

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

ALEX SCHEUER

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS
PRODUZIDO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**CURITIBA - PR
2019**

ALEX SCHEUER

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS
PRODUZIDO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

Monografia de Especialização apresentada ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Bill Jorge Costa

CURITIBA - PR

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

ALEX SCHEUER

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PRODUZIDO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 15 de outubro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Marcelo Rodrigues
Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

Prof. Me. Romildo Alves dos Prazeres
Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bill Jorge Costa
Orientador - UTFPR

Prof. Dr. Marcelo Rodrigues
UTFPR

Prof. Esp. Carlos Henrique Karam Salata
UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

Aos professores do Curso de Especialização em Energias Renováveis da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em especial ao orientador Professor Bill Jorge Costa, pelas excelentes contribuições para desenvolvimento deste trabalho, e ao coordenador Professor Marcelo Rodrigues, por seu comprometimento com as demandas do curso.

RESUMO

SCHEUER, Alex. **Geração de energia elétrica a partir de biogás produzido em estações de tratamento de esgoto**. 112 f. Monografia de Especialização em Energias Renováveis - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Diagnóstico do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), referente a 2017, indica que apenas 46% do esgoto gerado no país é tratado. Buscando reverter este quadro, o Brasil assumiu compromisso com a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável de até 2030 “alcançar o acesso ao saneamento e a higiene adequado e equitativos para todos”. Estudo da Agência Nacional de Águas (ANA) estima que serão necessários R\$ 149,5 bilhões para universalizar a coleta e tratamento de esgoto até 2035. Considerando-se que haverá aumento do investimento em saneamento básico na tentativa de cumprir os compromissos assumidos, há a necessidade de se aprimorar os processos de tratamento de esgoto adotados, tornando-os mais eficientes, sustentáveis e viáveis economicamente. É neste contexto este trabalho investiga as rotas tecnológicas envolvidas na geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no tratamento de esgoto sanitário. O aproveitamento do biogás pode trazer grande contribuição, visto que a energia elétrica gerada pode ser utilizada internamente nos processos de tratamento de esgoto e, eventualmente, exportada para rede elétrica. A partir de revisão bibliográfica sobre o tema, com ênfase em informações teóricas e dados experimentais obtidos em outros trabalhos de pesquisa, observou-se que há uma melhora significativa na viabilidade dos empreendimentos quando se associa à geração elétrica o aproveitamento térmico dos gases de exaustão. Para conversão de energia, os equipamentos mais amplamente utilizados são os motores de combustão interna, dado sua melhor eficiência elétrica, menores custos de aquisição e simplicidade operacional. Os principais tratamentos preliminares do biogás referem-se à remoção de umidade e contaminantes, tais como sulfeto de hidrogênio e siloxanos. Estes tratamentos possuem custos elevados que devem ser criteriosamente considerados nos estudos de viabilidade. O cenário que apresentou melhor viabilidade foi a aplicação de reatores UASB seguidos de lodos ativados convencional com aproveitamento elétrico e térmico do biogás (cogeração), com expectativa de retorno dos investimentos para populações atendidas próximas a 100.000 habitantes. Os principais ganhos ambientais no aproveitamento energético do biogás referem-se à redução de emissões de metano e na redução do volume de lodo a ser disposto em aterros sanitários por meio da secagem nos arranjos com cogeração.

Palavras-chave: Biogás, Tratamento de esgoto, Energia elétrica, Geração de Energia Elétrica.

ABSTRACT

SCHEUER, Alex. **Electricity generation from biogas produced in sewage treatment plants.** 112 p. Course Conclusion Monograph in Renewable Energy - Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2019.

Diagnosis of the National Sanitation Information System (SNIS), referring to 2017, indicates that only 46% of the sewage generated is treated. In order to reverse this situation, Brazil committed itself to the United Nations Summit on Sustainable Development by 2030 to "make access to adequate and fair sanitation and hygiene for all". A study by the National Water Agency (ANA) estimates that it will need R\$ 149.5 billion to universalize the collection and treatment of sewage by 2035. Considering that there will be an increase in investment in basic sanitation trying to fulfill the commitments assumed, there is the need to improve the sewage treatment processes adopted, making them more efficient, sustainable and economically practical. It is in this context that the use of biogas can bring great contribution, since the electric energy generated can be used internally in the processes of sewage treatment and exported to the grid. This work investigates the technological routes generating electric energy with the biogas from treating sanitary sewage. Using the electric energy produced, it is expected to lower or cut the use of an external source of electric energy, making the sewage treatment process more sustainable and energy-efficient. From a literature review on the subject, with emphasis on theoretical information and experimental data obtained in other research papers, it was observed that there is a significant improvement in the viability of the projects when the electrical generation is associated with the thermal use of exhaust gases. For energy conversion, the most widely used equipment is internal combustion engines, given their better electrical efficiency, lower acquisition costs and operational simplicity. The main preliminary biogas treatments refer to the removal of moisture and contaminants such as hydrogen sulfide and siloxanes. These treatments have high costs that must be carefully considered in the feasibility studies. The scenario that presented the best feasibility was the application of UASB reactors followed by conventional activated sludge with electric and thermal biogas utilization (cogeneration), with expected return on investments for the benefited populations close to 100,000 inhabitants. The main environmental gains in the biogas energy use refer to the reduction of methane emissions and the reduction of the volume of sludge landfilled through drying in cogeneration arrangements.

Keywords: Biogas, Sewage treatment, Electric energy, Electric power generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Protocolo de pesquisa.....	17
Figura 2 – Representação esquemática do processo de lodos ativados.	22
Figura 3 – Fluxograma de processo ETE com reatores em batelada sequencial.	25
Figura 4 – ETE Belém.	26
Figura 5 - Etapas da digestão anaeróbica.....	28
Figura 6 – Representação esquemática de um reator UASB.....	30
Figura 7 – Queimador aberto (a) e fechado (b).	34
Figura 8 – Secador rotativo (a) e secador de caçamba com misturador interno (b)..	36
Figura 9 – Motores Cummins série QSV91 (a) e Jenbacher J320 GS (b).....	38
Figura 10 – Microturbina Capstone C65 (65 kW _e).....	40
Figura 11 – Balanço esquemático de DQO sistemas anaeróbios (a) e aeróbios (b).	45
Figura 12 – Balanço de DQO com metano que pode ser efetivamente recuperado.	46
Figura 13 – Custo global evitado nos cenários propostos.	50
Figura 14 – Diagrama esquemático do fluxo de materiais na ETE Santa Quitéria....	51
Figura 15 – Produção mensal de biogás na ETE Santa Quitéria em 2013.	52
Figura 16 – Custo dos motores em R\$/kW em valores de 2015.	55
Figura 17 – Arranjo da alternativa 5 (UASB-LAC-GAS).	68
Figura 18 – CAPEX para as cinco alternativas.....	68
Figura 19 – OPEX para as cinco alternativas.....	70
Figura 20 – VPL para as cinco alternativas.	71
Figura 21 – Filtro de carvão ativado SILOXA modelo GRW 200.....	84
Figura 22 – Tratamento complementar c/ refrigerador e filtro de carvão ativado	85
Figura 23 – Filtro de sedimentos com dreno para condensado.....	86
Figura 24 – Vaso de desidratação por chiller	87
Figura 25 – Filtros de H ₂ S.....	88
Figura 26 – Desenho esquemático de uma microturbina com cogeração.....	94
Figura 27 – Desenho esquemático do arranjo da ETE Arrudas.	97
Figura 28 – Grupo gerador ciclo Otto ETE Ribeirão Preto.	98
Figura 29 – ETE Jacuípe II.....	99
Figura 30 – ETE Ouro Verde.....	100
Figura 31 – Planta de codigestão da CS Bioenergia.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atendimento da rede de coleta e tratamento de esgotos.	13
Tabela 2 – Composição típica do biogás gerado em reatores anaeróbios.....	28
Tabela 3 – Custo por potência instalada e rendimentos para conj. motogeradores..	55
Tabela 4 – Custo do gasômetro de acordo com a escala da ETE.	56
Tabela 5 – Custo tratamento biogás cenários 1, 3 e 5.	56
Tabela 6 – Custo tratamento biogás cenário 2.....	57
Tabela 7 – Custo tratamento biogás cenário 4.....	57
Tabela 8 – Custo da unidade de compressão (A-2 corresponde a cenário 2).	57
Tabela 9 – Custo sistema completo de secagem de lodo.	58
Tabela 10 – Custo das tubulações para condução dos gases do motogerador.....	58
Tabela 11 – Custo equip. p/ medição de vazão e análise de conc. de gases.....	58
Tabela 12 – Números de funcionários adicionais por escala da ETE.	59
Tabela 13 – Escala mínima para viabilidade em número de habitantes.	61
Tabela 14 – Premissas adotadas no estudo.	67
Tabela 15 – Cons. anual energia elét. s/ considerar custos evitados c/ o biogás.	69
Tabela 16 – Produção anual de lodo e custo para transporte e disposição final.	69
Tabela 17 – TIR para as alternativas 3 e 5.	71
Tabela 18 – Demanda e custo para secagem térmica do lodo.	73
Tabela 19 – Custos p/ habitante p/ sistema convencional e UASB + lodo ativado. ..	73
Tabela 20 – Valores de energia produzida a partir do biogás.	74
Tabela 21 – Resumo do custo de ciclo de vida LAAP, UASB-LAC e DP-LAC-DL.	76
Tabela 22 – Custo de equipamentos e custo instalado para mercado americano.	95

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ANA	Agência Nacional de Águas
CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RALF	Reator Anaeróbio de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente
RBS	Reator Batelada Sequencial
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TIR	Taxa Interna de Retorno
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>

LISTA DE UNIDADES

°C	Grau Celsius
cv	Cavalo-vapor
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-hora
GWh _e	Gigawatt-hora elétrico
h/a	Horas por ano
kVA	Quilovoltampere
kJ	Quilojoule
kW	Quilowatt
kW _e	Quilowatt elétrico
kWh	Quilowatt-hora
kWh _e	Quilowatt-hora elétrico
L	Litro
m	Metro
m ³	Metro cúbico
mg	Miligrama
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
MW _e	Megawatt elétrico
MWh	Megawatt-hora
MWh _e	Megawatt-hora elétrico
Nm ³	Normal metro cúbico
ppm	Parte por milhão
s	Segundo
TWh	Terawatt-hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	TEMA	14
1.1.1	Delimitação do Tema.....	14
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	15
1.3	OBJETIVOS.....	16
1.3.1	Objetivo Geral.....	16
1.3.2	Objetivos Específicos	16
1.4	JUSTIFICATIVA.....	16
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS.....	19
2.1.1	Lagoas de Estabilização.....	20
2.1.2	Lodos Ativados	21
2.1.2.1	Convencional (fluxo contínuo).....	22
2.1.2.2	Aeração prolongada	23
2.1.2.3	Reator em batelada sequencial (RBS).....	23
2.1.3	Valos de Oxidação	25
2.1.4	Reatores UASB	27
2.2	DIGESTÃO ANAERÓBICA DE LODO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....	30
2.3	O BIOGÁS E SUAS APLICAÇÕES	32
2.3.1	Combustão Direta sem Recuperação de Energia	33
2.3.1.1	Queimador aberto.....	34
2.3.1.2	Queimador fechado	35
2.3.2	Combustão Direta com Recuperação de Energia	35
2.3.2.1	Caldeiras	35
2.3.2.2	Secadores térmicos.....	36
2.3.3	Geração Combinada de Calor e Eletricidade	37
2.3.3.1	Motores de combustão interna	37

2.3.3.2	Turbinas a gás.....	39
2.3.3.3	Microturbinas.....	39
3	DESENVOLVIMENTO	41
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	41
3.2	VIABILIDADE NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	44
3.2.1	Reatores UASB.....	44
3.2.2	Processamento de Lodos em Reatores Anaeróbios	76
3.2.3	Conclusões.....	81
3.3	TRATAMENTOS PRELIMINARES	83
3.3.1	Remoção de Condensado.....	85
3.3.2	Remoção de Umidade.....	86
3.3.3	Remoção do H ₂ S.....	87
3.3.4	Remoção de Siloxanos.....	90
3.4	EQUIPAMENTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	91
3.4.1	Motores de Combustão Interna	91
3.4.2	Microturbinas.....	93
3.4.3	Conclusões.....	95
3.5	PLANTAS EM OPERAÇÃO	96
4	CONCLUSÃO	104
4.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
	REFERÊNCIAS	109

1 INTRODUÇÃO

Apesar de recentes avanços, diagnóstico do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), referente a 2017, indica que apenas 46% do esgoto gerado no país é tratado (SNIS, 2019). A Tabela 1 mostra o percentual de municípios atendidos por rede de coleta e o percentual da população atendida por serviço de tratamento, considerando cada macrorregião brasileira.

Tabela 1 – Atendimento da rede de coleta e tratamento de esgotos.

Macrorregião	Municípios atendidos coleta de esgotos (%)	População atendida tratamento de esgotos (%)
Norte	10,2	22,6
Nordeste	26,9	34,7
Sudeste	78,6	50,4
Sul	43,9	44,9
Centro-Oeste	53,9	52,0
Brasil	52,4	46,0

Fonte: Adaptado de SNIS (2019).

Entre as principais dificuldades para universalizar a coleta e tratamento de esgoto estão a falta de prioridade nas políticas públicas, alto custo de investimento e complexidade das obras. Buscando reverter este quadro, o Brasil assumiu compromisso com a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável de até 2030 “alcançar o acesso ao saneamento e a higiene adequados e equitativos para todos” (NAÇÕES UNIDAS, 2019). Meta semelhante é prevista como política pública no Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB, 2013). Estudo da Agência Nacional de Águas (ANA) estima que serão necessários R\$ 149,5 bilhões para universalizar a coleta e tratamento de esgoto até 2035 (ANA, 2019).

Considerando-se que haverá aumento do investimento em saneamento básico na tentativa de cumprir os compromissos assumidos, há a necessidade de se aprimorar os processos de tratamento de esgoto adotados, tornando-os mais eficientes, sustentáveis e viáveis economicamente. É neste contexto que o aproveitamento do biogás gerado no tratamento pode trazer grande contribuição, visto que a energia elétrica gerada pode ser utilizada internamente nos processos e, a depender de condições específicas de cada instalação, até exportada para a rede elétrica.

O consumo de energia elétrica é indispensável na gestão e operação dos sistemas de esgotamento sanitário e origina uma despesa de exploração significativa (SNIS, 2019). Em 2017 as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento participantes do SNIS foram de 1,3 TWh com esgotamento sanitário. Sob uma perspectiva econômica e financeira, as ineficiências no uso da energia elétrica constituem custos evitáveis que são suportados por subsídios à operação dos serviços e por taxas e tarifas cobradas dos usuários. Já sob uma perspectiva ambiental, o uso de energia sem considerações de eficiência contribui para a emissão de gases de efeito estufa desnecessários, com impactos nas alterações climáticas em escala global (SNIS, 2019).

1.1 TEMA

Análise das rotas tecnológicas envolvidas na geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no tratamento de esgoto sanitário, bem como estudo do potencial a ser explorado e viabilidade técnica/econômica de aproveitamento em empreendimentos novos e existentes.

1.1.1 Delimitação do Tema

A análise dos métodos de geração de biogás em estações de tratamento de esgoto (ETE) considerará como materiais de entrada os presentes nos diversos tipos de ETES, notadamente esgoto bruto e lodo. Todavia, resíduos orgânicos externos podem ser utilizados de modo complementar, em alguns cenários, contribuindo para a estabilização e otimização do processo de digestão anaeróbica. O trabalho tratará somente do tratamento de esgotos domésticos.

Serão avaliados somente os métodos de tratamento preliminar do biogás necessários para aumento de rendimento e redução de emissões visando atendimento a normas ambientais. A purificação do biogás para produção de biometano não será abordada.

Será considerada a combustão do biogás diretamente nos equipamentos de acionamento dos geradores elétricos. A opção de geração de energia térmica para

posterior conversão em elétrica não será investigada. Entretanto, será considerado possível aproveitamento do calor residual gerado para uso interno, por exemplo, para aquecimento do biodigestor.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Algumas das principais tecnologias utilizadas no tratamento de esgoto sanitário em centros urbanos fazem uso de biodigestores anaeróbicos. O biogás gerado no tratamento normalmente é perdido ou então é queimado, não se aproveitando a energia contida no gás. Associado ao aproveitamento energético, é premente mitigar os danos ambientais provocados pelo biogás. Conforme observado por Cabral (2016), parte significativa dos biodigestores projetados no passado não consideravam como premissa o uso do biogás, ocorrendo que hoje em boa parte dos reatores em operação há a perda do biogás para a atmosfera por vazamentos. Como o metano gerado é um importante gás de efeito estufa, há necessidade de se coletar eficientemente o biogás e buscar meios de emprego diversos da simples queima em *flares*.

Além da problemática do biogás, presente em parte das ETEs em operação, tem-se que todos os processos de tratamento de esgoto geram como resíduo o lodo, normalmente não aproveitado e descartado em aterros sanitários (TERA AMBIENTAL, 2018), resultando em um importante passivo ambiental.

Diante do exposto, coloca-se a seguinte pergunta: *Como melhorar a eficiência e sustentabilidade do processo de tratamento de esgoto sanitário e mitigar os danos ambientais inerentes?*

A premissa considerada neste trabalho para responder a esta pergunta faz uso dos biodigestores anaeróbicos para produção de biogás, tanto para tratamento primário do esgoto bruto, quanto para processamento de alguns tipos de lodo. A partir do uso da energia elétrica gerada por meio do biogás, espera-se reduzir ou eliminar o uso de fonte externa de energia elétrica, tornando o processo de tratamento de esgoto mais sustentável e eficiente energeticamente. O processamento de lodo, por sua vez, pode criar condições para que o rejeito resultante seja utilizado como biofertilizante de melhor qualidade, gerando ganhos econômicos e evitando o descarte em aterros sanitários.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar alternativas tecnológicas já implementadas e em estudo para aproveitamento do biogás produzido nas estações de tratamento de esgoto doméstico, focando na análise da viabilidade da geração de energia elétrica para o autoconsumo e geração distribuída.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar a viabilidade de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto, considerando os diversos arranjos de tratamento de esgoto empregados no Brasil.
- b) Identificar os tratamentos preliminares necessários para aproveitamento do biogás na geração de energia elétrica.
- c) Avaliar os tipos de equipamentos disponíveis no mercado para geração de energia elétrica a partir do biogás.
- d) Levantar informações sobre plantas em operação no Brasil para fins de pesquisa e/ou uso comercial.

1.4 JUSTIFICATIVA

Este trabalho de pesquisa visa contribuir para o maior conhecimento da viabilidade e aplicação do biogás gerado em estações de tratamento de esgoto para uso na geração de energia elétrica. Além dos ganhos ambientais obtidos pela produção de energia elétrica a partir de fonte renovável, tem-se expectativa de demonstrar a melhora nos resultados financeiros do processo e assim contribuir para maior atratividade e disponibilidade de investimentos, incentivando a ampliação das

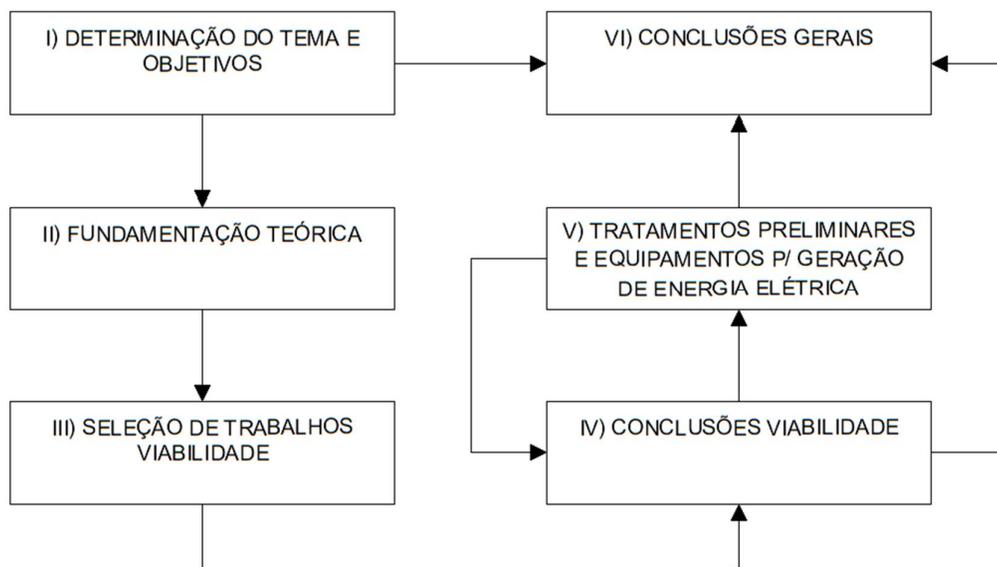
redes de coleta e tratamento, resultando em maior saúde e qualidade de vida para as populações atendidas.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho foi desenvolvido a partir da revisão bibliográfica sobre o tema, com ênfase em informações teóricas e dados experimentais obtidos em outros trabalhos de pesquisa.

A Figura 1 sintetiza o protocolo de pesquisa adotado.

Figura 1 – Protocolo de pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

A Etapa I buscou determinar o tema e os objetivos. Realizou-se revisão bibliográfica preliminar, com ênfase em trabalhos de autores reconhecidos na área de interesse.

A Etapa II consistiu no aprofundamento da revisão bibliográfica com o objetivo de se obter a base teórica para desenvolvimento da pesquisa. Focou-se no estudo dos processos de tratamento de esgoto, digestão anaeróbica, propriedades e aplicações do biogás.

Na Etapa III houve a seleção dos trabalhos com maior relevância acerca da viabilidade da geração de energia elétrica a partir do biogás gerado nos processos de tratamento de esgoto.

A Etapa IV focou no estudo pormenorizado dos trabalhos selecionados na Etapa III. Formulou-se hipóteses e elaborou-se as conclusões a respeito da viabilidade da geração de energia elétrica.

Na Etapa V estudou-se detalhadamente os tratamentos preliminares necessários para aproveitamento do biogás e os equipamentos utilizados na geração de energia elétrica, observando-se o impacto destes na viabilidade.

Na Etapa VI formulou-se as conclusões gerais desta pesquisa a partir dos objetivos específicos e premissas definidos na Etapa I e das conclusões e resultados obtidos nas Etapas IV e V.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é realizada a revisão bibliográfica dos temas tratamento de esgotos domésticos, digestão anaeróbica de lodo, e biogás e suas aplicações, buscando-se obter subsídios teóricos para desenvolvimento da pesquisa.

2.1 TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS

O esgoto sanitário é composto majoritariamente por água, que corresponde a cerca de 99,8% de sua composição volumétrica. O restante é constituído por sólidos suspensos e sólidos dissolvidos, na forma de compostos orgânicos, nutrientes, microrganismos e sólidos inertes. Os volumes, composições específicas e concentrações do esgoto dependem da região atendida e de sua respectiva disponibilidade de água, do nível socioeconômico e das atividades desenvolvidas, incluindo as industriais, além de causas como ocorrências de infiltrações na rede coletora de esgoto (VON SPERLING, 2005 apud PROBIOGÁS, 2015).

Os processos de tratamento de esgotos dividem-se em operações e processos unitários, usualmente classificados pelos seguintes níveis: preliminar, primário, secundário e, eventualmente, terciário (MAY, 2014).

O tratamento preliminar tem por objetivo a remoção dos sólidos grosseiros e areia, e normalmente é composto por gradeamento, desarenação e medição de vazão. O tratamento primário visa a remoção de sólidos sedimentáveis em suspensão e sólidos flutuantes, por meio da decantação primária. O tratamento secundário busca a remoção de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) em suspensão (matéria orgânica em suspensão fina, não removida no tratamento primário) e DBO solúvel (matéria orgânica na forma de sólidos dissolvidos). Nessa etapa do tratamento a remoção da matéria orgânica ocorre por meio de reações bioquímicas, realizadas por microrganismos. O contato efetivo entre esses organismos e o material orgânico contido nos esgotos propicia a conversão da matéria orgânica, seja de forma aeróbia ou anaeróbia. São exemplos de tipos de tratamento secundário comumente aplicados no Brasil: lagoas de estabilização, lodos ativados, valos de oxidação, reator UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (MAY, 2014).

O tratamento terciário tem como finalidade a remoção de poluentes tóxicos ou não biodegradáveis remanescentes e é bastante utilizado quando se tem como finalidade o reuso de águas. Exemplos de tratamentos terciários são a filtração, operações com membranas e processos oxidativos avançados (VARGAS, 2008).

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO) são parâmetros utilizados para indicar de forma indireta a concentração de matéria orgânica em um dado volume líquido. A DBO corresponde à quantidade de oxigênio dissolvido necessária para estabilizar a matéria orgânica por oxidação microbiana, enquanto a DQO considera um agente químico para oxidação da matéria orgânica. A DBO é um parâmetro importante para avaliação da biodegradabilidade dos efluentes, enquanto a análise da DQO é necessária devido à resistência de determinadas substâncias ao ataque biológico. Os valores de DQO são sempre superiores aos de DBO, pois as substâncias não biodegradáveis também são oxidadas.

2.1.1 Lagoas de Estabilização

As lagoas de estabilização são sistemas de tratamento biológico em que a estabilização da matéria orgânica é executada pela oxidação bacteriológica (oxidação aeróbica ou fermentação anaeróbica) e/ou redução fotossintética das algas (JORDÃO & PESSOA, 1995 apud KRACIK, 1998).

Trata-se de uma tecnologia simples, que possui como principal desvantagem a necessidade de grandes áreas para sua implantação. Mesmo as variantes que utilizam processos anaeróbios não permitem o aproveitamento do biogás, que é perdido para a atmosfera.

Segundo Jordão & Pessoa (1995 apud KRACIK, 1998), de acordo com a forma predominante de estabilização da matéria orgânica, as lagoas de estabilização podem ser classificadas em:

- Anaeróbias: Predominam processos de fermentação anaeróbia. Imediatamente abaixo da superfície não existe oxigênio dissolvido.
- Facultativas: Os processos de fermentação anaeróbica, oxidação aeróbia e redução fotossintética ocorrem simultaneamente. Uma zona

de atividade bêntica é sobreposta por uma zona aeróbia de atividade biológica, próxima à superfície.

- Estritamente aeróbias: Há um equilíbrio da oxidação e da fotossíntese, garantindo condições aeróbias em todo o meio.
- De maturação: Usadas como refinamento do tratamento prévio por lagoas ou outro processo biológico. Reduz bactérias, sólidos em suspensão, nutrientes, e uma parcela negligenciável da DBO.
- Aeradas: Há introdução de oxigênio no meio líquido por meio de um sistema mecanizado de aeração. Podem ser estritamente aeróbias ou facultativas.
- Com macrófitas: Usadas como polimento final de um tratamento por lagoas, com objetivo de reduzir nutrientes, sólidos em suspensão e a DBO remanescente. Requer manutenção (corte regular das plantas, secagem e destino final), e as áreas sombreadas incentivam a proliferação de moscas e mosquitos, razões pelas quais não é recomendada.

2.1.2 Lodos Ativados

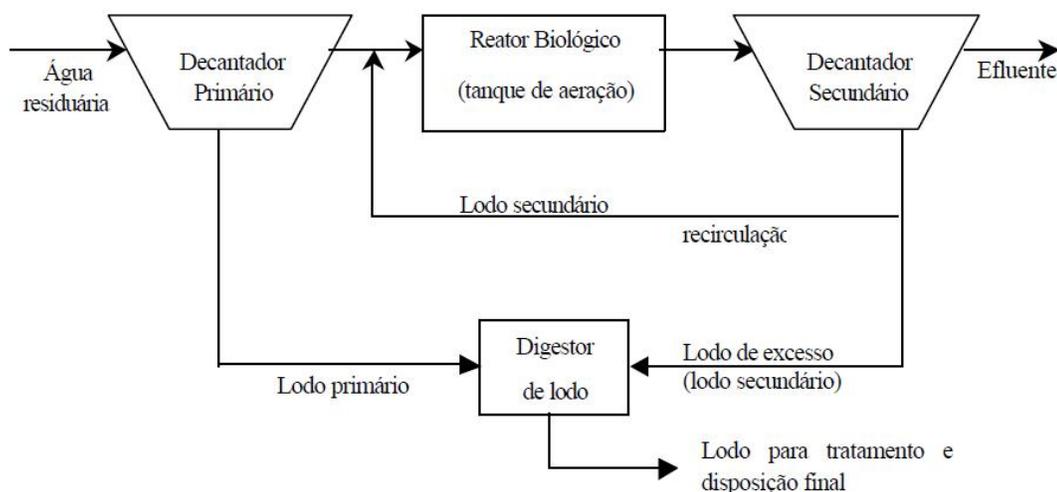
O processo fundamenta-se no princípio de que se tem que evitar a fuga descontrolada de bactérias ativas (lodo ativo) produzidas no sistema e que, portanto, deve-se recirculá-las de modo a se manter a maior concentração possível de microrganismos ativos no reator aerado, a fim de acelerar a remoção do material orgânico das águas residuárias (CAMPOS, 1994, apud MENDONÇA, 2002).

Esses microrganismos formam flocos que podem ser removidos por sedimentação em decantador secundário (ou flotador por ar dissolvido). Parte do lodo é recirculada ao reator aeróbio e parte é descartada para tratamento (MENDONÇA, 2002).

A boa qualidade do efluente final é a principal característica positiva do sistema de lodos ativados e a razão da sua ampla utilização no tratamento de esgoto sanitário. Como pontos negativos tem-se a elevada produção de lodo e os altos custos de implantação, operação e manutenção (VAN HAANDEL & MARAIS, 1999, apud, MENDONÇA, 2002).

O esquema básico do processo é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Representação esquemática do processo de lodos ativados.



Fonte: Mendonça (2002).

Existem três variações principais do processo: convencional, aeração prolongada e reator em batelada sequencial, detalhadas a seguir.

2.1.2.1 Convencional (fluxo contínuo)

O sistema de lodos ativados convencional apresenta um decantador primário, antes do tanque de aeração, para remover parcela da matéria orgânica (em suspensão, sedimentável) dos esgotos. Esta configuração proporciona economia de energia com aeração e reduz o volume do reator biológico. A idade do lodo usualmente é de 4 a 10 dias e o tempo de detenção hidráulica no reator é de 6 a 8 horas (VON SPERLING, 1997, apud DUTRA, 2014).

Para essa faixa de idade do lodo, a biomassa retirada do sistema no lodo excedente requer uma etapa de estabilização, devido ainda conter elevada matéria orgânica. O lodo excedente deve ser previamente adensado, retirando parcela da umidade, diminuindo o volume de lodo a ser tratado. (VON SPERLING, 1997, apud DUTRA, 2014). Esta estabilização pode ocorrer via processos biológicos anaeróbios ou aeróbios, ou ainda via estabilização química alcalina (CENTRO EXPERIMENTAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2019).

2.1.2.2 Aeração prolongada

A principal diferença do processo de aeração prolongada em relação ao processo convencional de fluxo contínuo é que a estabilização da biomassa ocorre no próprio tanque de aeração, não necessitando de uma etapa de estabilização complementar do lodo. Isto porque a biomassa permanece no sistema por um período de aeração mais longo, da ordem de 18 a 30 dias, e recebendo a mesma carga de DBO do esgoto bruto, haverá menor disponibilidade de alimento para as bactérias (relação alimento/microrganismos baixa). Com isso, as bactérias passam a utilizar nos seus processos metabólicos a própria matéria orgânica componente de suas células, ocorrendo assim a estabilização da biomassa no próprio tanque de aeração (DUTRA, 2014).

Outra diferença entre o processo de aeração prolongada e o processo convencional, é que no primeiro não há decantador primário, a fim de evitar a geração de alguma outra forma de lodo que necessite posterior estabilização. Desta forma, o fluxograma do sistema de aeração prolongada é mais simples, pois não há decantadores primários nem unidades de digestão de lodo (VON SPERLING, 1997, apud DUTRA, 2014).

O sistema de lodos ativados por aeração prolongada é a configuração que exige maior área para construção e consumo de energia elétrica quando comparado ao processo convencional (DUTRA, 2014).

2.1.2.3 Reator em batelada sequencial (RBS)

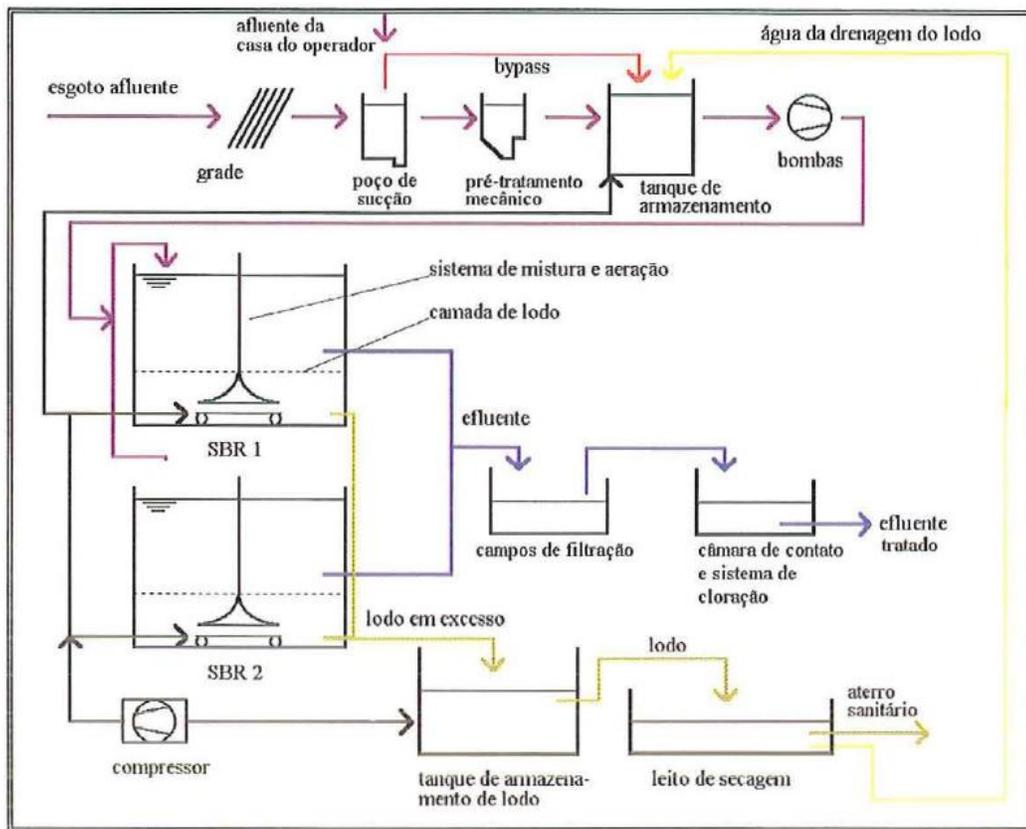
Esta tecnologia consiste na incorporação de todas as unidades, processos e operações adjuntos do sistema de lodos ativados convencional (decantação primária, oxidação biológica, decantação secundária) em um único tanque. Os processos e operação passam então a ser sequenciais ao longo do tempo (VON SPERLING, 1997, apud DUTRA, 2014).

Segundo Jordão & Pessoa, 2005, Apud Dutra, 2014, as seguintes fases compõem o processo do reator em batelada sequencial:

1. Enchimento: Esgoto bruto alimenta o tanque até o nível estabelecido pelo dimensionamento ou até a disponibilidade de entrada. Os aeradores podem operar ou não.
2. Reação Biológica: Os aeradores são mantidos ligados, garantindo o oxigênio necessário para a degradação da matéria orgânica e a transformação da amônia (NH_4). Para alcançar uma nitrificação e desnitrificação, a aeração deve ser interrompida durante a reação, de forma a prevalecer condições anóxicas por um período determinado.
3. Sedimentação: A aeração é desligada e os sólidos em suspensão sedimentam até o nível de lodo determinado no dimensionamento. A concentração de sólidos totais no lodo pode variar entre 6.000 a 8.000 mg/L.
4. Retirada do efluente: O efluente tratado é retirado por recalque hidráulico ou vertedor flutuante. É indicado garantir uma altura livre de proteção do clarificado acima do nível de lodo.
5. Repouso e ajustes: Tempo utilizado para retirada de lodo do reator e realização de ajustes entre ciclos. Pode-se ainda ter uma bomba hidráulica para recalque do lodo de forma automatizada, por meio de sensores de nível.

Os reatores em batelada sequencial têm aplicação, principalmente, em sistemas de pequeno porte e/ou que requeiram remoção de nitrogênio e potássio. Há possibilidade de produção de biogás a partir da digestão aeróbica do lodo gerado. Para exemplificação, a Figura 3 apresenta o fluxograma de processo de uma ETE com reatores em batelada sequencial. Por ser um processo descontínuo, é comum o arranjo com tanque de armazenamento e reatores em paralelo, de modo a absorver a entrada contínua do esgoto a ser tratado.

Figura 3 – Fluxograma de processo ETE com reatores em batelada sequencial.



Fonte: Marconi (2001).

Por ser um processo cíclico, caracterizado por várias operações sequenciais com tempos determinados, há necessidade de maior nível de automação para acionamento automático de válvulas, bombas, compressores, agitadores, quando comparado aos demais processos de tratamento.

2.1.3 Valos de Oxidação

Os valos de oxidação são unidades compactadas de tratamento com os mesmos princípios básicos da aeração prolongada e constituem estações de tratamento completo de nível secundário. A decantação no final é uma inclusão optativa e depende do tipo de operação estabelecida, mas, a existência desta unidade no efluente do valo eliminará sólidos decantáveis transportados, permitindo o funcionamento contínuo do sistema (CASAN, 2019).

Como exemplo, a Figura 4 mostra a ETE Belém, em Curitiba, que utiliza o processo de lodos ativados com aeração prolongada em valo de fluxo orbital, também conhecido como carrossel (CURITIBA, 2017).

Figura 4 – ETE Belém.



Fonte: Curitiba (2017).

De acordo com Casan (2019), as estações de tratamento mais simples são compostas por:

- Dispositivo de entrada: Caixa de passagem e de distribuição, quando houver mais de um valo. Estas podem ser precedidas por sistema de gradeamento e medição.
- Tanque de aeração: Possuem os formatos mais variados, sendo que o mais comum é o de fluxo orbital. O importante sobre o seu funcionamento é que seja mantido os critérios estabelecidos para a velocidade média do fluxo de 0,3 m/s durante o período de operação e que o fluxo escoe sem a possibilidade de zonas mortas. O esgoto é submetido a um processo de aeração onde ocorre a oxidação biológica e o que promove o crescimento de flocos biológicos e consequentemente a redução da DBO.
- Dispositivo de saída: São projetados em função do tipo de operação, que poderá exigir fluxo contínuo ou intermitente. Para operação

continua utiliza-se decantador secundário, com retorno de parte do lodo decantado.

2.1.4 Reatores UASB

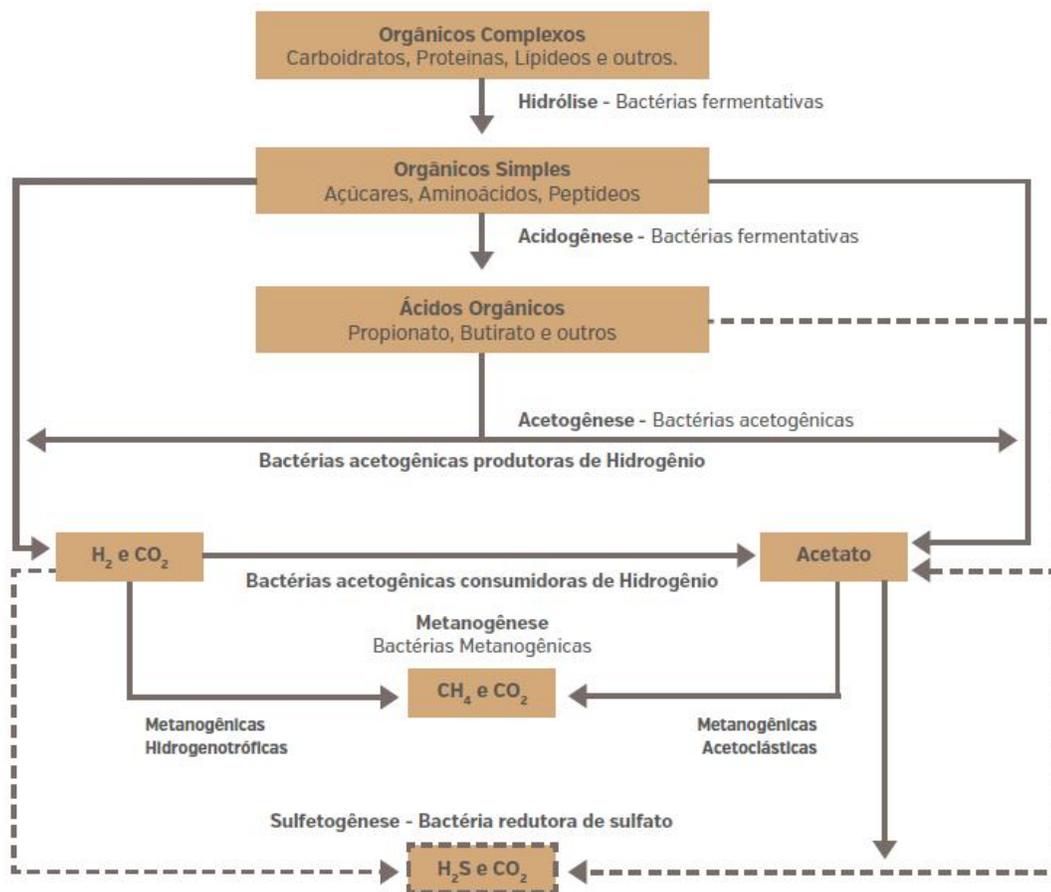
Os reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors*), ou Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo, fundamentam-se no processo de digestão anaeróbia, que é um processo biológico, fermentativo, em que microrganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio e produzem biogás (AMARAL, 2004).

Segundo Baréa (2006), a digestão anaeróbia é composta pelas seguintes fases:

- Hidrólise: Rompimento das cadeias polímeras em compostos mais simples, ao nível de monômeros, cujo tamanho destes permite a passagem através da membrana celular.
- Acidogênese: Os monômeros produzidos na hidrólise são reduzidos a ácidos graxos voláteis, CO_2 e H_2 , mediante um processo intracelular de oxidação-redução. Estas reduções são possíveis por ação catalisadora de bactérias acidogênicas.
- Acetogênese: Na continuação, bactérias acetogênicas, transformam os compostos anteriores em acetato. De forma similar à etapa anterior, neste passo se produz CO_2 e H_2 .
- Metanogênese: Por fim, bactérias metanogênicas, cumprem a função de transformar o acetato em metano. Além do metano e dióxido de carbono, o biogás produzido contém nitrogênio, hidrogênio e ácido sulfídrico (H_2S), em concentrações inferiores a 1%.

A Figura 5 apresenta as rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbica.

Figura 5 - Etapas da digestão anaeróbica.



Fonte: Probiogas (2015).

A Tabela 2 apresenta a composição típica do biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico.

Tabela 2 – Composição típica do biogás gerado em reatores anaeróbios

Parâmetro	Composição volumétrica típica
Metano – CH ₄	60 a 85%
Gás carbônico – CO ₂	5 a 15%
Monóxido de carbono – CO	0 a 0,3%
Nitrogênio – N ₂	10 a 25% (*)
Hidrogênio – H ₂	0 a 3%
Sulfeto de hidrogênio – H ₂ S	1000 a 2000ppmv
Oxigênio – O ₂	traços

(*) A elevada fração de nitrogênio deve-se ao N₂ dissolvido no esgoto doméstico

Fonte: Adaptado de Lobato (2011).

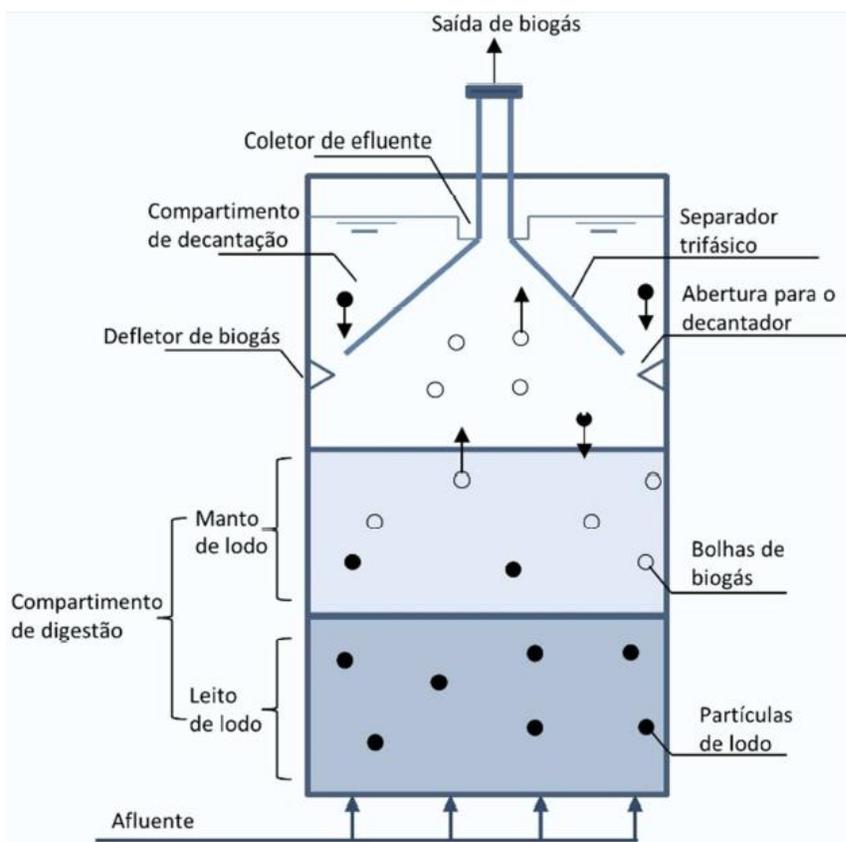
Muitos dos compostos intermediários formados durante o processo de digestão anaeróbia passam a ser utilizados pelas bactérias redutoras de sulfato, provocando uma competição delas com as bactérias fermentativas, acetogênicas e metanogênicas, pelos substratos disponíveis. Devido a essa competição, dois produtos finais passam a ser formados: metano (através da metanogênese) e sulfeto (através da sulfetogênese), sendo a concentração de sulfato que define qual o processo é predominante. Assim, o excesso de sulfatos pode prejudicar a produção de metano, e a sulfetogênese é, portanto, indesejável neste processo (CHERNICHARO, 2007 apud CABRAL, 2016).

Ainda segundo Baréa (2006), o funcionamento do reator UASB se processa da seguinte forma:

- O despejo é introduzido e distribuído em toda sua base.
- Um manto de lodo anaeróbio é mantido em seu interior. O esgoto afluente é forçado a percolar através deste manto. Nesta passagem, partículas finas suspensas são filtradas e componentes solúveis são absorvidos na biomassa.
- A biomassa converte o esgoto em biogás e alguma nova biomassa. O biogás sai na forma de bolhas o que ocasiona a necessária mistura.
- Na parte de cima do reator está localizada uma estrutura que direciona o biogás para os coletores de biogás. Parte dos sólidos (lodo) e líquidos são direcionados para os compartimentos de decantação. Neste local não há biogás, propiciando a decantação dos sólidos. Os sólidos que sedimentam no decantador retornam novamente para o compartimento em que se localiza o manto de lodo.
- O efluente tratado é retirado do reator por meio de vertedores localizados nos decantadores.

A Figura 6 mostra uma representação esquemática de um reator UASB.

Figura 6 – Representação esquemática de um reator UASB.



Fonte: Chernicharo, 2007, apud Koga, 2016.

Os reatores UASB são adequados somente para o processamento de despejos com grande quantidade de água e matéria seca usualmente inferior a 2%.

Para cumprir a legislação ambiental, o esgoto sanitário, depois do tratamento em reatores UASB, normalmente necessita de um tratamento secundário, de forma a reduzir a matéria orgânica remanescente e, caso necessário, minimizar a concentração de nutrientes como o nitrogênio e o fósforo. Em alguns casos, ainda se faz necessária a etapa de desinfecção (PROBIOGÁS, 2015).

2.2 DIGESTÃO ANAERÓBICA DE LODO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

As principais etapas do gerenciamento do lodo, com os respectivos objetivos são: adensamento para remoção da umidade e redução do volume; estabilização para

remoção da matéria orgânica e redução dos sólidos voláteis a fim de reduzir odor; desaguamento para remoção da umidade e redução ainda maior do volume; higienização para remoção de patogênicos, necessária em alguns casos, como uso agrícola e, por fim, a disposição final dos subprodutos (VALENTE 2015).

O processamento de lodos em ETEs tem o objetivo de estabilização de lodos primários e secundários. Além da possibilidade de aproveitamento do biogás, a estabilização reduz o volume de lodo a ser encaminhado para disposição final.

A constituição do lodo a ser digerido, principalmente a fração de matéria orgânica biologicamente degradável, depende das substâncias que compõem os esgotos, do tipo de processo de tratamento de esgoto, do volume de águas pluviais que é tratado juntamente na estação de tratamento e de variações sazonais (VALENTE 2015).

Os digestores anaeróbios convencionais destinam-se preferencialmente à estabilização de resíduos com elevada concentração de material particulado. Assim, a hidrólise desses sólidos pode se tornar a etapa limitante de todo o processo de digestão anaeróbia. Por sua vez, a taxa de hidrólise é afetada por diversos fatores, podendo-se destacar: a temperatura, o tempo de detenção hidráulica, a composição do substrato e o tamanho das partículas (PROBIOGÁS, 2015).

Na prática, os digestores anaeróbios são dimensionados com tempo de detenção acima do ótimo, de forma a compensar eventuais problemas operacionais como a flutuação do volume de lodo produzido, a ineficiência do sistema de mistura, a variação de temperatura ambiente, e o assoreamento por acúmulo de material inerte. Levando em consideração que os digestores em ETEs são dimensionados por meio do tempo de detenção hidráulica e que a carga orgânica do lodo a ser estabilizado é relativamente baixa, os digestores em ETEs têm capacidade para receber cargas orgânicas adicionais, permitindo, assim, a codigestão (PROBIOGÁS, 2015).

Em relação a temperatura, a digestão pode ser realizada tanto no regime termofílico (temperaturas mais altas) ou mesofílico (temperaturas médias), sendo que a opção mais comumente utilizada é a condição mesofílica. Objetivando otimizar a hidrólise do material particulado, os digestores convencionais são normalmente aquecidos, sendo usuais temperaturas de operação na faixa de 32 a 38°C. A fase de hidrólise se processa muito lentamente quando os digestores são operados a temperaturas inferiores a 20°C. Embora sejam necessários para a operação na

condição mesofílica também no Brasil, o isolamento e o aquecimento não estão sendo realizados na maioria dos digestores existentes. A ausência de isolamento e aquecimento dos digestores anaeróbios deve ser considerada durante a elaboração dos projetos, determinando tempos de detenção hidráulica maiores, em torno de 40 dias (PROBIOGÁS, 2015).

Os dois principais tipos de digestores para processamento de lodo são descritos a seguir (DUTRA, 2014):

- Digestor anaeróbico de baixa carga: Não possui mecanismos de mistura, constituindo um tanque único, onde ocorrem a digestão, adensamento e formação de sobrenadante simultaneamente. A ausência de mistura faz com que no máximo 50% do volume do digestor seja utilizado efetivamente no processo de digestão, resultando em digestores de grandes volumes para se conseguir boa estabilização.
- Digestor anaeróbico de um estágio e alta carga: Possui mecanismos de mistura e aquecimento, e é operado com taxas de alimentação uniformes de lodos previamente adensados, garantindo uniformidade das condições do tanque. Desta forma, este tipo de digestor proporciona melhor estabilização do lodo e resulta em tanques de menor volume.

2.3 O BIOGÁS E SUAS APLICAÇÕES

O biogás é uma fonte alternativa de energia, gerado por meio de processos de degradação microbiana de matéria orgânica em regime anaeróbico. É composto principalmente de metano e dióxido de carbono. O metano é responsável pelo poder energético da mistura gasosa e pode representar de 50% a 75% do biogás. No Brasil as temperaturas são propícias para a eficiência dos processos anaeróbios, sendo possível tratar efluentes ou resíduos sólidos de forma econômica e ao mesmo tempo produzir o biogás como fonte de energia renovável (ROTÁRIA DO BRASIL, 2019).

O biogás pode ser obtido a partir da digestão anaeróbia de resíduos domésticos, agrícolas e industriais. Com exceção da produção em aterros sanitários, a partir de resíduos sólidos urbanos (lixo), o processo da digestão anaeróbia se

processa no interior de reatores anaeróbios, sendo as mais comuns os tipos indiano, chinês, canadense e europeu (FIEP, 2016). Para o tratamento de esgoto sanitário, o reator tipo UASB, descrito no item 2.1.4, é o mais comum. A composição do gás é bastante afetada pelos substratos e tecnologia utilizados.

Segundo Lobato (2011), o poder calorífico do biogás está entre 21,5 e 25,1 MJ/m³, considerando concentrações de metano entre 60% e 70%, respectivamente, podendo ser utilizado para diferentes aplicações, tais como:

- Uso direto como combustível em caldeiras, fornos e estufas, em substituição a outros tipos de combustíveis.
- Geração de eletricidade para uso local ou venda para a concessionária de energia.
- Cogeração de eletricidade e calor.
- Combustível alternativo visando à injeção na linha de gás natural ou aproveitamento como combustível veicular.
- Secagem e higienização do lodo gerado na própria estação de tratamento de esgoto.
- No meio rural para cocção, iluminação, refrigeração de alimentos, aquecimento de água, secagem de insumos.

Qualquer que seja o uso pretendido, haverá sempre a necessidade de algum tipo de tratamento preliminar. Esse requisito poderá ser mínimo, a exemplo da simples remoção de condensado, no caso de usos menos nobres como a combustão direta; como bastante completo, quando se almeja a injeção na rede de gás natural ou a utilização como combustível veicular (CHERNICHARO e STUETZ, 2008, apud LOBATO, 2011).

Ainda segundo Lobato (2011), nos subitens a seguir são detalhadas as principais formas de uso do biogás.

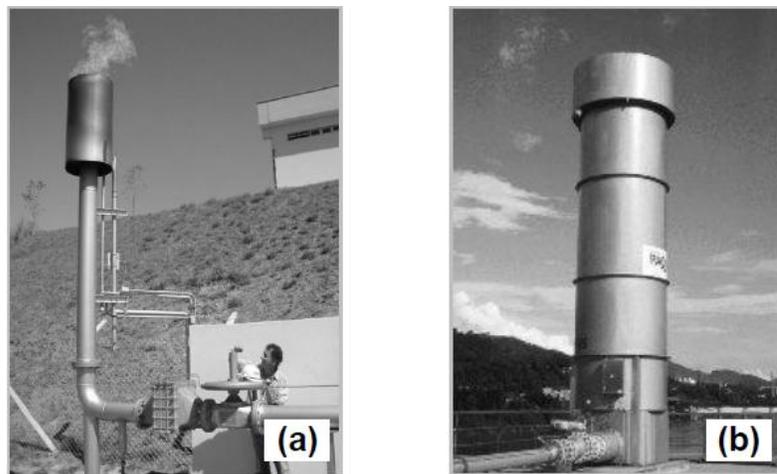
2.3.1 Combustão Direta sem Recuperação de Energia

A combustão direta sem recuperação de energia é realizada por meio de queimadores (*flares*), que são, basicamente, dispositivos que possibilitam a ignição e queima de gases. Embora o uso de queimadores não possibilite o aproveitamento energético, ainda assim esta alternativa deve existir nos locais onde o biogás é

gerado, por motivo de segurança (formação de atmosferas explosivas), para controle de odores e por razões climáticas, pois, como já visto, o metano é um importante gás de efeito estufa.

Os queimadores podem ser do tipo aberto ou fechado, apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Queimador aberto (a) e fechado (b).



Fonte: Lobato (2011).

Mesmo nas plantas em que há o aproveitamento energético do biogás, um queimador deve estar presente para os momentos em que o equipamento que aproveita o gás esteja fora de operação ou então quando a concentração de metano ou contaminantes estejam fora da faixa que permite a utilização.

2.3.1.1 Queimador aberto

Consiste basicamente em um queimador acoplado a defletor de vento para proteger a chama. O controle de gás é rudimentar, não existe isolamento térmico e a mistura é pobre. A perda de calor é considerável e isso leva à ocorrência de baixas temperaturas na parte superior da chama e interrupção das reações de combustão, resultando na formação de subprodutos indesejáveis. Dada a sua simplicidade, torna-se impossível melhorar as condições de queima de forma a atender padrões internacionais mais restritivos de emissões.

2.3.1.2 Queimador fechado

Possibilita a combustão do biogás no interior de uma câmara (torre) de material refratário, usualmente cilíndrica, assentada sobre o terreno. A combustão ocorre sob condições controladas, garantindo a conversão quase completa do biogás. No queimador fechado, a combustão é mais uniforme e as emissões são reduzidas. Os níveis de fumaça, chama e ruído são praticamente imperceptíveis (IEA, 2000, apud LOBATO, 2011).

2.3.2 Combustão Direta com Recuperação de Energia

A combustão direta é o método mais simples e mais eficiente de recuperar energia do biogás, uma vez que mais de 80% do valor calorífico do metano pode ser recuperado como energia útil.

O biogás pode ser canalizado diretamente até o consumidor, onde é utilizado nos equipamentos de combustão, em substituição ou em complementação ao combustível utilizado anteriormente, ou então utilizado em equipamentos como caldeiras e secadores térmicos.

2.3.2.1 Caldeiras

O biogás pode ser utilizado em substituição a um combustível convencional, como o gás natural, óleo combustível ou carvão. A queima do biogás é similar à queima de gás natural diluído, bastando poucas adaptações caso se utilize uma mistura de biogás com predominância de gás natural. Caso o biogás seja predominante ou o único combustível, são necessárias modificações maiores para compensar o menor conteúdo energético do biogás em comparação com o gás natural. Com isso, haverá a necessidade de modificação do sistema de alimentação e de queima de combustível na caldeira, de modo a possibilitar o processamento de uma vazão maior de gás e garantir um valor calorífico equivalente ao do gás natural.

A corrosão devido à umidade e ao ácido sulfídrico é outro problema nas caldeiras que usam o biogás como combustível. A redução dos efeitos corrosivos

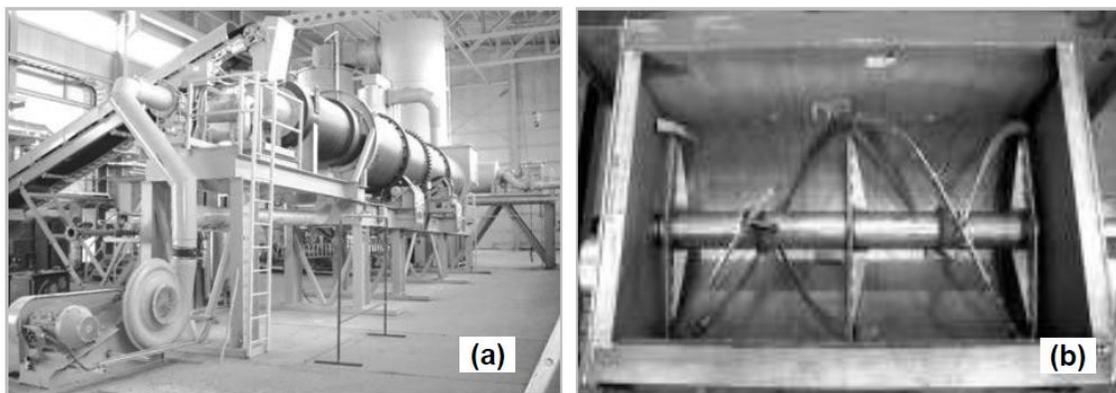
pode ser alcançada pela substituição do revestimento do pré-aquecedor e da chaminé por material anticorrosivo ou por materiais resistentes à corrosão (ex.: aço inoxidável), bem como o controle da temperatura dos gases de exaustão e a circulação adequada da água. Os níveis de umidade do biogás devem ser controlados com a instalação de purgadores e linhas de condensado para impedir danos aos equipamentos e problemas operacionais.

2.3.2.2 Secadores térmicos

Há possibilidade de aplicação da energia térmica gerada a partir do biogás em secadores para diversos propósitos, tais como sementes, grãos, ração e alimentos. Em estações de tratamento de esgoto pode-se aplicá-los na secagem de lodo, obtendo-se substancial redução de volume e inativação de patógenos, além da própria utilização do lodo seco como combustível.

Existem diversos tipos de secadores térmicos atualmente disponíveis no mercado, como os secadores rotativos diretos e indiretos, secadores de esteira diretos, secadores de caçamba diretos com misturadores internos. A Figura 8 mostra dois tipos de secadores aplicados à secagem de lodo.

Figura 8 – Secador rotativo (a) e secador de caçamba com misturador interno (b).



Fonte: Lobato (2011).

A preservação da matéria orgânica, associada à eliminação dos organismos patogênicos, constitui-se em um aspecto de fundamental importância quando o lodo (biossólido) vai ser utilizado na agricultura.

2.3.3 Geração Combinada de Calor e Eletricidade

A cogeração consiste no aproveitamento local do calor residual originado nos processos termodinâmicos de geração de energia elétrica, que de outra forma seria desperdiçado. O aproveitamento pode se dar sob a forma de vapor, água quente e/ou fria, para uma aplicação secundária. Por mais eficiente que seja o processo de transformação da energia de um combustível em energia elétrica, a maior parte da energia contida nesse combustível é transformada em calor e perdida para o meio ambiente. Assim, por meio da cogeração, é possível aproveitar o calor antes perdido, aumentando a eficiência energética do processo.

Para Salomon & Lora (2009) apud Lobato (2011), as principais vantagens da produção de energia elétrica pelo uso do biogás são:

- Geração descentralizada, com a geração de energia próxima da fonte consumidora.
- Possibilidade de lucro adicional devido à produção de energia e comercialização com companhias energéticas.
- Redução no consumo de energia pela planta produtora.
- Potencial de uso de processos para a cogeração de energia.
- Redução das emissões de metano para a atmosfera.

Algumas das principais tecnologias disponíveis comercialmente para a cogeração de eletricidade e calor são apresentadas a seguir, quais sejam: motores de combustão interna, turbinas a gás e microturbinas.

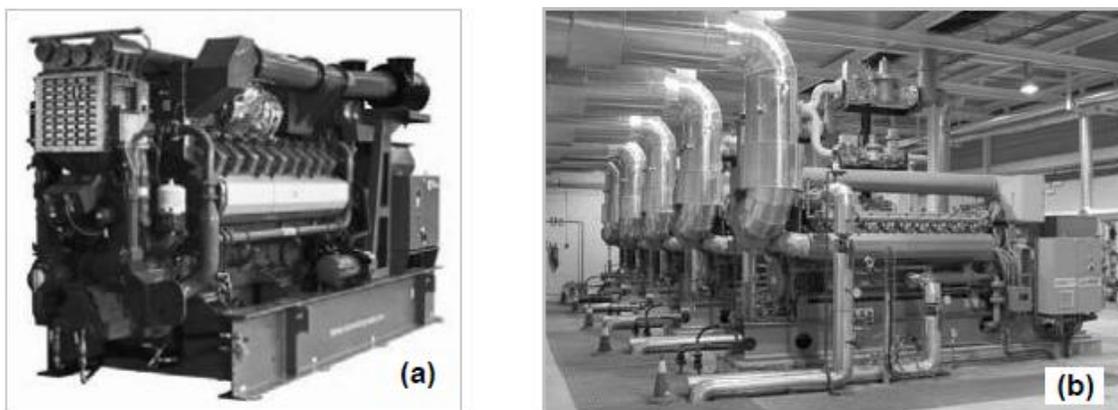
2.3.3.1 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna encontram-se disponíveis no mercado em potências variando entre 5 kW e 5 MW, podendo utilizar diversos tipos de combustíveis líquidos ou gasosos tais como óleo diesel, gasolina, gás natural, biogás ou ainda uma mistura deles, aumentando assim a sua flexibilidade. Esses equipamentos apresentam partida rápida, operação estável, elevado potencial de recuperação de calor e são usualmente bastante confiáveis. Ademais, tendem a ter um custo mais baixo e encontram-se disponíveis em tamanhos menores, mas estão

mais sujeitos à corrosão causada pelas espécies ácidas presentes no biogás (USEPA, 2003 apud LOBATO, 2011).

A Figura 9 apresenta dois modelos de motores de combustão internas que podem ser acionados por biogás.

Figura 9 – Motores Cummins série QSV91 (a) e Jenbacher J320 GS (b).



Fonte: Lobato (2011).

Existem quatro fontes de liberação de calor em motores de combustão interna que podem ser utilizadas: i) gás de exaustão; ii) água/ar do sistema de arrefecimento do motor; iii) água/ar do sistema de arrefecimento do óleo de lubrificação e iv) resfriamento do ar de sobrealimentação. A recuperação do calor emitido pelo escapamento e pelo sistema de arrefecimento do motor pode produzir água quente ou vapor à baixa pressão, que são apropriados para processos que demandam baixas temperaturas, para o aquecimento de ambientes, para o aquecimento de água e para a movimentação de refrigeradores de absorção (que utilizam calor para movimentar o sistema de resfriamento, ao invés de eletricidade para movimentar um compressor). O gás do sistema de exaustão pode ser utilizado diretamente em processos de secagem. Motores alimentados com gás natural normalmente atingem eficiências globais de 70 a 80% nas aplicações de cogeração de calor e eletricidade. A eficiência de recuperação de energia térmica emitida pelo escapamento e pelo sistema de arrefecimento usualmente representa 60 a 70% da energia disponível no combustível de alimentação (USEPA, 2003).

2.3.3.2 Turbinas a gás

Nas turbinas a gás, o combustível é fornecido na câmara de combustão a uma pressão bastante elevada, onde é queimado juntamente com o ar. A liberação de calor provoca a expansão dos gases, que, por sua vez, movimentam a turbina, que movimenta o gerador, produzindo energia. Na produção combinada de eletricidade e calor, as turbinas a gás são equipadas com uma unidade de recuperação de calor dos gases de exaustão, para conversão em energia térmica.

Esses equipamentos encontram-se disponíveis no mercado com potências entre 500 kW e 250 MW e com maior viabilidade de aplicação em projetos de recuperação de energia acima de 3 MW. As turbinas a gás apresentam menos problemas de corrosão, todavia são mais caras que os motores de combustão interna e necessitam de gás com qualidade consistente. O fato de demandarem pressões muito maiores de gás na entrada resulta na necessidade de compressores de gás, com maiores custos de instalação e de operação (USEPA, 2003, apud LOBATO, 2011).

A turbina a gás tem várias características atraentes, como tamanho compacto, alta flexibilidade, confiabilidade, partida rápida, menor necessidade de mão de obra operacional e melhor desempenho ambiental, em comparação com turbina a vapor e com os motores de combustão interna. No entanto, apresenta baixa eficiência, principalmente em carga parcial, lacuna esta que pode ser superada pela cogeração (GUPTA *et al.*, 2010).

2.3.3.3 Microturbinas

O combustível entra na câmara de combustão a uma pressão da ordem de 4 a 6 atm, onde é queimado juntamente com o ar. A liberação de calor provoca a expansão dos gases, havendo acionamento do conjunto turbina/gerador, produzindo energia. A utilização do gás de exaustão para promover o pré-aquecimento do ar de combustão proporciona o aumento da eficiência global do sistema. Esses equipamentos encontram-se disponíveis no mercado com potências entre 30 e 1.000 kW (USEPA, 2002, apud LOBATO, 2011).

A Figura 10 mostra um modelo de microturbina que pode ser acionada por biogás.

Figura 10 – Microturbina Capstone C65 (65 kW_e)



Fonte: Capstone (2019).

O pequeno porte destes sistemas aumenta a flexibilidade operacional, possibilitando a geração de energia em pequenas localidades, o que amplia o espectro de locais com potencial para a recuperação de biogás. Outra vantagem desta tecnologia é a redução nas emissões, principalmente de óxidos de nitrogênio, quando comparadas com os motores de combustão interna e turbinas de maior porte. As emissões das microturbinas situam-se abaixo de 9 ppm, enquanto para turbinas a gás elas são de 50 ppm e, para motores de combustão interna podem atingir até 3.000 ppm. O problema deste tipo de tecnologia para pequenas potências é o preço elevado, em função da ainda pequena escala de produção (PILAVACHI, 2002, apud LOBATO, 2011).

Este capítulo analisou os aspectos teóricos dos processos e equipamentos relacionados ao tema da pesquisa, permitindo formar a base para que os objetivos específicos sejam abordados.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são desenvolvidos os objetivos específicos enumerados no capítulo 1.

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Apesar do crescente interesse na produção e uso de energia a partir de fontes renováveis, o aproveitamento do biogás no Brasil ainda é incipiente quando comparado a alguns países europeus, tais como Alemanha, Itália e Áustria (BLEY JR, 2015).

Diferente de outras fontes renováveis, tais como solar e eólica, cuja qualidade dos insumos de entrada (sol e vento) dependem basicamente da localização do empreendimento e de fatores climáticos previamente avaliados, a produção do biogás requer estudo minucioso dos substratos disponíveis e sua logística, havendo necessidade de desenvolvimento de uma solução individualizada em cada empreendimento para que seja possível a produção e aproveitamento do biogás de modo econômico.

O desenvolvimento de uma cadeia produtiva de biogás requer, primeiramente, que se atravesse a barreira da viabilidade econômica. A Alemanha, referência no setor, desenvolveu sua indústria do biogás na esteira das exigências ambientais impostas pela União Europeia. O governo concedeu fortes incentivos, garantindo remuneração fixa aos produtores, o que levou a uma capacidade instalada de 4 GW, correspondente a 5% de toda a energia elétrica gerada no país. (FACHVERBAND BIOGAS E.V., 2019). Gradualmente os subsídios estão sendo retirados, o que arrefeceu os investimentos internos no setor, todavia, a indústria do biogás continua gerando importantes divisas para o país por meio de exportação da tecnologia desenvolvida, principalmente para países que concedem incentivos governamentais.

Todo o desenvolvimento tecnológico alcançado pela Alemanha foi realizado em condições climáticas adversas, requerendo biodigestores com alta tecnologia agregada. Para melhora na viabilidade dos investimentos, a opção normalmente é a construção de biodigestores de maior escala, concentrando o processamento de substratos gerados nas cercanias. Já no Brasil, as temperaturas altas e a

biodiversidade detritívora favorecem os processos de biodigestão anaeróbica, permitindo o uso de equipamentos menores, mais simples, de modo distribuído, reduzindo os custos de investimento.

Há de se destacar que, mesmo na Alemanha, também devido às condições climáticas adversas, os arranjos para tratamento de esgoto são majoritariamente aeróbicos e, portanto, as iniciativas para aproveitamento do biogás gerado no tratamento de esgoto bruto são escassas. A opção é por substratos com maior concentração de matéria orgânica e, neste cenário, a biodigestão do lodo gerado nos processos aeróbicos é relevante.

No Brasil, algumas iniciativas com apoio governamental ajudaram no desenvolvimento, ainda que modesto, do setor, podendo-se destacar:

- CIBiogás - Centro Internacional de Energias Renováveis-Biogás: Instalado no Parque Tecnológico Itaipu, o centro é formado por 27 instituições que desenvolvem e/ou apoiam projetos relacionados a energias renováveis. Sua estrutura conta com um laboratório de biogás no Parque Tecnológico Itaipu, em Foz do Iguaçu, e com 11 unidades de produção de biogás instaladas no oeste do Paraná. Tem foco no estudo da produção e aproveitamento do biogás em propriedades rurais, granjas e cooperativas, utilizando como substratos dejetos animais e resíduos industriais.
- PROBIOGÁS - Projeto Brasil-Alemanha de Fomento a Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil. O projeto foi fruto da cooperação técnica entre o Governo Brasileiro, por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, e o Governo Alemão, por meio da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH* (GIZ). Com o objetivo de contribuir para a ampliação do uso energético eficiente do biogás e, por conseguinte, para a redução de emissões de gases indutores do efeito estufa, o projeto estabeleceu uma rede de parcerias nas esferas governamental, acadêmica e empresarial e teve vigência entre os anos de 2013 e 2017. documentos sobre o aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto foram publicados, como pode ser visto nas referências bibliográficas Probiogás (2015) e Probiogás (2016).

Outra iniciativa importante na área, porém com foco em tratamento de esgoto, foi realizada pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR). Na década de 70 a SANEPAR iniciou as pesquisas em tratamento anaeróbio e este foi o diferencial que impulsionou o tratamento de esgoto no estado do Paraná, que tem um dos melhores índices de coleta e tratamento do Brasil. Com um quinto do investimento, os reatores UASB alcançavam 60 a 70% de eficiência de remoção de carga orgânica, enquanto sistemas completos chegavam a 98% de eficiência. Optou-se em investir nos UASBs, que foram considerados uma etapa inicial da implantação dos sistemas de tratamento, para que no futuro os projetos fossem complementados (ANDREOLI, C. V. & CARNEIRO, 2015). A SANEPAR desenvolveu sua própria versão de reator UASB, com algumas modificações construtivas, chamando-o de RALF (Reator Anaeróbio de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente), passando a utilizá-lo em quase todas as ETEs do Estado do Paraná a partir de 1986 (BARÉA, 2006). Todo esse desenvolvimento, no entanto, não considerou o aproveitamento energético do biogás gerado.

Ao contrário do movimento que se observa na Europa, e até mesmo no Brasil, em que o foco no desenvolvimento da cadeia de biogás é o aproveitamento desta forma de energia renovável com a finalidade principal de mitigar os danos ambientais inerentes ao aproveitamento de outras fontes, este trabalho de pesquisa tem por finalidade investigar o biogás como meio para alavancar a indústria nacional de saneamento básico, ainda muito dependente de investimentos estatais. Por meio da melhoria da atratividade econômica dos investimentos, espera-se contribuir para expansão dos sistemas de tratamento de esgoto, essenciais para melhora das condições saúde das populações atendidas. Além da questão econômica, a utilização dos processos de tratamento anaeróbico e o uso do biogás possibilitam adequado enfiletamento aos principais passivos ambientais gerados no tratamento de esgoto: lodo e metano.

No que se refere a questão econômica, há de observar que os aproveitamentos em que se evidenciam ganhos significativos na utilização do biogás, tanto no Brasil quanto internacionalmente, utilizam substratos de elevada concentração de matéria orgânica, como no caso de biomassa agrícola, dejetos animais, aterros sanitários, efluentes líquidos industriais e lodo de esgoto, quando se consegue elevada produção de biogás por volume unitário de reator. Para o caso do tratamento de esgoto sanitário bruto, em que a concentração de matéria orgânica é

muito baixa, há a necessidade de se avaliar cuidadosamente a viabilidade dos investimentos.

3.2 VIABILIDADE NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Nos processos de tratamento de esgoto domésticos há duas principais formas de se produzir biogás e aproveitá-lo no acionamento de geradores elétricos: tratamento de esgoto bruto por meio de reatores UASB e processamento de lodos em reatores anaeróbios, discutidos a seguir, nos itens 3.2.1 e 3.2.2. As conclusões acerca da viabilidade na geração de energia elétrica são apresentadas no item 3.2.3.

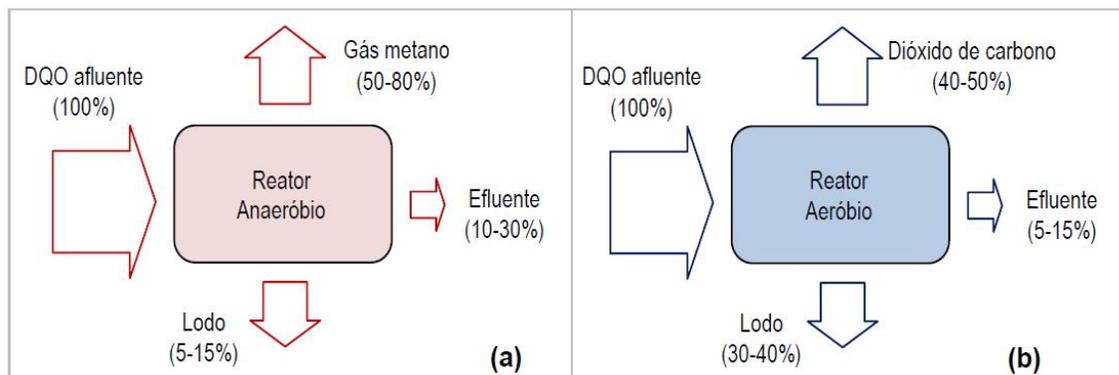
3.2.1 Reatores UASB

Além da produção de biogás, os processos anaeróbios possuem outras vantagens que contribuem para melhora na viabilidade dos empreendimentos:

- Baixa produção de lodo excedente, que se apresenta mais concentrado e com melhores características de desidratação, o que reduz os custos associados ao tratamento e disposição final deste. Chernicharo (2007) apud Cabral (2016) aponta que esta redução de sólidos pode ser de 2 a 8 vezes quando comparada aos processos aeróbios.
- Baixo consumo de energia, pois o custo associado à aeração é suprimido.
- Necessidade de áreas reduzidas para implantação.
- Tolerância a elevadas cargas orgânicas e aplicabilidade em pequena e grande escala (CHERNICHARO, 2007 apud CABRAL, 2016).

Para comparação, na Figura 11 são apresentadas as rotas de conversão da matéria orgânica nos sistemas anaeróbios e aeróbios, podendo-se notar as vantagens do sistema aeróbio no que se refere à produção de metano e baixa geração de lodo. Como poderá ser visto adiante, Lobato (2011) verifica em sua pesquisa que os valores de metano que podem ser efetivamente recuperados nos sistemas anaeróbios é sensivelmente inferior aos valores teóricos de 50-80% indicados na Figura 11(a).

Figura 11 – Balanço esquemático de DQO sistemas anaeróbios (a) e aeróbios (b).



Fonte: Chernicharo (2007) apud Cabral (2016).

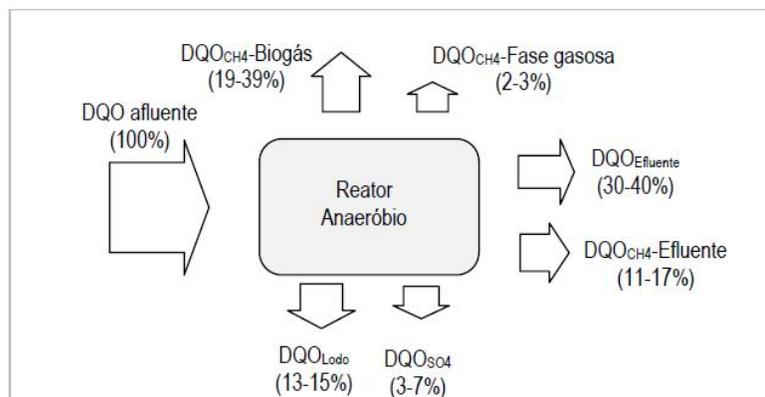
A seguir são apresentados os principais pontos de interesse e resultados alcançados por alguns trabalhos relevantes que tratam da temática da produção de biogás e geração de energia elétrica a partir de reatores UASB tratando esgoto doméstico.

a. Lobato (2011)

O trabalho teve como foco principal estudar a cogeração de energia e calor para secagem e desinfecção do lodo excedente de reatores UASB. Na pesquisa foi desenvolvido um modelo matemático que estima com maior exatidão a parcela de DQO recuperada como metano em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Este modelo foi validado por Cabral (2016) e serviu como base para elaboração do software ProBio 1.0, desenvolvido em parceria entre a SANEPAR e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). O ProBio calcula estimativas de produção de biogás e energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico e está disponível gratuitamente em <<http://site.sanepar.com.br/probio/probio.zip>>.

O modelo matemático desenvolvido pela autora e validado por resultados obtidos em reatores UASB em diferentes escalas (piloto, demonstração e real) apontou que somente de 19 a 39% da DQO afluente pôde ser recuperada como metano no biogás, como pode ser visto na Figura 12, em contraste com os valores teóricos de 50 a 80% apontados na Figura 11(a). Tais resultados são explicados pelas perdas de metano dissolvido no efluente e pela concentração de sulfato no afluente. A parcela de metano no biogás produzido variou de 50 a 75%.

Figura 12 – Balanço de DQO com metano que pode ser efetivamente recuperado.



Fonte: Lobato (2011).

A autora ainda avaliou diversas alternativas de recuperação do conteúdo energético do biogás, realizando um balanço de vantagens e desvantagens de cada alternativa. Por fim elencou as possibilidades mais viáveis considerando reatores UASB com baixo e alto potencial de recuperação de metano. Os principais resultados são apresentados a seguir:

- Para sistemas com baixa capacidade de produção e recuperação de metano, a exemplo dos sistemas de menor porte, ou que apresentem maiores teores de sulfato no afluente e elevadas perdas de metano dissolvido no efluente, é pouco provável que a utilização de equipamentos para geração combinada de eletricidade e calor encontre viabilidade econômica. Nesses casos, a principal alternativa que se apresenta refere-se à combustão direta com recuperação de energia térmica para secagem de lodo, com objetivo de redução de umidade e higienização.
- Para sistemas com alta capacidade de produção e recuperação de metano, tanto a combustão direta com recuperação de calor como a cogeração de calor e eletricidade podem se mostrar viáveis. O ganho de eficiência conseguido com o aproveitamento da energia térmica (gases de exaustão), em complementação à geração de eletricidade, aumenta significativamente a viabilidade econômica dessa alternativa.
- A avaliação comparativa das alternativas para recuperação do conteúdo energético do biogás indicou que a cogeração de eletricidade

e calor empregando motores de combustão interna é a que reúne mais vantagens, principalmente quanto aos aspectos mais relevantes para países em desenvolvimento, como os fatores econômicos, confiabilidade e simplicidade da tecnologia.

b. Cabral (2016)

A partir de medições realizada em seis estações de tratamento distribuídas pelo país, a autora avaliou a quantidade de biogás gerado em relação a carga orgânica recebida, influência do clima e temperatura, e realizou estimativas em relação a geração de energia. Deste trabalho pôde-se extrair:

- A produção de biogás apresentou variação dependendo das condições construtivas e operacionais de cada reator, e de acordo com o clima e características do meio líquido.
- O biogás apresentou elevada concentração de metano, com médias entre 70 a 79%. Esta concentração é adequada para aproveitamento em unidades de cogeração (CHP) de energia.
- O dióxido de carbono variou de 4 a 14%, com média de 8%.
- As medições de sulfeto de hidrogênio apresentaram variação diária, com 75% das leituras indicando valores até 2.000 ppm, evidenciando a necessidade de remoção antes do aproveitamento energético, dado o alto potencial corrosivo desta substância.
- O volume do gasômetro para armazenamento do biogás deve ter capacidade para compensar variações de produção, permitindo o funcionamento contínuo dos equipamentos de geração de energia elétrica. Os estudos estimaram que o volume do gasômetro dever ser de 30% do volume de biogás gerado diariamente.
- Devido à, principalmente, problemas de vedação, a produção de biogás medida ficou aquém da estimada na maioria das estações de tratamento.
- O modelo proposto por Lobato (2011) foi o que melhor estimou a produção de biogás e energia e pode ser utilizado como ferramenta inicial para os estudos de viabilidade, todavia, os valores medidos são

significativamente inferiores aos valores obtidos pelo modelo matemático.

- As perdas por metano dissolvido no efluente e vazamentos por fissuras estão presentes mesmo nos reatores reformados recentemente e não devem ser negligenciados na análise de viabilidade econômica.
- Chuvas diminuem a produção de biogás por alterarem as características do meio líquido.
- A quantidade de vazamentos para a atmosfera é fator determinante para que se tenha produção adequada de biogás. Há necessidade de reforma nos reatores existentes e mudanças nos novos projetos.
- Chernicharo *et al.* (2015) apud Cabral (2016) aponta que o emprego de reator UASB seguido de tratamento biológico aeróbio pode resultar em economias nos custos de investimento (CAPEX) de 20 a 50% e de operação/manutenção (OPEX) acima de 50% em comparação com uma planta de lodo ativado convencional.

A autora indica algumas ações para otimização da produção e coleta do biogás:

- Reduzir as contribuições de águas pluviais e infiltração na rede de esgoto.
- Incluir no pré-tratamento do esgoto bruto gradeamento fino e caixa de areia areada.
- Melhorar a resistência a corrosão do reator, com recuperação estrutural, impermeabilização e aplicação de revestimento anticorrosivo, bem como incluir mecanismo para remoção da espuma.
- Melhorar a estanqueidade e reduzir vazamentos por meio da detecção de vazamentos, utilização de tampas com vedação adequada e de material adequado para tubulação de coleta.

c. Koga (2016)

A autora avaliou o potencial de aproveitamento energético dos subprodutos de uma ETE anaeróbia de médio porte, localizada em Curitiba, por meio da análise de fluxos de materiais e de energia. O arranjo desta ETE é composto por reatores

UASB/RALF com pós-tratamento por meio de lagoas aerada e de decantação. As lagoas são responsáveis por 70% do consumo de energia elétrica da estação.

Como não havia medidores de vazão e analisadores de composição na saída dos reatores, a autora quantificou o potencial energético do biogás por meio do software ProBio 1.0 a partir das medidas de vazão afluente, considerando a pior situação (potencial energético menor; menor eficiência na remoção de DQO; maiores índices de perda de metano), gerando estimativas mensais de produção de biogás e da energia química disponível.

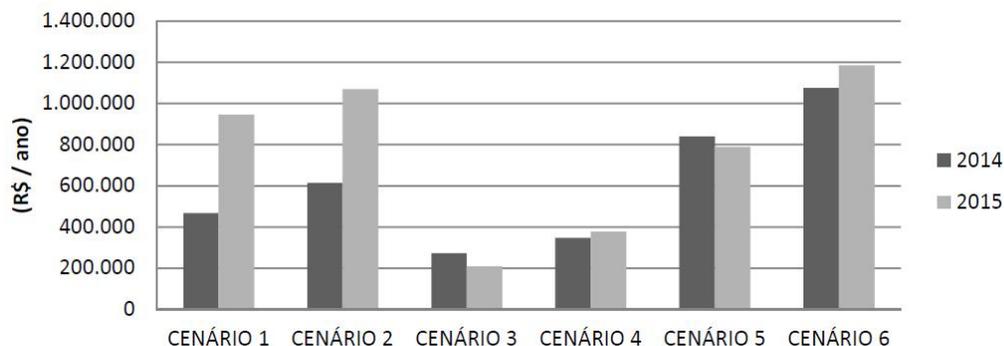
A partir dos subprodutos lodo, espuma e biogás foi estimada a geração de 1,99 GWh_e de energia elétrica para o ano de 2014. A demanda de energia elétrica para o mesmo ano foi de 3,56 GWh_e, ou seja, a energia gerada seria suficiente para suprir 55,89% da demanda da ETE. Em 2015, a geração de energia elétrica a partir dos mesmos subprodutos foi estimada em 1,98 GWh_e, e a demanda de energia elétrica foi de 3,35 GWh_e. A energia elétrica gerada supriria 59,10% da demanda da estação. O biogás foi o subproduto com maior potencial de geração de energia elétrica, seguido do lodo e espuma.

Além da utilização para geração de energia elétrica, foram analisados seis cenários distintos para aproveitamento energéticos dos subprodutos:

1. Geração de energia elétrica a partir do biogás.
2. Cogeração de energia a partir do biogás.
3. Secagem térmica do lodo a partir do biogás.
4. Secagem térmica do lodo e da espuma a partir do biogás.
5. Secagem térmica do lodo e da espuma a partir da combustão do lodo, espuma e biogás.
6. Secagem térmica do lodo e da espuma a partir da energia térmica do lodo, biogás e espuma e geração elétrica a partir do biogás.

A Figura 13 apresenta o custo global evitado em cada cenário, em valores de 2016, obtido somando-se dos benefícios do custo evitado na disposição do lodo, espuma, cinzas e geração de energia elétrica.

Figura 13 – Custo global evitado nos cenários propostos.



Fonte: Koga (2016).

Da Figura 13 extrai-se que o cenário 6 apresenta o maior custo global evitado, tanto para o ano de 2014 quanto 2015. Os cenários de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica (cenário 1) e cogeração (cenário 2) tiveram melhor desempenho em 2015 devido ao progressivo aumento no custo de energia elétrica no período avaliado (acréscimo de 78,25%). Os cenários de secagem do lodo e espuma (3 e 4) somente a partir do biogás tiveram o pior desempenho nos dois anos avaliados. O bom desempenho dos cenários 5 e 6 explicam-se pela redução de 90% no volume do lodo e espuma, reduzindo os custos relativos a transporte e disposição dos subprodutos.

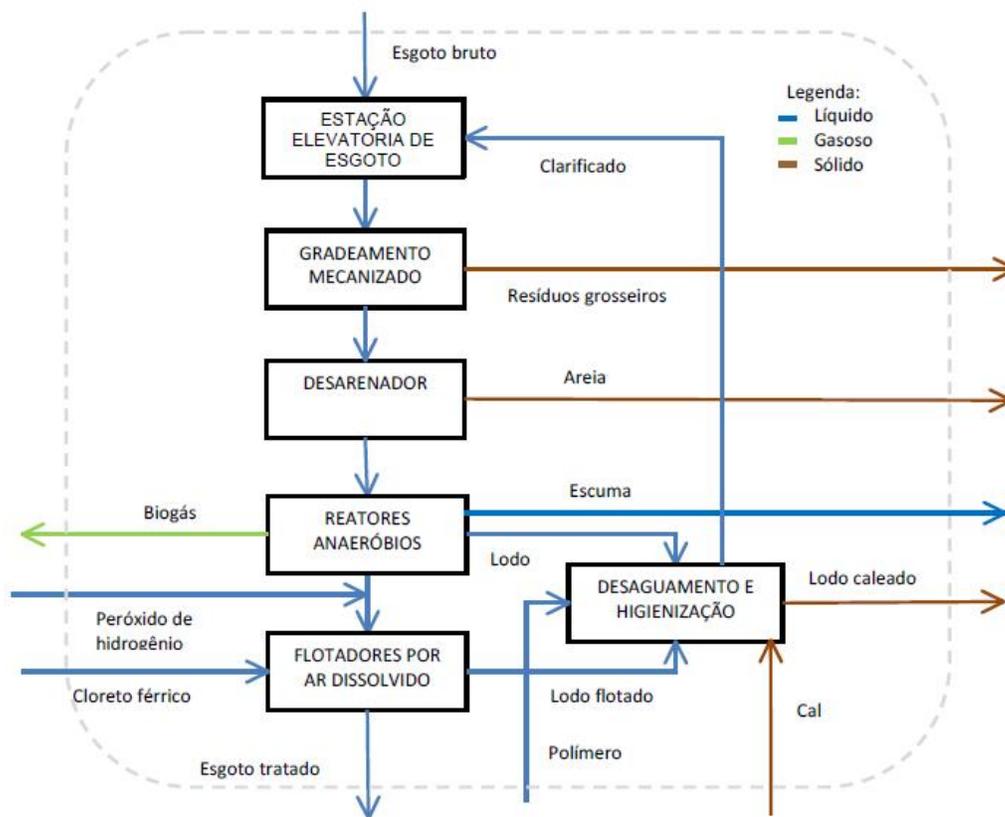
A autora não realizou estudos para verificar qual alternativa possui melhor viabilidade econômica.

d. Shirado (2014)

A autora realizou as análises de fluxo de materiais (AFM) e de energia (AFE) na ETE Santa Quitéria (SANEPAR), em Curitiba, e buscou, entre outros estudos, diagnosticar oportunidades de aproveitamento de subprodutos do processo. Na época do estudo a estação tinha capacidade para tratar 420 L/s, o que equivale a uma população atendida de aproximadamente 200 mil habitantes.

A ETE Santa Quitéria possui grade mecanizada e desarenador para tratamentos preliminares, seis reatores UASB/RALF para tratamento biológico, flotação por ar dissolvido para pós-tratamento e, por fim, sistema de desaguamento e higienização do lodo. O diagrama esquemático do fluxo de materiais na ETE Santa Quitéria é apresentado na Figura 14.

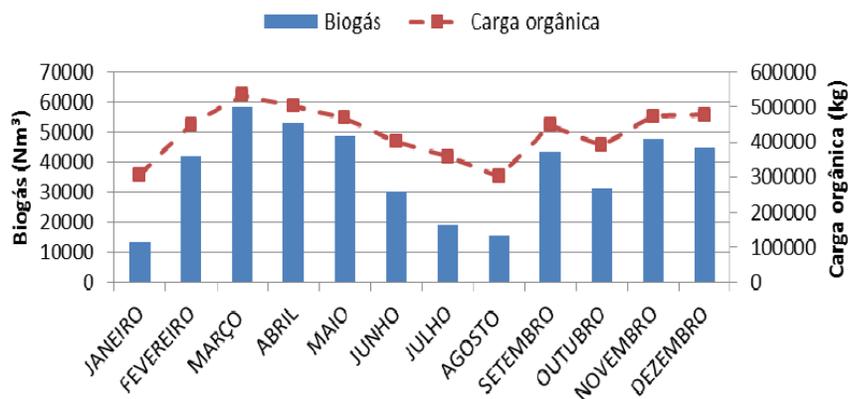
Figura 14 – Diagrama esquemático do fluxo de materiais na ETE Santa Quitéria.



Fonte: Shirado (2014).

Como não havia medidores de vazão de biogás, a autora utilizou o modelo proposto por Lobato (2011) para estimar o volume gerado pelos reatores anaeróbios. O volume acumulado para o ano de 2013 foi aproximadamente 447.759 Nm³. A produção mensal de biogás é apresentada na Figura 15, podendo-se verificar que acompanha as variações registradas na carga orgânica afluyente.

Figura 15 – Produção mensal de biogás na ETE Santa Quitéria em 2013.



Fonte: Shirado (2014).

Medições de vazão em tempo real realizadas na ETE Atuba Sul, também em Curitiba, que possui reatores similares aos utilizados na ETE Santa Quitéria, registram uma vazão média aproximadamente 37% inferior aos valores estimados para ETE Santa Quitéria. A autora sugere que tal diferença pode ser devido ao fato de a metodologia proposta por Lobato (2011) considerar reatores UASB convencionais. Como os reatores RALF possuem abertura superior no separador trifásico, isto pode dificultar a pressurização do reator para captação do biogás gerado, favorecendo a saída de parte do biogás juntamente com o líquido.

A ETE Santa Quitéria consumiu, em 2013, 1.369.358 kWh_e de energia elétrica. Deste valor, o processo de flotação por ar dissolvido foi responsável pelo consumo de aproximadamente 849.778 kWh_e, que corresponde a mais de 60% do consumo de energia no ano. A elevatória de recalque de esgoto bruto e o processo de desaguamento de lodo consumiram aproximadamente 380.403 kWh_e e 124.830 kWh_e, respectivamente. Estes processos juntos totalizaram cerca de 38% do consumo total de energia elétrica da ETE.

Considerando um teor de metano de 75% no biogás produzido, a autora estimou que seria possível gerar 1.208.952,48 kWh_e/ano, considerando um rendimento de 36% na conversão de energia química do biogás para energia elétrica utilizando um motor ciclo Otto na faixa de 101 a 250 kW_e. Este valor permitiria suprir 88% do consumo anual da ETE. Para regularizar e reservar a vazão do biogás, a autora sugere a instalação de um gasômetro, o que permitiria a autossustentabilidade em energia elétrica em sete meses do ano. Caso, além do biogás, o lodo e espuma

fossem aproveitados, a autogeração de energia elétrica seria 21% acima do necessário para suprir a ETE no ano de 2013.

A autora não realizou estudos de viabilidade econômica das alternativas propostas.

e. Valente (2015)

O autor pontua que as principais vantagens do aproveitamento energético do biogás são a redução dos custos operacionais com energia e gestão do lodo e, que no Brasil, apesar do grande potencial devido ao uso maciço de tecnologias anaeróbias, esta alternativa ainda é pouco difundida devido à incerteza sobre sua viabilidade econômica.

O estudo avaliou a viabilidade econômica do aproveitamento de biogás em ETEs que servem entre 50.000 e 450.000 habitantes, considerando o arranjo reator UASB e pós-tratamento com lodos ativados. Segundo o autor, este é o arranjo com expectativa de maior implementação nos próximos anos. Foram avaliados cinco cenários:

1. Geração de eletricidade contínua.
2. Geração de eletricidade no horário de ponta.
3. Cogeração com secagem parcial do lodo.
4. Secagem do lodo com geração de eletricidade para autossuprimento do secador.
5. Somente secagem do lodo.

A produção de biogás considerada no estudo foi estimada com base em medições realizadas em duas ETEs, a cada 20 minutos, durante um mês. As medições apontaram o valor de 0,016 Nm³/hab.dia, porém, como as medições foram realizadas em período de estiagem, como medida conservadora, o autor adotou o valor de 0,014 Nm³/hab.dia. As concentrações de metano medidas nas duas ETEs foram de 77,9% e 78,2% para o mesmo período. O autor adotou a concentração de 75%.

Para o primeiro cenário, assumiu-se que o biogás é utilizado somente para geração de eletricidade, sem aproveitamento do calor produzido pelo gerador.

Para o segundo cenário, assim como o anterior, considerou-se o uso da energia somente para geração de eletricidade, porém, com geração majoritariamente no horário de ponta. Para isso, há necessidade de um gasômetro de maior volume, bem

como utilização de equipamentos de maior capacidade à jusante do gasômetro. No estudo foi considerado a opção pela tarifa horo-sazonal verde.

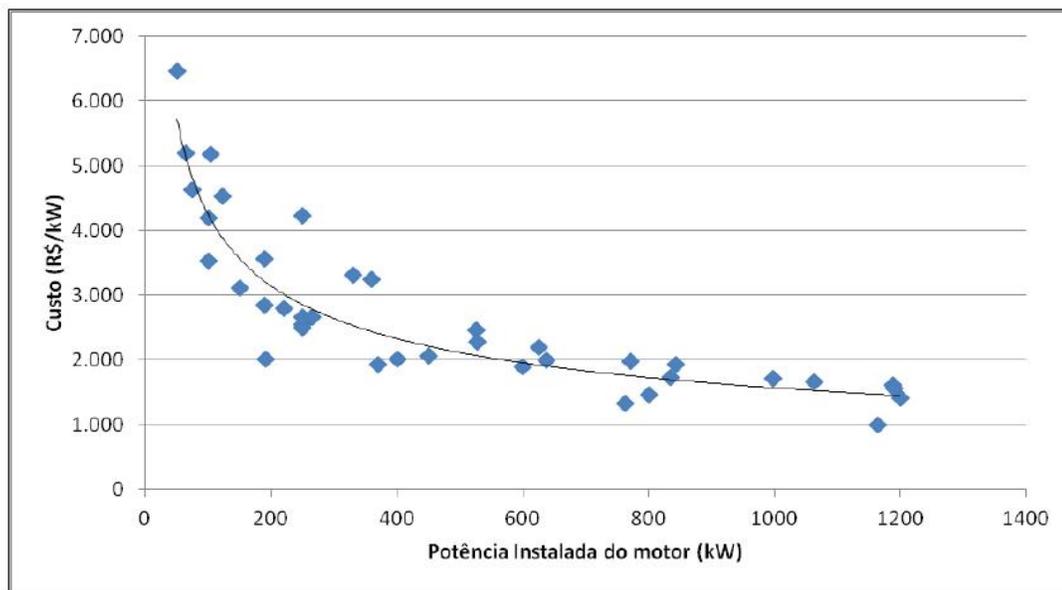
O terceiro cenário considerou o uso do biogás para geração de eletricidade num conjunto motogerador e aproveitamento do calor residual para a secagem do lodo.

O quarto cenário propôs o uso do biogás para geração de eletricidade e calor, porém, com priorização para geração da energia térmica para a secagem do lodo e geração de eletricidade somente para suprir a demanda elétrica intrínseca do sistema de secagem. Há a necessidade de inclusão de uma câmara de combustão para gerar o calor necessário para o sistema de secagem. O dimensionamento dos equipamentos para tratamento do gás e geração de eletricidade é reduzido em relação aos cenários anteriores.

No quinto cenário considerou-se que todo biogás será utilizado para a secagem do lodo por meio de uma câmara de combustão. Como o biogás é apenas queimado, este cenário não previu a eliminação de siloxanos e umidade após o dessulfurizador, suprimindo o filtro de carvão ativado e o *chiller*, presentes nos cenários anteriores.

Quanto aos custos de investimento do conjunto motogerador, o autor considerou somente equipamentos confeccionados para o uso de biogás e não motores adaptados, por esses serem mais eficientes, robustos e requerem reformas com menor frequência. Todos os modelos cotados foram da Europa. A Figura 16 apresenta os valores cotados para os motogeradores em R\$/kW já considerando os custos relacionados à importação (impostos, transporte marítimo, alfândega).

Figura 16 – Custo dos motores em R\$/kW em valores de 2015.



Fonte: Valente (2015).

Como há uma iteração entre a eficiência do motor e a potência instalada, o autor avaliou os rendimentos elétrico e térmico dos conjuntos motogeradores e levantou os custos por faixa de potência instalada. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Custo por potência instalada e rendimentos para conj. motogeradores.

Eficiências e custo (R\$/kW) dos motores segundo potência							
	≤ 30	34 – 50	51 – 100	101 – 250	251-400	401-800	801 - 1200
Rendimento Elétrico	28%	32%	36%	38%	40%	42%	42%
Rendimento Térmico	60%	56%	50%	48%	46%	44%	44%
Preço R\$/kW	10.000	9.000	7.300	5.400	4.400	3.200	2.600

Fonte: Valente (2015).

Em relação ao dimensionamento do gasômetro, visando compensar oscilações na produção de biogás, o autor verificou que a norma alemã DWA-M 363 (DWA, 2010 apud VALENTE, 2015) recomenda que o volume armazenado deve ser de 30 a 50% do volume diário de biogás gerado, quando produzindo biogás a partir da digestão anaeróbica de lodo. O autor observou, também, que o projeto de recuperação energética para a ETE Rio Preto, em São José do Rio Preto, com arranjo composto por reatores UASB e pós tratamento por lodos ativados, para atendimento a uma

população de 600.000 habitantes, adotou para seu gasômetro o volume de 35% da vazão diária de biogás, valor este também adotado pelo autor em seu estudo. A

Tabela 4 mostra o custo do gasômetro levantado pelo autor considerando a escala da ETE.

Tabela 4 – Custo do gasômetro de acordo com a escala da ETE.

Volume do Gasômetro				
Nº Habitantes	50.000	100.000	200.000	450.000
Volume de biogás m ³ /dia	700	1.400	2.800	6.300
Gasômetro/Volume diário	variável de acordo como regime de geração			
Gasômetro Modelo	GS-216	GS-217	GS-222	GS-225
Preço (R\$)	450.000	525.000	585.000	800.000

Fonte: Valente (2015).

Os custos dos sistemas de tratamentos do gás para os cinco cenários em função da escala da ETE, estimados pelo autor, são apresentados nas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 5 – Custo tratamento biogás cenários 1, 3 e 5.

Subsistema de filtração do biogás - apenas queima do biogás				
Nº Habitantes	50.000	100.000	200.000	450.000
2 Tanques de drenagem (R\$)	30.400	35.600	39.000	44.000
Dessulfurizador (R\$)	140.000	165.000	184.000	210.000
Total subsistema de filtração	170.400	200.600	223.000	254.000
Subsistema de filtração do biogás - biogás para geração de eletricidade				
Chiller (R\$)	82.000	95.000	105.000	120.000
Filtro de carvão ativado p/ remoção dos siloxanos (R\$)	40.000	40.000	60.000	80.000
Total sistema de filtração	292.400	335.600	388.000	454.000

Fonte: Valente (2015).

Tabela 6 – Custo tratamento biogás cenário 2.

Subsistema de filtragem do biogás - apenas queima do biogás				
Nº Habitantes	50.000	100.000	200.000	450.000
Tanque de drenagem (R\$)	44.000	44.000	44.000	44.000
Dessulfurizador (R\$)	210.000	210.000	210.000	210.000
Total subsistema de filtragem	254.000	304.800	304.800	304.800
Subsistema de filtragem do biogás - biogás para geração de eletricidade				
Chiller (R\$)	120.000	144.000	144.000	144.000
Filtro de carvão ativado p/ remoção de siloxanos (R\$)	80.000	96.000	96.000	96.000
Total sistema de filtragem	454.000	544.800	544.800	544.800

Fonte: Valente (2015).

Tabela 7 – Custo tratamento biogás cenário 4.

Subsistema de filtragem do biogás + eletricidade				
Chiller (R\$)	82.000	82.000	82.000	82.000
Filtro de carvão ativado p/ siloxanos (R\$)	40.000	40.000	40.000	40.000
Total sistema de filtragem	292.400	322.600	345.000	376.000

Fonte: Valente (2015).

O custo da unidade de compressão a montante dos motogeradores em função da escala da ETE, estimado pelo autor, é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Custo da unidade de compressão (A-2 corresponde a cenário 2).

Unidade de compressão do biogás				
Nº Habitantes	50.000	100.000	200.000	450.000
Compressores (R\$)	50.000	60.000	70.000	80.000
Compressores (R\$) A-2	80.000	96.000	96.000	96.000

Fonte: Valente (2015).

O custo do sistema de secagem de lodo em função da escala da ETE, estimado pelo autor, é mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Custo sistema completo de secagem de lodo.

Sistema de secagem do lodo				
Nº Habitantes	50.000	100.000	200.000	450.000
Secador térmico (R\$)	753.000	980.000	1.212.000	1.857.000

Fonte: Valente (2015).

O custo das tubulações para condução dos gases de escape do motogerador em função da escala da ETE, estimado pelo autor, é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Custo das tubulações para condução dos gases do motogerador.

Sistema de aproveitamento térmico do calor residual				
Nº Habitantes	50.000	100.000	200.000	450.000
Tubulações em aço inox (R\$)	20.000	22.000	24.000	26.000

Fonte: Valente (2015).

O custo do medidor de vazão e do analisador de concentração de gases, estimado pelo autor, é mostrado na

Tabela 11.

Tabela 11 – Custo equip. p/ medição de vazão e análise de conc. de gases.

Custo dos equipamentos de medição do biogás		
Medidor de vazão tipo vortex	R\$	23.694
Analisador de gases fixo	R\$	21.763

Fonte: Valente (2015).

Em relação à conexão à rede elétrica da distribuidora, o autor estimou os custos de obras e adaptações elétricas em R\$ 100.000,00, e considerou o mesmo valor para todos os cenários (1, 2, 3 e 4).

Em relação ao custo de mão de obra, considerou-se o aumento no número de funcionários existentes, necessários para o controle e manutenção básica da unidade de recuperação energética e secagem do lodo. Os valores considerados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Números de funcionários adicionais por escala da ETE.

Nº de funcionários				
Nº de habitantes	50.000	100.000	200.000	450.000
Nº de funcionários	2	2	3	4
Custo anual - mão de obra (R\$)	91.000	91.000	136.500	182.000

Fonte: Valente (2015).

Os custos de manutenção para os equipamentos complexos, tais como motogerador e sistema de secagem de lodo, foram estimados em 2% do custo de investimento, e considerou-se que serão contratados junto aos fornecedores dos equipamentos.

O valor da tarifa de energia elétrica considerado foi obtido a partir das tarifas praticadas pelas principais concessionárias do Brasil. Para os cenários 1 e 3 foi considerado que toda a energia elétrica gerada a partir do biogás seria consumida na própria ETE, obtendo-se um custo evitado. Para o cenário 2, além do custo evitado com a energia consumida na ETE, considerou-se o custo evitado com a energia gerada pelo sistema de compensação. A diferença entre os custos evitados nas duas situações foi que nos cenários 1 e 3 o custo evitado foi calculado incluindo os tributos, enquanto no cenário 2 os valores dos tributos foram descontados do custo evitado, pois considerou-se que incidem tributos sobre a energia compensada.

O valor do custo de transporte e disposição do lodo foi levantado junto a cinco prestadoras de serviço de saneamento. Adotou-se o valor médio de R\$ 120,00/t para calcular o custo evitado com o lodo não enviado para aterro, considerando-se teor de sólidos entre 20 e 30%.

Os resultados de maior interesse são elencados a seguir:

- O cenário 2, que possui o maior conjunto motogerador, apresentou maior eficiência na conversão para energia elétrica.
- Para a ETE de 450.000 habitantes os cenários 1 e 2 apresentaram a mesma geração de energia elétrica, visto que toda a energia gerada na ponta é consumida na ponta, não gerando créditos para compensação. Isto porque no estudo limitou-se a potência instalada do gerador em 1 MW para todos os cenários e, conseqüentemente, para o caso da ETE de 450.000, os dois cenários adotaram potências instaladas próximas.

- Para o cenário 3 observou-se que o rendimento térmico é maior quanto menor for a escala da ETE, consequência do rendimento elétrico menor para conjuntos motogeradores de menor capacidade.
- Percebeu-se que apesar da significativa diferença na umidade do lodo para os cenários 3 e 5, a quantidade de lodo evitado é semelhante. Isso porque o volume não varia proporcionalmente à quantidade de água no lodo.
- Para as ETEs até 200.000 habitantes, o maior investimento (CAPEX) foi observado no cenário 2, devido ao maior dimensionamento do conjunto motogerador, gasômetro e demais equipamentos relacionados. Para a ETE de 450.000 o maior investimento ocorreu no cenário 3.
- O estudo da viabilidade econômica, avaliada utilizando os métodos do Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), demonstrou a inviabilidade para a ETE de 50.000 habitantes em todos os cenários. Para a ETE de 100.000, os cenários 3 e 5, que promovem secagem de lodo, apresentaram TIRs positivas, com baixas expectativas para reembolso do projeto. Para a ETE de 200.000 habitantes, somente o cenário 2 se mostrou inviável. A ordem dos cenários mais viáveis foi 3, 5, 4 e 1, evidenciando os ganhos do aproveitamento térmico para secagem do lodo na melhora da viabilidade econômica.
- Para a ETE de 450.000 habitantes todos os cenários demonstraram-se viáveis, com melhor desempenho na ordem 5, 3, 4, 1, 2. A melhor viabilidade do cenário 5 em relação ao 3, segundo o autor, pode ser resultado da redução eficiência térmica no cenário 3 (com o aumento da potência instalada melhora a eficiência elétrica) e pelo custo de investimento ser praticamente o dobro no cenário 3 (R\$ 10.040.513,00 contra R\$ 5.451.381,00).
- O autor avaliou ainda a escala mínima para viabilidade em cada cenário considerando uma TIR de 8%. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

- Conforme dados de 2013, o autor informa que existe no país 203 municípios com população acima de 138.000 habitantes, que juntos representam aproximadamente 50% de toda a população brasileira, concluindo que nestes é possível o aproveitamento viável do biogás por meio do cenário 3.
- Apesar da contribuição na redução de custos operacionais e possível melhoria na qualidade da energia suprida, o autor estima que se o biogás fosse aproveitado em todos os 203 maiores municípios brasileiros, ter-se-ia uma potência instalada de aproximadamente 100 MW, correspondente a pouco mais de 7% do consumo total de energia elétrica no setor de saneamento (água e esgoto). Por fim, o autor conclui que a estratégia de aproveitamento energético do biogás transcende a questão energética e se insere num âmbito maior de aprimoramento e ampliação do serviço de saneamento.

Tabela 13 – Escala mínima para viabilidade em número de habitantes.

Cenário	1	2	3	4	5
Escala da ETE em n° habitantes	162.666	243.900	137.782	161.037	153.836

Fonte: Adaptado de Valente (2015).

f. Probiogás (2015)

Este trabalho é um guia técnico sobre o aproveitamento energético do biogás em ETEs, concebido no contexto do “Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS”. Os pontos de maior interesse abordados pelos autores apresentados são a seguir:

- Os reatores UASB possuem várias características favoráveis em relação aos sistemas aeróbios mecanizados, o que têm contribuído para sua disseminação no país: reduzida demanda de área, baixo consumo de energia, simplicidade operacional, baixa produção de sólidos, baixo custo de implantação e operação, possibilidade de operação com baixos tempos de detenção hidráulica e elevados tempos de retenção de sólidos, compatibilidade com as condições climáticas brasileiras.

- Mesmo que a motivação principal para adoção da digestão anaeróbia seja o tratamento de esgoto e/ou lodo, a otimização das condições visando a maximização da geração de biogás desde a fase inicial de elaboração do projeto até a operação dos reatores melhora a eficiência da ETE.
- A produção específica de biogás está diretamente relacionada às concentrações de DQO de fácil degradação. Baixas concentrações de DQO podem resultar em problemas de separação entre a fase sólida e a líquida, aumentando o perigo da perda de gás dissolvido com o efluente final. Por outro lado, concentrações acima de 3.000 mg DQO/L aumentam o perigo de inibição do processo por subprodutos ácidos e podem dificultar a separação entre a fase sólida e a gasosa (BISCHOFBERGER *et al.*, 2005 apud PROBIOGÁS, 2015).
- Aspectos que interferem na produção de biogás e na eficácia de sua captura: remoção de sólidos grosseiros, areia e gordura; distribuição do esgoto no reator; carga hidráulica volumétrica; separador trifásico; remoção de escumas; estanqueidade e corrosão dos reatores; tamponamento e captação do biogás; recuperação do biogás no meio líquido; rotinas operacionais; taxa de infiltração e contribuições de águas pluviais às redes coletoras; incorporação de subprodutos ao esgoto sanitário.
- A previsão de dispositivos de monitoramento e controle automatizado diminui muito a operação rotineira, favorecendo atividades de gestão e otimização do processo. Principais parâmetros que devem ser acompanhados continuamente, em tempo real: vazão do substrato; vazão, temperatura, pressão e composição do biogás, temperatura no reator.
- Para pequenas e médias plantas de biogás, recomenda-se a utilização de armazenamento sem pressão ou de gasômetros de baixa pressão. O armazenamento sob alta pressão é viável somente em plantas de grande porte.
- A utilização da energia elétrica e térmica resulta em redução de custos de 15 a 20%, indicado que o limite da viabilidade econômica pode estar

abaixo dos 100.000 habitantes quando utilizados os dois tipos de energia. Portanto, os principais custos evitados utilizados na análise dos projetos de viabilidade são o custo da tarifa elétrica local e o custo com o transporte e disposição final do lodo, que devem ser criteriosamente considerados ao longo da vida útil do projeto.

- Um projeto que gera energia elétrica a partir do biogás deve garantir que a energia produzida tenha um custo inferior ao daquela consumida da rede elétrica. Como a tarifa varia por estado ou município, a viabilidade deve ser calculada caso a caso.
- Considerando o cenário de retomada do crescimento econômico do país, de tendência de aumento das tarifas de energia elétrica, de ampliação das ações focadas na mitigação das emissões de gases do efeito estufa, de necessidade de aumento da eficiência nos sistemas de tratamento de esgoto e dos sinais de incentivo para geração distribuída renovável e disseminação das práticas de eficiência energética, a geração de eletricidade nas ETEs, a partir do biogás, passa a ser uma alternativa atrativa do ponto de vista financeiro e ambiental.
- Ao secar o lodo, reduz-se o seu volume, diminuindo, também, os custos com o transporte e com a disposição final do material. Além disso, a secagem térmica do lodo pode promover sua higienização, requisito imprescindível, por exemplo, para a reciclagem agrícola do material. Nesse caso, a higienização do lodo dispensa o uso de produtos químicos, como o óxido de cálcio, que é tipicamente aplicado em ETEs que adotam a estabilização alcalina prolongada para remoção de agentes patogênicos.
- Os custos com o transporte e com a disposição final do lodo na maioria dos municípios é definido pelas empresas que administram os aterros sanitários e podem variar bastante. O gerenciamento do lodo representa um custo operacional significativo para as ETEs. Ao secar o lodo, pode-se reduzir o volume (e o custo) de transporte e disposição final em 72%.

- O lodo anaeróbio seco pode ser utilizado como substituto de combustíveis que já são empregados na geração de energia. Assim, ao utilizar o biogás na secagem, garante-se uma redução no custo operacional com o transporte e disposição final do lodo e pode-se, ainda, gerar energia adicional.
- Com a aprovação da Lei nº 12.305/2010, a partir de 2014, apenas a parte não aproveitável dos resíduos (rejeitos) pode ser encaminhada para aterros sanitários. Isso significa que o lodo das ETEs precisa ser submetido a todos os processos possíveis de tratamento e recuperação por meio das tecnológicas disponíveis e economicamente viáveis, antes de ser depositado em um aterro sanitário. Apesar da viabilidade econômica ser um critério que varia caso a caso, o envio de lodos para aterros já começa a ser considerado impeditivo em alguns municípios, conforme a lei supracitada. Nos outros casos, a lei tem causado um aumento expressivo do custo da disposição final.
- O serviço de tratamento de esgotos, por ser um negócio intensivo em capital e de interesse público, deve apresentar retorno dentro de um horizonte de médio a longo prazo. Essa visão deveria se refletir na qualidade dos projetos e das obras. Ao economizar na fase de planejamento, de execução da obra e/ou na etapa de compra de equipamentos, na maioria dos casos se está perdendo recursos com manutenção e operação ao longo da vida útil da ETE. Para projetos de biogás, essa realidade é ainda mais válida. Como a perda de gás e a parada da geração de energia afeta diretamente a geração de receita, isso precisa ser evitado para que um projeto de aproveitamento energético tenha retorno.
- Os custos estimados para a execução das fases de projeto e preparação da licitação, tão importantes no alcance de um projeto de qualidade, são muitas vezes menosprezados, o que pode acabar comprometendo a qualidade dos equipamentos adquiridos e a execução da obra.

- Para garantir a devida qualidade de um projeto, recomenda-se que o projeto executivo e a preparação da licitação sejam realizados por uma empresa ou profissional com experiência no tema.
- Uma das principais características dos projetos de aproveitamento energético de biogás é que seus custos de investimento são majoritariamente referentes à compra e à montagem de equipamentos. Na avaliação dos custos é importante considerar que componentes de baixo custo de investimento podem causar altos custos de operação e manutenção. Isso é fundamental para garantir uma sustentabilidade técnica e econômica.
- Quando se comparam equipamentos utilizados para conversão do biogás, uma variável muito relevante é o seu rendimento energético. No Brasil, existem poucas marcas que fabricam motores e turbinas exclusivos para o biogás e há ainda pouca experiência prática sobre a eficiência desses equipamentos. A maioria dos motores comercializados para biogás no país são motores adaptados e, apesar de significativamente mais baratos, apresentam eficiência inferior àquela tipicamente verificada no mercado internacional. O mesmo se aplica aos sistemas térmicos e aos equipamentos utilizados no sistema de secagem do lodo. A eficiência térmica desses equipamentos, custos de manutenção, emissões atmosféricas e segurança precisam ser devidamente comparados.
- Na compra dos equipamentos, a existência de uma boa assistência técnica é outro fator a ser considerado. Se uma planta permanece muito tempo parada, por falta de manutenção, há perda de receita.
- Além de projetar e construir uma planta para otimizar a produção e a captação do biogás, é muito importante que a ETE seja bem operada para evitar a perda desse combustível e para salvaguardar as condições ótimas de sua produção. Muitas ETEs no país ainda são operadas de forma passiva, sendo a atuação do operador limitada a resolver os problemas quando surgem. Em uma ETE com aproveitamento energético de biogás, o papel ativo do operador passa a ser essencial para a sustentabilidade financeira do projeto.

- Considerando o atual contexto do setor de saneamento, o maior desafio para o aproveitamento energético de biogás não é técnico ou financeiro. Aqueles que até agora realizaram projetos dessa natureza declaram que a principal dificuldade encontrada foi convencer interna e externamente as suas empresas acerca da viabilidade técnica e econômica de tais projetos. Nesse sentido, a sensibilização de todos os envolvidos no processo, desde os agentes governamentais e as instituições financeiras até os gestores e operadores nas prestadoras de serviço, é crucial para que essa alternativa seja nacionalmente fomentada e multiplicada.

g. Probiogás (2016)

Este trabalho, também concebido no contexto do “Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS”, teve por objetivo específico a análise técnico-econômica da viabilidade do uso do biogás gerado em ETEs para fins de produção de energia elétrica.

O estudo comparou três tecnologias de tratamento de esgoto, gerando cinco alternativas para a análise:

1. Lodo ativado com aeração prolongada (LAAP). Sem geração de biogás.
2. Decantador primário, lodo ativado convencional e digestor anaeróbio de lodo (DP-LAC-DL). O biogás gerado no digestor é apenas queimado.
3. Decantador primário, lodo ativado convencional e digestor anaeróbio de lodo com sistema de aproveitamento energético de biogás (DP-LAC-DL-GAS). Idêntico à alternativa 2, todavia, o biogás produzido é aproveitado em um motogerador para geração de energia elétrica e autoconsumo.
4. Reator UASB e lodo ativado convencional (UASB-LAC). O biogás gerado no reator é apenas queimado.
5. Reator UASB e lodo ativado convencional com sistema de aproveitamento energético do biogás (UASB-LAC-GAS). Idêntico à alternativa 4, entretanto, o biogás produzido é aproveitado em um motogerador para geração de energia elétrica e autoconsumo.

As premissas adotadas no estudo das cinco alternativas são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Premissas adotadas no estudo.

CRITÉRIO	PREMISSA
População	<ul style="list-style-type: none"> 100.000 habitantes
Forma de aproveitamento	<ul style="list-style-type: none"> Unidade motor-gerador ciclo Otto para geração de energia elétrica Geração elétrica contínua [24 horas por dia]
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> Concepção tecnológica de ETE nova Ampliação de um sistema de aproveitamento de bio-gás em ETEs existentes [com ressalvas]
Tarifa de energia elétrica*	<ul style="list-style-type: none"> Horosazonal – verde A4 para a faixa de tensão de 2,3 a 25 kV da COELBA com desconto de 15% [detalhes nas seções 6.1.1 e 8.3.2]
Câmbio base**	<ul style="list-style-type: none"> R\$ 3,50 por Euro
Juros de empréstimo*	<ul style="list-style-type: none"> 8,70% [BNDES]
Taxa de inflação*	<ul style="list-style-type: none"> 6,50%
Destino final de lodo	<ul style="list-style-type: none"> Custos de disposição final em aterro sanitário sem higienização
* Base 07/2015	
** Variado na análise de sensibilidade	

Fonte: Probiogás (2016).

Para a alternativa 5 foi considerada a perda de 30% causada pela saída de metano do reator UASB de forma dissolvida com o eluente líquido. Segundo os autores, os valores observados na prática variam entre 14 e 50%, sofrendo influência da carga hidráulica aplicada, temperatura e pressão parcial do gás no interior do reator. Este fenômeno não ocorre em reatores anaeróbios de lodo. Por outro lado, os reatores UASB geram biogás com teores de metano mais elevados comparados aos reatores anaeróbios de lodo. O arranjo considerado na alternativa 5 é apresentado na Figura 17.

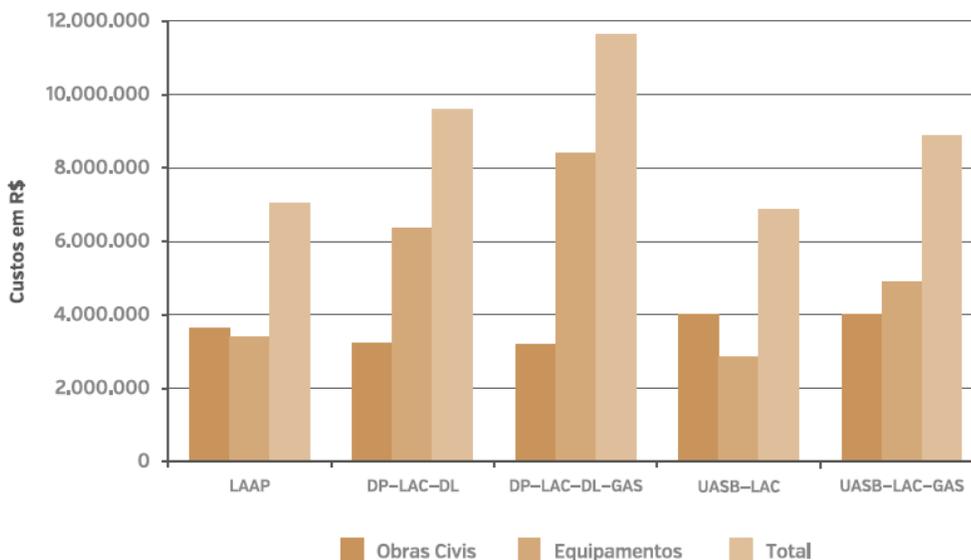
Figura 17 – Arranjo da alternativa 5 (UASB-LAC-GAS).



Fonte: Probiogás (2016).

Para os custos de investimento (CAPEX), considerou-se nos cálculos somente os aspectos que diferem uma alternativa de outra. Os custos de investimento calculados para as cinco alternativas são apresentados na Figura 18.

Figura 18 – CAPEX para as cinco alternativas.



Fonte: Probiogás (2016).

Como pode ser observado na Figura 18, a alternativa de menor CAPEX foi a de reator UASB e lodo ativado convencional (UASB-LAC). As alternativas que consideram digestão de lodo apresentaram custos de investimento mais elevados devido utilização de equipamentos mais complexos, boa parte importados.

Para os custos de operação e manutenção (OPEX), considerou-se os custos referentes ao consumo de energia elétrica, disposição final de lodo, e os custos de manutenção do sistema de aproveitamento energético de biogás, quando presente.

Em relação ao consumo de energia elétrica, considerou-se somente o custo referente à aeração, assumindo-se que o consumo de outros equipamentos na ETE não difere significativamente entre as alternativas. A Tabela 15 apresenta o consumo de energia elétrica para as cinco alternativas, sem considerar o custo evitado com a geração de energia elétrica para as alternativas 3 e 5.

Tabela 15 – Cons. anual energia elé. s/ considerar custos evitados c/ o biogás.

DESCRIÇÃO	Un.	LAAP	DP-LAC-DL	DP-LAC-DL-GAS	UASB-LAC	UASB-LAC-GAS
Consumo Energético por ano	kWh/ano	2.828.272	2.139.982	2.139.982	1.430.422	1.430.422
Custo operacional anual com energia elétrica	R\$/ano	954.851	722.478	722.478	482.924	482.924

Fonte: Probiogás (2016).

Referente aos custos com a disposição de lodo, foi considerada disposição final em aterro sanitário após desaguamento com uma concentração de sólidos de 25%. O custo de disposição de lodo contempla o custo de coleta, transporte e disposição final em aterro sanitário, e pode variar significativamente de projeto para projeto, dependendo principalmente da distância entre a ETE e o aterro sanitário, bem como da umidade do lodo produzido e da tarifa aplicada. O volume de lodo gerado e o custo para sua disposição considerados no estudo são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Produção anual de lodo e custo para transporte e disposição final.

DESCRIÇÃO	Un.	LAAP	DP-LAC-DL	DP-LAC-DL-GAS	UASB-LAC	UASB-LAC-GAS
Quantidade de lodo gerado por ano	m³/ano	6.885	5.556	5.556	4.260	4.260
Custo anual para transporte e disposição final	R\$/ano	1.032.804	833.391	833.391	639.029	639.029

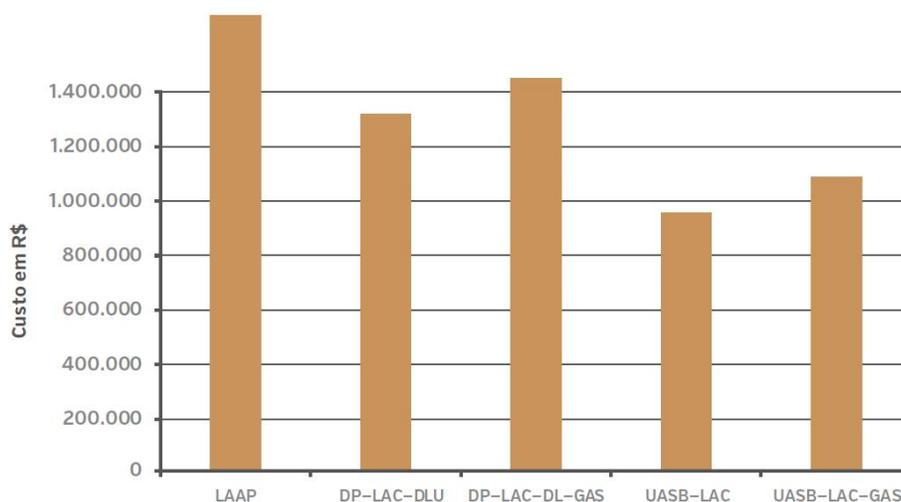
Fonte: Probiogás (2016).

As demais despesas consideradas no cálculo do custo de OPEX foram: manutenção e reparação dos equipamentos de geração, manutenção no sistema de tratamento de gás, manutenção do gasômetro, manutenção do sistema de captação

e transporte do biogás, manutenção das instalações elétricas, manutenção medidor de vazão e composição do biogás, manutenção do sistema de queima, autoconsumo de energia elétrica do CHP, consumo de óleo lubrificante, análises laboratoriais do biogás, mão de obra do operador, custos gerais.

A Figura 19 mostra os custos de operação e manutenção calculados para as cinco alternativas. Observa-se que as alternativas que adotam reatores UASB possuem os menores OPEX.

Figura 19 – OPEX para as cinco alternativas.



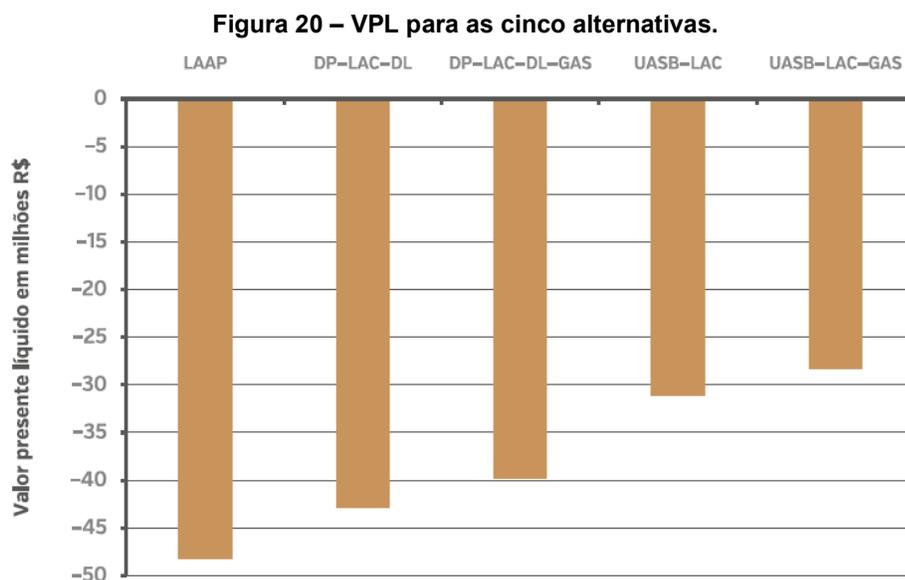
Fonte: Probiogás (2016).

Em relação às receitas, a energia elétrica produzida por meio do aproveitamento do biogás gerado nas alternativas 3 (DP-LAC-DL-GAS) e 5 (UASB-LAC-GAS) foram computadas no fluxo de caixa como receita, pois deixa-se de consumir energia elétrica da rede. Considerando geração contínua e as tarifas aplicadas no estudo, a receita anual gerada foi de R\$ 476.000 para o arranjo com digestor de lodo e R\$ 475.862 para o reator UASB.

O estudo da viabilidade econômica considerou os métodos do Valor Presente Líquido (VLP) e da Taxa Interna de Retorno (TIR), calculados a partir de um horizonte de planejamento de 25 anos.

O trabalho não considerou a receita oriunda da tarifa cobrada do prestador pelo serviço de esgotamento sanitário. Sendo este um estudo comparativo, tomou-se como base somente os custos de investimento e operação ao longo do universo de referência, e, como custo evitado, a geração de energia elétrica a partir do biogás. A

ausência de receitas oriundas das tarifas de esgoto gerou valores presentes líquidos negativos em todas as alternativas. A Figura 20 apresenta o VPL obtido para as cinco alternativas.



Fonte: Probiogás (2016).

O cálculo da TIR foi considerado somente para as alternativas 3 e 5. Foram considerados somente os custos e receitas diretamente vinculados às instalações de aproveitamento do biogás, composto pelo sistema de coleta, transporte, tratamento e armazenamento do biogás, e o motogerador. Os resultados são apresentados na Tabela 17. Em ambos os casos se obteve viabilidade econômica, com valores bastante superiores à taxa mínima de atratividade (TMA) de 8,7% considerada como premissa na Tabela 14.

Tabela 17 – TIR para as alternativas 3 e 5.

ITEM	INSTALAÇÕES DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS POR MEIO DE MOTOR-GERADOR	
	DIGESTOR DE LODO	UASB
Taxa Interna de Retorno	20,37 %	19,21 %

Fonte: Probiogás (2016).

Os autores ainda realizaram a análise de sensibilidade para a alternativa 5 (UASB-LAC-GAS) em relação à variação de diversas condições adotadas no estudo. A síntese dos resultados é apresentada a seguir:

- O parâmetro de perda de biogás adotado foi variado de 30% (valor adotado no estudo) para 40%. Ainda assim a alternativa UASB-LAC-GAS obteve melhor VPL em relação às demais alternativas. A TIR reduziu de 19,21% para 16,95%, evidenciando a importância da estanqueidade do reator.
- O aumento da tarifa de energia elétrica aumenta a viabilidade relativa da alternativa 5 em relação às demais, pois este impacta mais as alternativas que consomem mais energia elétrica. Um aumento real anual de 2% na tarifa resulta em TIR de 24,59% para alternativa 3 e 23,71% para a alternativa 5.
- Em relação à variação cambial, mesmo considerando um aumento de 3,5 R\$/EUR (câmbio considerado no estudo) para 4,5 R\$/EUR, a alternativa 5 apresentou melhor viabilidade relativa. As alternativas mais impactada foram a 3 (DP-LAC-DL-GAS) e a 2 (DP-LAC-DL), devido a maior utilização de equipamentos importados (42% e 32% do CAPEX, respectivamente). Para alternativa 5 (UASB-LAC-GAS) somente 21% do CAPEX foi considerado importado. As alternativas 1 e 4 não utilizaram equipamentos importados. A TIR com o câmbio em 4,5 R\$/EUR resultou em 13,85% e 12,71% para as alternativas 3 e 5, respectivamente.
- Considerando um aumento nos custos de manutenção de 50%, a alternativa 5 continuou apresentar melhor viabilidade relativa. Para este cenário a TIR ficou em 15,29% e 13,83% para as alternativas 3 e 5, respectivamente.

Por fim, analisou-se o potencial econômico adicional pelo uso da energia térmica para secagem do lodo, considerando a cogeração (CHP) para as alternativas 3 e 5. A demanda e custo para as cinco alternativas são apresentadas na Tabela 18. Apesar de não se ter realizado o estudo da viabilidade, demonstrou-se que a alternativa 5 pode suprir 46% da demanda térmica necessária para secagem do lodo. Para o arranjo DP-LAC-DL-GAS a economia é significativamente menor (16%) devido à necessidade de aquecimento do digestor anaeróbio de lodo.

Tabela 18 – Demanda e custo para secagem térmica do lodo.

PARÂMETRO	Un.	LAAP	DP-LAC-DL	DP-LAC-DL-GAS	UASB-LAC	UASB-LAC-GAS
Energia térmica do CHP	kWh/d	0	0	4.269	0	4.268
Consumo de energia térmica na ETE**	kWh/d	0	0	2.299	0	0
Energia térmica disponível para secagem de lodo	kWh/d	0	0	1.970	0	4.268
Consumo de energia térmica necessária para secagem de lodo	kWh/d	14.835	11.971	11.971	9.179	9.179
Cobertura da demanda de energia térmica para secagem de lodo	-	0%	0%	16%	0%	46%
Custo diário do GN*	R\$/d	2.239	1.807	1.509	1.385	741
Custo anual do GN	R\$/a	817.211	659.425	550.890	505.635	270.517
* Adotando tarifa de gás natural de R\$ 1,4564 por m ³ [BAHIAGAS, 2015]						
** Considerando o aquecimento do digestor somente na alternativa com aproveitamento de biogás						

Fonte: Fonte: Probiogás (2016).

h. Raimundo *et al.* (2017)

O estudo dimensionou dois tipos de digestores – convencional e UASB – para tratamento de esgoto doméstico da cidade de Pouso Alegre (MG) e avaliou o potencial de produção de biogás e a viabilidade econômica dos arranjos.

Para análise da viabilidade econômica, os autores estimaram os custos de implantação, operação e manutenção a partir de valores disponíveis na literatura, atualizando-os para o ano de 2016 pela cotação média do dólar. Do mesmo modo, as estimativas de consumo energético foram obtidas também da literatura. Os valores adotados na pesquisa são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Custos p/ habitante p/ sistema convencional e UASB + lodo ativado.

Sistema	Implantação R\$/hab	O&M R\$/hab. Ano	Consumo Energético kWh/hab.ano
Convencional	114,57	14,32	22
UASB + lodo ativado	100,25	10,02	17

Fonte: Raimundo *et al.* (2017).

Para cálculo da receita anual considerou-se que toda a energia produzida seria consumida pela própria ETE, ou seja, a receita seria a gerada a partir da economia que a ETE obteria nos seus custos anuais de energia. Adotou-se para o cálculo a tarifa industrial da CEMIG, no valor de R\$ 410,27 por MWh para o ano de 2016.

O cálculo da viabilidade foi realizado pelo método do valor presente líquido (VPL), determinando-se o valor presente dos pagamentos futuros a partir do fluxo de caixa, descontados a uma taxa mínima de atratividade de 12%, subtraindo-se o custo inicial do investimento. A análise considerou uma projeção de 20 anos (até 2037). Para simplificação da análise econômica, não foi considerado o reajuste da tarifa de energia ao longo dos anos, assim como a produção de energia da ETE para o cálculo da receita e os custos de O&M, que foram calculados com a população do ano 2037 (173.106 habitantes) e não como uma função do aumento da população ao longo dos anos.

Os valores de energia produzida a partir do biogás em um ano são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Valores de energia produzida a partir do biogás.

Sistema	Energia produzida MWh/ano
Convencional	1.484,18
UASB + lodo ativado	2.782,85

Fonte: Raimundo et al. (2017).

A pesquisa concluiu que o digestor UASB é mais eficiente, conseguindo abater até 95% da energia consumida pela ETE, contra 39% do reator convencional. Todavia, a partir do método do VLP verificou-se inviabilidade econômica para sua aplicação considerando 20 anos de vida útil do projeto.

i. Dutra (2014)

Por meio da metodologia de custo do ciclo de vida, onde todas as despesas desde a concepção até o fim da vida útil são consideradas, o autor investiga três variantes do sistema de tratamento por lodos ativados, dimensionados para

atendimento a uma população de 100.000 habitantes. São considerados os custos de implantação, operação, manutenção e reparação, considerando principalmente os seguintes aspectos: área construída, custos de implantação de obras civis e aquisição de equipamentos, consumo de energia, custo de disposição de lodo, potencial de aproveitamento energético do biogás.

As seguintes alternativas são avaliadas: lodo ativado com aeração prolongada (LAAP); reator UASB seguido por lodo ativado convencional (UASB-LAC); lodo ativado convencional e digestor de lodo (DP-LAC-DL). Dentre as variantes avaliadas, o autor conclui que a utilização de reator UASB seguido por lodo ativo convencional é a que apresenta menor custo do ciclo de vida, com custos de implantação e operação menores. Os custos de operação são minorados, principalmente, pelo menor consumo energético e potencial aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica. A alternativa de aeração prolongada obteve o maior custo do ciclo de vida.

Na alternativa UASB-LAC, o decantador primário é substituído pelo reator UASB, alcançando eficiência na remoção de DQO na ordem de 90%. O lodo excedente não estabilizado retorna ao reator UASB para estabilização anaeróbia, juntamente com o lodo anaeróbio já presente no reator. Para tratamento do lodo é necessária apenas a desidratação.

O resumo dos custos calculados pelo autor é apresentado na Tabela 21 (valores de 2014).

Tabela 21 – Resumo do custo de ciclo de vida LAAP, UASB-LAC e DP-LAC-DL.

Custos do ciclo de vida (valores refletem a inflação)						
	LAAP		UASB-LAC		DP-LAC-DL	
Custos construção civil	R\$	4,935,915.69	R\$	3,800,951.36	R\$	4,413,675.23
Custos iniciais de equipamentos	R\$	2,182,464.66	R\$	1,311,027.06	R\$	4,677,812.48
Custo total de Implantação	R\$	7,118,380.35	R\$	5,111,978.42	R\$	9,091,487.71
Custos totais de Energia Elétrica	R\$	144,967,761.13	R\$	72,523,039.87	R\$	104,799,012.38
Custos totais de Substituição	R\$	9,593,554.92	R\$	5,236,366.92	R\$	11,517,953.34
Custos totais de Disposição de lodo	R\$	99,103,863.68	R\$	52,580,105.45	R\$	41,614,446.46
Custo total de Operação	R\$	253,665,179.73	R\$	130,339,512.24	R\$	157,931,412.18
Custo total	R\$	260,783,560.07	R\$	135,451,490.66	R\$	167,022,899.89

Custos do ciclo de vida (Valor Presente Líquido)						
	LAAP		UASB-LAC		DP-LAC-DL	
Custo total (VPL)	R\$	98,827,993.93	R\$	52,256,119.04	R\$	66,697,227.66

Fonte: DUTRA (2014).

Em relação a produção de biogás, o dimensionamento realizado pelo autor estimou uma produção diária de 4.850 m³ para a alternativa UASB-LAC e de 3.733 m³ para a DP-LAC-DL. A alternativa LAAP não possui etapa anaeróbia e, portanto, não produz biogás.

3.2.2 Processamento de Lodos em Reatores Anaeróbios

Os processos de tratamento de esgoto por meio de sistemas aeróbicos, em função do crescimento acelerado dos microrganismos, produzem lodos instáveis e com menor potencial de desaguamento, normalmente requerendo uma etapa adicional para digestão do lodo, com a finalidade principal de estabilização. Esta estabilização normalmente é feita por digestão anaeróbia, gerando biogás.

Em países de clima frio, onde predominam os processos de tratamento de esgoto aeróbicos, a captação do biogás sempre foi economicamente interessante para fornecer o combustível necessário para aquecimento dos digestores. Mais recentemente houve grande crescimento no interesse pela geração da energia elétrica. Como principal exemplo tem-se a Alemanha, onde, em 2013, 80% do biogás formado no processamento de lodo foi utilizado para geração de energia elétrica, 10%

para geração de energia térmica e/ou acionamento direto de bombas e compressores e o restante vendido ou perdido (PROBIOGÁS, 2015).

No Brasil já existem algumas plantas em operação gerando energia elétrica, todavia, o aproveitamento está muito aquém do potencial disponível, sobretudo, em consequência da incerteza em relação a viabilidade econômica dos projetos. Uma vez obtido o biogás, os tratamentos necessários e o aproveitamento energético são semelhantes à alternativa utilizando reatores UASB.

A seguir são apresentadas observações e resultados obtidos por alguns trabalhos relevantes que tratam da temática da produção de biogás e da geração de energia elétrica a partir do processamento do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto.

a. Leite (2011)

Este trabalho teve por objetivo avaliar a digestão do lodo da ETE Insular (Florianópolis) por meio de um digestor piloto considerando condições mesofílicas (35°C). Esta ETE possui sistema de tratamento do tipo lodo ativado de aeração prolongada e atendia na época do estudo aproximadamente 130.000 habitantes. As observações e resultados de maior interesse são resumidos a seguir:

- A maior parte das ETEs construídas antes do ano 2000 não possuem sistema adequado de disposição final de lodos, não realizando qualquer processo de tratamento, sendo o lodo excedente descartado até mesmo nos próprios sistemas biológicos das ETEs, reduzindo consideravelmente a eficiência de remoção do material orgânico do esgoto afluyente, além de causar outros prejuízos ao processo.
- A maioria dos microrganismos são mesofílicos, crescendo melhor em temperaturas que variam entre 20°C a 40°C, sendo assim, os processos convencionais de digestão anaeróbia ocorrem nessa faixa de temperatura. Condições termofílicas melhoram a higienização do lodo e devem ser consideradas quando se pretende aproveitar o biossólido resultante como fertilizante, por exemplo.
- Condições termofílicas produzem mais biogás, todavia, com maior concentração de CO₂ e, por conseguinte, menor volume relativo de metano.

- O digester piloto foi capaz de suportar incrementos da carga orgânica volumétrica aplicada sem grandes prejuízos na mineralização e na redução do volume do lodo bruto.
- A composição do biogás gerado no digester piloto teve concentrações médias de 60% para o metano e 34% para CO₂ durante o período de operação do digester (180 dias), condizente com os valores observados na literatura.
- O digester piloto mostrou-se capaz de remover matéria orgânica existente no lodo adensado, gerando um subproduto mais inorgânico e com menor massa de sólidos.

b. Probiogás (2015)

Este trabalho já foi analisado no item 3.2.1. A seguir são destacadas as observações de maior interesse relacionadas ao processamento de lodo nas ETEs:

- Mesmo que o tipo de construção em forma ovoide possua uma série de vantagens com relação à mistura, retenção de calor e captação de biogás, a construção em forma de cilindro é a mais comum, por ter um custo de construção significativamente mais econômico.
- A produção específica teórica é de 0,8 m³/kg de sólidos orgânicos voláteis, o que corresponde a uma produção de biogás de cerca de 25 L/(hab.d) (ANDREOLI, VON SPERLING & FERNANDES, 2010). Têm-se verificado, no Brasil, valores de produção de biogás entre 12 e 17 L/(hab.d).
- Embora haja uma relação entre o volume do digester, a vazão do lodo afluyente e a carga de matéria orgânica, as condições de processo dependem, também, do tamanho absoluto do respectivo reator. A distribuição do volume total do reator em um ou mais digestores é uma variável preponderante. Muitas vezes, é possível obter melhores resultados em reatores maiores.
- Quando for aproveitada unicamente a energia térmica do biogás, devem ser utilizados os mais baixos valores esperados para o dimensionamento da capacidade de armazenamento de biogás. Caso a instalação inclua motores a gás ou plantas de cogeração, a

capacidade de armazenamento deve levar em conta os mais elevados valores esperados, mesmo que esses valores sejam esperados apenas em determinadas fases do ano (vários meses).

- Estações com taxas específicas de biogás acima de 25 L/(hab.d) só devem ser dimensionadas se os respectivos resultados tiverem sido medidos em um horizonte de vários anos de operação.
- Levando em consideração que os digestores em ETEs são dimensionados por meio do tempo de detenção hidráulica e que a carga orgânica do lodo a ser estabilizado é relativamente baixa, os digestores em ETEs têm capacidade para receber cargas orgânicas adicionais, permitindo, assim, a codigestão.
- Na codigestão, a situação mais comum é o uso do lodo do tratamento de esgoto como substrato principal, misturado com uma porção menor de outro substrato, ou, ainda, com uma variedade de outros substratos. O uso de um cosubstrato normalmente melhora a produção de biogás. Taxas típicas de adição de cosubstratos em digestores de lodos variam de 5 a 20%. A adição de cosubstratos pode resultar em um aumento na produção de biogás de 40 a 200% (BRAUN, 2002).

c. Probiogás (2016)

Este trabalho já foi analisado no item 3.2.1, podendo-se observar o desempenho relativo da alternativa DP-LAC-DL-GAS em relação às demais.

Apesar da menor viabilidade em relação às alternativas que utilizam reatores UASB, a Figura 20 demonstra a melhora de viabilidade da alternativa DP-LAC-DL com a inclusão no aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica.

d. Dutra (2014)

Este trabalho já foi analisado no item 3.2.1, onde se verificou que a alternativa de reator UASB seguido por lodo ativado convencional (UASB-LAC) possui menor custo do ciclo de vida que as alternativas decantador primário, lodo ativado convencional e digestor de lodo (DP-LAC-DL) e lodo ativado com aeração prolongada (LAAP).

A seguir são apresentados as observações e resultados de maior interesse referentes à alternativa DP-LAC-DL:

- A alternativa DP-LAC-DL foi a que apresentou maior custo de implantação, principalmente devido ao custo de aquisição dos digestores de lodo, cotados com uma empresa alemã.
- A alternativa DP-LAC-DL apresentou o menor custo de disposição final do lodo, todavia, próximo ao custo obtido pela alternativa UASB-LAC.
- Para os demais indicadores de desempenho (potência instalada por área construída, custo de energia, custo de operação), a alternativa DP-LAC-DL apresentou resultados inferiores à alternativa UASB-LAC, porém, significativamente melhores que a alternativa LAAP.

e. ALVES (2016)

A autora avaliou a codigestão do glicerol gerado no biodiesel em conjunto com resíduos sólidos urbanos e lodo de ETEs com objetivo de aumentar a produção de biogás. A seguir são apresentados as observações e resultados de maior interesse:

- O gerenciamento dos lodos (adensamento, estabilização, condicionamento, desidratação e disposição final) pode ser responsável por até 60% do custo total associado com o tratamento de águas residuárias municipais.
- Entre as diversas opções disponíveis atualmente para processamento dos lodos de ETEs, a digestão anaeróbia é provavelmente a tecnologia mais amplamente utilizada.
- O uso da digestão anaeróbia para codigerir lodo de ETE com outros resíduos orgânicos para melhorar tanto a produção de biogás como a qualidade do biossólido tratado, foi proposto e implementado em várias estações de tratamento de águas residuárias em todo o mundo.
- A digestão anaeróbia pode ser empregada em plantas de tratamento já existentes, sem investimento de capital significativo.
- Na maior parte das etapas do seu manuseio, o lodo de ETE é constituído de mais de 95% de água, com uma concentração de sólidos da ordem de 0,25 a 12% do lodo, em peso.
- A composição macromolecular dos lodos de ETE é em torno de 20%, 27% e 11% para carboidratos, proteínas e lipídeos, respectivamente.

- Alternativas de tratamento de lodos de ETE em sua forma bruta, tais como a codigestão com resíduos urbanos em ambientes controlados ou digestores anaeróbios, visando o aproveitamento energético do biogás poderiam aumentar o potencial de geração de biogás desses resíduos para geração de energia, reduzir os custos do tratamento do lodo nas ETEs e também os riscos ambientais ligados a sua disposição final em aterros.

3.2.3 Conclusões

O estudo dos diversos trabalhos e cenários apresentados nos subitens 3.2.1 e 3.2.2 permitiu a sedimentação de alguns conceitos e elaboração de hipóteses, visando a melhor aplicação dos recursos destinados a ampliação dos sistemas de tratamento de esgoto:

- Há grande tendência de aplicação de reatores UASB em novos empreendimentos, devido, principalmente, aos baixos custos de implantação e operação desta tecnologia. Todavia, ainda não se consolidou o interesse no aproveitamento do gás inerentemente gerado.
- A não consideração do aproveitamento do biogás na etapa de projeto de engenharia de reatores UASB resulta em equipamentos deficientes, com grande perda de biogás, o que impacta na viabilidade de eventual aproveitamento energético futuro. Os cuidados adotados para aproveitamento do biogás acabam por melhorar a eficiência do processo de tratamento de esgoto.
- Há tendência de utilização de motores de combustão interna ciclo Otto para geração de energia elétrica devido, principalmente, a simplicidade operacional e menores custos de aquisição e manutenção, quando comparados a microturbinas.
- O aproveitamento térmico dos gases de exaustão dos motores de combustão interna para secagem do lodo (cogeração) pode contribuir decisivamente para viabilidade dos empreendimentos, a depender dos custos de disposição final do lodo verificados caso a caso.

- O arranjo mais promissor para plantas novas é o UASB seguido de lodos ativados convencional (UASC-LAC), que demonstrou melhor viabilidade nos estudos de Valente (2015) e Dutra (2014). A viabilidade econômica para o arranjo UASB-LAC encontra-se entre 100.000 e 200.000 pessoas atendidas pela ETE.
- Segundo o estudo comparativo realizado em Probiogás (2016) para uma população de 100.000 habitantes, a alternativa de reator UASB seguido de lodos ativados convencionais e aproveitamento elétrico do biogás é que apresentou melhor viabilidade entre cinco alternativas tecnológicas diferentes, incluindo três alternativas em que o biogás não é aproveitado.
- Há grande dificuldade na estimação dos valores de biogás efetivamente produzidos em ETEs existentes. Os valores encontrados na literatura normalmente levam a estimativas exageradas, que resultam no sobredimensionamento de equipamentos e superestimação receitas. O modelo que melhor se aproxima da realidade é o proposto por Lobato (2011) e implementado no software ProBio 1.0.
- Para estudo da viabilidade de aproveitamento do biogás em ETEs existentes, sobretudo nas que utilizam reatores UASB, recomenda-se como etapa preliminar a aquisição e instalação de medidor para a vazão de biogás. As leituras devem ser realizadas continuamente (online) e registradas em *data-logger* ou eventual sistema de automação existente. O tempo de análise deve ser, preferencialmente, de no mínimo 1 ano, de modo a se verificar a variação sazonal na produção de biogás, afetada principalmente por eventos de chuva.
- Apesar do amadurecimento tecnológico alcançado pela aplicação de reatores UASB em boa parte das ETEs em funcionamento no Brasil, o aproveitamento energético do biogás ainda é incipiente. A falta de incentivos governamentais e a incerteza sobre a viabilidade dos investimentos não permitiu a consolidação de uma cadeia de fornecedores, gerando grande dependência de equipamentos importados.

- Nas aplicações para processamento do lodo, os digestores anaeróbios apresentam-se como equipamentos mais complexos e dispendiosos em relação aos reatores UASB
- Pode haver incremento significativo na produção de biogás quando são adicionados outros substratos ao lodo processado nos digestores anaeróbios (codigestão), todavia, reque-se um controle operacional mais apurado.
- O estudo do enquadramento melhor tarifário junto à concessionária de energia elétrica deve fazer parte análise de viabilidade econômica. Esquemas de geração na ponta podem ser eventualmente vantajosos apesar do maior investimento devido ao sobredimensionamento dos equipamentos de transporte, armazenamento, tratamento de biogás e de geração de energia elétrica.
- Os estudos analisados permitiram vislumbrar que, mesmo com as dificuldades derivadas da falta de experiência e dos custos elevados para os equipamentos, há expectativa de viabilidade econômica para ETEs que atendem a partir 100.000 habitantes.

3.3 TRATAMENTOS PRELIMINARES

O nível de tratamento prévio do biogás depende do método de aproveitamento que se pretende utilizar. Em estações de tratamento de esgoto no Brasil, as aplicações mais comuns relacionam-se ao aproveitamento para secagem do lodo, que requer baixo nível de tratamento, e a geração de energia elétrica, que requer um nível intermediário. A purificação para produção de biometano, com retirada de CO₂, requer um nível de tratamento sofisticado, que pode impactar severamente na viabilidade dos investimentos.

A remoção de condensado é a forma de tratamento mais simples e deve ser aplicada a qualquer sistema que possua coleta de biogás, mesmo que o uso final seja a combustão direta. Para o aproveitamento em equipamentos para geração de energia elétrica, tais como motores a combustão interna, turbinas e microturbinas, é ainda necessária a remoção de umidade, H₂S e, eventualmente, de siloxanos.

Como exemplo, Valente (2015), em seu estudo de viabilidade econômica para aproveitamento de biogás em ETEs para atendimento a populações entre 50.000 e 450.000 habitantes, utilizou os seguintes equipamentos nos arranjos que previam a geração de eletricidade por motor de combustão interna ciclo Otto:

- Tanques de drenagem para remoção de água condensada;
- Vaso de desidratação por chiller para remoção da umidade;
- Vaso dessulfurizador preenchido com ferro metálico;
- Filtro de carvão ativado para remoção fina de H₂S e de siloxanos.

A Figura 21 mostra o filtro de carvão ativado considerado por Valente (2015). Após a remoção grosseira de H₂S (< 500 ppm), o filtro de carvão ativado faz a remoção fina do sulfeto e remoção dos siloxanos.

Figura 21 – Filtro de carvão ativado SILOXA modelo GRW 200.



Fonte: Valente (2015).

Os custos dos sistemas de tratamento considerados por Valente (2015) são apresentados nas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7. Por se tratar de equipamentos importados, observa-se que os custos são bastante expressivos, prejudicando a viabilidade das ETEs de menor escala.

Já em Probiogás (2016), na análise de viabilidade técnico econômica das alternativas 3 e 5, que também utilizam biogás para acionamento de motor de combustão interna ciclo Otto, os autores adotaram um arranjo com coletores de água

condensada, sistema de remoção biológica de H_2S por meio de injeção controlada de ar no interior do gasômetro, e como tratamento complementar uma combinação de refrigerador e filtro de carvão ativado para remoção do H_2S residual, umidade e siloxanos, mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Tratamento complementar c/ refrigerador e filtro de carvão ativado



Fonte: Probiogás (2016).

Nos subitens a seguir são analisados os principais tratamentos utilizados previamente ao aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica.

3.3.1 Remoção de Condensado

O biogás, geralmente, é saturado de vapor d'água, resultando na ocorrência de condensação. O condensado se forma com o resfriamento do gás ao longo da tubulação de transporte e pode bloqueá-la, caso não removido. Assim, os dutos para transporte do gás devem ser inclinados em direção a pontos em que a água condensada possa ser eliminada adequadamente (pontos de purga ou dreno). Os pontos de purga devem possibilitar a eliminação do condensado do sistema com segurança, ou seja, sem escape de biogás. Dispositivos automáticos para remoção do condensado podem ser instalados nos pontos mais baixos dos gasodutos. (PROBIOGÁS, 2015).

A Figura 23 mostra um filtro separador de sedimentos com dreno para condensado.

Figura 23 – Filtro de sedimentos com dreno para condensado



Fonte: PROBIOGÁS (2015).

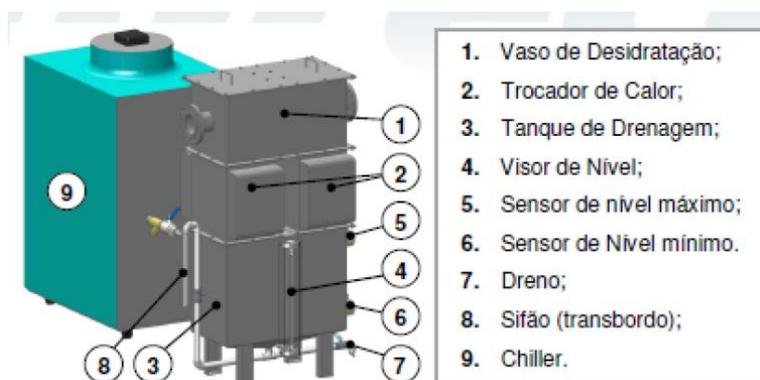
Probiogás (2015) recomenda o uso de filtros de cascalho para retirada de partículas grosseiras presentes no biogás, simultaneamente à retirada de água condensada.

3.3.2 Remoção de Umidade

O vapor d'água deve ser removido do biogás a fim de proteger os componentes dos sistemas de aproveitamento do gás contra desgaste e danos, e atender às exigências dos estágios seguintes de tratamento.

O resfriamento é processo mais utilizado e baseia-se no princípio da separação do condensado pelo resfriamento do biogás abaixo do ponto de orvalho. A Figura 24 mostra o equipamento considerado por Valente (2015) em seu estudo.

Figura 24 – Vaso de desidratção por chiller



Fonte: Valente (2015).

Outros processos, mais sofisticados, para remoção da umidade são adsorção utilizando sílica como material adsorvente e a absorção com desidratção por glicol, normalmente empregados nos processos de purificação para produção de biometano.

3.3.3 Remoção do H₂S

O sulfeto de hidrogênio é altamente corrosivo e pode danificar tubulações, válvulas, instrumentos e peças dos equipamentos para conversão de energia. As concentrações de H₂S encontradas em ETEs variam bastante, a depender das características do esgoto e do processo de tratamento adotado. Segundo VALENTE (2015), as concentrações em reatores UASB, na média, não ultrapassam 2.000 ppm, enquanto nos biodigestores de lodo podem chegar até 1.000 ppm. Apesar de variar de acordo com o fabricante, a concentração de H₂S para uso energético usualmente não deve passar de 300 ppm.

A seguir são discutidas as formas usuais de dessulfurização aplicadas no tratamento do biogás.

a. Filtro de ferro metálico ou palha de aço

A eliminação do H₂S se dá pela reação do sulfeto com o ferro metálico ou palha de aço, gerando sulfeto de ferro sólido, que é eliminado.

Lobato (2011) em seu aparato experimental para aproveitamento do biogás em motor de combustão interna utilizou dois filtros preenchidos com palha de aço,

mostrados na Figura 25. O arranjo com dois filtros em paralelo permite a troca da palha de aço sem parada do sistema.

Figura 25 – Filtros de H₂S.



Fonte: Lobato (2011).

b. Injeção controlada de ar no gasômetro (microaeração)

A microaeração é conseguida pela injeção de ar sob condições controladas. Trata-se de um método barato e eficiente para se reduzir as concentrações de H₂S no biogás, sendo muito popular, sobretudo, em plantas de biogás agrícolas. O processo exige a dosagem exata de ar, mesmo quando a vazão de gás bruto oscila e, por isso, a alimentação de ar no sistema deve ser monitorada, para que não se atinjam limites que ofereçam risco de explosão e nem limites que comprometam possíveis usos em função da presença de oxigênio no biogás. Em termos de qualidade, os resultados obtidos, em geral, são adequados para a queima em motores estacionários a gás, desde que não ocorram grandes oscilações nas concentrações de enxofre (PROBIOGÁS, 2015).

c. Inibição química - precipitação do sulfeto

Neste processo são adicionados sais de ferro no interior do reator UASB para propiciar a precipitação do H₂S juntamente com o lodo.

Segundo Valente (2015), a precipitação de sulfeto é um método relativamente barato, precisando de investimento mínimo e com uma operação, monitoramento e tratamento simples. Todavia, o grau de dessulfurização é dificilmente controlável, sendo um método normalmente aplicado a reatores com altas concentrações de H₂S

ou para casos de aproveitamento em que são admitidas grande concentrações de sulfeto.

d. Dessulfurização biológica

Segundo Chernicharo (2010) apud Valente (2015), para o tratamento biológico de biogás, as três técnicas mais utilizadas são os biolavadores, biopercoladores e os biofiltros. Os princípios de remoção do H_2S do biogás são parecidos. O gás a ser tratado é forçado através de um meio imobilizado ou móvel no qual microrganismos ficam aderidos a materiais naturais ou sintéticos na forma de um biofilme ou como biomassa suspensa num meio líquido. Os compostos voláteis biodegradáveis são então absorvidos pelo meio suporte e pelo biofilme ou biomassa suspensa, sendo biologicamente oxidados a substâncias menos prejudiciais.

A dessulfurização biológica é capaz de remover quantidades muito elevadas de H_2S , todavia, não deve ser aplicada se são esperadas flutuações frequentes na concentração de sulfeto.

e. Lavagem química

As principais características da lavagem química, segundo Valente (2015), são:

- O princípio básico de um lavador químico é a absorção no líquido de lavagem dos compostos poluentes na corrente gasosa. Isso é alcançado pelo intenso contato do biogás bruto com a solução absorvente, no interior de uma coluna empacotada especialmente projetada para propiciar uma grande área interfacial.
- Produtos químicos são adicionados à solução lavadora com o objetivo de incrementar a absorção e remoção dos compostos odorantes. Os principais tipos de reatores são o de contracorrente, no qual ambas as correntes (gasosa e líquida) fluem verticalmente, a gasosa no modo ascendente e a líquida no modo descendente; e o horizontal ou de fluxo cruzado, no qual a corrente líquida flui verticalmente, enquanto a gasosa atravessa o meio suporte horizontalmente.
- A operação é mais viável economicamente para níveis de gás purificado com cerca de 50 ppm. Esta tecnologia requer um elaborado controle do processo e conhecimento dos operadores em lidar com os

agentes químicos utilizados, devendo ser considerada em casos em que a concentração de sulfeto de hidrogênio é alta e/ou flutuante.

f. Adsorção

Segundo Chernicharo (2010) apud Valente (2015), a dessulfurização por meio da adsorção é um processo em que as moléculas de compostos orgânicos voláteis entram em contato com a superfície de um adsorvente sólido e se ligam via forças moleculares fracas. A superfície de um adsorvente inclui todas as áreas acessíveis e pode, portanto, ser extensiva a sólidos que incorporam uma rede interna de poros, incluindo aqueles com diâmetros de dimensões moleculares.

Um tratamento típico por adsorção consiste em uma coluna vertical, empacotada com meios suportes estáticos de material granular. Esta técnica de dessulfurização é extremamente eficiente, com concentrações finais inferiores a 1 ppm. Embora os custos de investimento sejam relativamente baixos, os custos globais específicos desta tecnologia são consideravelmente mais elevados que as demais (VALENTE, 2015).

3.3.4 Remoção de Siloxanos

Os siloxanos são compostos orgânicos de silício normalmente sintetizados e não encontrados na natureza. Estes são utilizados, entre outros, em cosméticos, desodorantes, sabões e detergentes. Por isso, é possível encontrá-los no biogás oriundo de esgotos domésticos (VALENTE, 2015).

Na combustão do biogás, os siloxanos se transformam em sílica (SiO_2), o qual leva ao desgaste por abrasão das peças móveis como válvulas, cilindros e pistões em motores e turbinas, e, também, atua como um isolante térmico e elétrico. Como resultado, o desempenho desses equipamentos de combustão pode ser significativamente reduzido e os catalisadores de pós-combustão podem tornar-se menos eficazes (NARROS *et al.*, 2009 apud VALENTE, 2015).

Segundo Valente (2015), os principais métodos para remoção dos siloxanos são: resfriamento ao ponto de orvalho, congelamento (método criogênico), carvão ativado e lavagem.

A adsorção por carvão ativado é o método mais utilizado. Neste tipo de filtro um reservatório é preenchido com carvão ativado e este se liga aos siloxanos. Conforme a vazão de biogás a ser tratada e as respectivas frações de siloxanos no gás, é possível dimensionar e confeccionar os filtros com intervalos de manutenção definidos. A saturação do filtro de carvão ativado leva à perda da eficácia e a proteção contra esta situação pode ser melhorada pelo uso de um sistema de tratamento com dois filtros de carvão ativado consecutivos. De qualquer forma, um intervalo de manutenção de no mínimo seis meses é recomendado e, assim, é possível substituir o carvão ativado na manutenção anual do equipamento de gás (PROBIOGÁS, 2015).

3.4 EQUIPAMENTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A geração de energia elétrica a partir do biogás produzido nas estações de tratamento de esgoto pode ser realizada por meio de duas tecnologias principais: motores de combustão interna e microturbinas, discutidas nos subitens a seguir.

As turbinas a gás, apesar de poderem ser aplicadas em teoria, esbarram na necessidade de pressões muito grandes de gás na entrada, o que resultaria na utilização de compressores de alta capacidade e alto custo, não encontrando viabilidade técnica e econômica nos projetos de geração de energia elétrica associados a estações de tratamento de esgoto.

3.4.1 Motores de Combustão Interna

Esses equipamentos são divididos em motores de ignição por centelha ou Otto e de ignição por compressão ou Diesel, podendo ser de dois ou quatro tempos. A diferença principal entre os dois tipos de motores está na forma em que ocorre a combustão. Nos motores de ignição por centelha, a mistura ar/combustível é admitida na câmara de combustão e inflamada por meio de uma vela de ignição. Já nos motores de ignição por compressão, o ar é admitido na câmara de combustão e comprimido até uma pressão suficiente para que ocorra a combustão espontânea quando o combustível for injetado (PECORA, 2006).

Motores a gás de ciclo Otto são utilizados em pequenas, médias e grandes plantas. Os motores aspirados são alimentados com uma mistura de biogás e ar, por

meio da linha do controle e regulação de gás, sendo que, em motores com turbocompressor, essa mistura é comprimida antes da entrada no cilindro. A admissão de uma maior quantidade de combustível no cilindro resulta no aumento do desempenho do motor. Os motores ciclo Diesel realizam a ignição da mistura de ar e biogás por meio de uma pequena quantidade de óleo diesel, chamado de óleo de ignição. A quantidade de óleo de ignição consumida corresponde a, aproximadamente, 2 a 10% daquela necessária em motores a diesel convencionais, tendo eficiência mecânica superior à dos motores a gás de ciclo Otto. Na falta de biogás, o motor pode ser comutado para operar unicamente com diesel (PROBIOGÁS, 2015).

Os motores a gás ciclo Otto têm sido preferidos, principalmente, pela maior vida útil, manutenção menos frequente, menor emissão de poluentes, e eficiência total maior (considerando cogeração), quando comparados aos motores ciclo Diesel. Todavia, devido à escala de produção reduzida, possuem custos mais elevados.

Os motores ciclo Otto podem ser construídos especificamente para queima de biogás, enquanto os motores ciclo Diesel utilizam motores comuns, de baixo custo, adaptados para a queima de biogás, e possuem aplicação comercial somente em faixa de potência mais restrita.

Apesar de o mercado de biogás ainda estar em processo de germinação, observa-se que já há uma boa quantidade de fabricantes nacionais de grupos geradores ciclo Diesel com soluções aptas para a queima de biogás. A incorporação de avanços eletrônicos, tais como controle eletrônico de ignição, sensor de detonação e controle de mistura ar/combustível, tornaram estes equipamentos suficientemente eficientes e robustos, principalmente, para aplicações de pequeno porte. Este desenvolvimento tem sido estimulado por iniciativas, principalmente, em propriedades rurais, onde a digestão anaeróbica tem se mostrado adequada para o tratamento dos resíduos orgânicos inerentes ao manejo intensivo de animais. As soluções nacionais têm sido preferidas nestas aplicações, sobretudo, devido ao menor custo de investimento e manutenção. Como não há a necessidade de remoção de siloxanos, alguns fabricantes/fornecedores vendem o filtro de dessulfurização e compressor auxiliar em conjunto com o grupo gerador, simplificando a implantação do sistema. Já para aplicações de maior demanda, há a prevalência dos equipamentos ciclo Otto importados.

Segundo Valente (2015), apesar de variarem conforme o fabricante, os requisitos para utilização de biogás como combustível em motores de combustão interna são essencialmente muito semelhantes: temperatura inferior a 40°C; concentração de metano entre 45% e 70%; umidade relativa inferior a 80%. Em relação à concentração de H₂S, os requisitos situam-se normalmente entre 300 e 500 ppmv (CHEN *et al.*, 2016 apud PIROLI, 2016).

As eficiências elétrica e total (elétrica e aquecimento) situam-se próximas a 40% e 70%, respectivamente, em boa parte dos fornecedores. Uma boa característica dos motores de combustão interna é manter a eficiência em situações de carga parcial próxima aos valores alcançados em carga total.

Para contextualização em relação a um mercado maduro, segundo EPA (2015a), considerando dados de 2015, havia nos Estados Unidos uma potência instalada de aproximada 2,3 GW em aplicações cogeração acionadas por motores de combustão interna, e em 84% dos casos eram utilizados motores ciclo Otto acionados por gás natural, biogás ou gás de aterro.

Segundo EPA (2015a), os custos de implantação inicial dos conjuntos geradores a motor de combustão interna são inferiores aos conjuntos geradores acionados por turbina a gás para aplicações inferiores a 20 MW. Já os custos de manutenção dos motores de combustão interna costumam ser superiores aos das turbinas a gás de mesma capacidade, entretanto, os serviços de manutenção normalmente podem ser executados por mão de obra própria ou por meio de prestadores de serviço locais.

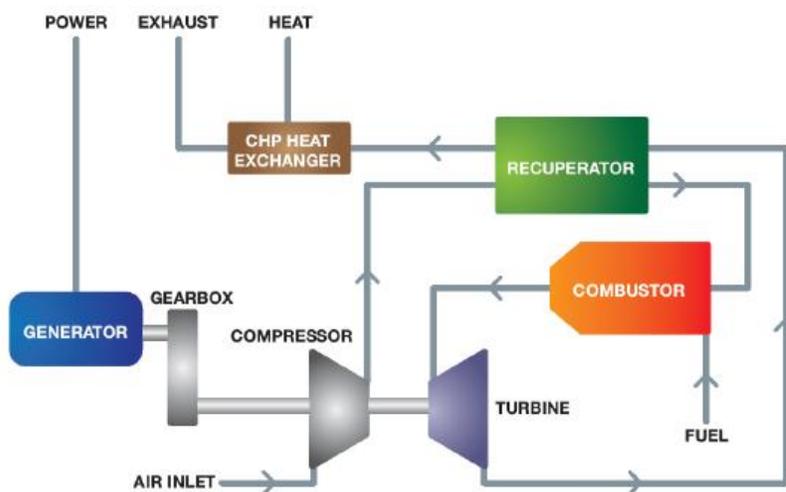
Por fim, observa-se que os motores de combustão interna possuem eficiência elétrica superior às microturbinas de mesma potência, o que normalmente resultará em custos de operação inferiores.

3.4.2 Microturbinas

As microturbinas operam a partir do mesmo ciclo termodinâmico das turbinas maiores (ciclo Brayton) e compartilham com estas muitos dos seus componentes básicos. Neste ciclo, o ar atmosférico é comprimido, aquecido pela queima de um combustível, e os gases da combustão acionam uma turbina de expansão, que por sua vez, pelo mesmo eixo, aciona o compressor na entrada de ar e provê potência

mecânica. As principais diferenças em relação as turbinas de maior porte estão nas taxas de compressão e temperaturas de combustão menores, e no uso de compressor com somente um estágio. A Figura 26 apresenta um desenho esquemático de uma microturbina em uma aplicação de cogeração (CHP).

Figura 26 – Desenho esquemático de uma microturbina com cogeração



Fonte: EPA (2015b)

Como a velocidade no eixo pode chegar a 60.000 rpm, há duas principais alternativas adotadas pelos principais fabricantes para conversão da energia mecânica disponível no eixo em energia elétrica. A primeira faz uso de um gerador assíncrono de alta rotação, acoplado diretamente ao eixo da turbina. A partir de eletrônica de potência, a tensão gerada é convertida para o padrão da rede. A segunda alternativa utiliza uma caixa de engrenagens para reduzir a rotação no eixo e acionar um gerador síncrono convencional de 3600 rpm.

Assim como os motores a combustão interna, as microturbinas podem operar em paralelo ou independentemente da rede elétrica, com os equipamentos necessários para proteção e controle incorporados ao fornecimento.

Em termos de potência elétrica, estão disponíveis no mercado conjuntos turbo geradores que variam de 30 kW a 1 MW, que podem ser arranjados em paralelo para fornecimento de potências maiores.

Para referência, na Tabela 22 são apresentados os custos dos equipamentos e o custo total instalado em US\$/kW para mercado americano, para diversos valores de potência elétrica. Esta estimativa de custos considera em todos os cenários

cogeração para aproveitamento dos gases de combustão para geração de água quente. Para o mercado brasileiro, como os equipamentos seriam importados, os custos seriam significativamente superiores aos apresentados.

Tabela 22 – Custo de equipamentos e custo instalado para mercado americano.

Potência elétrica	30 kW	65 kW	200 kW	250 kW	333 kW	1000 kW
Custo equipamentos (US\$/kW)	2.690	2.120	2.120	1.840	1.770	1.710
Custo total instalado (US\$/kW)	4.300	3.220	3.150	2.720	2.580	2.500

Fonte: Adaptado de EPA (2015b)

As microturbinas possuem como principais vantagens menores emissões de NO_x, possibilidade de operar com menores concentrações de metano, tolerar altas concentrações de H₂S e, dependendo do fornecedor, também de siloxanos, reduzindo a necessidade de tratamento preliminar destes componentes, todavia, requerem sistemas de redução de umidade mais apurados.

As eficiências elétricas variam tipicamente de 26% (30 kW_e) a 33% (1 MW_e). A eficiência total (elétrica e aquecimento) pode chegar a 90% para todas as faixas de potência.

3.4.3 Conclusões

Em aplicações de baixa potência somente para geração de energia elétrica (sem cogeração) é provável que a opção mais viável seja a aplicação de motores de combustão interna ciclo Diesel nacionais, adaptados para queima de biogás. A boa eficiência na geração de energia elétrica, menor custo de investimento e a facilidade de manutenção por mão de obra própria ou de assistência técnica local são as principais vantagens. Porém, há custos de operação importantes que não podem ser negligenciados, como custo do diesel necessário ao funcionamento do equipamento, bem como a logística para disponibilização e armazenamento deste no local de aplicação. Outro fator desfavorável é a menor durabilidade que, dependendo do regime de funcionamento e tempo de vida projeto, pode gerar custos adicionais importantes devido a necessidade de eventual substituição ou reforma geral.

Para aplicações de maior potência, com cogeração para secagem de lodo ou para aquecimento de digestores anaeróbicos, os estudos de viabilidade devem considerar, além dos motores ciclo Diesel nacionais, a aplicação dos motores ciclo Otto e microturbinas importados. Os motores ciclo Otto, construídos especificamente para combustão de biogás, podem trazer ganhos em eficiência, confiabilidade e durabilidade, que podem justificar os maiores custos de investimento e operação/manutenção. As microturbinas a gás, por sua vez, apesar da menor eficiência elétrica, podem ter boa aplicabilidade nos casos de maior demanda térmica, seja para aquecimento de digestores ou para secagem de lodo.

Outro ponto importante a se considerar é o estudo minucioso dos tratamentos preliminares do biogás requeridos para cada equipamento, pois, é possível que os custos dos tratamentos levem a escolha de uma solução mais tolerante a contaminantes, como por exemplo as microturbinas.

Por fim, há de destacar que estudos de viabilidade devem sempre contemplar alternativas para aproveitamento da energia térmica dos gases de combustão, pois, conforme visto na subseção 3.2, a cogeração tem grande potencial para melhorar o retorno dos investimentos.

3.5 PLANTAS EM OPERAÇÃO

A seguir são apresentados alguns empreendimentos nacionais relevantes que fazem uso do biogás produzido em ETEs para geração de energia elétrica.

a. ETE Arrudas (Belo Horizonte)

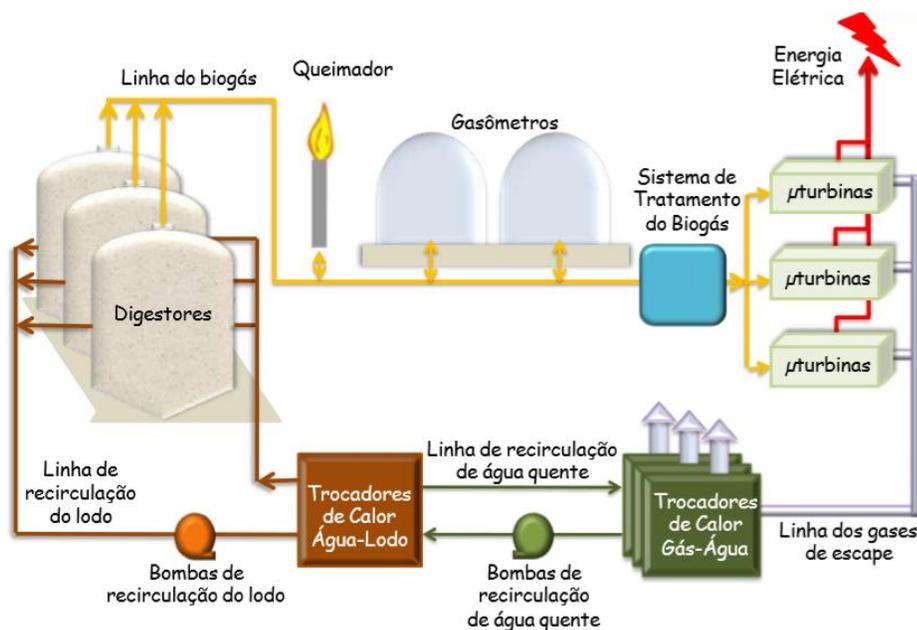
A ETE Arrudas, cujo desenho esquemático é apresentado na Figura 27, tem como processo de tratamento lodos ativados convencional, com digestão anaeróbia do lodo e aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica por meio de um arranjo com três conjuntos de quatro microturbinas de 200 kW, resultando em um total de 2,4 MW de potência instalada.

Principais dados (MONACHESI, 2019):

- Vazão média de operação (2012): 2,45 m³/s
- Produção média de biogás (2012): 12.430 Nm³/dia
- Consumo de energia elétrica (2012): 13,0 GWh/ano

- Concentração de metano no biogás: 68%
- Poder calorífico do biogás: 24.798 kJ/Nm³
- Energia gerada com biogás: 19,9 MWh/mês (Jan/2013)
- Energia consumida na planta: 37,4 MWh/mês (Jan/2013)

Figura 27 – Desenho esquemático do arranjo da ETE Arrudas.



Fonte: Monachesi (2019).

b. ETE Ribeirão Preto

A ETE Ribeirão Preto tem como processo de tratamento lodos ativados convencional, com digestão anaeróbia do lodo e aproveitamento energético biogás para geração de energia elétrica por meio de dois grupos geradores de combustão interna Ciclo Otto de 752 kW cada, um dos quais mostrado na Figura 28.

Principais dados (AMBIENT, 2019):

- Volume produzido de biogás: 7.000 Nm³/dia
- Cogeração para aquecimento do lodo do digestor
- Teor de metano no biogás: > 60%
- Operação em paralelo com a rede elétrica da concessionária
- Fabricante dos grupos geradores: Guascor (importados)
- Total do investimento: Aprox. US\$ 1,8 milhões / MW instalado (2012)
- Consumo energia total ano 2014: 10.409.364 kWh

- Energia produzida pelo biogás ano 2014: 5.275.085 kWh (51% do total)

Figura 28 – Grupo gerador ciclo Otto ETE Ribeirão Preto.



Fonte: Ambient (2019).

c. ETE Jacuípe II (Feira de Santana)

O aproveitamento do biogás foi implementado por meio de um projeto de P&D da ANEEL. O esquema de tratamento é por meio de reator UASB e o aproveitamento do biogás é realizado por motogerador de combustão interna de 200 kW. Para tratamento do biogás é utilizado gasômetro com biodessulfurização, refrigerador de biogás e filtro de carvão ativado. A Figura 29 mostra a ETE Jacuípe II.

Principais dados (PLATZER, 2019):

- População contribuinte: 97.200
- Eficiência remoção DQO: 65%
- Concentração de metano: 65%
- Perda de biogás: 25%
- Eficiência elétrica motogerador: 38%
- Disponibilidade técnica: 8.000 h/a (funcionamento contínuo)
- Estudo de viabilidade econômica indicou TIR de 13,2%

Figura 29 – ETE Jacuípe II



Fonte: Platzer (2019).

d. ETE Ouro Verde (Foz do Iguaçu)

A ETE Ouro Verde, mostrada na Figura 30, é uma unidade piloto de energia renovável da SANEPAR. Foi a primeira planta de biogás produzido a partir de esgoto sanitário a gerar energia elétrica e a fornecê-la para a rede de distribuição da concessionária local.

Principais dados (POSSETTI *et. al.*, 2019):

- Capacidade: 75 L/s de esgoto (35.000 habitantes)
- DQO esgoto bruto: ~180 mg/L
- Vazão de entrada: ~40 L/s
- Volume do reator: 2.000 m³
- Vazão biogás: ~ 50 m³/dia
- Potência compressor: 0,5 cv
- Potência gerador: 25 kVA (acionamento p/ motor de comb. interna)
- Capacidade de geração: 1.350 kWh/mês
- Energia gerada: 200 – 250 kWh/mês

Figura 30 – ETE Ouro Verde.



Fonte: Probiogás (2015).

e. CS Bioenergia (Curitiba)

Este projeto de codigestão foi implantado junto a área da ETE Belém (SANEPAR) e tem como substratos 30 a 40% de lodo da ETE e o restante suprido por grandes geradores de sobras alimentares, como por exemplo sacolões, shopping centers e CEASA. Possui dois motogeradores ciclo Otto de 1,4 MW cada. A planta, mostrada na Figura 31, consome 0,6 MW e o restante é vendido conforme resolução 506/2012 da ANEEL (SANEPAR, 2019).

Principais dados (FACHVERBAND BIOGAS E.V., 2019):

- Capacidade de produção de gás: até 26.400 m³/dia
- Potência instalada: 2,8 MW_e
- Volume dos digestores: 2 x 10.000 m³
- Tipo de digestão: Mesofílica, molhada, hidrólise separada
- Investimento total: € 20 milhões (2017)

Figura 31 – Planta de codigestão da CS Bioenergia



Fonte: Fachverband Biogas E.V. (2019).

A seguir é executada análise acerca da importância destes projetos para desenvolvimentos futuros:

- A ETE Arrudas é a maior estação de tratamento de esgoto de Minas Gerais e, por meio do aproveitamento do biogás, consegue produzir mais da metade da energia elétrica que consome. A adoção de microturbinas torna o projeto especialmente interessante, podendo ser importante fonte de informações a respeito dos custos de implantação e operação/manutenção desta tecnologia para futuros projetos.
- A ETE Ribeirão Preto, assim como a ETE Arrudas, produz biogás a partir digestão anaeróbica do lodo gerado no processo de lodos ativados, todavia, emprega grupos geradores de combustão interna ciclo Otto. Observa-se que, de modo análogo ao que ocorre na ETE Arrudas, aproximadamente metade da energia elétrica consumida é suprida por meio do biogás.
- Por se tratar de estações de tratamento de grande porte e com características semelhantes, a análise comparativa dos custos de OPEX e CAPEX relacionados aos sistemas de tratamento e aproveitamento do biogás nas ETEs Arrudas e Ribeirão Preto pode resultar em indicadores mais assertivos em relação às vantagens e

desvantagens das tecnologias utilizadas na geração de energia elétrica.

- Apesar de o setor de saneamento básico ser dominado por empresas estatais estaduais, que possuem políticas de investimentos fortemente atreladas a fatores políticos e sociais, o investimento realizado na ETE Ribeirão Preto foi executado por uma empresa privada, com objetivo principal de redução de custos operacionais. Há de se destacar que o projeto foi assinalado viável considerando o prazo de 13 anos para o término do contrato de concessão.
- Segundo AMBIENT (2019), o aproveitamento do biogás na ETE Ribeirão Preto, juntamente com o reenquadramento tarifário junto à concessionária local, permitiu reduzir a contribuição da energia elétrica nos custos operacionais de 40% para 16%.
- A análise da ETE Jacuípe II pode trazer resultados práticos para confirmar o limiar da viabilidade econômica do aproveitamento do biogás produzido em reatores UASB para geração de energia elétrica, visto que atende a uma população de aproximadamente 100.000 habitantes.
- Na ETE Jacuípe II empregou-se tratamentos preliminares de custo elevado. Há grande interesse em se verificar se o maior investimento resultou em menores custos operacionais e maior durabilidade para o conjunto motogerador.
- A análise da ETE Ouro Verde pode trazer informações acerca da implantação de sistemas de pequeno porte conectados à rede da concessionária local, em esquema de compensação. Todavia, por ser uma unidade piloto, a análise de custos e desempenho da ETE Ouro Verde deve considerar as ponderações necessárias devido a eventual utilização de equipamentos não comerciais e/ou adaptados para tratamento e aproveitamento do biogás.
- A análise do projeto da CS Bioenergia merece especial atenção por se tratar do primeiro projeto de codigestão de lodo de ETE e resíduos orgânicos urbanos implantado no Brasil. Porém, observa-se que o custo total do projeto superou € 7,1 milhões / MW_e instalado (2017),

muito superior ao custo informado para o projeto da ETE Ribeirão Preto, que foi de US\$ 1,8 milhões / MW_e (2012). A origem de custos tão elevados talvez resida na maior complexidade do processo e grande necessidade de equipamentos importados, fatores críticos para eventuais desenvolvimentos futuros.

4 CONCLUSÃO

A seguir são apresentadas as conclusões em relação aos objetivos específicos e demais problemas e premissas elencados no capítulo 1.

Em relação ao aproveitamento do biogás em ETEs existentes, há amplo espaço para avaliação de investimentos, visto a grande quantidade de reatores UASB atualmente em operação no Brasil e a grande quantidade de lodo gerado nos arranjos aeróbios.

O estado do Paraná, particularmente, por meio da implantação maciça dos reatores RALF a partir da década de 80, possui um potencial expressivo a ser explorado. Todavia, este tipo de reator parece ser especialmente afetado pela saída do biogás juntamente com o efluente tratado, resultando em produção efetiva de biogás muito inferior a estimada teoricamente.

Para uma melhor avaliação do potencial energético efetivamente disponível em reatores UASB existentes e em suas variantes, tal como o RALF, é altamente indicada a instalação de um medidor de vazão de biogás na saída do reator e a aquisição das medições de modo contínuo por período mínimo de um ano. Os valores de vazão medidos, juntamente com valores de teor de metano e contaminantes, obtidos em análises químicas frequentes, devem compor a base de dados utilizada nos estudos de viabilidade, permitindo, além da estimativa mais assertiva do potencial energético, considerar nos cenários de viabilidade equipamentos de pré-tratamento e conversão de energia mais adequados às condições operacionais.

Para avaliação do potencial energético resultante da digestão anaeróbica do lodo em plantas existentes, o principal fator de atenção é o alto custo do reator e equipamentos eletromecânicos associados, majoritariamente importados para plantas de maior porte. Iniciativas como a da empresa CS Bionergia, apresentada na subseção 3.5, em que se associou o lodo de ETE a resíduos orgânicos urbanos para compor a carga dos reatores em um esquema de codigestão, podem elevar significativamente os volumes produzidos de biogás, porém, requerem sistemas complexos e dispendiosos para pré-tratamento dos resíduos, em maioria importados. A codigestão também aumenta a complexidade das reações químicas e requer controle operacional e sistemas de instrumentação e automação mais sofisticados, impactando significativamente nos custos de investimento e operação/manutenção.

Para estações de tratamento de esgoto novas, observou-se que o arranjo com reator UASB seguido de lodos ativados convencionais é o que possui melhor viabilidade técnica/econômica quando considerado o ciclo de vida total do projeto. Apesar do maior investimento inicial em relação a opções que não geram ou não aproveitam o biogás, o aproveitamento energético deste para geração de energia elétrica e secagem de lodo em esquema de cogeração se traduz em custos operacionais evitados significativos. Nos estudos analisados, a viabilidade econômica é alcançada para ETEs que atendem a uma população de aproximadamente 100.000 habitantes. Todavia, caso a multiplicação de projetos para o aproveitamento do biogás leve a ampliação da cadeia nacional de fornecedores, reduzindo os custos de OPEX e CAPEX, é provável que se alcance a viabilidade em empreendimentos consideravelmente menores.

Outro aspecto importante a se tratar em empreendimentos novos é que deve haver um grande esforço no projeto de engenharia para que os reatores UASB e assemelhados passem a adotar técnicas para maximizar a recuperação do biogás. Melhores vedações, retirada de espuma e técnicas para recuperação do gás dissolvido no efluente devem ser consideradas. A pouca preocupação com questões ambientais e a crença na inviabilidade do aproveitamento do biogás até o momento levou a construção de reatores deficientes.

Quanto aos tratamentos preliminares necessários para aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica ou cogeração, observou-se para plantas de maior porte, que também há uma grande dependência de equipamentos importados, sobretudo, para remoção de H₂S e siloxanos. Estes equipamentos possuem custos elevados e contribuem significativamente para piora da viabilidade econômica dos investimentos.

Sobre os equipamentos para conversão de energia, verificou-se uma tendência na utilização de motores de combustão interna devido, principalmente, a maior eficiência elétrica e simplicidade construtiva. Para plantas de pequeno porte a viabilidade pode ser mais facilmente alcançada por meio de fabricantes nacionais, que desenvolveram suas soluções sobre motores ciclo Diesel adaptados para queima de biogás. Para os empreendimentos de maior densidade de energia, há a prevalência dos motores ciclo Otto importados, com construção específica para combustão de biogás. Contudo, para as aplicações maiores deve-se avaliar, também, cenários com a aplicação de microturbinas, visto que estas, apesar do maior investimento inicial,

podem resultar em menores custos de manutenção, bem como menores investimentos no pré-tratamento do gás. Aplicações de cogeração com uso mais intensivo do calor podem ser especialmente favoráveis para microturbinas, dado sua maior eficiência térmica.

No que diz respeito à questão ambiental, o aproveitamento do biogás sempre será vantajoso. A concepção de reatores com a finalidade de uso do biogás levará a menores emissões diretas de metano e maiores eficiências na remoção de carga orgânica, com descarte de efluente com menor capacidade poluidora nos corpos hídricos. A cogeração para secagem de lodo, além de ganhos financeiros expressivos na etapa de transporte, permite um melhor manejo deste que é o principal resíduo gerado nas estações de tratamento de esgoto, seja reduzindo significativamente os volumes a serem descartados ou preparando lodo para eventual aproveitamento energético por meio de queima. Com a Lei nº 12.305/10 (PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos) será crescente as restrições ao descarte de resíduos sólidos que possam ter aproveitamento energético.

Relativamente ao aproveitamento de lodo como biofertilizante, observou-se que este é um mercado com poucas perspectivas de desenvolvimento num futuro próximo, principalmente, devido à necessidade de remoção de conteúdo patogênico para aproveitamento na agricultura. A sanitização pode ser mais facilmente alcançada em digestores operando em meio termofílico, porém, este é um mercado ainda a se desenvolver.

Para plantas com eventual excedente de geração de energia elétrica há de destacar possíveis ganhos com a adesão ao sistema de microgeração distribuída (Resolução Normativa ANEEL N° 482/2012, atualizada pela Resolução Normativa ANEEL N° 687/2015). Este cenário pode ser promissor, principalmente, nos casos de plantas de pequeno porte dotadas de reatores UASB sem etapa adicional de tratamento ou com tratamento completar de baixo consumo de energia. Como os reatores UASB praticamente não consomem energia elétrica, a energia gerada poderia ser injetada na rede da concessionária para compensação da energia consumida em outra ETE.

Em relação às plantas em operação analisadas, observa-se que já há desenvolvimentos comercialmente importantes para aproveitamento do biogás gerado na digestão de lodos, como visto nas ETEs Arrudas e Ribeirão Preto. A iniciativa de aproveitamento do biogás na ETE Jacuípe II pode trazer informações

relevantes sobre a viabilidade do aproveitamento do biogás gerado em reatores UASB para atendimento a populações a partir de 100.000 habitantes, contribuindo para disseminação desta alternativa tecnológica nos desenvolvimentos futuros. A implantação do projeto da CS Bioenergia, além da temática do biogás, mostra-se como uma alternativa sustentável para disposição final dos resíduos orgânicos urbanos, todavia, neste momento, com custo bastante elevado.

Em função das amplas possibilidades de aplicação do biogás, conforme previamente discutidas, é importante destacar que o desenvolvimento do biogás como fonte renovável de energia elétrica, além de outras modalidades de energia, interessa particularmente ao desenvolvimento do Paraná. O governo do estado elaborou a Lei Estadual Paraná Nº 19.500, de 21.5.2018, instituindo a Política Estadual do Biogás, do Biometano e demais produtos derivados da decomposição anaeróbica de matéria orgânica de diversas origens. Estabelece princípios, regras, obrigações e instrumentos de organização, incentivos, fiscalização e apoio às cadeias produtivas, integradas ou não, visando o enfrentamento das mudanças climáticas e a promoção do desenvolvimento regional com sustentabilidade ambiental, econômica e social.

Por fim, assim como VALENTE (2015), a conclusão final deste estudo é que a estratégia de aproveitamento energético do biogás especificamente em estações de tratamento de esgoto transcende a questão energética e se insere num âmbito maior de aprimoramento e ampliação do serviço de saneamento.

4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir propostas para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de metodologia para estimar vazão de biogás em reatores RALF, considerando as diferenças destes em relação aos reatores UASB convencionais.
- Estudo da viabilidade do uso de reatores UASB sem tratamento complementar em aplicações de geração distribuída, visando sua utilização em localidades não atendidas por tratamento de esgoto. Avaliar melhor enquadramento tarifário e modo operacional (ponta, fora da ponta, contínuo).

- Análise comparativa dos custos de OPEX e CAPEX relacionados aos sistemas de tratamento e aproveitamento do biogás das ETEs Arrudas e Ribeirão Preto, visando confrontar os sistemas de geração por meio de microturbinas e motores de combustão interna ciclo Otto.
- Realizar estudo de caso sobre a ETE Jacuípe II, de modo a confirmar a viabilidade econômica verificada nos estudos preliminares e o desempenho dos tratamentos preliminares adotados.
- Realizar estudo de caso sobre a planta da CS Bioenergia, com foco na análise da cadeia logística para disponibilização dos resíduos orgânicos urbanos, bem como ganhos ambientais resultantes.

REFERÊNCIAS

AESBE. **Sanepar apresenta ETEs sustentáveis em evento sobre Biogás em Foz do Iguaçu (PR)**. Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento. Disponível em: <<http://www.aesbe.org.br/sanepar-apresenta-etes-sustentaveis-em-evento-sobre-biogas-em-foz-do-iguacu-pr/>>. Acesso em 08 ago. 2019.

ALVES, I. R. F. S. **Avaliação da codigestão na produção de biogás**. 153 f. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016.

AMARAL, F. L. M. **Biodigestão anaeróbica dos resíduos sólidos urbanos: um panorama tecnológico atual**. 107 f. Dissertação (mestrado). Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. 2004.

AMBIENT. **Biogás de ETE para geração de energia elétrica. Case da ETE – Ribeirão Preto**. Disponível em: <<http://abconsindcon.com.br/wp-content/uploads/2018/06/6º-ENA-Biogás-de-ETE-para-geração-de-energia-elétrica-Case-da-ETE-Ribeirão-Preto.pdf>>. Acesso em 10 ago. 2019.

ANA. **Atlas Esgotos**. Disponível em: <<http://atlasesgotos.ana.gov.br/>>. Acesso em 08 abr. 2019.

ANDREOLI, C. V. & CARNEIRO, C. **Tecnologias potenciais para saneamento: produto da integração universidade – empresa**. 2. Ed. SANEPAR, 2015.

BARÉA, L. C. **RALF, Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente reduzindo custos e economizando energia no tratamento de esgotos**. SANEPAR. Mar. 2006.

BLEY JR, C. **Biogás: a energia invisível**. 2ª ed. rev. e ampl. CIBiogás; ITAIPU Binacional, 2015.

CABRAL, C. B. G. **Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário**. 139 f. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. 2016.

CANCELLI, T. **Geração de energia a partir do biogás de estações de tratamento de esgoto doméstico**. 22 f. Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Mudanças Climáticas, Projetos Sustentáveis e Mercado de Carbono da Universidade Federal do Paraná. 2013.

CAPSTONE. **Capstone products**. Disponível em: <<https://www.capstoneturbine.com/products/>>. Acesso em 20 Ago. 2019.

CASAN. **ETE - Estação de tratamento de esgotos sanitários**. Disponível em: <<https://www.casan.com.br/menu-conteudo/index/url/ete-estacao-de-tratamento-de-esgotos-sanitarios#0>>. Acesso em 17 ago. 2019.

CURITIBA. **Plano municipal de saneamento básico**. Prefeitura Municipal de Curitiba. Nov. 2017.

CENTRO EXPERIMENTAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Digestor Anaeróbio**. Disponível em:
<<http://www.saneamento.poli.ufrj.br/index.php/br/infraestrutura/digestor-anaerobio>>. Acesso em 14 ago. 2019

DUTRA, G. H. L. **Avaliação técnico-econômica de alternativas de lodos ativados no tratamento de esgotos domésticos**. 95 f. Trabalho de conclusão de curso de graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. 2014.

EPA. **Catalog of CHP technologies. Section 2. Technology Characterization – Reciprocating Internal Combustion Engines**. U.S. Environmental Protection Agency. Combined Heat and Power Partnership. March 2015a.

EPA. **Catalog of CHP technologies. Section 5. Technology Characterization – Microturbines**. U.S. Environmental Protection Agency. Combined Heat and Power Partnership. March 2015b.

FACHVERBAND BIOGAS E.V. **Biowaste do biogas**. July 2019. Disponível em:
<<https://biowaste-to-biogas.com/>> Acesso em 23 ago. 2019.

FIEP. **Oportunidades da cadeia produtiva de biogás para o estado do Paraná**. Observatórios Sistema Fiep. 2016.

KOGA, P. **Geração de energia renovável a partir dos subprodutos de uma estação de tratamento anaeróbia de esgotos**. 134 f. Dissertação (mestrado). Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial. Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI e a Universidade de Stuttgart. Curitiba, 2016.

KRACIK, M. E. S. **Caracterização do esgoto bruto de 5 localidades da grande Florianópolis e sistema de tratamento de esgotos do Continente: Uma contribuição para a melhoria do desempenho do complexo de lagoas de estabilização de Potecas**. 130 f. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.

LEITE, W. R M. **Digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto**. 142 f. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

MAY, A. **O esgotamento sanitário e os planos de segurança da água**. 119 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. 2014.

MENDONÇA, L. C. **Microbiologia e cinética de sistema de lodos ativados como pós tratamento de efluente de reator anaeróbio de leito expandido**. 219 f. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2002.

MONACHESI, M. **A Experiência da COPASA MG no aproveitamento energético do biogás na ETE Arruda**. IV Seminário Internacional de Engenharia de Saúde Pública. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/uploads/2013/05/Marcelo_Monachesi.pdf>. Acesso em 03 ago. 2019.

NAÇÕES UNIDAS. **Objetivo 6. Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/ods6/>>. Acesso em 08 abr. 2019.

NEITZEL, J. **Potencial de produção de biogás da codigestão anaeróbia de resíduos de frutas e verduras e lodo de esgoto primário**. 87 f. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina. 2015.

PIROLLI, M. **Avaliação da remoção de sulfeto de hidrogênio de biogás provindo da digestão de efluentes suínicos utilizando biofiltro em escala piloto**. 83 f. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2015.

POSSETTI, G. R. C. et al. **Experiências da Sanepar em bioenergia e eficiência energética**. IV Seminário Internacional de Engenharia de Saúde Pública. Disponível em: <<http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/uploads/2013/05/Gustavo-R.C.-Possetti-.01.pdf>>. Acesso em 02 ago. 2019.

PLANSAB. **Plano Nacional de Saneamento Básico**. 2013. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/processos/AECBF8E2/Plansab_Versao_Conselhos_Nacionais_020520131.pdf>. Acesso em 08 abr. 2019.

PLATZER, C. **A utilização de biogás em ETE no Brasil é viável? O potencial de aproveitamento na realidade brasileira**. Disponível em: <https://www.casan.com.br/ckfinder/userfiles/files/palestras_7_encontro_tecnico/Christopher.pdf>. Acesso em 05 ago. 2019.

RAIMUNDO, D. R. et al. **Estudo das emissões evitadas de GEE e da viabilidade econômica da produção energética do biogás gerado no tratamento de efluentes, aplicados à cidade de pouso alegre – MG**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v.6, n.5, p. 995-1016, 2017.

ROTÁRIA DO BRASIL. **Biogás: Saneamento focado em recursos**. Disponível em <<http://brasil.rotaria.net/biogas/>>. Acesso em 09 ago, 2019.

SANEPAR. **4º Workshop Internacional – Aproveitamento Energético de Biogás de ETEs – Resumo Técnico**. Curitiba, 2016. Disponível em: <http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/publicacoes/GIZ_ResumoTecnico-4WorkshopInternacional.pdf>. Acesso em 09 ago. 2019.

SNIS. **Diagnóstico dos serviços de água e esgoto - 2017**. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretária Nacional de Saneamento. Fev. 2019.

TERA AMBIENTAL. **Como destinar corretamente o lodo biológico da estação de tratamento de esgoto**. 2018. Disponível em: <<https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/como-destinar-corretamente-o-lodo-biologico>>. Acesso em 08 abr. 2019.

VARGAS, G. D. L. P. **Tratamento terciário de esgoto sanitário através de processos oxidativos avançados para a obtenção de águas de reuso**. 2008. 264 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina. 2008.