A escolha dos empreendimentos para fazer as coletas de esgoto foi feita segundo alguns critérios. A princípio, foi definido que as coletas seriam realizadas em um período que fosse suficiente para acompanhar as variações climáticas. Dessa maneira, estipulou-se que as amostras seriam colhidas de março a julho de 2018, com uma frequência semanal. De modo a verificar se há variação na composição do esgoto ao longo do dia, as coletas foram realizadas pela manhã e pela tarde, alternando-se o turno da coleta a cada semana.

Uma vez que a vazão de contribuição do esgoto afeta diretamente o volume de biogás produzido e, por consequência, a quantidade de energia elétrica gerada, procurou-se selecionar condomínios com número de unidades diferentes. Além disso, como visto anteriormente, Von Sperling e Chernicharo (2005) comentam que a caracterização dos esgotos é influenciada por hábitos da população e classe social. Logo, a seleção para esse estudo também buscou abordar condomínios com níveis econômicos desiguais.

Além dos fatores teóricos relatados, a seleção dos condomínios submeteu-se a fatores práticos, como a facilidade de acesso aos poços de visita (PV) e à permissão ou não fornecida pelos administradores dessas unidades para que a pesquisa se desenvolvesse. Isto posto, três empreendimentos foram selecionados em Aracaju, sendo dois verticais e um horizontal, os quais são descritos a seguir.

- Condomínio 1 – Residencial Monticello (RMO)

O Residencial Monticello (RMO) está localizado no conjunto Augusto Franco, bairro Farolândia. Segundo França e Rezende (2015), verificam-se dois segmentos de uso residencial nesse bairro: o econômico, com empreendimentos de médio padrão; e o de padrão mais elevado, com condomínios que substituem antigas mansões. Nesse caso, o RMO se caracteriza como segmento econômico, possuindo duas torres com 14 pavimentos tipo, e cada pavimento tipo contendo quatro apartamentos de 79,05 m², totalizando 112 apartamentos. Destes, 105 estão atualmente ocupados. As coletas das amostras de esgoto ocorreram no PV do pavimento garagem do condomínio, o qual está localizado em área coberta (sombra).

- Condomínio 2 - Residencial Sunville (RSv)

O Residencial Sunville (RSv) é um condomínio horizontal, com 78 casas, localizado no bairro Atalaia. O padrão desse empreendimento é mais elevado em comparação ao RMO, com terrenos variando entre 375 e 663 m² e residências com 158 a 212 m² (com casas de um ou dois andares). Esse condomínio está localizado a apenas 300 metros da Praia de Atalaia e muito próximo da Orla de Atalaia (considerado um dos pontos turísticos da cidade). No momento, quatro casas estão desocupadas, portanto, os cálculos foram feitos com base em 74 unidades. As coletas das amostras de esgoto foram realizadas no último PV antes do lançamento final, em local descoberto.

- Condomínio 3 - Porto das Águas (PAg)

O condomínio Porto das Águas está localizado no bairro Luzia, e a sua escolha se deu, principalmente, pelo grande número de apartamentos. Trata-se de um condomínio de padrão médio, com apartamentos de 68 m². São nove edifícios de 10 pavimentos, com quatro unidades por andar, somando um total de 360 imóveis. Destes, 300 possuem moradores atualmente e 60 estão desocupados. As amostras de esgotos desse condomínio foram coletadas em PV localizado na área externa (sem cobertura).

3.1.2 Caracterização dos esgotos

A caracterização dos esgotos foi realizada no laboratório SAMA da UFS, logo, limitou-se à disponibilidade de reagentes e de equipamentos dessa unidade. Objetivando-se preservar as características dos esgotos coletados, as amostras foram dispostas em isopor com gelo durante o transporte. Os parâmetros analisados encontram-se no Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros físicos e químicos utilizados para caracterização do esgoto doméstico gerado nos condomínios selecionados

PARÂMETRO	MÉTODO
Temperatura	termômetro comum – medição <i>in loco</i>
pH	pHmetro – in loco (SAMA)
DQO total	<i>Standard methods for the examination of water and wastewater – American Public Health Association (APHA, 2005)</i>
DQO filtrada	
Sólidos Totais (ST)	
Sólidos Totais Fixos (STF)	
Sólidos Totais Voláteis (STV)	
Sólidos em Suspensão Totais (SST)	
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	

Fonte: autora (2019)

Vale ressaltar que a quantificação de parâmetros como nitrogênio, fósforo e sulfato, por exemplo, poderiam ser enriquecedores para a pesquisa, no sentido que estes elementos afetam as reações de digestão e o crescimento da biomassa e, portanto, poderiam auxiliar na interpretação dos resultados. Devido a impossibilidade de realização dessas análises no SAMA, esses parâmetros não foram medidos. Por outro lado, por se tratar de esgoto doméstico, espera-se que esses e outros fatores não apresentem potencial de toxicidade significativo, uma vez que a degradação dos substratos desse tipo de esgoto ocorre de forma lenta, favorecendo o equilíbrio dos micro-organismos digestores (BRASIL, 2016a).

3.2 Análise estatística

O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado aos dados de DQO bruto obtidos no laboratório para as amostras de cada condomínio. Segundo Anjos (2005), o objetivo do teste de Shapiro-Wilk é fornecer uma estatística de teste para avaliar se uma amostra tem uma distribuição Normal. O teste pode ser utilizado para amostras de qualquer tamanho e a estatística W de teste para a normalidade é definida pela Equação 3.1.

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.1)$$

Onde,

y_i = variável aleatória observada;

\bar{y} = média da variável aleatória observada;

n = número de dados da amostra;

$$b = \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} a_{n-i+1} \cdot (y_{n-i+1} - y_i), \text{ se } n \text{ é par};$$

$$b = \sum_{i=1}^{\frac{(n+1)}{2}} a_{n-i+1} \cdot (y_{n-i+1} - y_i), \text{ se } n \text{ é ímpar};$$

a = coeficientes tabelados.

Consideraram-se as seguintes hipóteses nesse teste: H_0 – a amostra provém de uma população normal, e H_1 – a proposta não provém de uma distribuição normal. O nível de significância considerado foi de 5%. De acordo com Torman, Coster e Riboldi (2012), os testes de Shapiro-Francia e Shapiro-Wilk têm obtido resultados superiores às outras técnicas de verificação da normalidade.

Após a verificação da normalidade, procedeu-se à análise estatística através da ferramenta *box-plot*. Segundo Capela e Capela (2011), o *box-plot* permite avaliar a simetria dos dados, sua dispersão e a existência ou não de *outliers* (valores atípicos - pontos que destoam consideravelmente do conjunto de dados das amostras).

O gráfico foi construído com base em cinco números: valor mínimo, primeiro quartil (Q1), mediana (segundo quartil – Q2), terceiro quartil (Q3) e valor máximo. A regra utilizada para determinação dos *outliers* se baseou na amplitude interquartil (AIQ – diferença entre Q3 e Q1). Isto é, quaisquer valores abaixo de Q1 ou acima de Q3 por mais de 1,5 vezes AIQ são considerados *outliers* (WILLIAMSON, PARKER e KENDRICK, 1989; FARIAS, sd). Além disso, considerou-se como valores mínimos e máximos os menores e maiores valores não *outliers*, respectivamente.

A caixa do gráfico *box-plot* vai desde o primeiro quartil até o terceiro quartil, e uma linha é traçada desde as extremidades das caixas até os valores mínimos e máximos. A análise estatística através do *box-plot* permitiu também uma rápida visualização para a comparação de dois ou mais conjunto de dados, observando-se a sua distribuição com relação à mediana e à variabilidade ou constância desses dados no tempo. Essa técnica foi utilizada para análise estatística dos seguintes parâmetros aferidos em laboratório: DQO bruta e filtrada, pH e temperatura.

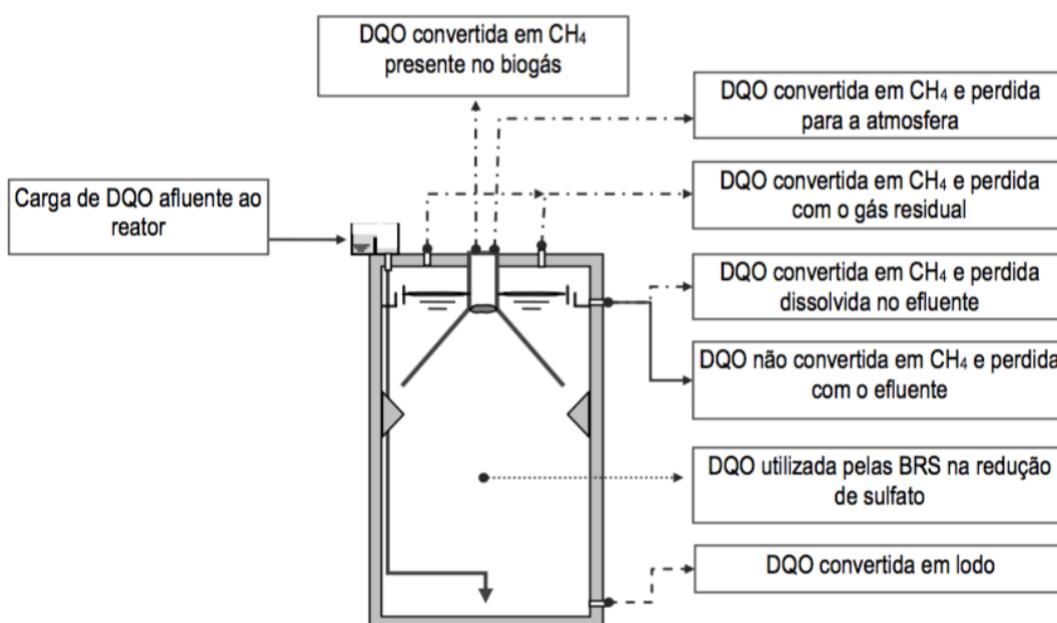
3.3 Estimativa de produção de biogás e do potencial energético

O Probio 1.0 é um *software* gratuito que foi elaborado através de uma parceria entre a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) (INCT ETEs SUSTENTÁVEIS, 2018). Esse programa se baseia na metodologia

desenvolvida por Lobato (2011) para estimativa de produção de biogás a partir de reatores UASB tratando esgotos domésticos, considerando as parcelas de DQO que não são analisadas em métodos mais tradicionais.

Inicialmente, estima-se a quantidade de DQO total que é removida no sistema, a parcela convertida em lodo e a parcela consumida pelas BRS. Calcula-se, então, a DQO máxima convertida em CH_4 e a sua produção volumétrica máxima. A partir desse volume, é possível estimar a parcela real de CH_4 que estará disponível para o aproveitamento, descontando-se as perdas de metano dissolvido no efluente, as perdas como gás residual e outras perdas eventuais. A partir do esquema da Figura 7 é possível observar as perdas consideradas nesse método.

Figura 7 – Rotas de conversão de DQO e fluxos de metano em reatores UASB



Fonte: Lobato (2011)

3.3.1 Dados de entrada para a estimativa do biogás

Os dados de entrada necessários para a estimativa do biogás segundo o método proposto são:

- População contribuinte (Pop);
- Concentração de DQO total afluente ($C_{\text{DQOtot.afl}}$);
- Vazão afluente (Q);
- Eficiência de remoção de DQO (E_{DQO});
- Concentração de sulfato no afluente (C_{SO_4});
- Eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4});
- Temperatura operacional do reator (T);

- Percentual de CH₄ no biogás (C_{CH₄});
- Percentuais de perdas de biogás: dissolvido no efluente (p_L), como gás residual (p_w) e por outras perdas (p_O).

Segundo BRASIL (2014), resultados do censo do IBGE em 2010 constataram que o número médio de pessoas convivendo em um mesmo domicílio no Brasil é de 3,34. Portanto, a população contribuinte (Pop) nesse estudo foi calculada multiplicando-se esse valor pelo número de imóveis ocupados em cada condomínio. Ao final, os resultados foram arredondados para o valor inteiro mais próximo. A concentração de DQO total afluente (C_{DQOtot.afl}) e a temperatura operacional (T) foram obtidos nas análises do laboratório.

Para o cálculo da vazão afluente (Q) considerou-se o consumo médio *per capita* de água segundo estratificação socioeconômica obtida por Oliveira e Filho (2004). Utilizou-se esse estudo como referência devido à semelhança climática e econômica da região com o local de estudo. O valor médio de consumo de água obtido para residências multifamiliares classe A foi de 272 L.hab⁻¹.d⁻¹ (RSv), e de 239 L.hab⁻¹.d⁻¹ para empreendimentos habitacionais classe B (RMO e PAg). Além disso, segundo a NBR 9.649 (ABNT, 1986), foi considerado um coeficiente de retorno igual a 0,8. Logo, a vazão de contribuição dos esgotos foi calculada através da Equação 3.2.

$$Q = 0,8 \cdot Pop \cdot C_{\text{água}} \quad (3.2)$$

Onde,

Q = vazão afluente (L.d⁻¹);

Pop = população contribuinte (número de habitantes do condomínio);

$C_{\text{água}}$ = consumo médio *per capita* de água segundo classe econômica (L.hab⁻¹.dia⁻¹)

Os demais dados de entrada foram obtidos através de valores indicados na literatura. A fim de se obter resultados representativos, consideraram-se os três cenários disponíveis no *software*: pessimista, típico e otimista. O cenário pessimista envolve sistemas operando com esgotos mais diluídos, maior concentração de sulfato, menor eficiência de remoção de DQO e maiores perdas; o cenário otimista, porém, se refere a sistemas com características opostas (esgoto concentrado, menor concentração de sulfato, maior eficiência na remoção de DQO e menores perdas). Por fim, o cenário típico se caracteriza pelas condições intermediárias (LOBATO, 2011). Na Tabela 2, encontram-se os dados de entrada teóricos que foram considerados para a estimativa de biogás nesse estudo.

Tabela 2 – Dados de entrada para a estimativa de biogás

Parâmetro	Unidade	Cenário			Referências/ Modo de obtenção
		Pessimista	Típico	Otimista	
População contribuinte (Pop)	hab.		-		Calculada em função dos imóveis ocupados
Concentração de DQO total afluente ($C_{DQO_{tot.afl}}$)	kgDQO.m ⁻³		-		Laboratório (APHA, 2005)
Contribuição <i>per capita</i> de DQO	kgDQO.hab ⁻¹ .dia ⁻¹		-		Calculada com os resultados das análises
Vazão afluente (Q)	m ³ .dia ⁻¹		-		Calculada segundo Eq. 3.1
Eficiência esperada de remoção de DQO (E_{DQO})	%	60	65	70	Von Sperling e Chernicharo (2005)
Concentração de sulfato no afluente (C_{SO_4})	kgSO ₄ .m ⁻³	0,08	0,06	0,04	Singh e Viraghavan (1998); Metcalf e Eddy (2003); Glória <i>et al.</i> (2008) apud Lobato (2011)
Eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4})	%	80	75	70	Souza (2010) apud Lobato (2011)
Coefficiente de produção de sólidos (YDQO)	kgDQO _{lodo,-1} .kgDQO _{rem} ⁻¹	0,11	0,17	0,23	Chernicharo (1997)
Temperatura operacional do reator (T)	°C		-		Medida <i>in loco</i>
Percentual de CH ₄ no biogás (C_{CH_4})	%	70	75	80	Von Sperling e Chernicharo (2005)
Perda de CH ₄ no efluente (p _L)	kgCH ₄ .m ⁻³	0,025	0,020	0,015	Souza e Chernicharo (2011)
Perda de CH ₄ como gás residual (p _w)	%	7,5	5,0	2,5	Souza e Chernicharo (2011)
Outras perdas de CH ₄ (p _o)	%	7,5	5,0	2,5	Souza e Chernicharo (2011)

Fonte: autora (2019)

3.3.2 Cálculo das parcelas do balanço de massa de DQO

Uma vez definidos os dados de entrada, estimou-se a produção de biogás. Primeiramente, calculou-se a contribuição *per capita* de DQO afluente de acordo com a Equação 3.3.

$$QPCDQO = \frac{C_{DQO_{tot.afl}} \cdot Q}{Pop} \quad (3.3)$$

Onde,

$QPCDQO$ = contribuição *per capita* de DQO afluente (kgDQO.hab⁻¹.d⁻¹);

$C_{DQO_{tot.afl}}$ = concentração de DQO afluente total (kgDQO.m⁻³);

Q = vazão afluente média (m³.d⁻¹);

Pop = população contribuinte (hab).

Com a contribuição *per capita* de DQO afluente, calculou-se a DQO que é removida no sistema (Equação 3.4).

$$DQO_{rem} = Pop. QPCDQO. EDQO \quad (3.4)$$

Onde,

DQO_{rem} = massa diária de DQO removida no sistema (kg DQOrem.d⁻¹);

$EDQO$ = eficiência de remoção de DQO (%).

A partir da massa diária de DQO removida, calculou-se a parcela de DQO que é convertida em lodo (Equação 3.5 e 3.6), a DQO utilizada pelas BRS na redução de sulfato (Equações 3.7 e 3.8), a DQO convertida em metano e presente no biogás (Equação 3.9 e 3.10), e a DQO convertida em metano e perdida dissolvida no efluente e no gás residual (3.11, 3.12 e 3.13).

$$DQO_{lodo} = Y_{DQO}. DQO_{rem} \quad (3.5)$$

$$Y_{DQO} = Y. K(STV - DQO) \quad (3.6)$$

Onde,

DQO_{lodo} = massa diária de DQO convertida em lodo (kgDQOlodo.d⁻¹);

Y_{DQO} = coeficiente de produção de sólidos (kgDQOlodo.kgDQOremov⁻¹).

Y = coeficiente de produção de sólidos (kgSTV.kgDQOremov⁻¹)

$K(STV - DQO)$ = fator de conversão de STV em DQO (1 kgSTV = 1,42 kgDQOlodo)

$$COSO_4, convertida = Q. CSO_4. ESO_4 \quad (3.7)$$

$$DQOSO_4 = COSO_4, convertida. k(DQO - SO_4) \quad (3.8)$$

Onde,

$COSO_4, convertida$ = carga de SO₄ convertida em sulfeto (kgSO₄.d⁻¹);

CSO_4 = concentração média de SO₄ no afluente (kgSO₄.m⁻³);

ESO_4 = eficiência de redução de SO₄ (%);

$DQOSO_4$ = massa diária de DQO utilizada pelas BRS na redução de sulfato (kgDQOSO₄.d⁻¹);

$k(DQO - SO_4)$ = DQO consumida na redução de sulfato (0,667 kgDQOSO₄.kg(SO₄²⁻)⁻¹).

$$DQO_{CH_4} = DQO_{rem} - DQO_{lodo} - DQOSO_4 \quad (3.9)$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4} \cdot R \cdot (273+T)}{P \cdot KDQO \cdot 1000} \quad (3.10)$$

Onde,

DQO_{CH_4} = massa diária de DQO convertida em metano (kgDQO.d⁻¹);

Q_{CH_4} = produção volumétrica teórica máxima de metano (m³.d⁻¹);

R = constante universal dos gases (0,08206 atm.L.mol⁻¹.K⁻¹);

T = temperatura operacional do reator (°C);

P = pressão atmosférica (1 atm)

$KDQO$ = DQO correspondente a 1 mol de CH₄ (0,064 kgDQOCH₄.mol⁻¹).

$$Q_{W_{CH_4}} = Q_{CH_4} \cdot p_w \quad (3.11)$$

$$Q_{O_{CH_4}} = Q_{CH_4} \cdot p_o \quad (3.12)$$

$$Q_{L_{CH_4}} = Q \cdot p_L \cdot f_{CH_4} \cdot \left(\frac{R \cdot (273+T)}{p \cdot KDQO \cdot 1000} \right) \quad (3.13)$$

Onde,

$Q_{W_{CH_4}}$ = perda de metano com o gás residual (m³.d⁻¹);

p_w = percentual da perda de metano com o gás residual (%);

$Q_{O_{CH_4}}$ = outras perdas de metano na fase gasosa (m³.d⁻¹);

p_o = percentual de outras perdas de metano na fase gasosa (%);

$Q_{L_{CH_4}}$ = perda de metano dissolvido no efluente (m³.d⁻¹);

p_L = perda de metano dissolvido no efluente (kgCH₄.m⁻³);

f_{CH_4} = fator de conversão de massa de metano em massa de DQO (4,0 kgDQO.kgCH₄⁻¹).

Uma vez calculadas as perdas de CH₄, foi possível estimar a produção real de metano e de biogás (Equações 3.14 e 3.15).

$$Q_{real_{CH_4}} = Q_{CH_4} - Q_{W_{CH_4}} - Q_{O_{CH_4}} - Q_{L_{CH_4}} \quad (3.14)$$

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{real_{CH_4}}}{C_{CH_4}} \quad (3.15)$$

Onde,

Q_{realCH_4} = vazão real estimada de metano ($m^3 \cdot d^{-1}$);

$Q_{biogás}$ = vazão real estimada de biogás ($m^3 \cdot d^{-1}$);

C_{CH_4} = percentual de metano no biogás.

3.3.3 Cálculo do potencial energético disponível e da potência elétrica do sistema de biogás

O potencial energético disponível depende diretamente da qualidade e da quantidade de biogás, ou seja, quanto maior for o teor de metano, maior será o poder calorífico desse gás, assim como, quanto maior for o volume de biogás, maior será o potencial para gerar energia elétrica.

Em razão da estimativa do volume real de metano e do volume real de biogás, pode-se calcular a energia disponível desse gás (Equação 3.16), a geração diária de energia elétrica (Equação 3.17) e a potência instalada (Equação 3.18)

$$E_{CH_4} = Q_{realCH_4} \cdot PCI_{CH_4} \quad (3.16)$$

$$E_{elétrica} = E_{CH_4} \cdot \eta_{gerador} \quad (3.17)$$

$$PE = \frac{E_{elétrica}}{h} \quad (3.18)$$

Onde,

E_{CH_4} = energia química disponível no biogás diariamente ($kWh \cdot d^{-1}$);

PCI_{CH_4} = poder calorífico inferior do metano (cerca de $10 kWh \cdot m^{-3}$ (LOBATO, 2011));

$E_{elétrica}$ = eletricidade gerada por dia ($kWh \cdot d^{-1}$);

$\eta_{gerador}$ = rendimento elétrico do equipamento de conversão (%);

PE = potência elétrica instalada ($kW \cdot d^{-1}$);

h = regime de geração (h).

3.4 Elaboração do projeto

A elaboração do projeto para geração de energia elétrica a partir do tratamento de esgoto doméstico, em porte condominial, foi pautada em algumas considerações. Previu-se que seriam necessários um tratamento preliminar simplificado, um sistema de recalque, um reator anaeróbio (UASB) e um sistema para coleta, transporte, armazenamento e utilização do biogás.

3.4.1 Tratamento preliminar e sistema de recalque

Segundo Von Sperling (1996), o tratamento preliminar objetiva a remoção de sólidos grosseiros que poderiam danificar o funcionamento dos equipamentos subsequentes. Devido à baixa vazão de contribuição e ao isolamento proporcionado pelo sistema de coleta do esgoto (o qual não se mistura com águas pluviais e não recebe material carreado), o tratamento preliminar previsto consiste apenas de grades de barras, com limpeza manual, para contenção de algum material grosseiro eventual. Ou seja, admitiu-se que não seria necessário a construção de caixa de areia, já que o esgoto proveniente unicamente das atividades residenciais não teria uma quantidade relevante deste material.

As grades e o sistema de recalque (caixa de entrada, poço de sucção e bomba) foram dimensionados de acordo com o manual da Sanepar (SANEPAR, sd) e a NBR 12.208 (ABNT, 1992).

3.4.2 UASB

3.4.2.1 Dimensionamento do reator

O tipo de reator dimensionado nesse estudo foi do modelo UASB. Essa consideração se justifica porque o método de Lobato (2011) utilizado para estimar a produção biogás é baseado nessa configuração de reator para tratamento de esgoto doméstico. Como mostrado no item 2.3 da revisão de literatura, existem reatores de pequena configuração que fazem o uso do biogás que são utilizados com sucesso em diversas partes do mundo, favorecendo o desenvolvimento sustentável, especialmente, do meio rural. Dessa forma, julgou-se essa consideração como aceitável para uma análise inicial, destacando-se, no entanto, que a construção de modelos em tamanho real seria interessante para se obter resultados mais verossímeis.

O dimensionamento dos UASBs foi embasado nas diretrizes da NBR 12.209 (ABNT, 2011) e algumas orientações indicadas em PROSAB (1999). Inicialmente, calculou-se o volume total a ser tratado com base no tempo de detenção hidráulico (TDH) recomendado para vazões médias (8 horas), através da Equação 3.19.

$$TDH = \frac{V_t}{Q} \quad (3.19)$$

Onde,

TDH = tempo de detenção hidráulico (h);

V_t = volume total do reator (m³);

Q = vazão afluyente ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

Uma vez definido o volume total a ser tratado e com os valores indicados por facilidades construtivas (altura de aproximadamente 4,5 metros), calculou-se a área de cada reator (Equação 3.20).

$$A = \frac{V_t}{H} \quad (3.20)$$

Onde,

A = área do reator (m^2);

V_t = volume total do reator (m^3);

H = altura do reator (m).

As dimensões dos reatores assumiram valores inteiros para facilitar a construção. No entanto, uma vez definidas essas medidas, o TDH verdadeiro e o volume verdadeiro foram corrigidos e seus limites verificados.

Posto que os esgotos domésticos são relativamente diluídos, o limite de capacidade nos reatores UASB são definidos pela taxa de aplicação hidráulica, a qual resulta em uma velocidade ascensional que poderá ser suficiente ou não para manter o grau adequado de expansão da manta de lodo, sem que ocorra o arraste da biomassa para a zona de decantação (velocidades recomendadas para vazão média na faixa de 0,5 a 0,7 $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$). A verificação da velocidade ascensional foi feita a partir da Equação 3.21.

$$Vel = \frac{Q \cdot H}{V_r} \quad (3.21)$$

Onde,

Vel = velocidade ascensional no compartimento de digestão (Cdig) ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$);

Q = vazão afluyente ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$);

H = altura do reator (m);

V_r = volume total do reator (m^3).

A estimativa de eficiência do reator em termos de remoção de DQO pode ser calculada a partir da Equação 3.22. Essa equação foi determinada para UASBs operando na faixa de 20 a 27 °C (CAPASSI *et al.*, 2013).

$$EDQO = 100 \cdot (1 - 0,68 \cdot TDH^{-0,35}) \quad (3.22)$$

Onde,

$EDQO$ = eficiência do reator UASB, em termos de remoção de DQO (%);

TDH = tempo de detenção hidráulica (h);

$0,68$ = constante empírica.

3.4.2.2 Sistema de distribuição e de descarga

O esgoto que alimenta os reatores deve ser distribuído continuamente e homogêneo, de modo a evitar escoamentos preferenciais, zonas mortas ou curtos-circuitos, os quais reduzem a eficiência do tratamento. Para isso, recomenda-se o cálculo do número de tubos distribuidores (Equação 3.23) em função da carga orgânica aplicada (característica do tipo de lodo) e da área de influência de cada distribuidor. O lodo de esgotos domésticos normalmente formado nesse tipo de configuração é do tipo floculento com características de concentração média elevadas. Logo, a área de influência indicada para cada distribuidor foi da ordem de 1,5 a 3,0 m² (PROSAB, 1999). Sendo adotada:

$$N_d = \frac{A_r}{A_d} \quad (3.23)$$

Onde,

N_d = número de distribuidores no reator;

A_r = área transversal do reator (m²);

A_d = área de influência do distribuidor (m²).

Verificou-se também se o diâmetro do distribuidor é grande o suficiente para proporcionar uma velocidade descendente inferior a 2,0 m.s⁻¹, saída de ar e prevenir obstruções, tendo que ser, no entanto, pequeno suficiente para evitar acúmulo de material inerte junto ao ponto de descarga do tubo. A literatura indica diâmetros entre 75 e 100 mm com bocal de saída de 50 mm. Além disso, recomenda-se um afastamento de 10 a 20 cm entre a extremidade do bocal de saída do distribuidor e a laje de fundo para evitar obstrução do sistema em caso de acúmulo de alguma parcela de material inerte.

Já os tubos de descarga do efluente tratado foram dimensionados de acordo com a NBR 10.844 (ABNT, 1989), considerando tubos de seção transversal circulares e altura de lâmina líquida igual a 2/3 do diâmetro da seção circular.

3.4.2.3 Separador trifásico

O detalhamento dos reatores UASB está relacionado ao separador trifásico, o qual proporciona a separação da biomassa (compartimento de digestão - Cdig), efluente tratado (compartimento de decantação - Cdec) e gases (câmara de gás). As Equações 3.24, 3.25 e 3.26 foram utilizadas para determinar a taxa de liberação de biogás, velocidade de passagem do Cdig para o Cdec e a taxa de escoamento superficial no Cdec, respectivamente. Sousa (1986) recomenda valores mínimos de $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ e máximo de $5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ para taxa de liberação de gás. Ademais, alguns limites são indicados pela NBR 12.209 (ABNT, 2011) como velocidade de passagem do Cdig para o Cdec menor ou igual a $2,5 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, e taxa de escoamento superficial no Cdec menor ou igual a $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

$$T_{gás} = \frac{Q_{gás}}{A_{(l-g)}} \quad (3.24)$$

$$V_{(dig - dec)} = \frac{Q}{A_{(dig-dec)}} \quad (3.25)$$

$$T_{dec} = \frac{Q}{A_{dec}} \quad (3.26)$$

Onde,

$T_{gás}$ = taxa de liberação de biogás ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$);

$Q_{gás}$ = vazão estimada de biogás ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$);

$A_{(l-g)}$ = área de interface líquido-gás (m^2);

$V_{(dig - dec)}$ = velocidade de passagem do Cdig para o Cdec ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$);

Q = vazão afluyente ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$);

$A_{(dig-dec)}$ = área de passagem do Cdig para o Cdec (m^2);

T_{dec} = taxa de escoamento superficial no Cdec ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$);

A_{dec} = área transversal do Cdec (m^2).

3.4.2.4 Produção de lodo

Chernicharo (1997) apresenta as Equações 3.27 e 3.28 para a estimativa de produção e volume de lodo em reatores UASB. Espera-se, nesses casos, uma baixa produção de sólidos biológicos (lodo) devido às baixas taxas de crescimento dos micro-organismos anaeróbios.

$$P_{lodo} = Y \cdot (S_o - S) \cdot Q \quad (3.27)$$

Onde,

P_{lodo} = produção de sólidos no sistema (kgSST.d^{-1});

Y = coeficientes de sólidos no sistema ($\text{kgSST.kgDQOrem}^{-1}$);

S_o = concentração de DQOtotal afluyente (kgDQO.m^{-3});

S = concentração de DQOtotal efluente (kgDQO.m^{-3});

Q = vazão média do esgoto afluyente ($\text{m}^3.\text{d}^{-1}$).

$$V_{lodo} = \frac{P_{lodo}}{\gamma.C} \quad (3.28)$$

Onde,

V_{lodo} = produção volumétrica de lodo ($\text{m}^3.\text{d}^{-1}$);

γ = densidade do lodo (usualmente da ordem de 1.020 a 1.040 kgSST.m^{-3});

C = concentração de sólidos no lodo (usualmente da ordem de 2% a 5%).

3.4.3 Sistema de biogás

Por fim, o sistema para o aproveitamento energético do biogás foi definido com base em experimento em escala real realizado por Lobato (2011) com sistemas compactos, os quais foram compostos por três reatores UASBs atendendo a populações equivalentes de 320, 640 e 380 habitantes, ou seja, na mesma grandeza da população contribuinte dos condomínios RMo, RSv e PAg. Adicionalmente, as partes que compõem esse sistema foram baseadas no sistema de aproveitamento apresentado por Valente (2015) e segundo recomendações apresentadas na revisão de literatura.

3.5 Estudo de viabilidade

3.3.1 Viabilidade técnica

De acordo com Faria, Silva e Rodrigues (2014), “a viabilidade técnica da tecnologia está relacionada com a possibilidade da tecnologia ser desenvolvida com sucesso pelos pesquisadores no seu ambiente de trabalho”. Por essa razão, é imprescindível buscar informações sobre a disponibilidade de recursos e competências para o seu desdobramento, evitando-se gastos desnecessários e procedendo-se com segurança.

Nesse estudo foram considerados os seguintes aspectos para a avaliação da viabilidade técnica: i) estágio de desenvolvimento da tecnologia, o qual considera o tempo e recursos necessários para conclusão, dificuldades e incertezas tecnológicas; ii) competências técnicas; iii) complexidade, que se refere ao grau de novidade da tecnologia, interação com outras tecnologias e envolvimento da saúde humana e ambiental; e iv) disponibilidade de matéria-prima.

3.3.2 Viabilidade econômica

O estudo de viabilidade econômica é importante, pois serve como parâmetro para definir se o projeto possui retorno financeiro. É importante que a constatação de uma viabilidade econômica aconteça no início do processo, pois, quanto mais tarde um projeto não viável é cancelado, maiores serão as perdas. Além disso, a criação de cenários diferenciados é crucial para a tomada de decisão, uma vez que possibilita a visualização de alternativas, permitindo a escolha de cenários mais ou menos arriscados financeiramente (FARIA, SILVA E RODRIGUES, 2014).

A viabilidade econômica se inicia com a determinação dos custos e, para a sua análise, existem métodos consolidados na literatura, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), e o tempo de retorno do investimento (*payback*). Todas essas análises foram realizadas nessa pesquisa.

3.3.2.1 Estimativa dos custos

O estudo de viabilidade econômica do sistema proposto iniciou com o levantamento dos custos de implantação (CAPEX – *Capital Expenditure*), e de operação e manutenção (OPEX – *Operation Expenditure*).

Os custos relativos à adequação do sistema proposto às instalações existentes não foram determinados. Embora essa investigação seja fundamental para acomodação de um novo sistema em condomínios já construídos, o foco desse estudo foi averiguar se essa tecnologia possui viabilidade técnica e econômica individualmente. Isso significa que, se essa viabilidade for constatada, esta poderá ser uma alternativa para concepção de novos projetos; e a análise das despesas para adequação de projetos já concebidos deverá ser realizada para cada situação.

O CAPEX compreendeu as despesas com a aquisição de materiais e equipamentos, mão-de-obra, instalação de equipamentos e construção civil do sistema, assim como as estruturas auxiliares que possam ser necessárias. O OPEX abrangeu os custos com o consumo

de energia elétrica, gastos com a manutenção do UASB e do sistema de aproveitamento do biogás, e os custos com as atividades de operação.

3.3.2.2 VPL - Valor Presente Líquido

Segundo Silva e Fontes (2005), “o valor presente líquido (VPL) de um projeto de investimento pode ser definido como a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa associado. Em outras palavras, é a diferença do valor presente das receitas menos o valor presente dos custos”. Logo, O VPL representa, basicamente, o cálculo de quanto os futuros pagamentos somados a um custo inicial estariam valendo atualmente (Equação 3.29).

$$VPL_{iM} = -C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{Rt - Ct}{(1+i_M)^t} \quad (3.29)$$

Onde,

VPL_{iM} = valor presente líquido para uma taxa de desconto iM (unidade monetária);

C_0 = custos, despesas ou saída de caixa no tempo zero (unidade monetária);

Rt = receita, benefícios ou entrada de caixa na data t (unidade monetária);

Ct = custos, despesas ou saída de caixa na data t (unidade monetária);

iM = taxa de desconto igual a taxa mínima de atratividade, em %;

t = quantidade de tempo, em anos, que o dinheiro foi investido no projeto, começando no ano 1.

n = número de anos.

Dessa forma, o VPL evidencia o lucro econômico do projeto. Logo, o projeto que apresenta VPL maior que zero é economicamente viável, sendo considerado o melhor cenário aquele que apresentar o maior VPL. Se igual a zero, considera-se que o investimento é indiferente. E no caso de VPL negativo, o investimento não é economicamente viável.

3.3.2.3 TIR – Taxa Interna de Retorno

A TIR é um indicador de rentabilidade do projeto e deve ser comparada com a TMA do investidor. Ou seja, uma TIR maior que a TMA significa que haverá mais lucros investindo-se nesse projeto do que teria investindo-se na TMA. Segundo Soares (1977), a diferença entre a TIR e o VPL é que o VPL tem seu resultado apresentado em valores monetários e a TIR é expressa em percentuais, o que facilita a sua interpretação. A TIR é obtida igualando-se o valor atual dos fluxos de caixa de um projeto a zero (Equação 3.30).

$$VPL = 0 = -C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{Rt - Ct}{(1+TIR)^t} \quad (3.30)$$

Onde,

TIR = taxa interna de retorno (%);

3.3.2.4 *Payback descontado – tempo de retorno*

O *payback* é o indicador do período necessário para que um investimento seja recuperado, em outras palavras, representa o tempo de retorno do investimento. O cálculo do *payback* descontado é feito através do somatório das receitas do fluxo de caixa (valores positivos) até que se alcance o valor dos fluxos de caixa negativos, resultando em uma diferença nula. Para cada ano no fluxo de caixa, os valores foram ajustados descontando-se a TMA, ou seja, considerando o valor do dinheiro no tempo.

3.3.3 *Impacto ambiental*

Nessa etapa da metodologia pretende-se observar os impactos ambientais do sistema proposto. Segundo a resolução nº 001 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1986), considera-se impacto ambiental qualquer modificação das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

- I – a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II – as atividades sociais e econômicas;
- III – a biota;
- IV – as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V – a qualidade dos recursos ambientais.

4 Resultados e Discussão

4.1 Caracterização dos esgotos dos condomínios

4.1.1 Análise preliminar dos dados

A partir da Tabela 3 observam-se os resultados obtidos nas análises das amostras coletadas durante os meses de março a julho de 2018. Os valores referentes às DQOs total e filtrada são resultados da média de três exemplares, pois as análises foram feitas em triplicata, conforme previsto no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

Tabela 3 – Resultado dos ensaios laboratoriais (DQO total e filtrada, pH e temperatura)

Ensaio (data- turno)	RMo				RSv				PAg			
	DQO total (mg.L ⁻¹)	DQO filt. (mg.L ⁻¹)	pH	T (°C)	DQO total (mg.L ⁻¹)	DQO filt. (mg.L ⁻¹)	pH	T (°C)	DQO total (mg.L ⁻¹)	DQO filt. (mg.L ⁻¹)	pH	T (°C)
1 (06/03-M)	344,0	-	9,42	26,0	415,0	-	8,16	-	205,9	-	7,93	-
2 (13/03-T)	-	-	7,79	26,0	592,0	457,0	7,36	31,0	514,4	212,4	6,99	29,0
3 (20/03-M)	85,2	71,7	7,42	26,5	515,7	356,9	7,57	31,0	439,5	316,3	7,43	29,0
4 (28/03-T)	644,8	370,5	6,08	29,0	546,0	420,8	7,07	31,0	394,4	292,4	7,42	28,5
5 (02/04-M)	838,1	617,7	4,75	27,5	688,7	497,6	7,79	31,0	799,7	786,7	7,09	29,0
6 (10/04-M)	559,6	517,0	7,50	-	625,4	438,9	7,15	-	679,6	557,6	7,35	-
7 (18/04-T)	646,7	501,5	7,49	27,5	731,2	480,2	7,65	31,0	273,7	207,9	7,51	28,5
8 (24/04-M)	469,2	406,0	7,41	28,0	590,6	533,8	8,44	29,5	595,7	533,8	7,98	28,2
9 (30/04-T)	884,8	548,0	7,22	29,5	595,1	441,5	7,47	30,5	597,7	340,8	7,87	29,0
10 (08/05-M)	472,5	413,1	9,05	27,8	310,5	247,2	7,68	28,5	859,7	830,0	7,55	28,0
11 (14/05-T)	833,2	826,1	9,15	28,8	531,8	351,1	7,61	29,5	300,1	202,0	7,34	29,2
12 (23/05-M)	833,2	421,5	7,5	28,0	356,9	269,8	6,93	29,5	463,4	322,1	6,39	28,8
13 (04/06-T)	711,9	626,1	9,19	28,1	547,6	357,6	7,19	28,9	327,9	261,4	7,28	28,0
14 (12/06-M)	453,1	426,6	7,35	27,0	625,4	478,3	6,78	29,0	807,4	696,4	8,85	28,2
15 (26/06-M)	900,3	760,3	6,93	27,0	833,9	599,6	6,78	27,5	213,0	177,5	6,71	26,5
16 (03/07-T)	459,5	394,4	5,68	26,8	418,9	343,4	7,39	27,5	429,2	295,0	7,33	27,0

Legenda: M: manhã, T: tarde

Fonte: autora (2019)

Quando algum exemplar de uma triplicata obteve um resultado muito diferente dos outros dois exemplares, a média foi feita considerando apenas as duas amostras com valores semelhantes. Isso aconteceu porque houve um entendimento de que ocorreu algum erro durante o experimento, já que é lógico que ensaios realizados com a mesma amostra possuam resultados aproximados. Dentre os 48 ensaios realizados, quatro valores de DQO foram obtidos a partir da média de dois valores, o restante foi calculado através da média dos três exemplares. Alguns parâmetros não puderam ser medidos em alguns ensaios, como a DQO filtrada no ensaio 1 devido à falta da membrana de filtração, e a temperatura nos ensaios 1 e 6 devido à falta do termômetro.

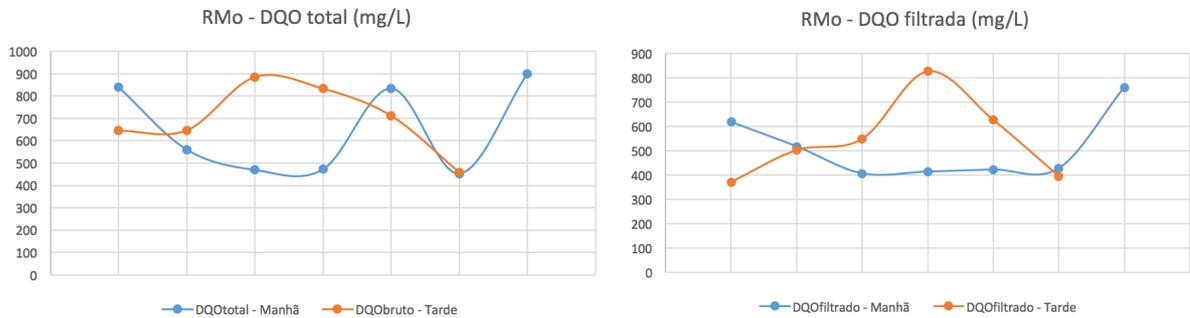
Através da Tabela 3 percebe-se que as temperaturas dos esgotos dos três condomínios são bastante semelhantes e possuem uma variação muito baixa ao longo dos meses, o que já era esperado uma vez que a amplitude térmica em Aracaju é pequena durante todo o ano, sendo pontuais os casos em que a temperatura fica inferior a 20 °C ou superior a 30 °C. O pH apresentou resultados próximos à neutralidade na maior parte dos ensaios, conforme esperado já que se trata de esgoto doméstico, salvo algumas exceções onde se observou uma maior presença de espuma e o pH obteve valores mais elevados. Isso aconteceu com mais frequência no RMo.

Os valores de DQO total do RMo das primeiras três coletas apresentaram resultados baixos, destoando consideravelmente dos valores encontrados para os outros condomínios, além disso, estava sendo percebida uma quantidade grande de espuma nesse esgoto e uma concentração muito baixa de matéria orgânica. Dessa forma, buscou-se o detalhamento do projeto desse condomínio para verificação dos ramais que estavam sendo direcionados ao PV inicialmente selecionado, pois havia a suspeita de que esse PV estaria recebendo apenas a contribuição de águas cinzas. Contudo, este projeto não foi disponibilizado. Dessa forma, a coleta das amostras foi modificada para outro PV cujo esgoto apresentava aspectos mais característicos.

Os gráficos contidos nas Figuras 8, 9 e 10 permitem observar e comparar os resultados obtidos para as coletas realizadas em turnos diferentes com relação à DQO total e filtrada. Para a construção dos gráficos da Figura 8, desconsideraram-se os ensaios 1, 2 e 3, em decorrência da modificação do local de coleta das amostras do RMo. Através dos gráficos observa-se que não é possível fazer uma divisão clara sobre a concentração de matéria orgânica nos esgotos em turnos diferentes para os condomínios RMo e RSv. Ambos possuem valores de DQO

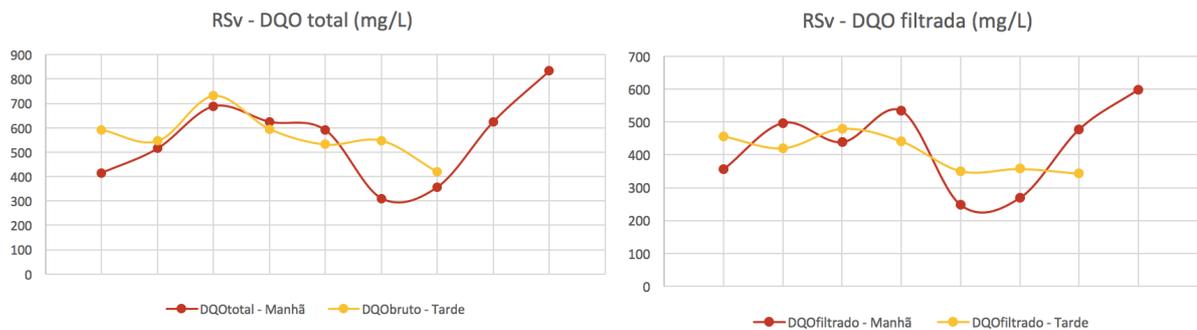
maiores e menores tanto para o turno da manhã como da tarde. No PAg, porém, verifica-se uma predominância de valores de DQO maiores nas amostras coletadas pela manhã.

Figura 8 – Comportamento da DQO total e filtrada segundo turno de coleta do RMo



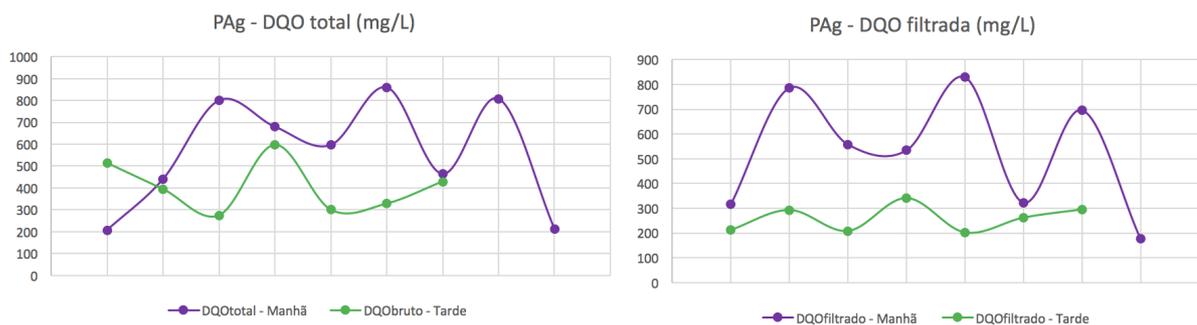
Fonte: autora (2019)

Figura 9 – Comportamento da DQO total e filtrada segundo turno de coleta do RSv



Fonte: autora (2019)

Figura 10 – Comportamento da DQO total e filtrada segundo turno de coleta do PAg



Fonte: autora (2019)

É possível observar também através das Figuras 8 - 10 que o RSv foi o condomínio que apresentou menor variação de DQO durante o dia, o que pode ser um indicativo da menor interferência nas características do esgoto com relação à distância entre o PV e as residências. Como nesse condomínio o PV de coleta estava mais afastado dos imóveis, provavelmente as interferências nas propriedades do esgoto devido a alguma atividade pontual foram menores.

4.1.2 Análise estatística dos dados

Para verificação da normalidade dos dados de DQO bruta dos condomínios, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk. Segundo o teste, pode-se afirmar com nível de significância de 5% que as amostras provêm de uma população normal. As estatísticas W de teste para a normalidade calculadas para cada conjunto de dados se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 – Estatísticas W do teste de Shapiro-Wilk aplicados aos dados de DQO bruta dos condomínios

Empreendimento	W
RMo	0,93673924
RSv	0,97511192
PAg	0,94118189

Fonte: autora (2019)

Os valores mínimos, Q1, Q2 (mediana), Q3 e valores máximos de cada conjunto de dados calculados para construção dos gráficos *box-plot* encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Variáveis estatísticas dos gráficos *box-plot* (DQO bruta e filtrada, pH e temperatura)

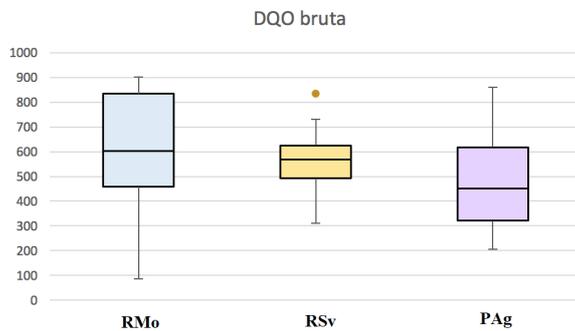
Variável	RMo				RSv				PAg			
	DQO total (mg.L ⁻¹)	DQO filt (mg.L ⁻¹)	pH	T (°C)	DQO total (mg.L ⁻¹)	DQO filt (mg.L ⁻¹)	pH	T (°C)	DQO total (mg.L ⁻¹)	DQO filt (mg.L ⁻¹)	pH	T (°C)
Valor mínimo	85,2	205,9	6,08	26,0	310,5	247,2	6,78	27,5	205,9	177,5	6,71	27,0
Q1	457,9	400,2	7,15	26,9	491,5	354,0	7,13	28,9	320,9	236,9	7,23	28,1
Q2 (mediana)	602,2	426,6	7,46	27,5	569,1	438,9	7,43	29,5	451,4	316,3	7,39	28,5
Q3	833,2	582,8	8,11	28,1	625,4	479,3	7,66	31,0	618,2	545,7	7,63	29,0
Valor máximo	900,3	826,1	9,42	29,5	731,2	599,6	8,44	31,0	859,7	830,0	7,98	29,2

Fonte: autora (2019)

Foram encontrados no total sete *outliers*, sendo um referente à DQO total do RSv (833,9 mg.L⁻¹), um à DQO filtrada do RMo (71,7 mg.L⁻¹), dois ao pH do RMo (4,75 e 5,68), dois ao pH do PAg (6,39 e 8,85), e um à temperatura do PAg (26,5 °C). Esses *outliers* estão representados nas Figuras 11, 12, 13 e 14 através de pontos.

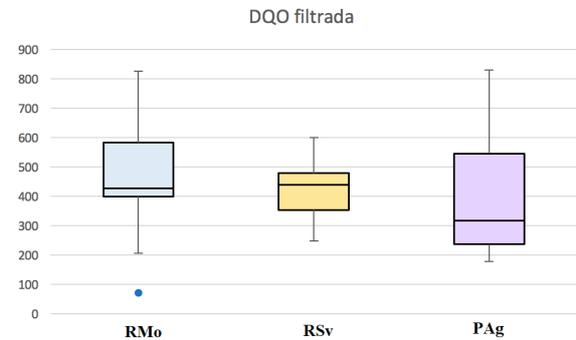
De acordo com a Figura 11, observa-se que houve uma maior dispersão dos dados de DQO total no RMo do que nos outros condomínios. Esses dados possuem uma variabilidade significativa, com valores alternando entre 457,9 mg.L⁻¹ e 833,2 mg.L⁻¹ para esse empreendimento, o que pode estar relacionado com o afastamento do ponto de coleta das amostras com relação ao ponto de geração dos esgotos.

Figura 11 – Box-plot DQO total (mg.L⁻¹)



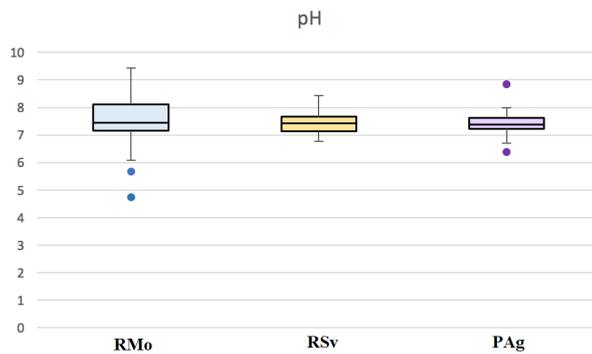
Fonte: autora (2019)

Figura 12 – Box-plot DQO filtrada (mg.L⁻¹)



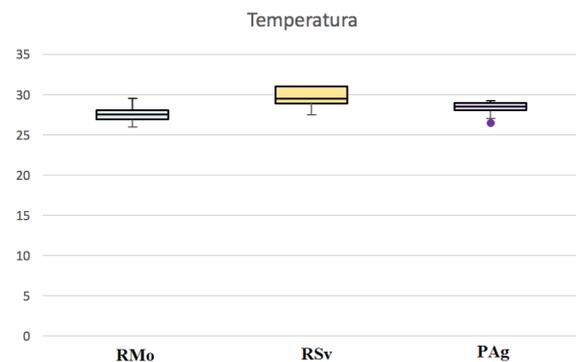
Fonte: autora (2019)

Figura 13 – Box-plot pH



Fonte: autora (2019)

Figura 14 – Box-plot temperatura (°C)



Fonte: autora (2019)

Os resultados referentes aos outros condomínios apresentaram uma menor dispersão, principalmente o RSv. Além disso, observa-se um comportamento relativamente simétrico da caixa do gráfico com relação às medianas nas três situações, o que faz com que a média se aproxime desse valor. Segundo Silva (2006), a distribuição normal é simétrica em torno da média, o que implica que a média, mediana e a moda são coincidentes, e de acordo com o teste de Shapiro-Wilk aplicado anteriormente, aceitou-se a hipótese de que essa amostra vem de uma população normal, logo, o comportamento se mostra coerente.

De acordo Metcalf e Eddy (2003), esgotos com DQO total de 800 mg.L⁻¹ são classificados como forte, e como médio quando possuem DQO de 430 mg.L⁻¹. Neste caso, observa-se que as medianas da DQO bruta dos três condomínios apresentaram valores aproximados, com características predominantes de esgoto médio. Para Von Sperling (2005), a

DQO dos esgotos domésticos costuma ser em torno de 600 mg.L^{-1} . Ao calcular-se a média aritmética da DQO total desconsiderando o *outlier* identificado no RSv, obtêm-se os seguintes resultados: $583,7 \text{ mg.L}^{-1}$ (RMo), $539,4 \text{ mg.L}^{-1}$ (RSv), e $493,8 \text{ mg.L}^{-1}$ (PAG). Isto é, os valores se encontram próximos ao indicado na literatura, com exceção do PAG cujo esgoto exibiu uma DQO total média um pouco menor.

Analisando-se a Figura 12, é possível perceber que diferentemente do gráfico da DQO total, a DQO filtrada apresentou maior dispersão nos dados no PAG, além de não possuir uma simetria das caixas com relação à mediana, principalmente no RMo. Comparando-se os gráficos das Figuras 11 e 12, nota-se que houve uma redução menos significativa da mediana da DQO total do RSv e do PAG com relação à mediana das suas DQOs filtradas, sugerindo uma presença maior de sólidos em suspensão total (SST) no RMo.

Na análise do parâmetro pH (Figura 13) foi identificado o maior número de *outliers*. Isso pode ser justificado devido à interferência repentina que pode acontecer no pH causada por alguma atividade domiciliar que tenha impactado diretamente o esgoto do PV utilizado para realizar a coleta da amostra. Por exemplo, se uma máquina de lavar foi utilizada pelo apartamento mais próximo ao PV logo antes da coleta, a concentração de sabão será maior naquela amostra. Outro fator que contribui para essa suposição, é o de que os *outliers* de pH ocorreram apenas no RMo e no PAG e não ocorreram no RSv, cujo PV encontra-se afastado das habitações.

Pela Figura 14, observa-se uma variabilidade mínima da temperatura durante os meses de coleta. O RSv foi o que obteve uma maior dispersão dos dados com relação a esse parâmetro, possivelmente porque o PV se encontra em um local descoberto, sujeito à ação de intempéries. As temperaturas médias dos esgotos domésticos foram: $27,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (RMo), $29,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (RSv) e $28,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (PAG), ou seja, praticamente iguais às medianas mostradas na Tabela 5 anteriormente. Além disso, detectou-se que todos os processos digestivos estavam ocorrendo na faixa mesofílica.

No que diz respeito à série de sólidos, calcularam-se os parâmetros estatísticos descritivos média aritmética e desvio padrão, os quais estão dispostos na Tabela 6. Constataram-se valores elevados de desvio padrão, em especial nos dados referentes ao RMo, o que reflete à dispersão dos dados demonstrada no gráfico *box-plot* da Figura 11. Analisando-se os dados, nota-se que os SST (sólidos suspensos totais) configuram a menor parcela dos ST (sólidos totais) nas três circunstâncias, com valores médios de $158,5 \text{ mg.L}^{-1}$, $108,1 \text{ mg.L}^{-1}$ e $141,9 \text{ mg.L}^{-1}$ no RMo, RSv e PAG, respectivamente. Isto é, a maior parte dos sólidos contidos

nas amostras encontravam-se dissolvidos. No RMo e no RSv, em média 84% dos sólidos estavam dissolvidos, e essa porcentagem foi de cerca de 74% para o PAg.

Tabela 6 – Resultado dos ensaios laboratoriais (série de sólidos)

Parâmetro	RMo		RSv		PAg	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
ST (mg.L ⁻¹)	988,7	528,0	677,4	172,7	548,4	216,5
STF (mg.L ⁻¹)	304,8	142,5	171,0	107,0	99,7	91,0
STV (mg.L ⁻¹)	683,9	529,5	506,4	156,3	448,7	159,4
SST (mg.L ⁻¹)	158,5	236,8	108,1	37,5	141,9	93,6
SDT (mg.L ⁻¹)	830,1	570,6	569,3	167,9	406,5	234,3

Fonte: autora (2019)

Ainda se referindo à Tabela 6, verifica-se que no RMo há uma presença maior de STF (sólidos totais fixos) do que nos outros condomínios, tanto em termos quantitativos como em porcentagem. Por volta de 31% dos ST são fixos e 69% são voláteis neste empreendimento. Enquanto isso, em média 75% dos sólidos totais são voláteis no RSv, e 82% no PAg.

Metcalf e Eddy (2003) apresentam as concentrações típicas das diversas frações de sólidos em esgotos domésticos, conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Concentrações típicas de frações de sólidos em esgotos domésticos

Característica	Forte	Médio	Fraco
ST (mg.L ⁻¹)	1.230	720	390
STF (mg.L ⁻¹)	605	350	185
STV (mg.L ⁻¹)	655	360	205
SST (mg.L ⁻¹)	400	210	120
SDT (mg.L ⁻¹)	860	500	270

Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (2003)

Comparando-se as Tabelas 6 e 7, verifica-se que as concentrações médias da série de sólidos obtidas nos ensaios do RMo e RSV possuem características predominantemente de esgoto médio a forte, e o PAg se aproxima das propriedades de esgoto médio a fraco. Conforme sugerido anteriormente através da análise dos gráficos box-plot de DQO total e filtrada, o RMo seria o empreendimento com maior teor de SST, fator este confirmado nesses experimentos.

4.2 Estimativa de produção de biogás

Os dados de entrada teóricos admitidos para estimativa de produção de biogás e potencial energético através do *software* Probio 1.0 estão listados na secção 3.2.1 do capítulo Material e Métodos. Foram feitas simulações considerando os três cenários disponibilizados pelo

programa (pessimista, típico e otimista). Na Tabela 8, encontram-se os dados de entrada calculados e obtidos através das análises laboratoriais.

Tabela 8 – Dados de entrada utilizados no *software* Probio 1.0

Parâmetro	RMo	RSv	PAg
População contribuinte (hab)	350	247	1.002
DQO total afluyente (mg.L ⁻¹)	583,7	539,4	493,8
Contribuição <i>per capita</i> de DQO (kg.hab ⁻¹ .dia ⁻¹)	0,11	0,12	0,09
Temperatura (°C)	27,6	29,7	28,4
Vazão afluyente (m ³ .d ⁻¹)	66,92	53,74	191,58

Fonte: autora (2019)

A contribuição *per capita* de DQO para esgotos domésticos varia de 0,09 a 0,11 kg.hab⁻¹.d⁻¹ segundo Von Sperling e Chernicharo (2005). O RMo possuiu contribuição *per capita* de DQO igual a 0,11 kg. hab⁻¹.dia⁻¹, o RSv igual a 0,12 kg. hab⁻¹.dia⁻¹, e o PAg igual a 0,09 kg. hab⁻¹.dia⁻¹. Logo, os três condomínios têm DQO *per capita* dentro ou próximo da faixa fixada por esses autores.

Os resultados disponibilizados pelo Probio 1.0 para estimativa de produção de biogás e do potencial energético são apresentados na Tabela 9. A maior produção volumétrica de biogás estimada foi registrada para o PAg (21,6 m³.d⁻¹ no cenário otimista), porém sua composição foi a que apresentou a menor proporção de metano (69,1%). Embora esse empreendimento tenha obtido as menores concentrações de matéria orgânica, a população de contribuição é mais de três vezes maior que a dos outros condomínios. Logo, a energia química disponível neste empreendimento é significativamente superior.

De acordo com Lobato (2011), a produção volumétrica média de biogás para a situação típica de UASB tratando esgoto doméstico é de 14 NL.hab⁻¹.dia⁻¹. Nesse estudo, a estimativa apontou para os seguintes valores no cenário típico: 16,62 NL. hab⁻¹.dia⁻¹ (RMo), 17,08 NL. hab⁻¹.dia⁻¹ (RSv), e 14,86 NL. hab⁻¹.dia⁻¹ (PAg) (Tabela 9). Ou seja, os resultados desses experimentos apontam para uma produção volumétrica unitária de biogás um pouco acima da média esperada. Isso pode ter acontecido devido às temperaturas dos esgotos, que foram superiores à 25 °C (temperatura padrão considerada no modelo desenvolvido por essa autora).

Ainda com relação à Tabela 9, destaca-se o valor relativo à taxa de emissão de metano. Mesmo considerando que o sistema seria de pequena escala, o não aproveitamento contínuo desse gás pode oferecer um impacto ambiental considerável ao longo do ano. No cenário típico, os sistemas propostos poderiam emitir de 26,6 a 88,8 toneladas de CH₄ anualmente.

Tabela 9 – Estimativa de produção de biogás e potencial energético

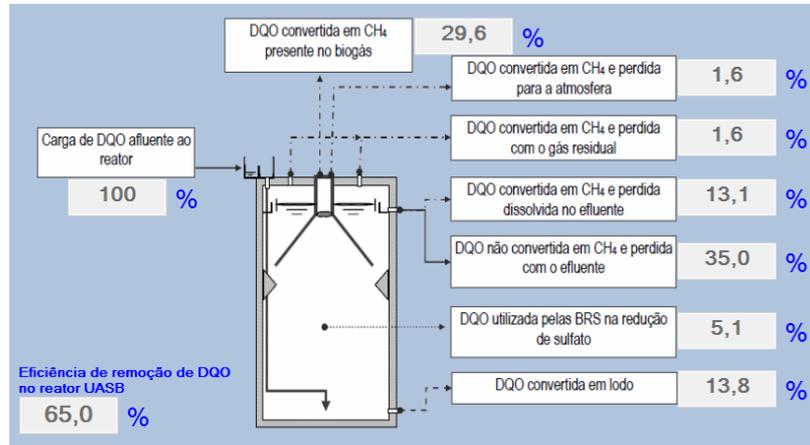
Parâmetros	Unidades	RMo			RSv			PAg		
		Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista	Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista	Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista
Conversão em CH ₄ presente no biogás	%	49,90	64,40	77,30	48,20	63,30	76,60	49,10	62,60	75,40
Proporção CH ₄ no biogás	%	69,70	69,70	69,70	69,40	69,40	69,40	69,10	69,10	69,10
Produção real de CH ₄ no biogás	m ³ .d ⁻¹	3,00	4,50	6,00	2,10	3,20	4,40	8,10	11,40	14,90
Produção real de biogás	m ³ .d ⁻¹	4,30	6,40	8,70	3,10	4,70	6,40	11,70	16,40	21,60
Perda de potencial energético	kWh.d ⁻¹	27,00	22,20	16,00	20,50	16,80	12,20	75,10	60,80	43,70
Produção normalizada de CH ₄	Nm ³ .d ⁻¹	2,70	4,10	5,50	1,90	2,90	4,00	7,30	10,30	13,50
Produção normalizada de biogás	Nm ³ .d ⁻¹	3,90	5,80	7,90	2,80	4,20	5,80	10,60	14,90	19,50
Energia química disponível	kWh.d ⁻¹	27,00	40,10	54,30	19,00	29,00	39,70	72,60	101,90	133,80
Taxa de emissão de CH ₄	ton.ano ⁻¹	17,90	26,60	36,00	12,60	19,20	26,40	48,20	67,60	88,80
Volume unitário de CH ₄ produzido	NL.hab ⁻¹ .d ⁻¹	7,78	11,58	15,66	7,78	11,85	16,24	7,32	10,27	13,49
	Nm ³ .m ³ esgoto ⁻¹	0,04	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,04	0,05	0,07
Volume unitário de biogás produzido	NL.hab ⁻¹ .d ⁻¹	11,17	16,62	22,48	11,20	17,08	23,40	10,58	14,86	19,51
	Nm ³ .m ³ esgoto ⁻¹	0,06	0,09	0,12	0,05	0,08	0,11	0,06	0,08	0,10
Potencial energético unitário	kWh.m ³ esgoto ⁻¹	0,40	0,60	0,80	0,40	0,50	0,70	0,40	0,50	0,70
	kWh.m ³ biogás ⁻¹	6,90	6,90	6,90	6,87	6,87	6,87	6,84	6,84	6,84
	kWh.hab ⁻¹ .d ⁻¹	0,10	0,10	0,20	0,10	0,10	0,20	0,10	0,10	0,20

Nm³: volume e condições padrão de temperatura e pressão: 273 K e 1 atm

Fonte: Probio 1.0 (INCT ETEs SUSTENVÁVEIS, 2018)

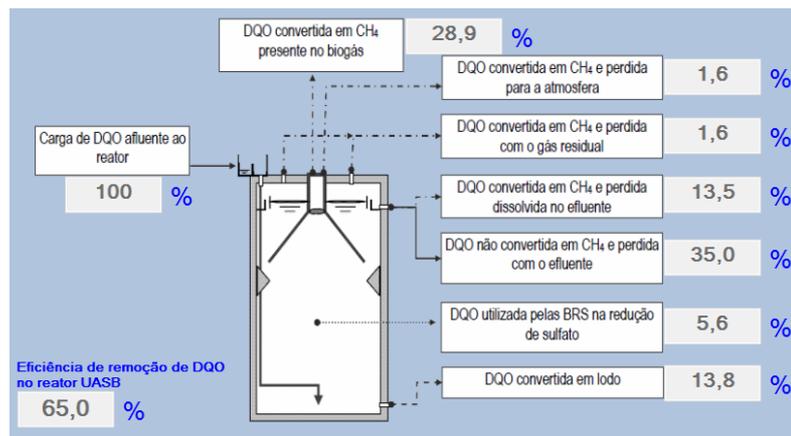
O balanço de massa de DQO dos empreendimentos habitacionais para o cenário típico fornecidos pelo Probio 1.0 podem ser examinados a partir das Figura 15 a 17.

Figura 15 – Balanço de massa de DQO para o cenário típico do RMo



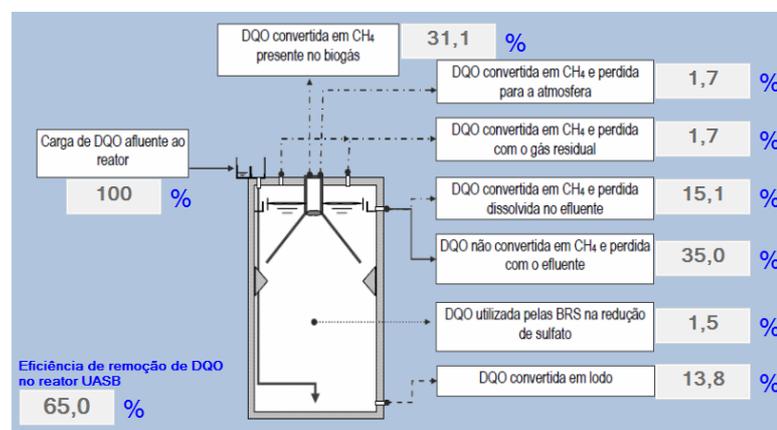
Fonte: Probio 1.0 (INCT ETES SUSTENTÁVEIS, 2018)

Figura 16 – Balanço de massa de DQO para o cenário típico do RSv



Fonte: Probio 1.0 (INCT ETES SUSTENTÁVEIS, 2018)

Figura 17 – Balanço de massa de DQO para o cenário típico do PAg



Fonte: Probio 1.0 (INCT ETES SUSTENTÁVEIS, 2018)

Nota-se, a partir das Figuras 15 a 17, que 35% da DQO afluente não é convertida em metano, logo, é perdida com o efluente. Isso se deve à eficiência estimada para os reatores UASBs, que foi de 65%. A parcela de DQO afluente que é convertida em metano e recuperada no biogás corresponde a apenas 29,6% para o RMo, 28,9% para o RSv, e 31,1% para o PAg. O restante dessa matéria orgânica é convertido em lodo, utilizado pelas BRS, convertido em CH₄ e perdido dissolvido no efluente, perdido com o gás residual e perdido para a atmosfera. Essas parcelas não estão em conformidade com as faixas previstas por Chernicharo (2007), as quais consideram que 50-80% da DQO afluente convertida em metano é recuperada no biogás, 10-30% é perdida com o efluente, e 5 a 15% é convertida em lodo. Isto é, a ineficiência dos sistemas na captação do biogás e no seu desprendimento com relação à massa líquida acarretam numa redução significativa do potencial energético desse gás.

Considerando apenas a DQO afluente que é convertida em CH₄, obtém-se as parcelas referentes ao aproveitamento e perda desse gás, conforme Figuras 18 a 20.

Figura 18 – Porcentagens de DQO convertida em CH₄ no RMo



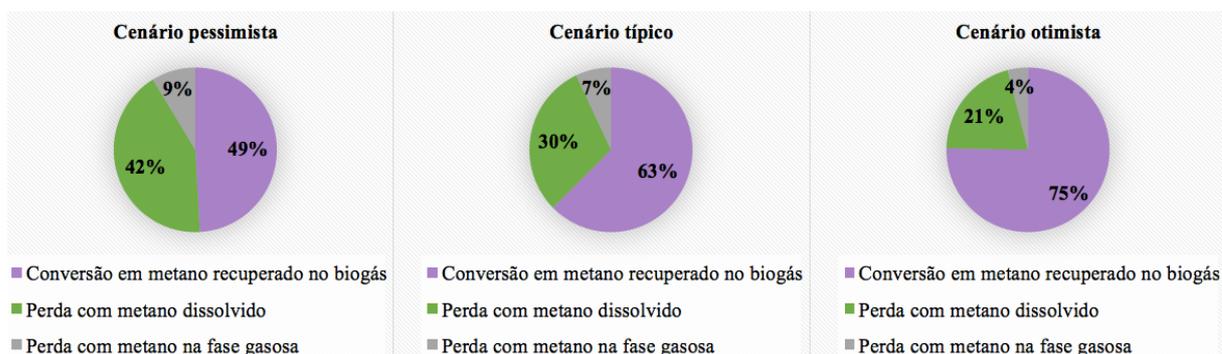
Fonte: Probio 1.0 (INCT ETEs SUSTENTÁVEIS, 2018)

Figura 19 – Porcentagens de DQO convertida em CH₄ no RSv



Fonte: Probio 1.0 (INCT ETEs SUSTENTÁVEIS, 2018)

Figura 20 – Porcentagens de DQO convertida em CH₄ no PAg



Fonte: Probio 1.0 (INCT ETEs SUSTENTÁVEIS, 2018)

A partir da Figura 18 percebe-se que o aproveitamento da matéria orgânica convertida em metano no RMo é substancialmente maior no cenário otimista em comparação com o cenário pessimista (22% a mais de CH₄ pode ser recuperado no biogás). As parcelas relativas ao RSv e ao PAg (Figuras 19 e 20) para os cenários pessimistas, típicos e otimistas foram similares às porcentagens do RMo. É interessante destacar esse fator, pois evidencia a importância da correta manutenção e operação dos sistemas de tratamento de esgoto. Além disso, essa discrepância entre os cenários influencia diretamente no potencial de retorno financeiro pela geração de energia elétrica a partir do biogás.

4.3 Dimensionamento dos sistemas de tratamento

4.3.1 Tratamento preliminar e sistema de recalque

Antes do esgoto doméstico ser direcionado para os reatores UASBs, previu-se um tratamento preliminar simplificado composto por duas grades instaladas em um canal de entrada, sendo a primeira com espaçamento de 30 mm e a segunda com espaçamento de 20 mm, ambas de aço inox AISI 304 (SANEPAR, sd). O canal de entrada deve conter também uma válvula de gaveta de cunha elástica flangeada para bloqueio do esgoto afluente quando for necessário fazer alguma manutenção no sistema, devendo esse esgoto ser encaminhado para o sistema de coleta público nesses casos.

Após o tratamento preliminar, o esgoto deve ser direcionado para o poço de sucção do sistema de recalque. A escolha da bomba desse sistema ocorreu em função da vazão afluente, da altura manométrica e da possibilidade de permitir a passagem de sólidos de até 20 mm. A bomba “ABS Sulzer Submersa Robusta 250T Standard 0,5CV” atende aos requisitos dos três empreendimentos estudados, além de ter um baixo consumo de energia, reduzidos custos de

manutenção e operação com baixo nível de ruído (SULZER, 2014). Considerando um tempo de detenção de 30 minutos, os poços de sucção têm as seguintes dimensões: profundidade de 1,5 m e área transversal de 1,0 m² no RMo e no RSv, e profundidade de 2,5 m e área de 1,69 m² no PAg.

4.3.2 UASB

A Tabela 10 apresenta os dados de entrada utilizados para o dimensionamento dos reatores UASBs, além de algumas considerações sobre parâmetros hidráulicos e cinéticos assumidos para o detalhamento segundo valores recomendados na literatura.

Tabela 10 – Dados de entrada para o dimensionamento dos reatores UASBs

Parâmetro	Unidade	RMo	RSv	PAg	Fonte
População contribuinte	hab.	350	247	1.002	Calculado - autora
Vazão afluyente	m ³ .dia ⁻¹	66,92	53,74	191,58	Calculado - autora
Vazão afluyente <i>per capita</i>	L.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	191,2	217,6	191,2	Calculado - autora
DQO total afluyente	mg.L ⁻¹	583,7	539,4	493,8	Calculado - autora
Y (coef. de produção de sólidos)	kgSST. kgDQOrem ⁻¹	0,15	0,15	0,15	Chernicharo (1997)
Densidade do lodo (γ)	kgSST.m ⁻³	1.030	1.030	1.030	Chernicharo (1997)
Concentração do lodo (C)	%	3	3	3	Chernicharo (1997)
Altura do Cdig	m	2,5	2,5	2,5	NBR 12.209/2011
Altura do Cdec	m	2,0	1,5	2,0	PROSAB (1999)
Abertura para o Cdec	m	0,15	0,15	0,20	PROSAB (1999)
Trespasse do defletor de gases	m	0,10	0,10	0,10	NBR 12.209/2011
Altura da parede vertical do Cdec	m	1,48	0,98	1,31	PROSAB (1999)
Q _{biogás} estimada	m ³ .dia ⁻¹	8,7	6,4	21,6	Probio 1.0

Fonte: autora (2019)

Nas Tabelas 11, 12 e 13, estão os resultados do dimensionamento dos reatores UASBs. Para o início da operação, previu-se que 40% do Cdig dos reatores devem ser preenchidos com lodo para inoculação do sistema (*start up*). Para verificação da taxa de liberação de biogás, considerou-se a estimativa do cenário otimista obtido pelo *software* Probio 1.0, buscando verificar essa taxa na situação de maior risco.

Verificando-se as Tabelas 11-13, é possível notar que os valores determinados se encontram dentro ou muito próximos dos valores recomendados na literatura, o que significa que os reatores propostos possuem condições hidráulicas e cinéticas favoráveis, facilitando à operação e manutenção, e permitindo uma vida útil prolongada. A taxa de liberação de biogás, entretanto, se encontra em torno do limite inferior sugerido por Souza (1986) nos três empreendimentos. O RMo e o PAg possuíram valores aceitáveis (1,04 e 1,09 m³biogás.m⁻².h⁻¹

respectivamente), porém o RSv obteve um valor inferior ($0,9 \text{ m}^3\text{biogás.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$), resultado da baixa vazão de biogás estimada para este condomínio.

Tabela 11 – Resultados do dimensionamento do reator UASB para o RMo

Parâmetro	Unidade	RMo	Valores típicos, máximos e mínimos recomendados	Fonte
TDH no Cdig	h	8,1	8	NBR 12.209/2011
TDH no Cdec	h	2,1	$\geq 1,5$	NBR 12.209/2011
A_r (área do reator)	m^2	5,0	-	-
V_r (volume do reator)	m^3	22,5	-	-
H (altura do reator)	m	4,5	3 - 6	PROSAB (1999)
Vel (velocidade ascensional no Cdig)	m.h^{-1}	0,56	0,5 - 0,7	NBR 12.209/2011
N_d (número de distribuidores)	unid.	4	-	-
$T_{gás}$ (taxa de liberação de biogás)	$\text{m}^3\text{biogás.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$	1,04	1 - 5	SOUZA (1986)
$Vel_{(dig - dec)}$ (velocidade de passagem do Cdig para o Cdec)	m.h^{-1}	1,58	$\leq 2,5$	NBR 12.209/2011
T_{dec} (taxa de escoamento superficial no Cdec)	$\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$	0,65	$\leq 1,2$	NBR 12.209/2011
Eficiência	%	67,26	-	-
Plodo	kgSST.dia^{-1}	3,94	-	-
	$\text{gSST.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$	11,26	-	-
Vlodo	$\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$	0,13	-	-
	$\text{L.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$	0,36	-	-

Fonte: autora (2019)

Tabela 12 – Resultados do dimensionamento do reator UASB para o RSv

Parâmetro	Unidade	RSv	Valores típicos, máximos e mínimos recomendados	Fonte
TDH no Cdig	h	7,1	8	NBR 12.209/2011
TDH no Cdec	h	1,6	$\geq 1,5$	NBR 12.209/2011
A_r (área do reator)	m^2	3,96	-	-
V_r (volume do reator)	m^3	15,8	-	-
H (altura do reator)	m	4,0	3 - 6	PROSAB (1999)
Vel (velocidade ascensional no Cdig)	m.h^{-1}	0,57	0,5 - 0,7	NBR 12.209/2011
N_d (número de distribuidores)	unid.	3	-	-
$T_{gás}$ (taxa de liberação de biogás)	$\text{m}^3\text{biogás.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$	0,9	1 - 5	SOUZA (1986)
$Vel_{(dig - dec)}$ (velocidade de passagem do Cdig para o Cdec)	m.h^{-1}	1,27	$\leq 2,5$	NBR 12.209/2011
T_{dec} (taxa de escoamento superficial no Cdec)	$\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$	0,67	$\leq 1,2$	NBR 12.209/2011
Eficiência	%	65,71	-	-
Plodo	kgSST.dia^{-1}	2,86	-	-
	$\text{gSST.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$	11,57	-	-
Vlodo	$\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$	0,09	-	-
	$\text{L.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$	0,37	-	-

Fonte: autora (2019)

Tabela 13 – Resultados do dimensionamento do reator UASB para o PAg

Parâmetro	Unidade	PAg	Valores típicos, máximos e mínimos recomendados	Fonte
TDH no Cdig	h	8,5	8	NBR 12.209/2011
TDH no Cdec	h	2,0	$\geq 1,5$	NBR 12.209/2011
A_r (área do reator)	m ²	15,0	-	-
V_r (volume do reator)	m ³	67,5	-	-
H (altura do reator)	m	4,5	3 - 6	PROSAB (1999)
Vel (velocidade ascensional no Cdig)	m.h ⁻¹	0,53	0,5 - 0,7	NBR 12.209/2011
N_d (número de distribuidores)	unid.	6	-	-
$T_{gás}$ (taxa de liberação de biogás)	m ³ biogás.m ⁻² .h ⁻¹	1,09	1 - 5	SOUZA (1986)
$Vel_{(dig - dec)}$ (velocidade de passagem do Cdig para o Cdec)	m.h ⁻¹	1,56	$\leq 2,5$	NBR 12.209/2011
T_{dec} (taxa de escoamento superficial no Cdec)	m ³ .m ⁻² .h ⁻¹	0,64	$\leq 1,2$	NBR 12.209/2011
Eficiência	%	67,79	-	-
Plodo	kgSST.dia ⁻¹	9,62	-	-
	gSST.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	9,60	-	-
V_{lodo}	m ³ .dia ⁻¹	0,31	-	-
	L.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	0,31	-	-

Fonte: autora (2019)

A descarga do efluente tratado dos UASBs dimensionados deve acontecer através de dois tubos PVC de 100 mm, posicionados em lados opostos nos reatores. Esses tubos foram dimensionados de acordo com a NBR 10.844 (ABNT, 1989). Na extremidade dessas tubulações (interiormente aos reatores), devem ser instalados dois tês para o barramento da espuma. Além disso, considerou-se a instalação de três tubos PVC com 75 mm de diâmetro para a coleta do lodo, os quais devem ser posicionados paralelamente a 50 cm do fundo dos reatores.

4.3.3 Sistema de biogás

O sistema de biogás contém um conjunto de elementos responsáveis pelo transporte, limpeza e armazenamento do biogás, e uma unidade de geração de energia elétrica, que consiste em um motor de combustão interna. Não foi considerado o aproveitamento da energia térmica decorrente do funcionamento do motogerador. As partes que compõem o sistema de biogás proposto são descritas a seguir.

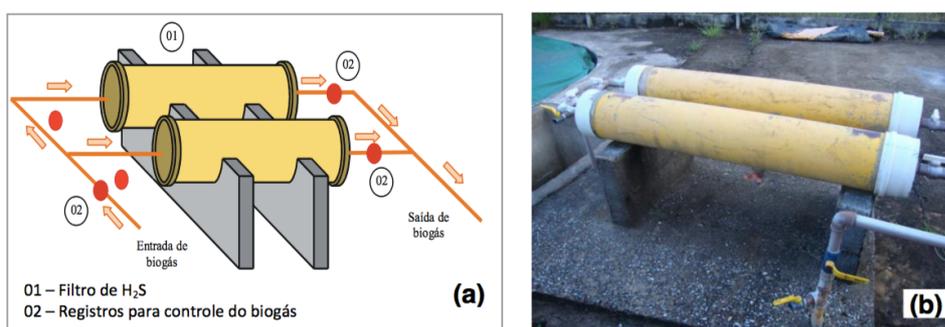
4.3.3.1 Filtro de H₂S

Como visto anteriormente, o H₂S tem alto poder corrosivo e pode danificar os equipamentos, logo, a sua redução auxilia no prolongamento da vida útil dos equipamentos. Um dos processos de dessulfurização envolve a adição de compostos de ferro, que reagem com o H₂S formando sulfetos não solúveis. Lobato (2011) propôs a remoção do sulfeto de

hidrogênio através de dois filtros (diâmetro de 200 mm e comprimento de 1,25 m) em paralelo, utilizando palha de aço número 1 e 2 como material de enchimento, conforme Figura 21.

Segundo a autora, a concentração de H_2S na entrada do motogerador após passar pelo filtro e pelas demais unidades foi de 150 ppm. Isto é, abaixo da concentração considerada prejudicial aos equipamentos, que é acima de 300-500 ppm segundo Holm-Nielsen, Al Seadi e Oleskowicz-Popiel (2009).

Figura 21 – Modelo de filtro de H_2S – (a) desenho esquemático, (b) vista geral



Fonte: Lobato (2011)

4.3.3.2 Reservatório pulmão

O reservatório pulmão serve para armazenar o biogás produzido no UASB diariamente antes de enviá-lo ao motogerador. O reservatório pulmão considerado nesse projeto foi o “*biogas storage bag*” da *Sunrise-ecoenergy* (Figura 22). Trata-se de um reservatório com material específico para o armazenamento de biogás com teor de metano acima de 60%. As principais características do reservatório são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Principais características do reservatório pulmão

Modelo	Biogas storage
Volume	8 m ³
Tempo de vida útil	15 anos
Capacidade de pressão	105 kPA
Resistência a temperatura	- 30° C a 70° C

Fonte: Sunrise-ecoenergy (2018a)

Esse reservatório é confeccionado com uma membrana reforçada em camadas, sendo composta pelos seguintes materiais: malha de poliéster industrial de alta resistência e fibra de vidro na parte interna, e PVC e Teflon como materiais de revestimento (SUNRISE-ECOENERGY, 2018a).

Figura 22 – Modelo de reservatório pulmão



Fonte: Sunrise-ecoenergy (2018a)

4.3.3.3 Compressor

Segundo Lobato (2011), a utilização de um compressor para pressurizar o gás armazenado no reservatório pulmão antes de alimentar o motogerador é necessário devido à pequena produção de biogás. Além disso, um filtro de umidade deve ser colocado na entrada do compressor visando reduzir a umidade do biogás, preservando o funcionamento deste e dos próximos elementos. O compressor utilizado no experimento da autora trabalhou com pressão máxima de 10 bar, a qual foi controlada por um pressostato.

Com base no compressor utilizado por Lobato (2011), determinaram-se os elementos para montagem de um compressor que fosse adequado e seguro à utilização com biogás, segundo orientações do prof. Dr. Wilson Luciano de Souza do Departamento de Engenharia Mecânica da UFS. Os elementos que compõem o compressor são: compressor de refrigeração bitzer modelo v5, motor elétrico 2 cv e um pressostato HLP 110 de 1 a 10 bar.

4.3.3.4 Motogerador

Comercialmente, encontraram-se dois modelos de motogeradores adequados à vazão prevista para os condomínios residenciais. Um da *Greenpower* (a) e outro da Branco (b) (Figura 23). As principais características dos motogeradores estão na Tabela 15.

Com o objetivo de aumentar a eficiência, algumas adaptações foram feitas em um motogerador do modelo B\$T-5000 Bio por Olavo Miranda Martins em sua monografia (LOBATO, 2011). Essas adaptações compreenderam a instalação de um regulador de pressão junto à estrutura do motor, acoplando-se um filtro de gás antes da entrada desse regulador para evitar entupimentos; uma válvula mecânica de controle de vazão para reduzir a vazão de biogás na entrada do motogerador (pressão média de entrada foi de 8 bar e a pressão de saída foi de

1,5 bar). Em seguida, anexou-se um regulador de fluxo eletromecânico, e a saída desse regulador foi ligada na entrada de biogás do motor.

Figura 23 – Modelos de motogeradores à biogás: (a) CC5000-MG, (b) B4T-5000 Bio



Fonte: (a) Sunrise-ecoenergy (2018b), SS Geradores (2015)

Tabela 15 – Principais características dos motogeradores

Modelo	CC5000 - MG	B4T – 5000 Bio
Tempos	4	4
Consumo	3,5 m ³ .h ⁻¹	2,0 m ³ .h ⁻¹
Rotação nominal	-	3.600 rpm
Tensão de saída	220 V	110/220 V
Potência nominal	3 kW	3,6 kW
Eficiência	-	23,5%*

*Eficiência do motogerador obtida experimentalmente (LOBATO, 2011)

Fonte: Lobato (2011)

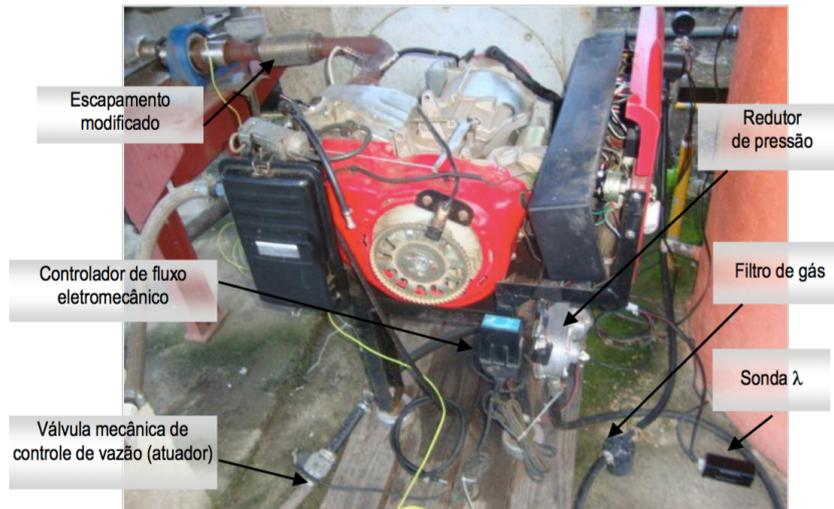
Além disso, instalou-se um sistema eletrônico de controle mistura ar/combustível. Esse sistema altera o fluxo de biogás em função da quantidade de oxigênio presente no coletor de descarga, e é composto por um sensor de O₂ no escapamento e uma central microprocessada reguladora de fluxo. O sensor de oxigênio serviu de referência para a central microprocessada controlar o regulador de fluxo eletromecânico. Programou-se essa central para manter o fator *lambda* (λ)¹ da mistura em torno de um. Esse fator se refere à razão entre a relação mássica real ar/combustível e a relação teórica ar/combustível (LOBATO, 2011). Na Figura 24, é possível visualizar as adaptações realizadas no motogerador.

De acordo com Lobato (2011), a potência gerada pelo motogerador adaptado foi avaliada por Martins (2010), utilizando um banco de resistência elétrica para dissipar a energia gerada. Os ensaios de eficiência do motogerador foram realizados com o motor original

¹ Quando o fator λ tem valor igual a 1, a mistura é estequiométrica, pois tem proporção real igual a teórica. Para valores superiores a 1, a mistura é considerada “pobre”, com menor teor de combustível que o ideal teórico, e a mistura é considerada “rica” com valores inferiores a 1 (LOBATO, 2011).

utilizando gasolina e com o sistema utilizando biogás pressurizado. A eficiência do motogerador utilizando biogás como combustível foi maior do que a eficiência obtida com gasolina (23,5% com biogás contra 19% com gasolina). Esse aumento pode ter sido ocasionado devido ao sistema controlador de fluxo instalado, o qual permitiu uma mistura ar/combustível na condição estequiométrica ($\lambda = 1$).

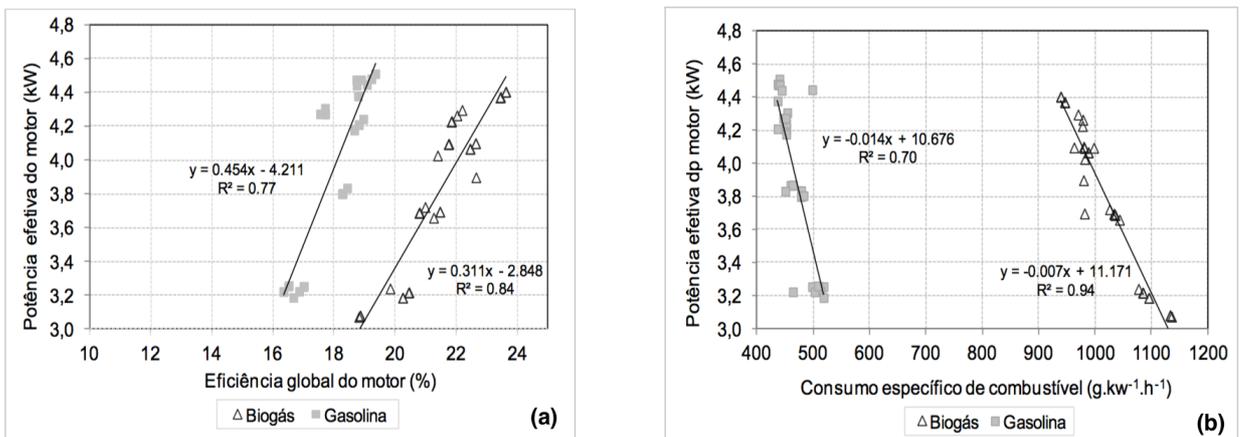
Figura 24 – Adaptações realizadas no motogerador modelo B4T-5000 Bio



Fonte: Lobato (2011)

Neste experimento também foi medido o consumo de combustível. O consumo específico para gasolina foi bastante inferior ao do biogás, o que já era esperado pois esses combustíveis se encontram em condições físicas diferentes, além de possuírem densidades e potenciais caloríficos distintos (Figura 25).

Figura 25 – (a) Potência efetiva x eficiência do motogerador, (b) Potência efetiva x consumo específico de combustível



Fonte: Lobato (2011)

Nos gráficos da Figura 25, é possível observar o comparativo do rendimento do motogerador (a) e o consumo específico de combustível (b) em função da potência efetiva. Volumetricamente, o consumo médio de biogás obtido para o motogerador alimentado com biogás foi de $1,7 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (LOBATO, 2011), isto é, um pouco inferior ao informado pelo fabricante, que é de $2,0 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (BRANCO, 2007).

Por fim, o motogerador adaptado apresentou autossuficiência elétrica. A potência elétrica média disponível, já considerando o consumo devido à compressão do biogás foi da ordem de 2,3 kW (LOBATO, 2011).

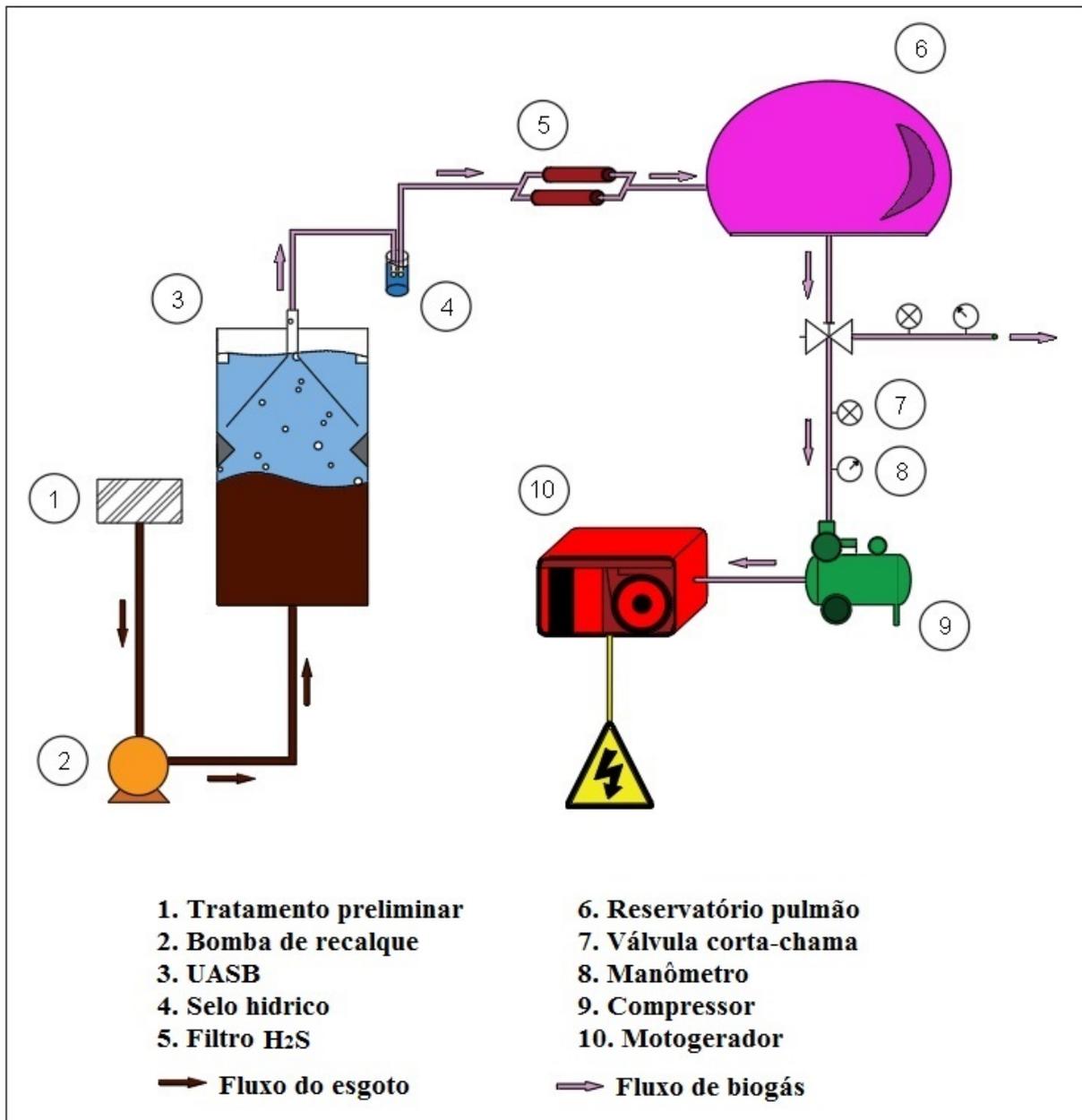
4.3.3.5 Sistema de transporte, segurança e manutenção

A tubulação de transporte do biogás e suas conexões devem ser resistentes contra impactos mecânicos, químicos e térmicos. Previu-se a instalação da tubulação com inclinação de 0,5 a 2,0% e a colocação de purgadores para remoção da umidade. Esses purgadores devem ter fácil acesso e evitar o escapamento de biogás. Após os UASBs, previu-se a colocação de um selo hídrico, responsável por impedir o retorno do biogás ao reator, e na saída do gasômetro a instalação de uma válvula corta-chama e um manômetro.

Além disso, pressupõe-se a instalação de uma linha de biogás paralela à linha principal logo após o gasômetro com o objetivo de redirecionar esse gás quando forem feitas manutenções na linha principal, ou quando houver produção excedente, segundo recomendações da NBR 12.209 (ABNT, 2011). Esta linha de biogás deve ser composta por válvulas corta-chama e de alívio (VALENTE, 2015).

A seguir, apresenta-se um esquema de todo o processo de tratamento projetado (Figura 26). Por fim, vale destacar que os dimensionamentos do tratamento preliminar e dos reatores UASBs foram feitos de forma individual para cada empreendimento habitacional, de modo a se obter o melhor custo-benefício e eficiência do processo de tratamento. Já o sistema de biogás se baseou em experimentos práticos executados no Brasil e, por não existir nenhuma norma específica de dimensionamento desses sistemas, além da baixa disponibilidade de modelos elétricos e mecânicos adequados à vazão de biogás em questão, admitiu-se a utilização do mesmo sistema para as três situações. Dessa forma, a diferença na operação dos sistemas de biogás estaria relacionada com o tempo de funcionamento do motogerador, que deve ser maior quanto maior for a vazão de biogás disponível.

Figura 26 – Desenho esquemático do sistema de tratamento de esgoto com aproveitamento energético do biogás proposto para os empreendimentos habitacionais



Fonte: autora (2019)

4.4 Estimativa do potencial energético disponível

Uma vez estimada a produção de biogás e definidas as partes constituintes do projeto, procedeu-se com os cálculos do potencial energético disponível para cada empreendimento (Tabelas 16-18). O número de horas de funcionamento dos motogeradores por dia foi calculado em função do consumo médio de biogás obtido no experimento citado na seção anterior. Nota-se que para os dois primeiros empreendimentos (RMO e RSv), o volume de biogás disponível seria

suficiente para alimentar o sistema por apenas 2 a 5 horas diariamente, enquanto no condomínio PAg, o motogerador funcionaria por até 12,71 horas no melhor cenário.

Tabela 16 – Estimativa do potencial energético do RMo

RMo	Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista
Produção real de biogás (m ³ .dia ⁻¹)	4,30	6,40	8,70
Funcionamento do motogerador (h)	2,53	3,76	5,12
Energia química disponível (kWh.dia ⁻¹)	27,00	40,10	54,30
Rendimento do motogerador (%)	23,5	23,5	23,5
Eletricidade gerada por dia (kWh.dia ⁻¹)	6,35	9,42	12,76
Potência elétrica instalada (kW)	2,51	2,50	2,49

Fonte: autora (2019)

Tabela 17 – Estimativa do potencial energético do RSv

RSv	Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista
Produção real de biogás (m ³ .dia ⁻¹)	3,10	4,70	6,40
Funcionamento do motogerador (h)	1,82	2,76	3,76
Energia química disponível (kWh.dia ⁻¹)	19,00	29,00	39,70
Rendimento do motogerador (%)	23,5	23,5	23,5
Eletricidade gerada por dia (kWh.dia ⁻¹)	4,47	6,82	9,33
Potência elétrica instalada (kW)	2,45	2,47	2,48

Fonte: autora (2019)

Tabela 18 – Estimativa do potencial energético do PAg

PAg	Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista
Produção real de biogás (m ³ .dia ⁻¹)	11,70	16,40	21,60
Funcionamento do motogerador (h)	6,88	9,65	12,71
Energia química disponível (kWh.dia ⁻¹)	72,60	101,90	133,80
Rendimento do motogerador (%)	23,5	23,5	23,5
Eletricidade gerada por dia (kWh.dia ⁻¹)	17,06	23,95	31,44
Potência elétrica instalada (kW)	2,48	2,48	2,47

Fonte: autora (2019)

A eletricidade gerada por dia no cenário típico do PAg é cerca de 60% maior que a eletricidade gerada no RMo e 71% maior que a eletricidade gerada no RSv. Isto é, a eletricidade gerada diariamente é função direta do tempo de funcionamento do motogerador, da vazão de biogás disponível e da energia química do biogás, a qual está relacionada ao teor de metano desse gás.

Embora o dimensionamento dos reatores UASBs tenha resultado em eficiências superiores à considerada no *software* Probio, que foi de 65%, e o sistema de tratamento de biogás permita uma melhora na composição desse gás antes da sua utilização, devido à remoção

da umidade e dos teores de H_2S , os cálculos para a estimativa do potencial energético foram realizados considerando os resultados apresentados no modelo, ou seja, a favor da segurança.

4.5 Análise de viabilidade técnica

A análise de viabilidade técnica se estabeleceu em função de quatro critérios: i) estágio de desenvolvimento da tecnologia, ii) competências técnicas, iii) complexidade, e iv) disponibilidade de matéria-prima.

Com relação ao primeiro quesito, as tecnologias referentes às etapas de tratamento preliminar e sistema de recalque podem ser consideradas bem desenvolvidas, a julgar pela infinidade de projetos semelhantes em operação nos mais diversos segmentos, inclusive em empreendimentos habitacionais, os quais normalmente já possuem sistemas de recalque para o sistema de abastecimento de água. Os recursos necessários para a instalação desses sistemas são facilmente encontrados na própria região, não sendo esperadas dificuldades e incertezas tecnológicas para a implantação e operação desses elementos.

Os reatores UASBs são bastante utilizados no Brasil para o tratamento de esgoto domésticos em estações de tratamento (BRASIL, 2015b). No projeto proposto, a construção desses reatores seria em concreto armado, uma tecnologia conhecida e corriqueira na prática da construção civil da região. Entretanto, considerou-se que o separador trifásico seria em fibra de vidro devido à dificuldade em se construir uma campânula em concreto armado para captação do biogás e à leveza do material. Segundo Possetti *et al.* (2018), a fibra de vidro é um material altamente resistente à corrosão e vem sendo adotado em diversos elementos dos sistemas de tratamento de esgoto. Quanto à disponibilidade desse material, identificou-se que já existe empresa especializada na confecção de estruturas em fibra de vidro em Aracaju.

O estágio da tecnologia para o sistema de biogás proposto foi o que se considerou menos desenvolvido. O principal motivo para isso foi a falta de equipamentos apropriados a projetos de pequeno porte. Outro agravante foi a dificuldade para obter informações relativas à especificação dos modelos de motogeradores disponíveis no mercado para pequenas vazões. Por exemplo, não se conseguiu obter a eficiência desses equipamentos junto aos fabricantes, sendo necessário se basear nos resultados obtidos experimentalmente por Martins (2010) para o dimensionamento do projeto. Além disso, não se encontrou motogeradores a biogás para a vazão de projeto sendo comercializados na região. Com isso, a estimativa dos recursos e do tempo necessário para a instalação do sistema de biogás ficam comprometidos.

Quanto à implantação, operação e manutenção dos sistemas de tratamento do esgoto, semelhante ao que acontece com o estágio de desenvolvimento da tecnologia, há um conhecimento teórico e prático consolidado, tanto por parte dos projetistas quanto dos profissionais envolvidos na construção, assim como uma disponibilidade abundante de matéria-prima. Contudo, a competência técnica se torna um desafio quando há a proposição de sistemas conhecidos de maneira inovadora, como o sistema de biogás apresentado nessa pesquisa. Algumas barreiras para o desenvolvimento das tecnologias de biogás no Brasil são a reduzida quantidade de projetos de referência e a dificuldade de acesso às informações, que acabam por desestimular investidores e profissionais da área. Destaca-se, portanto, a necessidade da capacitação de especialistas e de estudos que analisem a viabilidade de tais tecnologias, tendo em vista os benefícios potenciais evidenciados em diversos projetos ao redor do mundo.

Dessa maneira, pode-se considerar que o sistema para aproveitamento energético de biogás a partir do tratamento de esgoto doméstico ainda apresenta um certo grau de complexidade quando são considerados sistemas de pequena escala (empreendimentos habitacionais). Em áreas rurais, a produção de biogás em biodigestores tratando dejetos animais e alimentares já é bastante difundida, conseqüentemente, esses sistemas deixaram de ser considerados complexos. Por outro lado, novas alternativas precisam ser estudadas com o objetivo de atender às demandas futuras, sejam elas ambientais, sociais e/ou econômicas.

4.6 Análise de viabilidade econômica

4.6.1 Estimativa de custos

No que se refere à estimativa de custos, foram levantadas as despesas referentes à implantação dos sistemas propostos - *Capital Expenditure* (CAPEX). O CAPEX corresponde então a uma parcela única, ou seja, diz respeito ao valor necessário para a construção de todo o sistema de tratamento: tratamento preliminar + UASB + sistema de biogás. Por outro lado, os custos de operação e manutenção (*Operation Expenditure* – OPEX) são contínuos. Para as análises de viabilidade econômica, estimou-se o OPEX para o período de um ano, o qual deverá ser contabilizado até o final da vida útil do projeto.

4.6.1.1 *Capital Expenditure* - CAPEX

O CAPEX dos sistemas de tratamento de esgoto e aproveitamento do biogás estão dispostos nas Tabelas 19-21 e o detalhamento nos Apêndices A, B e C. Esses custos foram obtidos: i) através do Sistema de Orçamento de Obras de Sergipe (ORSE, 2018), com relação aos itens

poço de sucção, concreto armado, impermeabilização, tubos e conexões, e filtro H₂S; ii) diretamente com fornecedores, relativos aos custos para inoculação e sistema trifásico do UASB; e iii) através de sites confiáveis de venda para os demais elementos. Nestes casos, vários sites foram utilizados como base para compor o custo unitário final de cada item, evitando, dessa maneira, valores fora da média do mercado.

Tabela 19 – CAPEX do sistema completo do RMo

RMo	Custo unitário	Custo total (R\$)
Tratamento preliminar		
Válvula de gaveta	R\$ 19,10/unid.	R\$ 19,10
Grades	R\$ 19,10/m	R\$ 19,10
Poço de sucção	R\$ 66,93/m	R\$ 100,40
Bomba de recalque	R\$ 1.450,00/unid.	R\$ 2.900,00
UASB		
Inoculação	R\$ 95,00/m ³	R\$ 475,00
Concreto armado	R\$ 1.340,00/m ³	R\$ 6.767,30
Impermeabilização	R\$ 59,45/m ²	R\$ 5.409,95
Tubos e conexões	Apêndice A	R\$ 1.078,80
Separador trifásico (fibra de vidro)	R\$ 1.002,20/m ²	R\$ 5.011,08
Sistema de biogás		
Filtro H ₂ S	Apêndice A	R\$ 148,55
Reservatório pulmão	R\$780,00/unid.	R\$ 1.560,00
Compressor	Apêndice A	R\$ 1.889,82
Motogerador	R\$2.088,77/unid.	R\$ 4.017,54
Sistema de transporte e segurança	Apêndice A	R\$ 615,26
TOTAL (R\$)		R\$ 30.031,00

Fonte: autora (2019)

Tabela 20 – CAPEX do sistema completo do RSv

RSv	Custo unitário	Custo total (R\$)
Tratamento preliminar		
Válvula de gaveta	R\$ 19,10/unid.	R\$ 19,10
Grades	R\$ 19,10/m	R\$ 19,10
Poço de sucção	R\$ 66,93/m	R\$ 100,40
Bomba de recalque	R\$ 1.450,00/unid.	R\$ 2.900,00
UASB		
Inoculação	R\$ 95,00/m ³	R\$ 376,20
Concreto armado	R\$ 1.340,00/m ³	R\$ 6.164,28
Impermeabilização	R\$ 59,45/m ²	R\$ 4.874,90
Tubos e conexões	Apêndice A	R\$ 1.028,80
Separador trifásico (fibra de vidro)	R\$ 1.002,20/m ²	R\$ 3.968,78
Sistema de biogás		
Filtro H ₂ S	Apêndice A	R\$ 148,55
Reservatório pulmão	R\$780,00/unid.	R\$ 1.560,00
Compressor	Apêndice A	R\$ 1.889,82
Motogerador	R\$2.088,77/unid.	R\$ 4.017,54
Sistema de transporte e segurança	Apêndice A	R\$ 615,26
TOTAL (R\$)		R\$ 27.701,82

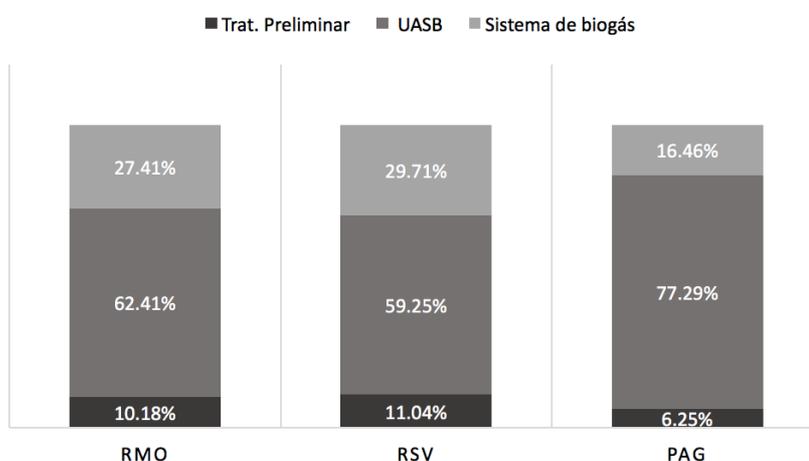
Fonte: autora (2019)

Tabela 21 – CAPEX do sistema completo do PAg

PAg	Custo unitário	Custo total (R\$)
Tratamento preliminar		
Válvula de gaveta	R\$ 19,10/unid.	R\$ 19,10
Grades	R\$ 19,10/m	R\$ 19,10
Poço de sucção	R\$ 66,93/m	R\$ 167,33
Bomba de recalque	R\$ 1.450,00/unid.	R\$ 2.900,00
UASB		
Inoculação	R\$ 95,00/m ³	R\$ 1.425,00
Concreto armado	R\$ 1.340,00/m ³	R\$ 13.668,61
Impermeabilização	R\$ 59,45/m ²	R\$ 6.598,95
Tubos e conexões	Apêndice A	R\$ 1.930,04
Separador trifásico (fibra de vidro)	R\$ 1.002,20/m ²	R\$ 15.033,24
Sistema de biogás		
Filtro H ₂ S	Apêndice A	R\$ 148,55
Reservatório pulmão	R\$780,00/unid.	R\$ 1.560,00
Compressor	Apêndice A	R\$ 1.889, 82
Motogerador	R\$2.088,77/unid.	R\$ 4.017,54
Sistema de transporte e segurança	Apêndice A	R\$ 615,26
TOTAL (R\$)		R\$ 50.011,64

Fonte: autora (2019)

A análise de viabilidade econômica foi elaborada com base em um período de vida útil de 25 anos. Para que isso fosse possível, considerou-se no CAPEX a substituição de alguns equipamentos que possuem vida útil inferior à de projeto, sendo estes: bomba de recalque, reservatório pulmão e motogerador; além do item impermeabilização, relativo à recuperação da camada protetora no reator. Previu-se que essa substituição ocorreria uma vez durante a vida útil do projeto, quando o equipamento não tivesse mais capacidade para operar. Na Figura 27, observa-se a proporção do CAPEX com relação às três etapas do tratamento.

Figura 27 – Frações do CAPEX segundo etapa do tratamento (RMO, RSV e PAg)

Fonte: autora (2019)

Na composição do CAPEX nota-se que o reator UASB foi o elemento responsável pela maior parte dos custos (62,41% no RMo; 59,25% no RSV; e 77,29% no PAg). O principal motivo para isso foram as altas despesas com concreto armado e, principalmente, com o separador trifásico. Durante as cotações, verificou-se a existência de diversas empresas que fabricam módulos para o tratamento de esgotos de Brasil, com diversos tipos de sistemas compactos, alguns inclusive englobando o tratamento primário e pós-tratamento. No entanto, todos orçamentos solicitados com essas empresas não foram respondidos.

As despesas relativas ao tratamento preliminar foram mais expressivas para os RMo e RSV do que para o PAg. Isso se deve, principalmente, pelo fato de que no condomínio PAg a bomba de recalque seria utilizada próximo da sua capacidade máxima. Já nos outros condomínios, como a vazão é muito baixa, a bomba funcionaria com uma folga maior, ou seja, superdimensionada.

Finalmente, os custos com o sistema de biogás corresponderam a 27,41% e 29,71% das despesas para o RMo e RSV respectivamente, e a 16,46% para o PAg. A proporção das despesas com o sistema de biogás foi menor para o PAg porque o sistema adotado foi o mesmo para os três empreendimentos, logo, a maior parcela do CAPEX nesse condomínio foi devido aos reatores, que precisariam ser maiores para atender à demanda, e não ao sistema de biogás, que seria capaz de atender às necessidades das três situações.

4.6.1.2 Operation Expenditure - OPEX

Os OPEX dos sistemas estão dispostos nas Tabelas 22-24. O consumo de energia elétrica do próprio sistema não foi considerado nesse levantamento porque a potência elétrica média disponível obtida em Lobato (2011) para o conjunto motogerador adotado já está considerando o consumo de energia devido à compressão do biogás e ao seu funcionamento.

Tabela 22 – OPEX anual do sistema completo do RMo

RMo		Custo unitário	Quantitativo	Custo total (R\$)
Manutenção do UASB		R\$ 3,00/hab.	350	R\$ 1.050,00
	Manutenção de geração	R\$ 0,021/kWh	4.593,78	R\$ 96,47
	Reparação de geração	R\$ 0,0315/kWh	4.593,78	R\$ 144,70
	Manutenção do reservatório	R\$ 0,012/	2.883,50	R\$ 34,60
Sistema	pulmão	m ³ biogas.ano		
de biogás	Manutenção do sistema de	R\$ 0,002/	2.883,50	R\$ 5,77
	transporte	m ³ biogas.ano		
	Mão de obra do operador	R\$ 25,43/h	8	R\$ 203,44
	Custos gerais	R\$ 24,5/kW	2,5	R\$ 61,09
			TOTAL	R\$ 1.596,07

Fonte: autora (2019)

Tabela 23 – OPEX anual do sistema completo do RSv

RSv		Custo unitário	Quantitativo	Custo total (R\$)
Manutenção do UASB		R\$ 3,00/hab.	247	R\$ 741,00
Sistema de biogás	Manutenção de geração	R\$ 0,021/kWh	3.358,62	R\$ 70,53
	Reparação de geração	R\$ 0,0315/kWh	3.358,62	R\$ 105,80
	Manutenção do reservatório pulmão	R\$ 0,012/m ³ biogas.ano	2.117,00	R\$ 25,40
	Manutenção do sistema de transporte	R\$ 0,002/m ³ biogas.ano	2.117,00	R\$ 4,23
	Mão de obra do operador	R\$ 25,43/h	8	R\$ 203,44
	Custos gerais	R\$ 24,5/kW	2,5	R\$ 61,25
			TOTAL	R\$ 1.211,66

Fonte: autora (2019)

Tabela 24 –OPEX anual do sistema completo do PAg

PAg		Custo unitário	Quantitativo	Custo total (R\$)
Manutenção do UASB		R\$ 3,00/hab.	1.002	R\$ 3.006,00
Sistema de biogás	Manutenção de geração	R\$ 0,021/kWh	11.319,48	R\$ 237,71
	Reparação de geração	R\$ 0,0315/kWh	11.319,48	R\$ 356,56
	Manutenção do reservatório pulmão	R\$ 0,012/m ³ biogas.ano	7.117,50	R\$ 85,41
	Manutenção do sistema de transporte	R\$ 0,002/m ³ biogas.ano	7.117,50	R\$ 14,24
	Mão de obra do operador	R\$ 25,43/h	8	R\$ 203,44
	Custos gerais	R\$ 24,5/kW	2,5	R\$ 61,25
			TOTAL	R\$ 3.964,61

Fonte: autora (2019)

Os valores referentes ao OPEX dos UASBs foram calculados de acordo com Von Sperling (2005), que prevê um custo anual, em média, de R\$3,00 por habitante, e os custos relativos ao sistema de biogás foram calculados com base em valores proporcionais aos apresentados em BRASIL (2017b). Considerou-se a visita de um operador especialista duas vezes por ano para eventuais manutenções. Para o funcionamento do motogerador, por se tratar de um acionamento simples e manual, admitiu-se que este poderia ser feito por funcionário do próprio condomínio, como acontece com os sistemas de água. Da mesma forma, a limpeza dos componentes do tratamento preliminar também seria executada por operário local.

A Tabela 25 traz um resumo de todos os custos de implantação, operação e manutenção dos empreendimentos estudados.

Tabela 25 – Resumos do CAPEX e OPEX dos empreendimentos habitacionais

Custo	Unidade	RMo	RSv	PAg
CAPEX	R\$	30.031,00	27.701,82	50.011,64
OPEX	R\$.ano ⁻¹	1.596,07	1.211,66	3.964,61
CAPEX per capita	R\$.hab ⁻¹	85,80	112,15	49,91
OPEX per capita	R\$.hab ⁻¹ . ano ⁻¹	4,56	4,91	3,96

Fonte: autora (2019)

Nota-se que os custos tanto para implantação como para operação e manutenção dos sistemas propostos, quando divididos pela quantidade de moradores, podem ser considerados baixos (na faixa de R\$ 50,00 a R\$ 112,00 para o CAPEX, e R\$ 4,00 – R\$5,00 por ano para o OPEX). Isso não necessariamente significa que o projeto possui viabilidade econômica, a qual foi analisada na seção 4.6.3; todavia, tendo em vista os benefícios ambientais e sociais mencionados anteriormente, acredita-se que essa proposta tem potencial para aplicação.

4.6.2 Economia anual após aproveitamento energético do biogás

Através da estimativa de eletricidade gerada obtida no item 4.4, e considerando a tarifa cobrada por kWh pela distribuidora de energia elétrica de Sergipe (ENERGISA/SE), obtém-se a economia gerada após a implantação do sistema. Considerou-se, portanto, o consumo de energia nas áreas comuns dos condomínios, ou seja, a economia gerada seria com relação ao gasto anual com energia nessas áreas, e não com relação às despesas em cada unidade habitacional.

Segundo a ANEEL (2017a), existe um tipo de tarifa que sinaliza aos consumidores a variação do valor de energia conforme o dia e horário de consumo – tarifa branca. Todas as distribuidoras de energia do Brasil devem atender aos pedidos de adesão à tarifa branca dos consumidores com média mensal superior a 500 kWh, e em 2019, essa obrigação passa a valer para unidades com consumo médio superior a 250 kWh/mês, ou seja, unidades de baixa tensão (residências, pequenos comércios, etc).

No caso da tarifa branca, os custos de energia variam para os horários de ponta, fora de ponta, e intermediário. O horário de ponta se refere ao período de três horas diárias consecutivas definido pela distribuidora e aprovado pela Aneel, que corresponde ao horário de maior carga do seu sistema elétrico, com exceção dos finais de semana e feriados nacionais. O horário intermediário corresponde ao período de uma hora anterior e posterior ao horário de ponta. E o horário fora de ponta é aquele composto pelo conjunto de horas diárias consecutivas e complementares às do horário de ponta e intermediário (ANEEL, 2016).

A tarifa de energia é composta por três custos distintos: energia gerada (TE), transporte de energia até as unidades consumidoras (transmissão e distribuição) e encargos setoriais (TUSD). Além disso, os Governos Federal, Estadual e Municipal incidem sobre a conta de energia o PIS/COFINS, o ICMS e a Contribuição para iluminação pública (ANEEL, 2017b). No Quadro 6, estão apresentadas as tarifas de modalidade tarifária branca (baixa tensão) da Energisa/SE considerando o valor total (TUSD+TE).

Quadro 6 – Tarifas de modalidade tarifária branca TUSD + TE (baixa tensão)

Grupo	Classes	TUSD + TE (R\$/kWh)		
		Ponta	Intermediário	Fora de ponta
B1	Residencial	1,07697	0,67335	0,41643
B2	Cooperativa de eletrif. rural	0,75389	0,47135	0,29150
	Rural	0,75389	0,47135	0,29150
	Rural irrigação	0,75389	0,47135	0,07870
	Serviço público de irrigação	0,64618	0,40401	0,24986
B3	Comercial, serviços e outros	1,13050	0,70546	0,42714
	Industrial	1,13050	0,70546	0,42714
	Poderes públicos	1,13050	0,70546	0,42714
	Serviço público	0,96092	0,59964	0,36306

Fonte: ENERGISA (2019)

Existem também as bandeiras tarifárias que indicam se haverá ou não acréscimo no valor da energia em função das condições de geração de eletricidade. Estas são chamadas de bandeira verde, amarela e vermelha, conforme descrição abaixo da ANEEL (2015):

- Bandeira verde: condições favoráveis de geração de energia (não há acréscimo);
- Bandeira amarela: condições de geração menos favoráveis (acrécimo de R\$ 0,010 para cada kWh consumido);
- Bandeira vermelha – patamar 1: condições mais custosas de geração (acrécimo de R\$ 0,030 para cada kWh consumido);
- Bandeira vermelha – patamar 2: condições ainda mais custosas de geração (acrécimo de R\$ 0,050 para cada kWh consumido).

Para o cálculo da economia de energia após o sistema, considerou-se que os motogeradores funcionariam preferencialmente no horário de ponta, e quando possível, nos demais horários (intermediário e fora de ponta). Por exemplo, o empreendimento RMo, de acordo com a estimativa de potencial energético (item 4.4), funcionaria por 2,53 horas no cenário pessimista, 3,76 horas no cenário típico e 5,12 horas no cenário otimista. Isto é, no cenário pessimista o motogerador funcionaria apenas no horário de ponta (menos de 3 horas); no cenário típico, durante todo o horário de ponta e em parte do horário intermediário (3 + 0,76 hora); e no cenário otimista, durante os horários de ponta e intermediário, além do horário fora de ponta (3 + 2 + 0,12 hora).

Essa consideração foi feita de modo a se obter a melhor economia possível, pois a geração de energia a partir do biogás no horário de ponta faz com o condomínio consuma menos energia da distribuidora no período em que a tarifa está mais cara. Além disso, adotou-se o mês com 30 dias, sendo oito dias correspondentes aos finais de semana e um dia referente ao feriado

(quando não há horário de ponta). A economia mensal de energia para os empreendimentos encontra-se nas Tabelas 26-28.

Tabela 26 – Economia mensal de energia do RMo

RMo				
		Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista
Eletricidade gerada por dia (kWh.d ⁻¹)		6,35	9,42	12,76
Funcionamento do motogerador por dia útil (horas.d ⁻¹)	Ponta	2,53	3	3
	Intermediário	0	0,76	2
	Fora de ponta	0	0	0,12
Funcionamento do motogerador por dia – finais de semana e feriado (horas.d ⁻¹)	Fora de ponta	2,53	3,76	5,12
Número de dias no mês	Dias úteis		21	
	Finais de semana e feriado		9	
Eletricidade gerada por mês (kWh.mês ⁻¹)	Ponta	133,20	157,7	157,1
	Intermediário	0	40,2	104,7
	Fora de ponta	57,1	84,8	121,0
Tarifa de modalidade tarifária branca (TUSD+TE) – residencial (R\$/kWh)	Ponta		1,07697	
	Intermediário		0,67335	
	Fora de ponta		0,41643	
Economia mensal (R\$/mês)	Ponta	R\$ 143,50	R\$ 168,83	R\$ 169,18
	Intermediário	R\$ 0	R\$ 27,07	R\$ 70,52
	Fora de ponta	R\$ 23,78	R\$ 35,32	R\$ 50,39
Economia mensal total (R\$/mês)		R\$ 167,28	R\$ 232,22	R\$ 290,08

Fonte: autora (2019)

Tabela 27 – Economia mensal de energia do RSv

RSv				
		Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista
Eletricidade gerada por dia (kWh.d ⁻¹)		4,47	6,82	9,33
Funcionamento do motogerador por dia útil (horas.d ⁻¹)	Ponta	1,82	2,76	3
	Intermediário	0	0	0,76
	Fora de ponta	0	0	0
Funcionamento do motogerador por dia – finais de semana e feriado (horas.d ⁻¹)	Fora de ponta	1,82	2,76	3,76
Número de dias no mês	Dias úteis		21	
	Finais de semana e feriado		9	
Eletricidade gerada por mês (kWh/mês)	Ponta	93,8	143,1	m
	Intermediário	0	0	39,8
	Fora de ponta	40,2	61,3	84,0
Tarifa de modalidade tarifária branca (TUSD+TE) – residencial (R\$/kWh)	Ponta		1,07697	
	Intermediário		0,67335	
	Fora de ponta		0,41643	
Economia mensal (R\$/mês)	Ponta	R\$ 100,98	R\$ 154,13	R\$ 168,14
	Intermediário	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 26,80
	Fora de ponta	R\$ 16,73	R\$ 25,54	R\$ 34,97
Economia mensal total (R\$/mês)		R\$ 117,72	R\$ 179,67	R\$ 229,90

Fonte: autora (2019)

Tabela 28 – Economia mensal de energia do PAg

		PAg		
		Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista
Eletricidade gerada por dia (kWh.d ⁻¹)		17,06	23,95	31,44
Funcionamento do motogerador por dia útil (horas.d ⁻¹)	Ponta	3	3	3
	Intermediário	2	2	2
	Fora de ponta	1,88	4,65	7,71
Funcionamento do motogerador por dia – finais de semana e feriado (horas.d ⁻¹)				
Número de dias no mês	Dias úteis		21	
	Finais de semana e feriado		9	
Eletricidade gerada por mês (kWh/mês)	Ponta	156,2	156,4	155,9
	Intermediário	104,1	104,3	103,9
	Fora de ponta	251,5	457,8	683,4
Tarifa de modalidade tarifária branca (TUSD+TE) – residencial (R\$/kWh)	Ponta		1,07697	
	Intermediário		0,67335	
	Fora de ponta		0,41643	
Economia mensal (R\$/mês)	Ponta	R\$ 168,19	R\$ 168,42	R\$ 167,90
	Intermediário	R\$ 70,11	R\$ 70,20	R\$ 69,99
	Fora de ponta	R\$ 104,75	R\$ 190,62	R\$ 284,61
Economia mensal total (R\$/mês)		R\$ 343,05	R\$ 429,24	R\$ 522,50

Fonte: autora (2019)

Os valores referentes às despesas mensais atuais com energia elétrica das áreas comuns foram obtidos através da conta de energia dos empreendimentos. Esses valores representam o valor total da conta: tarifa de energia por kWh mais impostos.

Com o consumo médio de energia e a economia gerada mensalmente, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Resumo da análise energética e economia após aproveitamento energético do biogás (cenário otimista)

	RMo	RSv	PAg
Consumo médio mensal de energia	R\$ 3.005,83/mês	R\$ 1.240,30/mês	R\$ 8.865,29/mês
Economia mensal após aproveitamento energético do biogás	R\$ 290,08/mês	R\$ 229,90/mês	R\$ 522,50/mês
Auto suprimento energético	9,65 %	18,54 %	5,89 %
Economia anual após aproveitamento energético do biogás	R\$ 3.481,00/ano	R\$ 2.758,83/ano	R\$ 6.269,99/ano

Fonte: autora (2019)

Observa-se, através da Tabela 29, que o aproveitamento energético do biogás não é suficiente para atender toda demanda de energia dos condomínios no cenário otimista. O sistema forneceria 5,89% da energia utilizada mensalmente no PAg; 9,65% no RMo e 18,54%

no RSv. Entretanto, a economia anual dos sistemas é considerável, obtendo-se uma economia aproximada equivalente ao consumo de um mês no RMo, a mais de dois meses no RSv, e a R\$ 6.269,099 no PAg anualmente.

4.6.3 VPL, TIR e *payback* descontado

Para o cálculo do VPL, TIR e *payback* descontado, considerou-se um tempo de vida útil de 25 anos, e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) igual a taxa Selic atual de 6,50% ao ano menos a inflação de 3,94% ao ano (BCB, 2018), o que resultou em uma TMA de 2,56%. Os resultados estão dispostos na Tabela 30.

Os custos no tempo zero equivalem ao CAPEX dos sistemas, os custos no tempo “t” ao OPEX, e a receita se refere à economia anual após aproveitamento energético do biogás. Nos Apêndices D, E e F, estão disponíveis os fluxos de caixa descontados de cada empreendimento.

A partir da Tabela 30, pode-se dizer que os sistemas do RMo e do RSv são viáveis economicamente, pois os VPL’s foram positivos e as TIR’s maiores que a TMA. Com isso, entende-se que as receitas geradas a partir do aproveitamento energético do biogás foram suficientes para arcar com todos os custos de implantação, operação e manutenção nesses empreendimentos.

Tabela 30 – VPL, TIR e *payback* descontado do RMo, RSv e PAg (cenário otimista) considerando os custos de todo o sistema

	RMo	RSv	PAg
CAPEX total	R\$ 30.031,00	R\$ 27.701,82	R\$ 50.011,64
OPEX anual	R\$ 1.596,07	R\$ 1.211,66	R\$ 3.964,61
Economia anual	R\$ 3.481,00	R\$ 2.758,83	R\$ 6.269,99
TMA	2,56%	2,56%	2,56%
VPL	RS 4.460,51	RS 590,87	-RS 7.826,50
TIR	3,82 %	2,75 %	1,12 %
Tempo de retorno (<i>payback</i> descontado)	21 anos	25 anos	Não tem retorno

Fonte: autora (2019)

O mesmo não aconteceu com o condomínio PAg. Um dos motivos para isso pode ser devido ao funcionamento do motogerador, na maior parte do tempo, nos horários fora de ponta. Embora a produção de biogás estimada tenha sido maior nesse empreendimento e o motogerador funcionaria por mais tempo, assim que se excedia as três horas do período de ponta e as duas horas do período intermediário, o motogerador funcionaria considerando a menor tarifa (fora de ponta), enquanto nos outros condomínios as receitas foram obtidas com a

maior parte da geração de energia ocorrendo no horário de ponta. Logo, a economia no PAg foi maior em termos absolutos, mas menor na proporção com as suas despesas anuais.

Ao comparar-se o OPEX e a economia anual do PAg na Tabela 30, nota-se que existe um saldo positivo de R\$ 2.305,38. Porém, apesar da economia gerada devido à produção de energia a partir do biogás ter sido maior que os custos para operar e manter o sistema, esse saldo não foi suficiente para compensar os custos de implantação do projeto, resultando na inviabilidade econômica do sistema proposto para esse empreendimento.

Salienta-se que a análise de viabilidade econômica foi realizada considerando o melhor cenário (otimista). Logo, a falta de manutenção do sistema pode comprometer a viabilidade detectada no RMo e RSv. Por outro lado, a receita utilizada no cálculo do VPL foi a economia anual obtida na seção 4.6.2. Essa economia foi calculada com base na bandeira verde, que é aquela na qual a geração de energia por parte da distribuidora apresenta condições favoráveis. Ou seja, quando estiver em voga as bandeiras amarela ou vermelha, a economia será maior, o que evidencia o impacto positivo da menor dependência das distribuidoras e das condições climáticas por parte dos condomínios.

Quanto ao período de retorno dos investimentos, o resultado obtido para o RMo foi próximo ao tempo de vida útil do projeto (21 anos) e igual a esse período para o RSv (25 anos). No entanto, convém observar que as despesas *per capita* anuais (Tabela 25) foram pequenas, ou seja, poderiam ser assumidas pelos residentes sem muita dificuldade. Além disso, espera-se que haverá um desenvolvimento dos setores do saneamento e biogás no Brasil nos próximos anos, estimulando a descentralização desses serviços e a diversificação da matriz energética brasileira, ou seja, reduzindo o CAPEX e OPEX.

De acordo com a Lei nº 11.445 (Brasil, 2007), que estabelece a Política de Saneamento Básico no Brasil, no artigo 48, destaca-se que a União deverá se basear, dentre outras, nas seguintes diretrizes: prioridade para as ações que promovam a equidade social e territorial no acesso ao saneamento básico; aplicação dos recursos financeiros por ela administrados de modo a promover o desenvolvimento sustentável, a eficiência e a eficácia; uniformização da regulação do setor e divulgação de melhores práticas; melhoria da qualidade de vida e das condições ambientais e de saúde pública; e colaboração para o desenvolvimento urbano e regional.

Segundo Itamaro (2016), em empreendimentos habitacionais, no caso da ausência de rede coletora de esgotos, é comum o descarte dos dejetos em fossas sépticas. Este trabalho estudou a adoção de um sistema local mais eficiente do que esse em condomínios, considerando

as despesas necessárias tanto para a construção e operação do sistema de tratamento do esgoto (tratamento preliminar + reatores UASBs) quanto para o sistema de aproveitamento energético do biogás.

Contudo, outra conjuntura pode ser analisada. Além das mudanças nas legislações, que passaram a ser mais exigentes, tem crescido o número de consumidores conscientes, fazendo com que a questão do saneamento básico nos condomínios seja tratada com mais seriedade. Com isso, muitos empreendimentos têm procurado alternativas para minizar o impacto negativo do descarte de efluentes (MEIO AMBIENTE, 2017). Desse modo, pode-se considerar a situação na qual a implantação do sistema de tratamento do esgoto (tratamento preliminar + UASB) ocorresse na fase de construção do empreendimento, ou seja, seriam arcados pela construtora e incorporados à venda do empreendimento. Consequentemente, apenas os custos referentes ao sistema de biogás seriam assumidos pelos condôminos.

Tendo vista essa conjuntura, calculou-se o VPL, TIR e *payback* descontado levando em conta apenas os custos com o sistema de biogás. Os resultados se encontram na Tabela 31 e os fluxos de caixa descontados nos Apêndices G, H e I.

Tabela 31 – VPL, TIR e *payback* descontado do RMo, RSv e PAg (cenário otimista) considerando apenas os custos com o sistema de biogás

	RMo	RSv	PAg
CAPEX	R\$ 8.231,17	R\$ 8.231,17	R\$ 8.231,17
OPEX	R\$ 546,07	R\$ 470,66	R\$ 958,61
Economia anual	R\$ 3.481,00	R\$ 2.758,83	R\$ 6.269,99
TMA	2,56%	2,56%	2,56%
VPL	R\$ 45.473,83	R\$ 33.639,05	R\$ 88.959,44
TIR	35,64 %	27,74 %	64,53 %
Tempo de retorno (<i>payback</i> descontado)	3 anos	4 anos	2 anos

Fonte: autora (2019)

De acordo com a Tabela 31, nota-se que todos os empreendimentos apresentaram viabilidade econômica na situação alternativa apresentada, com tempos de retornos significativamente pequenos (2, 3 e 4 anos). Isso serve para evidenciar que as receitas obtidas com a economia de energia são suficientes para pagar os custos com a implantação e operação do sistema de biogás em um período irrisório se comparado ao período de vida útil do projeto. Além disso, os custos de operação *per capita* anuais desse sistema seriam de apenas: R\$1,56 (RMo), R\$1,90 (RSv), e R\$0,96 (PAg).

Dessa maneira, ficou claro que a viabilidade econômica do sistema de aproveitamento de biogás foi favorável para empreendimentos habitacionais com populações equivalentes de 247 a 1002 habitantes. O que encareceu esse aproveitamento energético nessas localidades, resultando inclusive na inviabilidade econômica de um deles na primeira situação, foi a construção dos reatores UASBs. Logo, destaca-se a importância da elaboração de projetos de empreendimentos habitacionais que já incluam formas de tratamento de esgoto mais eficientes do que tanques sépticos, contribuindo para um desenvolvimento urbano mais sustentável e favorecendo a instalação de sistemas de aproveitamento do biogás.

Complementarmente, as reduções dos custos podem ocorrer devido a incentivos de políticas públicas, que poderiam dar descontos em impostos cobrados na energia como o PIS/COFINS, ICMS e na Contribuição para iluminação pública para empreendimentos que utilizem fontes de energia descentralizadas e renováveis. Estes estabelecimentos também poderiam ter descontos em impostos relacionados à habitação, como o IPTU, tendo em vista que existe uma diminuição dos encargos da municipalidade referentes à coleta e tratamento de esgoto. Logo, a tendência futura é que o cenário de custos apresentados neste trabalho tenha uma queda considerável.

Por fim, embora os resultados econômicos dos sistemas de biogás tenham sido positivos, esse estudo possui caráter apenas indicativo de viabilidade econômica, pois os custos podem variar de uma região para outra a depender da disponibilidade de recursos, avanço tecnológico e cultura, assim como as receitas geradas, as quais dependem das tarifas de energia local. Por isso, conclui-se que são necessários estudos adicionais aplicados a uma maior quantidade e variedade de empreendimentos habitacionais de modo a se estabelecer um melhor entendimento sobre os retornos financeiros desse tipo de tecnologia.

4.7 Impactos ambientais

Os impactos negativos estão relacionados àqueles cujas transformações degradam a qualidade do ambiente e colocam em risco a saúde dos seres vivos, enquanto os impactos positivos são àqueles cujas ações repercutem na recuperação dos meios atingidos, ou ainda, na prevenção dos impactos negativos, buscando o equilíbrio ambiental e a saúde coletiva.

Nesse contexto, observa-se que a produção de esgotos em empreendimentos habitacionais configura um impacto negativo inevitável, uma vez que a produção de ecrementos são inerentes à vida dos seres humanos. No entanto, o tratamento desses esgotos representa uma interferência com impacto positivo, pois objetiva minimizar ou eliminar o impacto

negativo do seu lançamento. Isto é, assume-se a responsabilidade de gerenciar esse esgoto de modo que a sua disposição não degrade a qualidade do meio ambiente e não comprometa à saúde da população.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias, como as ETE's compactas, tem crescido o número de empreendimentos habitacionais que são concebidos com sistemas mais sofisticados para o tratamento dos esgotos. Existe uma tendência mundial que busca construir edificações sustentáveis, os chamados “*green buildings*”, especialmente quando se trata de grandes edificações, hotéis, centros empresariais, shoppings, etc (HUBER, 2019). Essas construções geralmente incluem medidas para aumentar a eficiência energética e o conforto térmico das edificações, reduzir o consumo de água, preservar os recursos naturais, etc. Assim, o manejo adequado dos esgotos pode agregar ainda mais valor à essas construções, e embora esta seja uma tendência, essas ações ainda são escassas se comparadas às outras medidas adotadas, logo, precisam ser cada vez mais estimuladas, especialmente em regiões onde a cobertura de saneamento básico é insatisfatória e o clima é favorável à construção de sistemas anaeróbios.

Segundo Zeeman e Lettinga (1999) apud Lohani, Bakke e Khanal (2015), o tratamento anaeróbio de águas residuárias pode ser um processo adequado para sistemas locais devido ao baixo ou nenhum consumo energético, baixo requerimento de área e à relativa simplicidade dos projetos. O sistema de aproveitamento energético do biogás se apresenta, então, como mais um elemento com impacto ambiental positivo quando associados a esses sistemas, pois utiliza de forma eficiente o biogás que é produzido nos processos anaeróbios, ao invés de apenas queimá-lo ou descartá-lo.

Outro subproduto do tratamento anaeróbio é o lodo, o qual também deve ser gerenciado para não degradar o meio ambiente. Dentre os diversos métodos para gerenciamento adequado do lodo, tem-se a disposição em aterros sanitários, a aplicação controlada no solo, a conversão termoquímica, a incorporação em materiais de construção civil e a utilização como fertilizante agrícola (Zomer *et al.*, 2018). Embora o manejo do lodo não tenha sido objeto de estudo dessa pesquisa, é importante destacar que os empreendimentos habitacionais devem dispor o lodo de maneira adequada, de modo que o propósito principal da adoção desse processo seja atingido.

Isto posto, conclui-se que o sistema projetado tem potencial para minizar os impactos ambientais negativos decorrentes da produção de águas residuárias em empreendimentos habitacionais da seguinte maneira:

- (i) reduzindo a carga orgânica do esgoto da rede pública, pois quando o efluente tratado é lançado da rede pública (nos casos em que essa existir), haverá uma diluição da água residuária lá existente. Embora esse efeito possa ser desprezado se for considerado apenas um empreendimento, o desenvolvimento desse setor com o passar dos anos pode resultar em um efeito cumulativo se esta se tornar uma prática comum, isto é, o setor público passaria a tratar um esgoto com menor carga orgânica, resultando em menores riscos ambientais;
- (ii) possibilitando a construção de empreendimentos em regiões onde não há rede coletora de esgotos, tendo em vista que a disposição final deve atender a legislação vigente, e quando este tratamento não for suficiente para garantir a proteção ambiental, um pós-tratamento deve ser incluído;
- (iii) reduzindo o consumo de energia pela distribuidora e evitando que gases nocivos ao meio ambiente sejam descartados na atmosfera;
- (iv) prevenindo a contaminação do solo e dos mananciais da região, e que pessoas sejam contaminadas por doenças infecciosas e parasitárias; e
- (v) possibilitando o reaproveitamento do esgoto tratado em casos específicos, sendo necessário, porém, estudos adicionais para que esta utilização não ofereça risco ao meio ambiente e à saúde coletiva.

5 Conclusões e recomendações

É inegável que o aproveitamento energético de um resíduo produzido constantemente nas atividades humanas se apresenta como uma opção vantajosa do ponto de vista ambiental. A não recuperação da energia disponível no biogás representa, ao mesmo tempo, perda de valor no tratamento dos esgotos, agressão ao meio ambiente e desperdício de energia renovável. Diante disso, estudos devem ser estimulados de modo a otimizar a produção, captação e formas de aproveitamento desse recurso, principalmente em regiões onde a demanda por energia cresce em ritmo acelerado e as condições climáticas são favoráveis.

Essa dissertação partiu do pressuposto que sistemas compactos de tratamento anaeróbio de esgoto aplicados em empreendimento habitacionais tem potencial de aplicação, com vantagens que extrapolam os benefícios ambientais, isto é, permitindo a redução de despesas com energia nos edifícios através da geração descentralizada *in loco*. Dessa maneira, buscou-se conhecer as condições técnicas e econômicas para viabilidade desse sistema, analisando-se os seus principais entraves e vantagens, haja vista o potencial de crescimento dessa tecnologia no Brasil.

A estimativa de produção de biogás foi feita com base nos parâmetros dos esgotos de três condomínios multifamiliares com características econômicas e sociais distintas. Os resultados apontaram para proporções de metano adequadas ao aproveitamento energético. No entanto, uma parcela relevante da DQO convertida em metano seria perdida dissolvida no efluente, ou seja, mecanismos que possibilitem o desprendimento desse gás poderiam contribuir consideravelmente para o aumento do poder energético do biogás.

Com relação ao volume de biogás produzido, os sistemas dos empreendimentos RMo e RSv (com 350 e 247 habitantes respectivamente) produziram uma média de 4 a 7 m³.d⁻¹, ou seja, os motogeradores funcionariam por apenas 2 a 5 horas por dia. Enquanto isso o condomínio PAg (1.002 habitantes) teria volume de biogás suficiente para alimentar o motogerador por aproximadamente 12 horas diárias, o que significou que mais energia estaria sendo gerada nesse condomínio. Por outro lado, como a receita devido à economia de energia seria função das tarifas cobradas nos diferentes horários de utilização (ponta, intermediário e fora de ponta), os empreendimentos cujo motogeradores funcionariam majoritariamente nos horários de ponta obtiveram uma economia proporcional maior do que aquele em que boa parte da energia economizada estaria sendo gerada no horário fora de ponta. Dessa maneira, o

condomínio com maior produção volumétrica de biogás (PAg) também foi o que obteve menor porcentagem de economia financeira.

A análise de viabilidade técnica permitiu observar que o estágio de desenvolvimento da tecnologia do biogás ainda é recente com relação aos elementos para sua conversão em energia elétrica em módulos de pequena escala. Além disso, por se tratar de uma aplicação não usual, a incerteza quanto a funcionalidade e real benefícios dificulta o interesse em realizar investimentos. Todavia, as competências técnicas e disponibilidade de material não apresentaram nenhum impedimento quanto ao tratamento dos esgotos nessas localidades. Isso significa que a maior complexidade identificada seria com relação à montagem dos elementos para aproveitamento do biogás, uma vez que não existe norma específica que oriente os profissionais quanto ao seu dimensionamento ou comercialização local de sistemas modulares para as vazões analisadas.

Quanto à viabilidade econômica, identificou-se que os principais gastos estariam relacionados com a construção do reator, cerca de 60% a 80%. Quando se avaliou o cenário onde tanto o sistema de tratamento do esgoto quanto o sistema de biogás seriam implementados, nem todos os empreendimentos apresentaram retorno financeiro (RMO: VPL igual a R\$ 4.460,51; TIR de 3,82% e payback descontado igual a 21 anos; RSv: VPL igual a R\$ 590,87; TIR de 2,75% e payback descontado igual a 25 anos). O resultado foi negativo justamente para o PAg nessa situação (VPL igual a -R\$ 7.826,50), pois a economia gerada não foi suficiente para suprir os custos com o CAPEX nesse condomínio, o qual deveria atender a 1.002 pessoas. No entanto, mesmo para este empreendimento, o custo *per capita* foi de apenas R\$ 49,91 para o CAPEX e de R\$3,96.ano⁻¹ para o OPEX. Ou seja, os benefícios ambientais seriam suficientes para justificar a implementação dessa tecnologia, a qual dependeria de investimentos baixos.

A segunda análise de viabilidade econômica foi feita considerando o cenário onde o sistema de tratamento anaeróbio do esgoto já estaria instalado nos empreendimentos e os condomínios ficariam responsáveis por instalar, manter e operar o sistema de biogás. Nessa situação os retornos financeiros foram bastante vantajosos, VPLs de R\$ 45.473,83 (RMO), R\$ 33.639,05 (RSv) e R\$ 88.959,44 (PAg); TIRs iguais a 35,64%; 27,74% e 64,53%; CAPEX de R\$ 8.231,17 e OPEX anuais de apenas R\$ 546,07; R\$ 470,66 e R\$ 958,61 respectivamente. Isto é, todos os projetos seriam viáveis economicamente com períodos de retorno curtos (2, 3 e 4 anos). Esse cenário serviu como parâmetro de comparação, o qual refletiu os benefícios ambientais e econômicos da concepção de edifícios que já incluam sistemas de tratamento de esgoto mais eficientes. Dessa forma, estimula-se a conscientização das pessoas, as quais seriam

responsáveis pelo gerenciamento dos sub-produtos dos seus esgotos, ao mesmo tempo que traria retorno financeiro e contribuiria para um desenvolvimento urbano mais sustentável.

Finalmente, conclui-se que sistemas de aproveitamento de biogás gerado em estações compactas de tratamento anaeróbio em empreendimentos habitacionais apresentam potencial de aplicação. Os principais benefícios seriam de fato ambientais (manejo adequado dos efluentes, redução da emissão de gases do efeito estufa, redução da carga orgânica nos esgotos tratados pelas companhias de saneamento, menor dependência do poder público e possibilidade de construção de edifícios em áreas onde ainda não há cobertura de saneamento). Além disso, evidenciou-se que a instalação desses sistemas custaria pouco para cada morador, sendo a economia com as despesas de energia, na maior parte dos casos, suficiente para cobrir todos os custos de implantação, operação e manutenção. Entretanto, uma atenção especial deve ser dada no incentivo às construtoras para inclusão de sistemas de tratamento mais eficientes durante a concepção dos empreendimentos, de modo que esses benefícios sejam ainda maiores e as barreiras tecnológicas sejam superadas.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, L.K.; HARADA, H.; OKUI, H. Treatment of Dilute Wastewater in a UASB Reactor at a Moderate Temperature: Performance Aspects. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 83, n. 2, pp. 179-184, 1997.
- ANDRADE, M. A. N.; RANZI, T. J. D.; MUNIZ, R. N.; SILVA, L. G. S. S.; ELIAS, M. J. Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental. **SciELO**. Brasil, 2002.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasil, 2012.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Bandeiras tarifárias**. 2015. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>>. Acesso em: 02 Jan 2019.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Postos tarifários**. 2016. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/alta-tensao/-/asset_publisher/zNaRBjCLDgbE/content/alta-tensao/654800?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Falta-tensao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_zNaRBjCLDgbE%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_s_tate%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D2%26p_p_col_count%3D3>. Acesso em: 18 Dez 2018.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifa branca é nova opção para os consumidores a partir de 2018**. 2017a. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/tarifa-branca-e-nova-opcao-para-os-consumidores-a-partir-de-2018/656877?inheritRedirect=false. Acesso em: 18 Dez 2018.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Como é composta a tarifa**. 2017b. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/conteudo-educativo/-/asset_publisher/vE6ahPFxsWHt/content/composicao-da-tarifa/654800?inheritRedirect=false>. Acesso em: 18 Dez 2018.
- ANGELIDAKI, I.; TREU, L.; TSAPEKOS, P.; LUO, G.; CAMPANARO, S.; WENZEL, H.; KOUGIAS, P. G. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, 2018.
- ANJOS, A. **Teste de Shapiro-Wilk para normalidade**. 2005. Disponível em: < <https://docs.ufpr.br/~aanjos/CE213/ce213/node8.html>>. Acesso em: 29 out 2018.
- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. ed. 21. Washington, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9.648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9.649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.844: Instalações prediais de águas pluviais**. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.208: Projeto de estações elevatórias de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.969: Tanques sépticos –**

BRASIL. **Orientações para a importação de equipamento de biogás**. Probiogás – Ministério das Cidades. Brasília, 2017a.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás/ Probiogás**. organizadores, Ministério das Cidades. Brasília, 2017b.

CAPASSI, C. M.; COSTA, J. C.; CANTIL, M. E. S.; NAVARRO, R. S.; ROMERA, Y. F.; SUBTIL, E. L.; CHAGAS, R. K. Dimensionamento de um reator UASB para o tratamento de águas residuárias de suinocultura. **InterfacEHS**. v. 8, n. 2, 2013.

CAPELA, M. V.; CAPELA, J. M. V. Elaboração de gráficos *box-plot* em planilhas de cálculo. **I CMAC Sudeste - Anais do I Congresso de Matemática Aplicada e Computacional da Região Sudeste**. 2011.

CERQUEIRA, G. A.; PINTO, H. S.; FARIA, I. D.; BAPTISTA, J. C. R.; KASSMAYER, K.; SOUZA, L. B. G.; KOHLER, M. A.; ABBUD, O. A.; PINTO, V. C. **A crise hídrica e suas consequências**. Núcleo de Estudos e Pesquisas. Brasília, 2015.

CHAVES, S. R. M. **Influência da temperatura e do tempo de permanência sobre o desempenho de reatores uasb tratando esgoto sanitário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios: princípios de tratamento biológico de águas residuárias**. DESA-UFMS. v. 5. Belo Horizonte, 1997.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v. 5, n. 2, 2007.

CLIMATEMPO. **Climatologia Aracaju-SE**. 2018. Disponível em: < <https://www.climatempo.com.br/climatologia/384/aracaju-se>>. Acesso em: 23 Abr 2018.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 001 de 23 de janeiro de 1986**. Ministério do Meio Ambiente, 1986.

CONVERTI, A.; DRAGO, F.; GHIAZZA, G.; DEL BORGHI, M. Co-digestion of municipal sewage sludges and pre-hydrolysed woody agricultural wastes. **Chemical Technology and Biotechnology**. v. 69, p. 231 – 239, 1997.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. **Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural**. 2002.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. An Introduction, first ed. Wiley-VCH, Weinheim. 2008.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **ANP regulamenta o uso de biometano no Brasil**. 2015. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2015/02/anp-regulamenta-uso-de-biometano-no-brasil>>. Acesso em: 14 Abr 2018.

ENERGISA. **Tipos de tarifas**. 2018. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>. Acesso 18 Dez 2018.

EPA – Environmental Protection Agency. Global Emissions by Gas. 2017. Estados Unidos. Disponível em: < <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>>. Acesso em: 10 Jul 2017.

FARIA, A. F.; SILVA, T. P.; RODRIGUES, M. F. C. Método para análise e avaliação de estudo de viabilidade técnica, econômica e comercial e do impacto ambiental e social (EVTECIAS). **XXIV Seminário Nacional de Parques Tecnológicos e Incubadoras de Empresas**. Belém, 2014.

FARIAS, A. M. L. O **boxplot**. Disponível em: < <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/16496/boxplot.pdf>>. Acesso em: 11 Out 2018.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. **Guia prático do biogas: geração e utilização**. PROBIOGÁS. ed. 5. Gulzow, 2010.

FRANÇA, S. L. A.; REZENDE, V. L. F. **Produção do espaço urbano e novos eixos imobiliários em Aracaju-SE, Brasil: mercado e estado**. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2015.

GANGHIS, D.; PESTANA, M. **Tratamento de Efluentes**. Centro Federal de Educação Tecnológica. CEFET/BA. Bahia, sd.

GARFÍ, M.; CASTRO, L.; MONTERO, N.; ESCALANTE, H.; FERRER, I. Evaluating environmental benefits of low-cost biogas digesters in small-scale farms in Colombia: a life cycle assessment. **Bioresource Technology**. v. 274, pp. 541 – 548, 2019.

GUERI, M. V. D.; SOUZA, S. N. M.; KUCZMAN, O. Parâmetros operacionais do processo de digestão anaerobia de resíduos alimentares: uma revisão. **BIOFIX Scientific Journal**. v. 3, n. 1, pp. 17-25, 2018.

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

HUBER. **Wastewater treatment solution for large buildings and building complexes**. 2019. Disponível em: < <https://www.huber.de/solutions/decentralized-and-semi-centralized-wastewater-treatment/multi-storey-buildings-ie-hotels.html>>. Acesso em 03 Jan 2019.

HULLU, J.; MAASSEN, J.I.W.; VAN MEEL, P. A.; SHAZAD, S.; VAESSEN, J. M. P. **Comparing different biogas upgrading techniques**. DIRKSE MILIEUTECHNIEK. Eindhoven University of Technology, 2008.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades – panorama**. 2010. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/se/aracaju/panorama>>. Acesso em: 23 Abr 2018.

INCT ETEs SUSTENTÁVEIS – Instituto Nacional em Ciências e Tecnologia em ETEs Sustentáveis. **Softwares e Programas**. Disponível em: < http://etes-sustentaveis.org/?page_id=14>. Acesso em: 02 Jun 2018.

ITAMARO, G. **Tratamento de efluentes já é realidade em condomínios**. 2016. Disponível em: < <http://www.condominiosc.com.br/jornal-dos-condominios/tecnologia-e-inovacao/2787-tratamento-de-efluentes-ja-e-realidade-em-condominios>> Acesso em: 02 Jan 2019.

JÚNIOR, S. Geração de energia elétrica. 2013. Disponível em: < <https://www.slideshare.net/JuNNioRe/gerao-de-energia-eltrica-28903279>>. Acesso em: 30 Jun 2017.

KAPUSTA, S. C.; RODRIGUEZ, M. T. M. R. **Análise de impacto ambiental**. Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

KONRAD, O.; KOCH, F. F.; LUMI, M.; TONETTO, J. F.; BEZAMA, A. Potencial of biogas production from swine manure supplemented with glycerine waste. **Engenharia Agrícola**. V. 34, n. 5, p. 844 – 853, 2014.

- LANDIM, A. L. P. F.; AZEVEDO, L. P. **O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o útil ao sustentável.** BNDES. n. 57. pp. 59-100, 2008.
- LANSCHÉ, J.; MULLER, J. Life cycle assessment (LCA) of biogas versus dung combustion household cooking systems in developing countries – a case study in Ethiopia. **Journal of Cleaner Production.** v. 165, pp. 828 – 835, 2017.
- LEMA, J. M.; MÉNDEZ, R. J.; Tratamientos biológicos anaerobios. In: BUENO, J.; SASTRE, L.; LAVIN, A. (eds) **Contaminación e ingeniéria ambiental**, v. 3. Contaminación de las aguas. F.I.C.Y.T, Oviedo, 1997.
- LINS, L.P.; MITO, J.Y.L.; FERNANDES, D. M. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. In: IV Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais. 2015. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: MCT. 2015.
- LIMA, A. I. **Saiba a diferença entre esgoto sanitário e efluentes industriais.** 2013. Disponível em: < <http://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/bid/314718/saiba-a-diferen-a-entre-esgoto-sanit-rio-e-efluente-industrial>>. Acesso em: 11 Abr 2018.
- LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico.** 2011. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- LOHANI, S. P.; BAKKE, R.; KHANAL, S. N. A septic tank-UASB combined system for domestic wastewater treatment: a pilot test. **Water and Environment Journal.** v. 29, pp. 558-565, 2015.
- MATA-ALVAREZ, J. **Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes.** 1. ed. Londres: IWA, 2003.
- MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.; ROMERO-GUIZA, M. S.; FONOLL, X.; PECES, M.; ASTALS, S. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Elsevier.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 36, p. 412 – 427, 2014.
- MARTINS, O. M. **Utilização de um grupo motogerador alimentado com biogás obtido no tratamento de águas residuárias para geração de energia elétrica.** 2010. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso para graduação na escola de engenharia) – Universidade Federal e Minas Gerais, Belo Horizonte.
- MEIO AMBIENTE. **Condomínios adotam estações de tratamento de efluentes sanitários.** 2017. Revista Meio ambiente – Industrial & Sustentabilidade. Disponível em: < <http://rmai.com.br/condominios-adotam-estacoes-de-tratamento-de-efluentes-sanitarios/>>. Acesso em: 02 Jan 2019.
- MENDONÇA, S. R.; MENDONÇA, L. C. **Sistemas sustentáveis de esgotos.** São Paulo: Blucher, 2016.
- METCALF; EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse.** 4th ed. New York. McGraw Hill. 2003.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris.** 2017. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 18 Abr 2018.
- MORANDI, C. G.; WASIELEWSKI, S.; MOUARKECH, K.; MINKE, R.; STEINMETZ, H. Impact of new sanitation technologies upon conventional wastewater infrastructures. **Urban Water Journal**, v. 15, n. 16, pp. 526-533, 2017.

- NISHIMURA, R. **Análise de balanço energético de sistema de produção de biogás em granja de suíços: implementação de aplicativo computacional**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande.
- NOYOLA, A.; CAPDEVILLE, B.; ROQUES, H. Anaerobic treatment of domestic sewage with a rotating stationary fixed-film reactor. **Water Research**. v. 22, n. 12, pp. 1585-1592, 1988.
- 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, pp. 93- 114, 2006.
- OLIVEIRA, R. D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono**. 2009. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso para graduação no curso de Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- OLIVEIRA, J. I.; FILHO, M. L. Consumo *per capita* de água na cidade de Natal segundo a estratificação socioeconômica. **IV SEREA – Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água**, João Pessoa, Brasil. 2004.
- ORRICO, A. C. A.; LOPES, W. R. T.; MANARELLI, D. M.; JUNIOR, M. A. P. O.; SUNADA, N. da S. Codigestão dos dejetos de bovinos leiteiros e óleo de descarte. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal. v. 36, n. 3, p. 537 – 545, 2016.
- ORSE. **Manual do Orse: orçamento de obras de Sergipe**. Disponível em: <http://www.informsistemas.com/orse/manuais/manual_orse.pdf>. Acesso em: 15 Aug 2018.
- PAES, R. F. C. **Caracterização do chorume produzido no aterro da Muribeca - PE**. 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.
- PAGLIUSO, J.D.; PASSIG, F.H.; VILLELA, L.C.H. Odour treatment and energy recovery in anaerobic sewage treatment plants. **In: VII Oficina e Simpósio Latino-Americano de Digestão Anaeróbia**, Mérida, Yucatán - México, IWA/FEMISCA. 2002.
- PERUZZO, V. V. **Estudo da acidogênese e metanogênese aplicada ao tratamento da vinhaça da cana-de-açúcar**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Ambientais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.
- POSSETTI, G. F. C.; RIETOW, J. C.; COSTA, F. J. O. G.; WAGNER, L. G.; LOBATO, L. C. S.; RIBEIRO, T. B.; MELO, D. F.; REIS, J. A.; CHERNICHARO, C. A. L. UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 5: biogás e emissões fugitivas de metano. **Revista DAE**. v. 66, n. 214, 2018.
- POSTGATE, J. R. **The Sulphate-Reducing Bacteria**. 2. ed. London, 1984.
- PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. PUC-PR, UFMG, UFPb, UFRGS, UFRN, UNICAMP, USP. Rio de Janeiro, 1999.
- PIVELI, R. P. Tratamento de esgotos sanitários. sd. Disponível em: <<http://www.ctec.ufal.br/professor/elca/APOSTILA%20-%20TRATAMENTO%20DE%20ESGOTOS.pdf>>. Acesso em: 12 Out 2018.
- RANDS, M.B.; COOPER, D.E.; WOO, C.P.; FLETCHER, G.C.; ROLFE, F.K. Compost filters for H₂S removal from anaerobic digestion and rendering exhausts. **J. Water Pollution Control Federation**. v. 53, pp. 185-189, 1981.

RASI, S.; VEIJANEN, A.; RINTALA, J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. **Energy**. v. 32, pp. 1375-1380, 2007.

RITTMANN, B. E.; McCARTY, P. L. **Biotecnología del medio ambiente: principios y aplicaciones**. Madrid: McGraw-Hill, 2001.

ROCHA, G. Princípio de funcionamento do motor a combustão interna ciclo Otto. 2009. Disponível em: < <http://www.infomotor.com.br/site/2009/03/principio-de-funcionamento-do-motor-a-combustao-interna-ciclo-otto/>>. Acesso em: 13 Abr 2018.

RODRIGUES, A. A. L. S. **Co-digestão anaeróbia de resíduos de natureza orgânica**. 2005. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos) – Universidade de Aveiro, Portugal.

RODRIGUES, S. A.; BATISTELA, G. C. Uma revisão sobre a disponibilidade hídrica brasileira para geração de energia elétrica. **GEOAMBIENTE**. 2013. Disponível em: < <https://www.revistas.ufg.br/geoambiente/article/viewFile/27907/15761>>. Acesso em: 10 Jul 2017.

ROYA, R.; FREITAS, E.; BARROS, E.; ANDRADE, F.; PRAGNA, M.; SILVA, D. J. A. Biogás – Uma energia limpa. **Rev. Novo Enfoque**. v. 3, n.13, p. 142-149, 2011.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do Potencial de Geração de Energia Elétrica para Diferentes Fontes de Biogás no Brasil. **Renabio**. v. 2, n. 1, 2005.

SANEPAR. **Manual: estação elevatória de esgoto de pequeno porte para empreendimentos particulares**. sd. Disponível em: < https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/informacoes-tecnicas/projeto-hidrossanitario/manual_estacao_elevatoria_esgoto_pequeno_porte_particular.pdf>. Acesso em: 01 Nov 2018.

SANTOS, M. P. **Influência da temperatura na eficiência de tratamento de efluentes em reatores UASB**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

SCHNURER, A.; JARVIS, A. **Microbiological Handbook for Biogas Plants**. Suíça. Swenskt Gastekniskt Centar AB. 2010.

SERNA, E. Anaerobic Digestion Process. Disponível em: < <http://www.wtert.eu/default.asp?Menue=13&ShowDok=12>>. Acesso em: 29 Jun 2017.

SFEZ, S.; MEESTER, S. D.; DEWAULF, J. Co-digestion of rice straw and cow dung to supply cooking fuel and fertilizers in rural India: impact on human health, resource flows and climate change. **Science of The Total Environment**. v. 609, pp. 1600 – 1615, 2017.

SILVA, E. S. **A distribuição Normal**. 2006. Disponível em: < <http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node30.html>>. Acesso em: 14 Out 2018.

SILVA, M. L.; FONTES, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra (VET). **Sociedade de Investigações Florestais**. v. 29, n. 6, pp. 931-936, 2005.

SILVA, R. J.; SOEIRO, E. C. **Viabilidade da utilização do biogás como fonte alternativa de energia**. RUnPETRO. n. 1. 2014.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2016**. Ministério das Cidades. Brasília, 2018.

SOARES, S. **Contabilidade gerencial: VPL e TIR**. Centro de Ensino Superior do Amapá, Amapá, 1977.

SOUSA, F. **A influência da temperatura e do volume de efluentes nos sistemas de tratamento dos esgotos**. 2016. Disponível em: <
<https://ferdinandodesousa.wordpress.com/2016/09/19/a-influencia-da-temperatura-e-do-volume-de-efluentes-nos-sistemas-de-tratamento-dos-esgotos/>>. Acesso em: 26 Set 2017.

SOUZA, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**. v. 44, n. 137, 1984.

SOUZA, M. E. Criteria for the utilization, design and operation of UASB reactors. **Water Science and Technology**, v. 18, n. 12, pp. 55-69, 1986.

SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. A. L. Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. **Water Science and Technology**, v. 64, pp. 2259–2264, 2011.

SS GERADORES. **Gerador de energia Bioflex 4 KVA - Monofásico - Partida Elétrica - B4T5000BIO – Branco**. 2015. Disponível em: <
<https://www.lojassgeradores.com.br/geradores-de-energia/geradores-de-energia-a-gas/partida-eletrica/gerador-de-energia-bioflex-4-kva-monofasico-partida-eletrica-b4t5000bio-branco>>. Acesso em: 27 Nov 2018.

STEFFENS, F. H. **Produção de metano a partir de codigestão anaeróbia de vinhoto e glicerol residuais**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Ambientais) – Universidade de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul.

SULZER. **Bomba submersível modelo ABS Robusta**. 2014. Disponível em: <
https://www.sulzer.com/-/media/files/products/pumps/submersible-pumps/brochures/robustasubmersiblepump_bp_e10236.ashx?la=pt-br>. Acesso em 01 Nov 2018.

SUNRISE-ECOENERGY. **Sunrise econergy 3-100m3 PVC membrane home uses biogas digester for animal waste**. 2018a. Disponível em:<https://www.alibaba.com/product-detail/Sunrise-econergy-3-100m3-PVC-membrane_60678706421.html?spm=a2700.7724857.normalList.9.5e70638c59ytsh>. Acesso em: 21 Nov 2018.

SUNRISE-ECOENERGY. **5kw small biogas generator price**. 2018b. Disponível em:<
https://sunrise-econergy.en.alibaba.com/product/1180420423-219218903/5kw_small_biogas_generator_price.html?spm=a2700.icbuShop.prewdfa4cf.7.29f31ae2LsISLC>. Acesso em: 26 Nov 2018.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues**. New York: Mcgraw-Hill, 1993.

TORMAN, V. B. L.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. **Revista CHPA**. v. 32, p. 227-234, 2012.

TSAGARAKIS, K. P. Optimal number of energy generators for biogas utilization in wastewater treatment facility. **Energy Conversion and Management**. v. 38, p. 2694-2698, 2007.

USEPA. **Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) and User's Manual, Version 3.02**. U.S. EPA, Office of Research and Development and Clean Air Technology Center. EPA/600/R-05- 047. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2005.

- 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**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.
- VAN HAANDEL, A. C; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande: Epgraf, 1994.
- VAN-LIER, J. B.; TILCHE, A.; AHRING, B. K.; ACARIE, H.; MOLETTA, R.; DOHANYOS, M.; HULSHOFF POL, L. W.; LENS, P.; VERSTRAETE, W. New perspectives in anaerobic digestion. **Water Science and Technology**. v. 34, n. 1, p. 1 – 18, 2001.
- VANZIN, E. **Procedimento para análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica: aplicação no Aterro Santa Tecla**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Arquitetura) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.
- VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. de L. **Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions**. 1. ed. Londres: IWA, 2005.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- VON SPERLING, M. **Wastewater characteristics, treatment and disposal**. v. 1. IWA Publishing. London, 2007.
- WANG, Y.; XIHUI, W.; TONG, X.; LI, T.; WU, F. Life cycle assessment of large-scale and household biogas plants in northwest China. **Journal of Cleaner Production**. v. 192, pp. 221 – 235, 2018.
- WILLIAMSON, D. F.; PARKER, R. A.; KENDRICK, J. S. The box plot: a simple visual method to interpret data. **Academia and Clinic – Annals of internal medicine**. v. 110, n.11, pp. 916 – 921, 1989.
- YENIGUN, O.; DEMIREL, B. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: a review. **Process Biochemistry - ELSEVIER**. v. 48. pp. 901-911, 2013.
- ZAHER, U.; CHEONG, D.; WU, B.; CHEN, S. **Producing energy and fertilizer from organic municipal solid waste**. 2007. Department of Biological Systems Engineering, Washington State University, Olympia, WA.
- ZANETE, A. L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ZIEMINSKI, K.; FRAC, M. Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: Transformations, stages and microorganisms. **African Journal of Biotechnology**. v. 11, n. 18, p. 4127-4139, 2012.
- ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. The role of anaerobic digestion of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle at community level. **Water Science Technology**. pp. 187-194, 1999.
- ZOMER, J. A.; ELY, C.; COMELLI, R. U.; ALVES, M. V.; SKORONSKI, E. Lodo de estação de tratamento de esgoto como fertilizando no cultivo de fumo e aveia. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**. v. 11, n. 1, pp. 185-201, 2018.

APÊNDICE A – Composição detalhada do CAPEX do RMO

Material/equipamento	Unidade	Qnt	Custo unitário	Custo total	
Tratamento preliminar					
Válvula de gaveta (desvio do esgoto para manutenção)	Un.	1	R\$ 19,10	R\$ 19,10	
Grades (barra chata inox 304)	Un.	2	R\$ 19,10	R\$ 38,20	
Poço de sucção (cimentação anelar – poço até 250 m)	m	1,5	R\$ 66,93	R\$ 100,40	
Bomba de recalque "ABS Sulzer Submersa Robusta 250T Standard 0,5CV"	Un.	2	R\$ 1.450,00	R\$ 2.900,00	
Reator UASB					
Inoculação		m ³	5	R\$ 95,00	R\$ 475,00
Concreto armado fck = 21 Mpa, usinado, bombeado, adensado e lançado, para uso geral, com formas planas em compensado resinado 12 mm (05 usos)	Laje de fundo	m ³	0,5	R\$ 1.340,06	R\$ 670,03
	Parede direção x	m ³	2,25	R\$ 1.340,06	R\$ 3.015,14
	Parede direção y	m ³	1,8	R\$ 1.340,06	R\$ 2.412,11
	Laje de cobertura	m ³	0,5	R\$ 1.340,06	R\$ 670,03
Impermeabilização a base de resina termoplástica, marca Denver ou similar	Parede interna do reator	m ²	81	R\$ 59,45	R\$ 4.815,45
	Fundo interno do reator	m ²	10	R\$ 59,45	R\$ 594,50
Tubos e conexões de esgoto - PVC	Distribuição (75 mm)	m	21,2	R\$ 25,00	R\$ 530,00
	Tê (75 mm)	Un.	4	R\$ 26,28	R\$ 105,12
	Tê para barramento de espuma (100 mm)	Un.	2	R\$ 45,28	R\$ 90,56
	Tubo de saída do efluente (100 mm)	m	10	R\$ 31,35	R\$ 313,50
	Curva 90° para saída do efluente (100 mm)	Un.	2	R\$ 19,81	R\$ 39,62
Separador trifásico	Fibra de vidro	m ²	5	R\$ 1.002,20	R\$ 5.011,08
Sistema de biogás					
Filtro H ₂ S	Tubo PVC esgoto (200 mm)	m	2,5	R\$ 47,48	R\$ 118,70
	Palha de aço nº 1	Un.	15	R\$ 0,99	R\$ 14,85
	Palha de aço nº 2	Un.	15	R\$ 1,00	R\$ 15,00
Reservatório pulmão		Un.	2	R\$ 780,00	R\$ 1.560,00
Compressor	Compressor refrigeração bitz 5	Un.	1	R\$ 1.100,00	R\$ 1.100,00
	Motor elétrico	Un.	1	R\$ 598,48	R\$ 598,48
	Pressostato hlp 110	Un.	1	R\$ 122,00	R\$ 122,00
	Filtro de umidade	Un.	2	R\$ 34,67	R\$ 69,34
Motogerador B4T - 5000 Bio		Un.	2	R\$ 2.008,77	R\$ 4.017,54
Sistema de transporte e segurança	Tubo de pead, PE80 ramal predial, d=20mm x 2,3mm	m	20	R\$ 3,60	R\$ 72,00
	Válvula anti-retorno	Un.	1	R\$ 41,83	R\$ 41,83
	Válvula corta-chama	Un.	2	R\$ 50,23	R\$ 100,46
	Válvula de alívio	Un.	2	R\$ 10,99	R\$ 21,98
	Registro de gás	Un.	2	R\$ 19,85	R\$ 39,70
	Manômetro	Un.	1	R\$ 339,39	R\$ 339,39
CAPEX RMO				R\$	30.031,00

Fonte: autora (2019)

APÊNDICE B – Composição detalhada do CAPEX do RSv

Material/equipamento	Unidade	Qnt	Custo unitário	Custo total	
Tratamento preliminar					
Válvula de gaveta (desvio do esgoto para manutenção)	Un.	1	R\$ 19,10	R\$ 19,10	
Grades (barra chata inox 304)	Un.	2	R\$ 19,10	R\$ 38,20	
Poço de sucção (cimentação anelar – poço até 250 m)	m	1,5	R\$ 66,93	R\$ 100,40	
Bomba de recalque "ABS Sulzer Submersa Robusta 250T Standard 0,5CV"	Un.	2	R\$ 1.450,00	R\$ 2.900,00	
Reator UASB					
Inoculação		m ³	3,96	R\$ 95,00	R\$ 376,20
Concreto armado fck = 21 Mpa, usinado, bombeado, adensado e lançado, para uso geral, com formas planas em compensado resinado 12 mm (05 usos)	Laje de fundo	m ³	0,5	R\$ 1.340,06	R\$ 670,03
	Parede direção x	m ³	2	R\$ 1.340,06	R\$ 2.680,12
	Parede direção y	m ³	1,6	R\$ 1.340,06	R\$ 2.144,10
	Laje de cobertura	m ³	0,5	R\$ 1.340,06	R\$ 670,03
Impermeabilização a base de resina termoplástica, marca Denver ou similar	Parede interna do reator	m ²	72	R\$ 59,45	R\$ 4.280,40
	Fundo interno do reator	m ²	10	R\$ 59,45	R\$ 594,50
Tubos e conexões de esgoto - PVC	Distribuição (75 mm)	m	19,2	R\$ 25,00	R\$ 480,00
	Tê (75 mm)	Un.	4	R\$ 26,28	R\$ 105,12
	Tê para barramento de espuma (100 mm)	Un.	2	R\$ 45,28	R\$ 90,56
	Tubo de saída do efluente (100 mm)	m	10	R\$ 31,35	R\$ 313,50
	Curva 90° para saída do efluente (100 mm)	Un.	2	R\$ 19,81	R\$ 39,62
Separador trifásico	Fibra de vidro	m ²	3,96	R\$ 1.002,20	R\$ 3.968,78
Sistema de biogás					
Filtro H ₂ S	Tubo PVC esgoto (200 mm)	m	2,5	R\$ 47,48	R\$ 118,70
	Palha de aço nº 1	Un.	15	R\$ 0,99	R\$ 14,85
	Palha de aço nº 2	Un.	15	R\$ 1,00	R\$ 15,00
Reservatório pulmão		Un.	2	R\$ 780,00	R\$ 1.560,00
Compressor	Compressor refrigeração bitz 5	Un.	1	R\$ 1.100,00	R\$ 1.100,00
	Motor elétrico	Un.	1	R\$ 598,48	R\$ 598,48
	Pressostato hlp 110	Un.	1	R\$ 122,00	R\$ 122,00
	Filtro de umidade	Un.	2	R\$ 34,67	R\$ 69,34
Motogerador B4T - 5000 Bio		Un.	2	R\$ 2.008,77	R\$ 4.017,54
Sistema de transporte e segurança	Tubo de pead, PE80 ramal predial, d=20mm x 2,3mm	m	20	R\$ 3,60	R\$ 72,00
	Válvula anti-retorno	Un.	1	R\$ 41,83	R\$ 41,83
	Válvula corta-chama	Un.	2	R\$ 50,23	R\$ 100,46
	Válvula de alívio	Un.	2	R\$ 10,99	R\$ 21,98
	Registro de gás	Un.	2	R\$ 19,85	R\$ 39,70
	Manômetro	Un.	1	R\$ 339,39	R\$ 339,39
CAPEX RSv				R\$	27.701,82

Fonte: autora (2019)

APÊNDICE C – Composição detalhada do CAPEX do PAg

Material/equipamento	Unidade	Qnt	Custo unitário	Custo total	
Tratamento preliminar					
Válvula de gaveta (desvio do esgoto para manutenção)	Un.	1	R\$ 19,10	R\$ 19,10	
Grades (barra chata inox 304)	Un.	2	R\$ 19,10	R\$ 38,20	
Poço de sucção (cimentação anelar – poço até 250 m)	m	2,5	R\$ 66,93	R\$ 167,33	
Bomba de recalque "ABS Sulzer Submersa Robusta 250T Standard 0,5CV"	Un.	2	R\$ 1.450,00	R\$ 2.900,00	
Reator UASB					
Inoculação		m ³	15	R\$ 95,00	R\$ 1.425,00
Concreto armado fck = 21 Mpa, usinado, bombeado, adensado e lançado, para uso geral, com formas planas em compensado resinado 12 mm (05 usos)	Laje de fundo	m ³	1,5	R\$ 1.340,06	R\$ 2.010,09
	Parede direção x	m ³	4,5	R\$ 1.340,06	R\$ 6.030,27
	Parede direção y	m ³	2,7	R\$ 1.340,06	R\$ 3.618,16
	Laje de cobertura	m ³	1,5	R\$ 1.340,06	R\$ 2.010,09
Impermeabilização a base de resina termoplástica, marca Denver ou similar	Parede interna do reator	m ²	81,0	R\$ 59,45	R\$ 4.815,45
	Fundo interno do reator	m ²	30	R\$ 59,45	R\$ 1.783,50
Tubos e conexões de esgoto - PVC	Distribuição (75 mm)	m	35,4	R\$ 25,00	R\$ 885,00
	Tê (75 mm)	Un.	6	R\$ 26,28	R\$ 157,68
	Tê para barramento de espuma (100 mm)	Un.	4	R\$ 45,28	R\$ 181,12
	Tubo de saída do efluente (100 mm)	m	20	R\$ 31,35	R\$ 627,00
	Curva 90° para saída do efluente (100 mm)	Un.	4	R\$ 19,81	R\$ 79,24
Separador trifásico	Fibra de vidro	m ²	3,96	R\$ 1.002,20	R\$ 15.033,24
Sistema de biogás					
Filtro H ₂ S	Tubo PVC esgoto (200 mm)	m	2,5	R\$ 47,48	R\$ 118,70
	Palha de aço n° 1	Un.	15	R\$ 0,99	R\$ 14,85
	Palha de aço n° 2	Un.	15	R\$ 1,00	R\$ 15,00
Reservatório pulmão		Un.	2	R\$ 780,00	R\$ 1.560,00
Compressor	Compressor refrigeração bitz 5	Un.	1	R\$ 1.100,00	R\$ 1.100,00
	Motor elétrico	Un.	1	R\$ 598,48	R\$ 598,48
	Pressostato hlp 110	Un.	1	R\$ 122,00	R\$ 122,00
	Filtro de umidade	Un.	2	R\$ 34,67	R\$ 69,34
Motogerador B4T - 5000 Bio		Un.	2	R\$ 2.008,77	R\$ 4.017,54
Sistema de transporte e segurança	Tubo de pead, PE80 ramal predial, d=20mm x 2,3mm	m	20	R\$ 3,60	R\$ 72,00
	Válvula anti-retorno	Un.	1	R\$ 41,83	R\$ 41,83
	Válvula corta-chama	Un.	2	R\$ 50,23	R\$ 100,46
	Válvula de alívio	Un.	2	R\$ 10,99	R\$ 21,98
	Registro de gás	Un.	2	R\$ 19,85	R\$ 39,70
	Manômetro	Un.	1	R\$ 339,39	R\$ 339,39
CAPEX PAg				R\$ 50.011,64	

Fonte: autora (2019)

APÊNDICE D – Fluxo de caixa descontado do RMo
(sistema completo)

Ano	CAPEX_<i>C₀</i> (R\$)	OPEX_<i>C_t</i> (R\$)	Receita_<i>R_t</i> (R\$)	$\frac{R_t - C_t}{(1 + TMA)^t}$	Total descontado acumulado
0	-30031,00	0,00	0,00	0,00	-30031,00
1		-1596,07	3481,00	1837,88	-28193,12
2		-1596,07	3481,00	1792,00	-26401,11
3		-1596,07	3481,00	1747,27	-24653,84
4		-1596,07	3481,00	1703,66	-22950,18
5		-1596,07	3481,00	1661,14	-21289,04
6		-1596,07	3481,00	1619,67	-19669,37
7		-1596,07	3481,00	1579,24	-18090,13
8		-1596,07	3481,00	1539,82	-16550,30
9		-1596,07	3481,00	1501,39	-15048,91
10		-1596,07	3481,00	1463,91	-13585,00
11		-1596,07	3481,00	1427,37	-12157,63
12		-1596,07	3481,00	1391,74	-10765,89
13		-1596,07	3481,00	1357,00	-9408,88
14		-1596,07	3481,00	1323,13	-8085,75
15		-1596,07	3481,00	1290,10	-6795,65
16		-1596,07	3481,00	1257,90	-5537,74
17		-1596,07	3481,00	1226,50	-4311,24
18		-1596,07	3481,00	1195,89	-3115,35
19		-1596,07	3481,00	1166,04	-1949,31
20		-1596,07	3481,00	1136,93	-812,38
21		-1596,07	3481,00	1108,55	296,18
22		-1596,07	3481,00	1080,88	1377,06
23		-1596,07	3481,00	1053,90	2430,96
24		-1596,07	3481,00	1027,60	3458,56
25		-1596,07	3481,00	1001,95	4460,51

Fonte: autora (2019)

APÊNDICE E – Fluxo de caixa descontado do RSv (sistema completo)

Ano	CAPEX_Co (R\$)	OPEX_Ct (R\$)	Receita_Rt (R\$)	$\frac{Rt - Ct}{(1 + TMA)^t}$	Total descontado acumulado
0	-27701,82	0,00	0,00	0,00	-27701,82
1		-1212,66	2758,83	1507,58	-26194,24
2		-1212,66	2758,83	1469,95	-24724,30
3		-1212,66	2758,83	1433,25	-23291,04
4		-1212,66	2758,83	1397,48	-21893,57
5		-1212,66	2758,83	1362,60	-20530,97
6		-1212,66	2758,83	1328,58	-19202,38
7		-1212,66	2758,83	1295,42	-17906,96
8		-1212,66	2758,83	1263,09	-16643,88
9		-1212,66	2758,83	1231,56	-15412,32
10		-1212,66	2758,83	1200,82	-14211,50
11		-1212,66	2758,83	1170,84	-13040,66
12		-1212,66	2758,83	1141,62	-11899,04
13		-1212,66	2758,83	1113,12	-10785,91
14		-1212,66	2758,83	1085,34	-9700,58
15		-1212,66	2758,83	1058,25	-8642,33
16		-1212,66	2758,83	1031,83	-7610,50
17		-1212,66	2758,83	1006,08	-6604,42
18		-1212,66	2758,83	980,96	-5623,46
19		-1212,66	2758,83	956,48	-4666,98
20		-1212,66	2758,83	932,60	-3734,38
21		-1212,66	2758,83	909,32	-2825,05
22		-1212,66	2758,83	886,63	-1938,42
23		-1212,66	2758,83	864,50	-1073,93
24		-1212,66	2758,83	842,92	-231,01
25		-1212,66	2758,83	821,88	590,87

Fonte: autora (2019)

**APÊNDICE F – Fluxo de caixa descontado do PAg
(sistema completo)**

Ano	CAPEX C_0 (R\$)	OPEX C_t (R\$)	Receita R_t (R\$)	$\frac{R_t - C_t}{(1 + TMA)^t}$	Total descontado acumulado
0	-50011,64	0,00	0,00	0,00	-50011,64
1		-3964,61	6269,99	2247,84	-47763,80
2		-3964,61	6269,99	2191,73	-45572,08
3		-3964,61	6269,99	2137,02	-43435,06
4		-3964,61	6269,99	2083,68	-41351,38
5		-3964,61	6269,99	2031,67	-39319,71
6		-3964,61	6269,99	1980,95	-37338,76
7		-3964,61	6269,99	1931,51	-35407,25
8		-3964,61	6269,99	1883,30	-33523,96
9		-3964,61	6269,99	1836,29	-31687,67
10		-3964,61	6269,99	1790,45	-29897,22
11		-3964,61	6269,99	1745,76	-28151,46
12		-3964,61	6269,99	1702,18	-26449,28
13		-3964,61	6269,99	1659,70	-24789,58
14		-3964,61	6269,99	1618,27	-23171,31
15		-3964,61	6269,99	1577,87	-21593,44
16		-3964,61	6269,99	1538,49	-20054,95
17		-3964,61	6269,99	1500,09	-18554,86
18		-3964,61	6269,99	1462,64	-17092,22
19		-3964,61	6269,99	1426,13	-15666,09
20		-3964,61	6269,99	1390,54	-14275,55
21		-3964,61	6269,99	1355,83	-12919,72
22		-3964,61	6269,99	1321,98	-11597,74
23		-3964,61	6269,99	1288,99	-10308,75
24		-3964,61	6269,99	1256,81	-9051,94
25		-3964,61	6269,99	1225,44	-7826,50

Fonte: autora (2019)

APÊNDICE G – Fluxo de caixa descontado do RMo (sistema de biogás)

Ano	CAPEX_Co (R\$)	OPEX_Ct (R\$)	Receita_Rt (R\$)	$\frac{Rt - Ct}{(1 + TMA)^t}$	Total descontado acumulado
0	-8231,17	0,00	0,00	0,00	-8231,17
1		-546,07	3481,00	2861,67	-5369,5
2		-546,07	3481,00	2790,24	-2579,26
3		-546,07	3481,00	2720,59	141,34
4		-546,07	3481,00	2652,69	2794,02
5		-546,07	3481,00	2586,47	5380,49
6		-546,07	3481,00	2521,91	7902,40
7		-546,07	3481,00	2458,96	10361,36
8		-546,07	3481,00	2397,58	12758,95
9		-546,07	3481,00	2337,74	15096,68
10		-546,07	3481,00	2279,38	17376,07
11		-546,07	3481,00	2222,49	19598,56
12		-546,07	3481,00	2167,01	21765,57
13		-546,07	3481,00	2112,92	23878,49
14		-546,07	3481,00	2060,18	25938,68
15		-546,07	3481,00	2008,76	27947,43
16		-546,07	3481,00	1958,62	29906,05
17		-546,07	3481,00	1909,73	31815,78
18		-546,07	3481,00	1862,06	33677,84
19		-546,07	3481,00	1815,58	35493,42
20		-546,07	3481,00	1770,26	37263,68
21		-546,07	3481,00	1726,07	38989,75
22		-546,07	3481,00	1682,99	40672,74
23		-546,07	3481,00	1640,98	42313,73
24		-546,07	3481,00	1600,02	43913,75
25		-546,07	3481,00	1560,08	45473,83

Fonte: autora (2019)

APÊNDICE H – Fluxo de caixa descontado do RSv (sistema de biogás)

Ano	CAPEX_ <i>Co</i> (R\$)	OPEX_ <i>Ct</i> (R\$)	Receita_ <i>Rt</i> (R\$)	$\frac{Rt - Ct}{(1 + TMA)^t}$	Total descontado acumulado
0	-8231,17	0,00	0,00	0,00	-8231,17
1		-470,66	2758,83	2231,05	-6000,12
2		-470,66	2758,83	2175,37	-3824,75
3		-470,66	2758,83	2121,07	-1703,68
4		-470,66	2758,83	2068,12	364,44
5		-470,66	2758,83	2016,50	2380,94
6		-470,66	2758,83	1966,17	4347,11
7		-470,66	2758,83	1917,09	6264,19
8		-470,66	2758,83	1869,24	8133,43
9		-470,66	2758,83	1822,58	9956,01
10		-470,66	2758,83	1777,08	11733,09
11		-470,66	2758,83	1732,73	13465,82
12		-470,66	2758,83	1689,48	15155,30
13		-470,66	2758,83	1647,31	16802,6
14		-470,66	2758,83	1606,19	18408,79
15		-470,66	2758,83	1566,10	19974,88
16		-470,66	2758,83	1527,00	21501,89
17		-470,66	2758,83	1488,89	22990,78
18		-470,66	2758,83	1451,72	24442,50
19		-470,66	2758,83	1415,49	25857,99
20		-470,66	2758,83	1380,16	27238,14
21		-470,66	2758,83	1345,71	28583,85
22		-470,66	2758,83	1312,12	29895,96
23		-470,66	2758,83	1279,36	31175,33
24		-470,66	2758,83	1247,43	32422,76
25		-470,66	2758,83	1216,29	33639,05

Fonte: autora (2019)

APÊNDICE I – Fluxo de caixa descontado do PAg (sistema de biogás)

Ano	CAPEX_ <i>Co</i> (R\$)	OPEX_ <i>Ct</i> (R\$)	Receita_ <i>Rt</i> (R\$)	$\frac{Rt - Ct}{(1 + TMA)^t}$	Total descontado acumulado
0	-8231,17	0,00	0,00	0,00	-8231,17
1		-958,61	6269,99	5178,80	-3052,37
2		-958,61	6269,99	5049,53	1997,17
3		-958,61	6269,99	4923,49	6920,66
4		-958,61	6269,99	4800,60	11721,26
5		-958,61	6269,99	4680,77	16402,03
6		-958,61	6269,99	4563,93	20965,96
7		-958,61	6269,99	4450,01	25415,97
8		-958,61	6269,99	4338,94	29754,91
9		-958,61	6269,99	4230,63	33985,54
10		-958,61	6269,99	4125,03	38110,57
11		-958,61	6269,99	4022,07	42132,64
12		-958,61	6269,99	3921,67	46054,31
13		-958,61	6269,99	3823,78	49878,10
14		-958,61	6269,99	3728,34	53606,43
15		-958,61	6269,99	3635,27	57241,71
16		-958,61	6269,99	3544,53	60786,24
17		-958,61	6269,99	3456,06	64242,30
18		-958,61	6269,99	3369,79	67612,09
19		-958,61	6269,99	3285,68	70897,77
20		-958,61	6269,99	3203,67	74101,44
21		-958,61	6269,99	3123,70	77225,14
22		-958,61	6269,99	3045,73	80270,86
23		-958,61	6269,99	2969,70	83240,57
24		-958,61	6269,99	2895,58	86136,14
25		-958,61	6269,99	2823,30	88959,44

Fonte: autora (2019)