

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

EDSON AMÉRICO DA SILVA



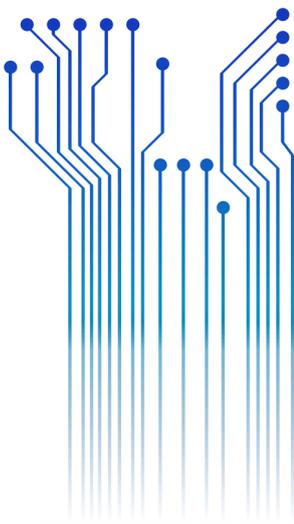
Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



Departamento de
Engenharia Elétrica

ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A
PARTIR DO BIOGÁS ORIUNDO DAS ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO



Campina Grande, Paraíba.
Setembro de 2017

EDSON AMÉRICO DA SILVA

ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A
PARTIR DO BIOGÁS ORIUNDO DAS ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Ubirajara Rocha Meira, M. Sc.

Campina Grande, Paraíba.
Setembro de 2017

EDSON AMÉRICO DA SILVA

ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A
PARTIR DO BIOGÁS ORIUNDO DAS ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Leimar de Oliveira
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Ubirajara Rocha Meira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha mãe, meu pai, minha irmã e minha noiva, os quais sempre me apoiaram, incentivaram e torceram para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus que sempre me deu forças para enfrentar as adversidades da vida e a buscar os objetivos que sempre desejei.

Agradeço a minha mãe, Júlia, que sempre esteve do meu lado, torcendo, rezando e apoiando em tudo que eu precisasse. Ao meu pai, Cícero, que com seu exemplo de força e trabalho me ensinou como se portar como cidadão que hoje sou.

Agradeço à minha irmã, Edna, pelos incentivos incansáveis.

Agradeço à minha noiva, Débora, que sempre esteve ao meu lado compreendendo minhas ausências e torcendo pelos meus sonhos

Ao meu orientador, Ubirajara Rocha, pela acolhida e oportunidade de um novo aprendizado advindo da elaboração deste trabalho.

A todos, meu muito obrigado e que Deus nos proteja sempre mais.

RESUMO

A utilização do Biogás para geração de energia elétrica é um conceito de produção mais limpa com eficiência ambiental e energética, pois além de reduzir custos, contribui para a diversificação e descentralização das fontes de energia. Quando este Biogás provém de estações de tratamento de esgoto, implica dizer que haverá redução das emissões do gás metano e geração de uma forma de energia renovável, propiciando, assim, a criação de políticas que aproveitem o potencial energético do Biogás e seus eventuais benefícios econômicos, sociais e ambientais, contribuindo na melhoria do saneamento básico no Brasil. Nesta perspectiva, este trabalho pretende analisar o potencial energético do Biogás, os modelos de aproveitamento para a geração, as tecnologias de conversão, os aspectos gerais das estações de tratamento de esgoto, os desafios para sua implementação, alguns modelos adotados no Brasil e no exterior e os aspectos socioambientais.

Palavras-chave: Biogás, Estações de tratamento de esgoto, Geração de Energia Elétrica.

ABSTRACT

The use of Biogas for electricity generation is a cleaner production concept with environmental and energy efficiency, as well as reducing costs, it contributes to the diversification and decentralization of energy sources. When this biogas comes from sewage treatment plants, it means that there will be a reduction of methane gas emissions and the generation of a form of renewable energy, thus providing the creation of policies that take advantage of the biogas energy potential and its possible economic benefits , social and environmental, contributing to the improvement of basic sanitation in Brazil. In this perspective, this work intends to analyze the energy potential of Biogas, generation models, conversion technologies, general aspects of sewage treatment plants, the challenges for its implementation, some models adopted in Brazil and abroad and socio-environmental aspects.

Keywords: Biogas, sewage treatment plants, Electric Power Generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Perfil da matriz elétrica brasileira em 2016	15
Figura 2: Biodigestor.....	18
Figura 3: Turbina a Gás.....	21
Figura 4: Ciclo Brayton aberto e simples	22
Figura 5: Principais componentes de uma Microturbina	22
Figura 6: Esquema de funcionamento de um Motor Ciclo Otto	23
Figura 7: Modelo de gerador a biogás (SG-75B)	24
Figura 8: Fluxo de Funcionamento de ETE.....	27
Figura 9: Opções para o aproveitamento e/ou geração de energia a partir do lodo 25% TS e classe B.	28
Figura 10: Aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbia e para a geração de EE	28
Figura 11: Aproveitamento do biogás somente para a geração de energia elétrica	29
Figura 12: ETE Jacuípe II	30
Figura 13: Aproveitamento energético do biogás na ETE de Iraklio, Grécia.....	32
Figura 14: Fluxograma do sistema de cogeração da ETE Arrudas.....	33
Figura 15: Gasômetros para armazenamento de biogás	34
Figura 16: Sistema de purificação do biogás.....	34
Figura 17: ETE Arrudas, Unidade de Cogeração	34
Figura 18: Vista das unidades experimentais	35
Figura 19: Visão geral da planta da ETE de Arruda.....	35
Figura 20: EXTRABES	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Matriz Energética Brasileira de acordo com a fonte utilizada.....	19
Tabela 2: Comparação entre as tecnologias disponíveis de conversão.....	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional tal Expenditure
CH ₄	Gás Metano
CO ₂	Gás Carbônico
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DAFA	Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EE	Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GIZ	Agência de Cooperação Internacional da Alemanha
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-hora
kWh/m ³	Kilowatt-hora por metro cúbico
MW	Megawatt
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
REN	Resolução Normativa
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TIR	Taxa Interna de Retorno
VPL	Valor Presente Líquido
UASB	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos	13
1.3	Estrutura do Trabalho.....	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	O BIOGÁS: produção a partir de esgotos domésticos	16
2.2	BIODIGESTOR.....	17
2.3	Potencial de Geração do Biogás.....	18
2.4	PROBIOGÁS	20
3	TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO.....	21
3.1	Turbina a Gás	21
3.2	Microturbina a Gás.....	22
3.3	Motores a Combustão Interna	22
3.4	Comparação entre as tecnologias de conversão	23
3.5	Motores a Biogás	24
3.6	Subestações	25
4	ASPECTOS GERAIS DAS ETEs.....	26
4.1	Legislação Vigente (REN 687/15)	26
4.2	Geração de Energia Elétrica em Estação de Tratamento de Esgoto	26
4.2.1	Modalidades para o aproveitamento do Biogás	27
5	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM ETE - alguns caso	30
5.1	ETE de Jacuípe II (Bahia)	30
5.2	ETE de Iraklío (Grécia).....	31
5.3	ETE da COMPESA (Pernambuco)	32
5.4	ETE Arrudas (Minas Gerais)	33
5.5	EXTRABES/UEPB.....	36
6	METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	37
6.1	Fluxo de Caixa	37
6.2	Taxa Mínima de Atratividade (TMA).....	37
6.3	Valor Presente Líquido (VPL)	37
6.4	Taxa Interna de Retorno (TIR).....	38
6.5	Payback	38
7	DESAFIOS E PERSPECTIVAS SOBRE O USO DE BIOGÁS DE ETEs NO BRASIL	39
7.1	Viabilidade do uso de Biogás no Brasil	39
7.1.1	Fontes de Financiamento	39
7.2	Tarifa de Energia Elétrica	41
7.3	Incentivos e Políticas Públicas	42
7.4	Aspectos Socioambientais	43
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1. INTRODUÇÃO

A digestão anaeróbia tem sido um dos tratamentos biológicos mais adotados em estações de tratamento tanto pela sua eficácia na diminuição da matéria orgânica que ela propicia quanto pela produção de biogás que é gerado como subproduto e que pode ser aproveitado energeticamente. A importância da utilização deste biogás para geração de energia elétrica se dá tanto para o meio ambiente como para as empresas de saneamento que desejem aportar este recurso como micro ou minigeradores de energia.

Segundo FIGUEIREDO (2007), diminuir a dependência de combustíveis fósseis e não renováveis ajuda alcançar soluções ambientalmente corretas, como a utilização da biomassa como fonte de energia, reduzindo os impactos globais pela queima de combustíveis fósseis e contribuindo com a matriz energética dos países.

MACEDO (2010) diz que no Brasil ainda são poucos os exemplos de estações de tratamento de efluentes que utilizam o biogás como fonte renovável de energia. O uso do biogás proveniente de ETE urbanas reduz as emissões do gás metano e gera uma forma de energia renovável, propiciando, assim, uma criação de políticas que aproveitem o biogás e contribuam para melhorar o saneamento básico no Brasil.

É inegável, portanto, que a geração de Energia Elétrica em ETE urbanas traz inúmeros benefícios, tais como:

- **Benefícios ambientais:** contribuindo para a promoção da utilização de fontes renováveis de energia, influenciando diretamente na redução dos impactos ambientais como a queima, por exemplo, de combustíveis fósseis;
- **Benefícios sociais:** garante à população um maior acesso ao saneamento básico, o que implica em saúde pública e melhoria na qualidade de vida das pessoas;
- **Benefícios econômicos:** como por meio da REN 482/12 não é possível a venda de EE por parte dos produtores de energia, as empresas de saneamento obteriam seus benefícios econômicos / financeiros através do abatimento do proporcional gerado versus os gastos associados do custo da energia consumida em kWh/mês nos locais de geração. É importante ressaltar que diante da REN 482/12, realizar tratamento de esgotos beneficia diretamente a qualidade dos recursos hídricos, estreitando as relações entre os eixos econômico e ambiental;

- **Outros benefícios:** aprimoramento da legislação vigente. Isso influencia em legislações relativas aos autoprodutores de energia, ou seja, com geração acima de 1 MW, onde há a possibilidade de venda de Energia Elétrica.

1.1 Motivação

O crescimento populacional ligado ao crescimento dos grandes centros urbanos, implicam no acelerado aumento da produção de resíduos e de águas residuais urbanas, que apresentam dificuldades quanto ao manejo gerando problemas socioambientais, além de serem problemáticos para as administrações públicas. Quanto mais a população cresce, se faz necessário aumentar a produção de Energia Elétrica.

A partir de então, surgem duas necessidades: preservar o meio ambiente e utilizar fontes renováveis de energia. Neste contexto, será abordada a utilização do Biogás oriundo de estações de tratamento de esgoto para a geração de Energia Elétrica, onde o grande desafio consistirá em abordar a melhoria nos aspectos socioambientais bem como o uso do Biogás no aproveitamento energético. Este trabalho foi motivado pelo interesse do autor por conhecer com maior profundidade essa fonte renovável de energia que pode complementar a Matriz Elétrica, purificar os esgotos e ainda por cima produzir fertilizantes.

1.2 Objetivos

O presente trabalho refere-se ao estudo da geração de energia elétrica a partir do Biogás proveniente do tratamento de esgotos. Esse estudo foi constituído de pesquisas bibliográficas acerca da produção de biogás a partir de águas residuais, buscando-se assim avaliar e explorar as possibilidades de utilização de resíduos orgânicos como fonte de energia elétrica. Além do mais, é necessário analisar tanto a geração quanto o potencial energético do biogás proveniente dos lodos de esgotos que são gerados nas Estações de Tratamento de Efluentes.

Tal análise será realizada levando-se em conta o potencial energético do Biogás, as tecnologias de conversão, os aspectos gerais das estações de tratamento de esgoto, os modelos de aproveitamento para a geração com exemplificações de alguns modelos adotados no Brasil e em outros países, os aspectos socioambientais e os desafios e perspectivas para sua implementação.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi subdividido em capítulos que serão descritos afim de familiarizar o leitor.

O Capítulo 1 é introdutório e contextualiza o trabalho, apresentando a motivação, definindo os objetivos e apresentando a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica a partir de uma revisão bibliográfica sobre o biogás, biodigestores, seu potencial de geração além de explanar o programa PROBIOGÁS.

O Capítulo 3 é dedicado a abordar algumas tecnologias de conversão para a geração de energia a partir do biogás.

O Capítulo 4 descreve aspectos gerais e intrínsecos às estações de tratamento de esgoto, onde em um primeiro momento é mostrada as modificações feitas na REN482/12, que culminou na legislação vigente. Em seguida, é detalhada uma abordagem acerca da geração de energia elétrica a partir do esgoto, bem como algumas modalidades de aproveitamento do biogás.

O Capítulo 5 relata alguns casos de estações de tratamento que já utiliza como fonte de energia o biogás.

O Capítulo 6 apresenta algumas metodologias que devem ser seguidas para a viabilidade econômica.

O Capítulo 7 mostra algumas fontes de financiamento bem como incentivos, políticas públicas e os aspectos socioambiente que a geração a partir do biogás proporciona.

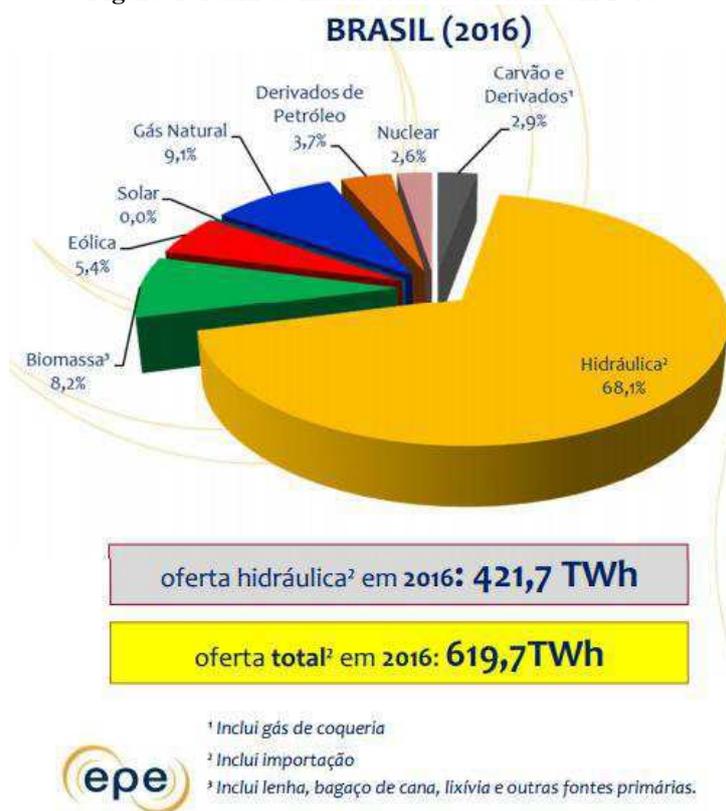
Por fim, no Capítulo 8 acontece o relato que o autor fez no que diz respeito às considerações finais sobre o conteúdo estudado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Na década de 70, após o primeiro choque do petróleo, é que os países manifestaram real interesse por fontes alternativas de energia. Devido aos preços dos combustíveis que se apresentavam muito voláteis, e a incerteza de suprimento de toda a demanda energética, o mundo então percebeu uma necessidade de substituição dos combustíveis fósseis (LEITE e LEAL, 2007).

Contudo, os fatores ambientais, como o agravamento do efeito estufa, a poluição e uma imposição social pela sustentabilidade dos recursos naturais, fizeram com que a bioenergia realmente fosse consolidada. Tudo isso é caracterizado pelo uso de fontes alternativas renováveis como a biomassa que vem a se inserir com destaque na cadeia produtiva.

Figura 1: Perfil da matriz elétrica brasileira em 2016



Fonte: BEN, 2017.

É válido destacar que em 2016, a participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com pequeno crescimento devido particularmente à queda da oferta interna de petróleo e derivados e expansão da geração hidráulica. Dados do Balanço Energético Nacional, edição 2017,

mostram que há um avanço da participação de fontes renováveis na matriz elétrica, devido à queda da geração térmica a base de combustíveis fósseis e ao incremento das gerações eólica e hidráulica. As fontes renováveis (hidroeletricidade, biomassa e eólica) responderam por 81,7% de toda a energia da matriz energética brasileira em 2016 (Figura 1), ou seja, é possível observar que o Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica predominantemente renovável.

Embora na Figura 1 não esteja exposto dados a respeito do biogás, o mesmo se encontra intrínseco nos dados sobre a biomassa, haja visto que ela é a principal fonte para o biogás, representando apenas 8,2% de energia na matriz energética brasileira. É importante frisar que a formação do biogás se dá durante a decomposição da matéria viva por bactérias microscópicas, que retiram da biomassa parte das substâncias de que necessitam para continuarem vivas, e lançam na atmosfera gases e calor (que são biogás).

2.1 O BIOGÁS - produção a partir de esgotos domésticos

Para que os resíduos provenientes de sistemas de saneamento e de tratamento de esgoto sejam convertidos em biogás é necessário que haja o processo de biodigestão, que ocorre por meio do estímulo da digestão anaeróbia (sem oxigênio) da biomassa dos resíduos. Em seguida, o biogás resultante é convertido em energia elétrica que pode ser usada para alimentar um motor-gerador. É necessário identificar a vazão do gás, sua composição química e seu poder calorífico para um melhor aproveitamento.

COELHO (2006) define o biogás como sendo uma mistura resultante da fermentação anaeróbia de material orgânico encontrado em resíduos animais e vegetais, lodo de esgoto, lixo ou efluentes industriais, como restos de matadouros, curtumes e fábricas de alimentos. Em outras palavras, o biogás é o subproduto de processos que envolvem a digestão anaeróbia da matéria orgânica oriunda de biomassa, sendo composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂).

Os resíduos usualmente utilizados na obtenção do biogás são dejetos humanos e animais, lama de esgoto e resíduos vegetais de colheita, os quais são caracterizados por serem nutrientes ricos que favorecem o crescimento das bactérias anaeróbias. Embora possua um excelente potencial energético, o biogás ao mesmo tempo agrava o efeito estufa quando lançado na atmosfera, devido ao alto teor (muito maior do que o CO₂) de CH₄ presente em sua composição e produzido nos digestores. Uma adequada utilização

do biogás é na obtenção de energia elétrica, pois representa uma alternativa de energia renovável para o país e contribui com a melhoria do balanço energético em sistemas de esgotamento sanitário, promovendo a descentralização da geração já que todo o adensamento populacional poderá funcionar como produtor de energia. De acordo com a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), a energia elétrica gerada nas Estações de Tratamento de Esgoto pode ser aproveitada pela própria ETE, com um suprimento que pode chegar a 90% dependendo da estrutura da estação, sendo uma excelente alternativa de energia para suprimento interno das ETEs. Neste caso, além de dar um destino ambientalmente adequado ao gás gerado, a digestão anaeróbia se apresenta como um tratamento eficaz para a geração de energia.

Em síntese, o biogás é a transformação de matéria orgânica em energia renovável para ser utilizada na produção de calor, de eletricidade, de combustível para automóveis e ainda de gás substituto do gás natural. Tanto nas residências e indústrias quanto nas propriedades rurais existe a produção de resíduos que se tratados pela via anaeróbia podem ser convertidos em biogás. Países da União Européia, conscientes acerca dos danos causados pelas emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis, estão investindo em projetos de uso do biogás para a geração de energia elétrica.

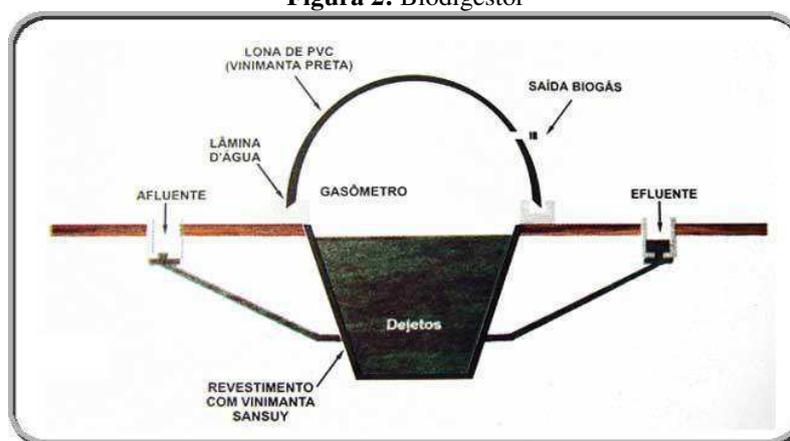
2.2 Biodigestor

O biodigestor é a unidade onde ocorre a fermentação da biomassa, caracterizado por um tanque, uma caixa ou uma vala revestida e coberta por um material impermeável. O fundamental é que, com exceção dos tubos de entrada e saída, o biodigestor deve ser vedado, criando um ambiente anaeróbio (sem a presença de oxigênio) para estimular os micro-organismos na degradação do material orgânico - o que gera o biogás.

São nestes reatores anaeróbios onde o material orgânico é decomposto por bactérias metanogênicas, resultando no final do processo em efluente tratado e biogás. Eles podem ser utilizados para tratar esgotos urbanos, lodos de ETEs, dejetos animais, efluentes e resíduos rurais e industriais que contenham elevada carga orgânica, e outras fontes de biomassa. Quanto maior a carga orgânica do material a ser digerido no biodigestor e respeitando as condições para um bom funcionamento, maior será a produção de biogás.

A digestão anaeróbia permite, portanto, uma redução significativa do potencial poluidor e a recuperação da energia na forma de biogás, utilizando para isso os biodigestores. Estes são caracterizados por uma câmara fechada, onde é colocado o material orgânico em solução aquosa, onde por meio da decomposição anaeróbia diminui o volume de sólidos e estabiliza o lodo bruto. Em alguns casos, os biodigestores possuem uma parte inferior cônica para deposição do lodo, enquanto a parte superior permite a captação do biogás, conforme pode ser percebido na Figura 2 onde é representado um esquema de biodigestor bastante usado principalmente em propriedades rurais.

Figura 2: Biodigestor



Fonte: EMBRAPA

A escolha do tipo de biodigestor depende da finalidade na qual o biodigestor está sendo construído e da disponibilidade do espaço onde será instalado (deve haver uma preocupação com a segurança, já que o metano produzido no biogás é um combustível inflamável). Os tipos mais difundidos são os modelos indiano, chinês e canadense (KUNZ, 2004).

2.3 Potencial de Geração de Biogás

Na digestão anaeróbia há um decréscimo da carga poluidora devido à geração de biogás, que consiste numa mistura de gases com potencial energético (metano, dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, entre outros). Essa transformação ocorre no biodigestor onde, paralelamente, acontece a produção de biofertilizantes. A tecnologia do biogás é relativamente simples, com capacidade de adaptação a diferentes sistemas produtivos e escalas, o que lhe rende significativo poder de abrangência geográfica, demonstrando grande potencial para uso térmico, elétrico ou veicular.

No entanto, a contribuição do biogás na matriz elétrica brasileira ainda é pequena, o que aponta para uma necessidade de evolução. De acordo com o MME (2015), representado na Tabela 1, esse tipo de energia corresponde a apenas 0,1% da potência instalada, muito menos do que outras modalidades renováveis como a do bagaço de cana, com 7,4% e a energia eólica, com 3,6% de participação do potencial instalado nacional.

Tabela 1: Matriz Elétrica Brasileira de acordo com a fonte utilizada

Fonte	Nº Usinas	Potência instalada (MW)	Estrutura %	Potência média por usina
Hidrelétrica	1.186	89.193	66,6	75
UHE	202	84.095	62,8	416
PCH	487	4.790	3,6	10
CGH	497	308	0,2	1
Gás	155	14.208	10,6	92
Gás Natural	121	12.550	9,4	104
Gás Industrial	34	1.658	1,2	49
Biomassa	504	12.341	9,2	24
Bagaço de Cana	387	9.881	7,4	26
Biogás	25	70	0,1	3
Outras	92	2.390	1,8	26
Petróleo	1.263	7.888	5,9	6
Nuclear	2	1.990	1,5	995
Carvão Mineral	13	3.389	2,5	261
Eólica	228	4.888	3,6	21
Solar	311	15	0,011	0,05
TOTAL	3.662	133.913	100,0	37
Importação contratada		5.850		
Disponibilidade total		139.763		

Fonte: Resenha Energética Brasileira, 2015

Os maiores gastos com EE em uma ETE são causados por bombeamento, onde a produção específica em kWh/m³ depende da concentração do esgoto da ETE e se há certa constância na vazão de entrada de esgoto da estação. A partir de dados obtidos em análises do efluente antes e após seu tratamento no biodigestor, tais como DQO (Demanda Química de Oxigênio) e Volume de esgoto da ETE, é possível estimar o volume de biogás gerado, com isso é possível escolher o tipo de tecnologia que será utilizada para geração de EE, determinando, assim, o tempo em que a tecnologia ficará em operação dado o volume de biogás produzido.

2.4 PROBIOGÁS

Surgindo do interesse em incrementar sistemas de saneamento com a utilização de alternativas renováveis, o projeto PROBIOGÁS, coordenado pelo Ministério das Cidades e a pela Agência de Cooperação Internacional da Alemanha (GIZ, na sigla em alemão), é um projeto de cooperação técnica internacional dedicado a fomentar a temática do biogás no Brasil. Considerando o crescimento populacional, o déficit nacional em saneamento e o crescente número de sistemas de saneamento que deverão ser implementados no âmbito do PAC – Programa de Aceleração do Crescimento – o Ministério das Cidades se interessou por conhecer mais a opção de utilizar o biogás gerado em sistemas de saneamento. Assim, o Governo brasileiro foi buscar referências no tema e identificou o interesse em cooperar com a Alemanha, desenvolvendo atividades que focam na melhoria das condições regulatórias, na aproximação das instituições de ensino e pesquisa e no fomento da indústria nacional.

Embora no Brasil já exista diversas experiências no uso do biogás, tanto nas cidades quanto no campo, vale salientar que há uma carência de normas e legislação voltadas para o biogás. Além disso, ainda existe dificuldade em encontrar no mercado de trabalho profissionais capacitados e com conhecimento profundo no tema. Outro ponto relevante é a incipiente disponibilidade de equipamentos e tecnologias adaptadas à realidade brasileira.

Portanto, o principal objetivo do projeto é a ampliação do uso energético eficiente do biogás em saneamento básico e em iniciativas agropecuárias e agroindustriais, além de inserir o biogás e o biometano na matriz energética nacional e, como consequência, contribuir para reduzir as emissões de gases que contribuem para o efeito estufa. Com relação ao financiamento, o Ministério das Cidades contribui com recursos do tipo “in kind”, disponibilizando servidores especialistas em saneamento, pertencentes ao seu quadro técnico, além da infraestrutura física para alocação da equipe do projeto durante toda sua realização. Já o governo da Alemanha dá apoio às tecnologias para a mitigação de mudanças climáticas, além de a elaboração de estudos técnicos, materiais de divulgação, capacitações, realização de eventos e consultorias pontuais. Embora em 2017 o projeto seja descontinuado, espera-se que o movimento não se encerre com seu fim e que os parceiros (Ministérios, Associações, Órgãos Ambientais, entre outros) continuarão se movimentando e trabalhando para o desenvolvimento do uso de biogás no Brasil.

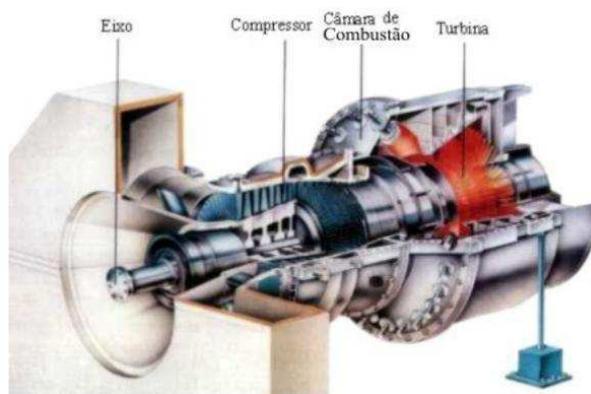
3. TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO

Por meio da combustão controlada do gás, a energia química contida nas moléculas do biogás é convertida em energia mecânica que, por sua vez, ativa um gerador que a converte novamente em EE. Além disso, o biogás gerado também pode ser utilizado para a cogeração (por exemplo, na queima direta em caldeiras). Há outro tipo de tecnologia, porém pouco difundida e não comercial, como a célula combustível; já os motores ciclo otto e as Microturbinas são largamente utilizados e são de fácil aquisição.

3.1 Turbina a Gás

As turbinas a gás estacionárias foram desenvolvidas a partir das turbinas usadas em aviação, onde o fluido é o gás da câmara de combustão. Os gases gerados em aterros sanitários, que apresentam como principal fonte de energia o metano, tem sido coletados em aterros municipais de lixo e são utilizados para a geração de EE por meio de Turbina a Gás. Porém, dependendo da vazão de operação, em ETEs é mais viável a utilização do Motor Ciclo Otto e de Microturbinas para a geração de EE.

Figura 3: Turbina a Gás

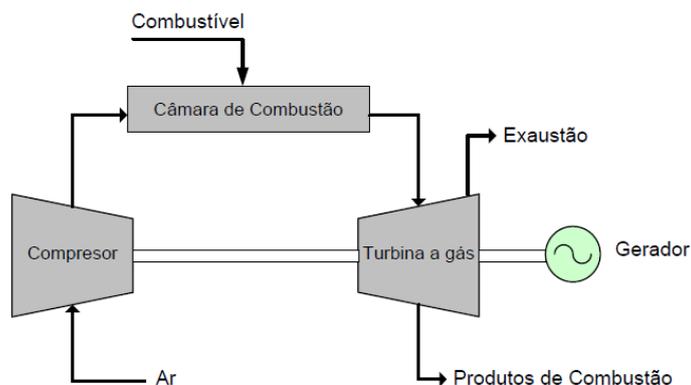


Fonte: BRANCO, 2005.

De acordo com a figura abaixo, é possível entender o processo: o ar atmosférico é aspirado e comprimido no compressor e encaminhado a uma alta pressão à câmara de combustão, onde é misturado com o combustível pulverizado provocando a ignição. O gás é enviado à Turbina a Gás com alta pressão e temperatura, quando ocorre a expansão dos gases até a pressão de exaustão, resultando em potência no eixo da

turbina. Parte desta potência é utilizada para o acionamento de um gerador elétrico (VAN WYLEN, 2003).

Figura 4: Ciclo Brayton aberto e simples

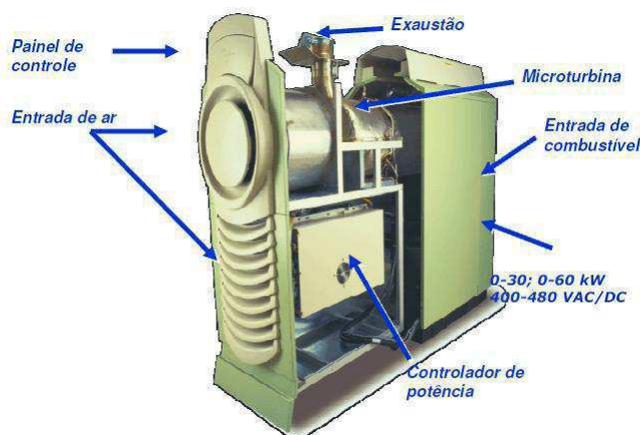


Fonte: JUSTI, 2013.

3.2 Microturbina a Gás

Podendo ser utilizadas com vários tipos de combustíveis (tais como Biogás, Gás natural, GLP (gás liquefeito de petróleo), Gás de poços de petróleo, Diesel/Gás oil e Querosene), as Microturbinas são turbinas de pequeno porte que geralmente operam na faixa de 20 a 250 kW, e se instalados em conjunto de módulos pode gerar cerca de 1,5 MW. Seu funcionamento é semelhante às Turbinas a Gás de grande porte. A Figura abaixo mostra os principais componentes de uma Microturbina.

Figura 5: Principais componentes de uma Microturbina

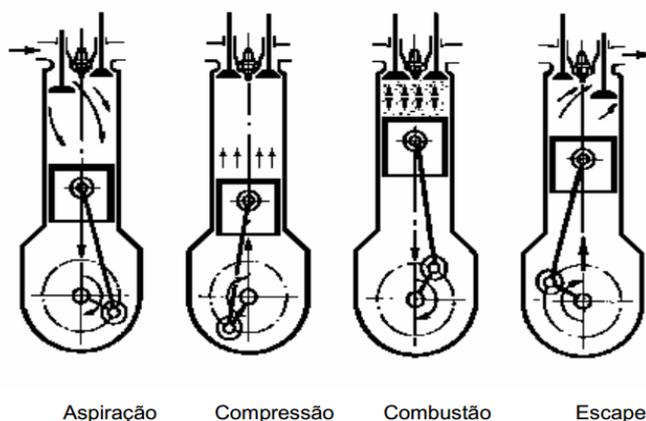


Fonte: MONTEIRO, 2004.

3.3 Motores a Combustão Interna

São motores que se aproximam do ciclo de combustão interna da ignição por centelha, onde seu rendimento é função apenas da relação de compressão. Aplicam-se tanto para geração de energia elétrica, pelo acoplamento de um gerador ao motor, quanto à geração de energia mecânica, que pode ser empregada no acionamento de bomba hidráulica, compressor ou veículo. No ciclo Otto, a combustão ocorre pela ignição do combustível através de uma fagulha na câmara de combustão.

Figura 6: Esquema de funcionamento de um Motor Ciclo Otto



Fonte: Dante, 2003

3.4 Comparação entre as tecnologias de conversão

Na Tabela 2 é possível analisar as principais diferenças entre as tecnologias disponíveis. Percebe-se que os motores possuem maior eficiência para a conversão energética do biogás, enquanto que as turbinas a gás possuem maior eficiência global de conversão, quando operadas em cogeração.

Tabela 2: Comparação entre as tecnologias disponíveis de conversão

	Motor Ciclo Otto	Motor Ciclo Diesel	TG de pequeno porte	Microturbina
Potência	30 kW - 20 MW	16 kW a 98 kW	500 kW - 150 MW	30 kW - 100 kW
Rendimento com Biogás	30 a 34%	30 a 35%	20 a 30%	24 a 28%
Emissões de NO_x	< que 3000 ppm	Por volta de 27 ppm	De 35 a 50 ppm	< que 9 ppm

Fonte: Adaptação de PÉCORA, 2006.

3.5 Motores a Biogás

Para a geração de energia elétrica utilizando o biogás como combustível é necessário a identificação da vazão disponível, da composição química e de seu poder calorífico. Os motores de combustão interna de ciclo Otto requerem pequenas alterações para a utilização do biogás como combustível.

A diferença entre o motor a ciclo Otto em relação ao motor a ciclo Diesel, indica que este último é mais apropriado do que o anterior devido à sua maior robustez e menor custo para uma mesma potência. Porém, para tal finalidade são necessárias algumas grandes modificações no motor Diesel através de um processo conhecido como ottolização. Contudo, perdas de potência e desempenho são verificadas em um motor ottolizado, ou seja após um motor a ciclo Diesel passar por um processo do ottolização.

Na maioria dos motores a biogás a tecnologia é restrita a motores de combustão interna de pequeno porte (50 a 100 kW), suficientes para abastecer as fazendas com geração de energia elétrica ou até mesmo acionamento de bombas de irrigação. Por se tratar de pequenas quantidades de esterco (em relação a aterros), é comum a utilização de gasômetros para armazenar o biogás quando a demanda por energia não é grande. Os equipamentos são na maioria das vezes de tecnologia nacional, utilizando-se motores de veículos adaptados ou até mesmo novos.

Figura 07 – Modelo de gerador a biogás (SG-75B)



Fonte: Grupo Fockink, 2009

3.5 Subestações

Para transformar o biogás extraído da decomposição da matéria orgânica é necessário criar todo um sistema de drenos para a sua captação. Além do mais, deve levar em consideração o teor reduzido de metano no biogás em comparação ao gás natural e as impurezas presentes que, dependendo da concentração, deverão ser tratadas antes da conversão.

Sendo assim, para gerar energia do biogás serão necessários diversos equipamentos como, caldeira, turbina, trocadores de calor, transformadores e subestação de energia, além de dispositivos de segurança.

4. ASPECTOS GERAIS DAS ETEs

4.1 Legislação Vigente (REN 687/15)

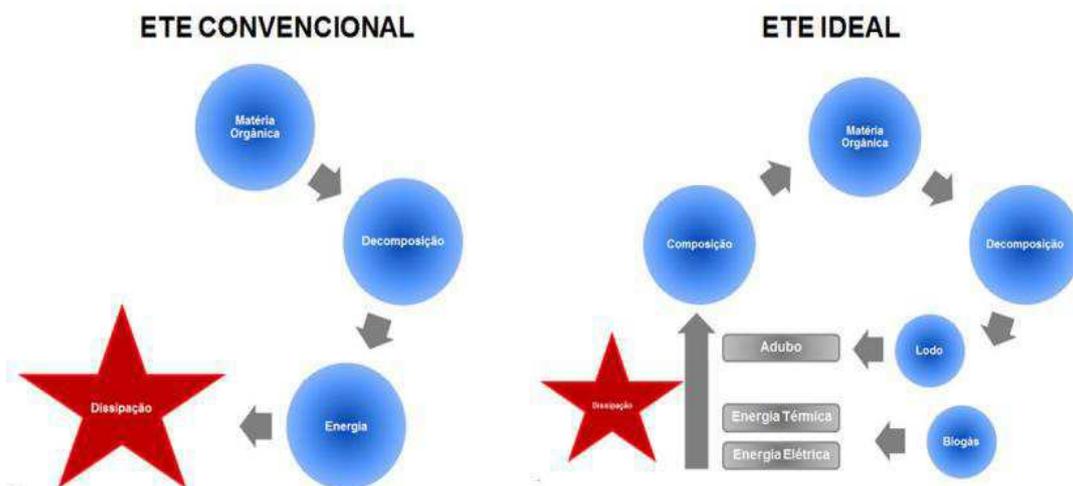
A Resolução Normativa N° 687 (REN 687/15) foi aprovada em Audiência Pública realizada na ANEEL alterando a REN 482/12, que havia instituído a Geração Distribuída, tornando mais fácil para que as pessoas e empresas possam produzir sua própria energia a partir de fontes renováveis (solar, eólica, hidráulica e de biomassa). As novas regras determinaram que será considerado minigeração a instalação de geradores com potência de até 75 kW e, passando dessa potência até o valor de 5 MW, será considerado minigeração.

Se a quantidade de energia gerada for superior à quantidade de energia consumida, então a energia que sobre irá para a distribuidora, gerando créditos que poderão ser compensados pelo prazo de até 60 meses. Além do mais, o consumidor poderá utilizar os créditos excedentes em instalações mais afastadas do local de consumo (mas na área da mesma distribuidora) para compensar nessa outra unidade consumidora. Essa modalidade de compensação é denominada “autoconsumo remoto”. O sistema de compensação de energia elétrica instituído pela ANEEL funciona semelhante ao método adotado em alguns países, denominado “*net metering*”, ou seja, não há venda da energia produzida, e sim créditos gerados.

Outra novidade que a nova resolução trouxe é a possibilidade de geração distribuída em condomínios. Os créditos gerados podem ser compensados nas múltiplas unidades do condomínio, com uma porcentagem predefinida pelos próprios consumidores. Além disso, a ANEEL criou também a geração distribuída, que permite que diferentes consumidores se unam em consórcio ou cooperativa, instalem um micro ou minigerador e utilizem a energia gerada para reduzir as suas contas de energia elétrica.

4.2 Geração de Energia Elétrica em Estação de Tratamento de Esgoto

O principal objetivo de uma estação de tratamento de esgoto está na redução do impacto ambiental, evitando danos ao solo, águas e também ao ar, com o máximo de eficiência.

Figura 8: Fluxo de Funcionamento de ETE

Fonte: Barros, 2015

A princípio, o esgoto que vem da rede coletora é transportado até a estação elevatória, de maneira que as partículas maiores sejam retidas e ele siga até uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Aqueles resíduos sólidos são destinados a um aterro sanitário, enquanto o líquido é enviado a um reator onde há o processo de digestão da matéria orgânica pelas bactérias ali presentes e de lá segue para uma etapa de pós-tratamento. A atividade bacteriana produzirá um gás que pode ser queimado e transformado em gás carbônico ou pode ser reaproveitado.

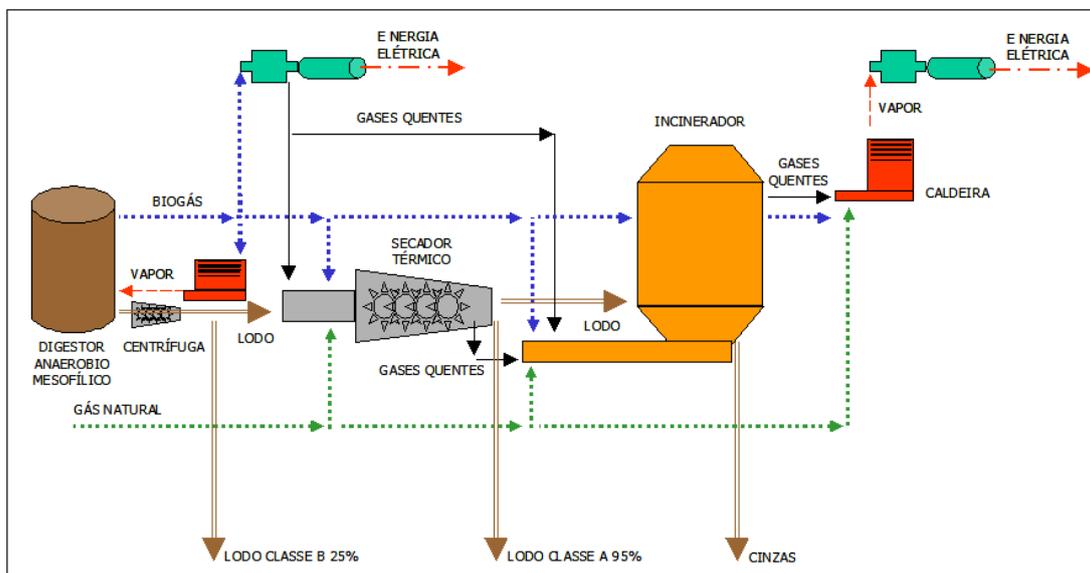
Algumas etapas devem ser definidas para a realização de um projeto no âmbito da geração de Energia Elétrica a partir do biogás, a saber: identificar o potencial energético dos esgotos afluentes da ETE em estudo, selecionar a tecnologia de conversão, realizar o levantamento dos custos de investimento e manutenção do equipamento, avaliar a viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na ETE bem como o tempo de recuperação do capital ou Payback, e analisar os benefícios econômicos e ambientais envolvidos.

4.2.1 Modalidades para o aproveitamento do Biogás

As diferentes modalidades para o aproveitamento e/ou a geração de energia são diretamente dependentes das soluções empreendidas para o tratamento do lodo (como estabilização, secagem térmica e incineração), podendo estas ser exclusivamente implantadas ou combinadas entre si mediante diferentes arranjos e possibilidades, como ilustra a Figura 1 abaixo, lembrando que a digestão do tipo mesofílica é aquela realizada

a uma temperatura compreendida entre 32°C e 38°C (a faixa da digestão termofílica é de 50°C a 60°C).

Figura 9: Opções para o aproveitamento e/ou geração de energia a partir do lodo 25% TS e classe B

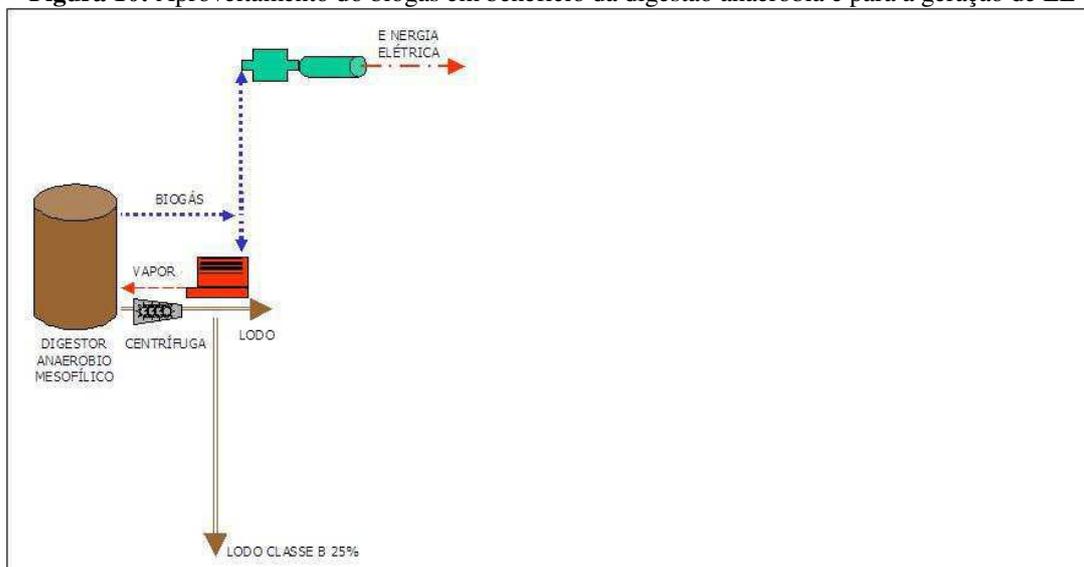


Fonte: Volschan Jr., 2009

Caso o lodo seja somente estabilizado e desidratado mecanicamente (com teor de sólidos TS de 25% e classe B), é possível aproveitar o biogás em benefício da própria etapa de digestão anaeróbia e/ou para a geração de energia elétrica por meio de motores de combustão interna, turbinas ou células combustíveis.

É possível o biogás ser também aproveitado para a geração de energia elétrica, como mostra o desenho esquemático da Figura 9.

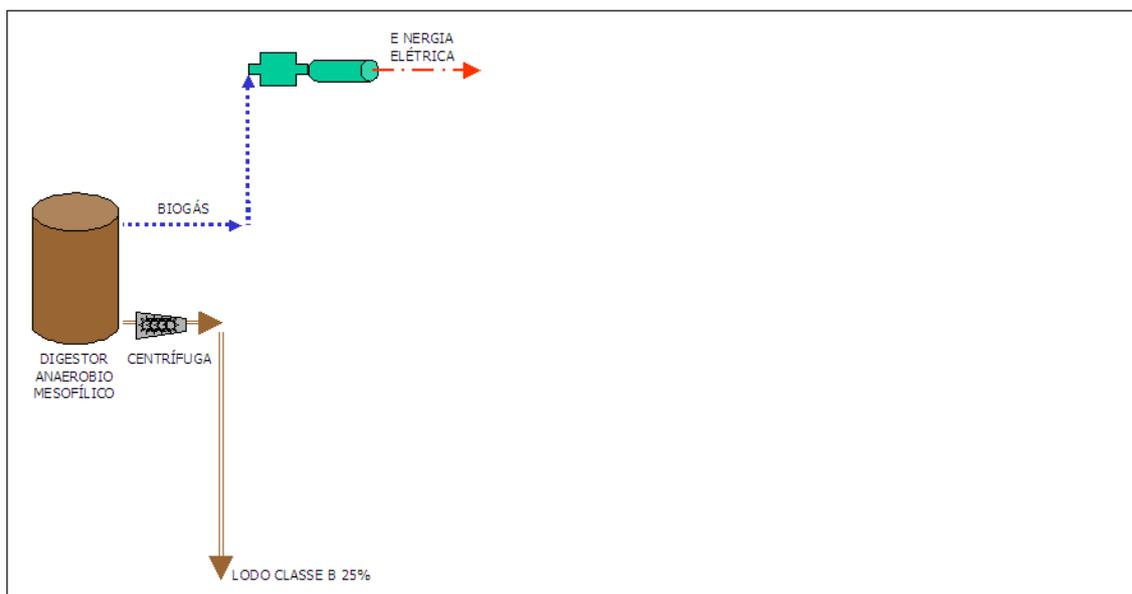
Figura 10: Aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbia e para a geração de EE



Fonte: Volschan Jr., 2009

O biogás pode também ser exclusivamente utilizado para a geração de energia elétrica, como indica o desenho esquemático da Figura 10, ou até mesmo como combustível de veículos automotores.

Figura 11: Aproveitamento do biogás somente para a geração de energia elétrica



Fonte: Volschan Jr., 2009

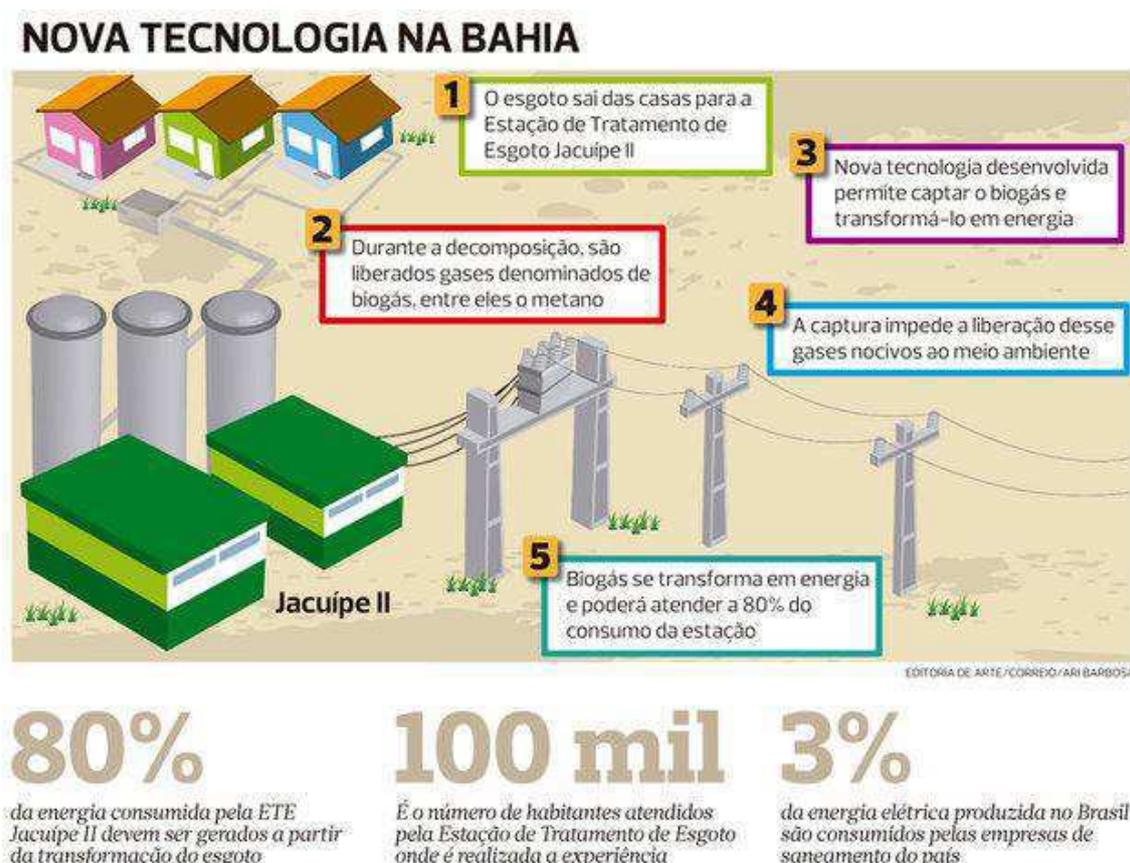
Quando empregada a secagem térmica, a qual possibilita o alcance de até 95% de teor de sólidos e lodo com qualidade tipo Classe A, é usual aproveitar-se o biogás gerado na digestão anaeróbia como fonte exclusiva de combustível ou como fonte complementar ao gás natural. Quanto mais o biogás for aproveitado em benefício da etapa de digestão anaeróbia, ou utilizado para a geração de energia elétrica, maior deverá ser a quantidade de gás natural requerida para a secagem térmica. No caso da utilização do biogás para a geração de energia elétrica, os gases quentes dos motores de combustão interna/turbinas, a temperaturas de até 500 °C, podem ser aproveitados como fonte de calor para a secagem térmica.

5. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM ETE - alguns casos

5.1 ETE de Jacuípe II (Bahia)

No final de 2016, o Governador do Estado da Bahia inaugurou a primeira usina de geração de energia através do biogás proveniente do esgoto no estado. Localizada na Estação de Tratamento (ETE) Jacuípe II, em Feira de Santana, o projeto conta com a parceria da Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS e é fruto de um investimento da ordem de R\$ 4,6 milhões, sendo R\$ 3,6 milhões da Coelba, através do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, R\$ 840 mil da Embasa e R\$ 150 mil da Agência de Cooperação Alemã - GIZ.

Figura 12: ETE Jacuípe II



Fonte: <http://www.correio24horas.com.br/noticia/nid/pesquisa-testa-uso-do-biogas-captado-do-esgoto-para-gerar-energia-na-bahia/>

Com potencial de indicar soluções para estações de tratamento de esgoto de

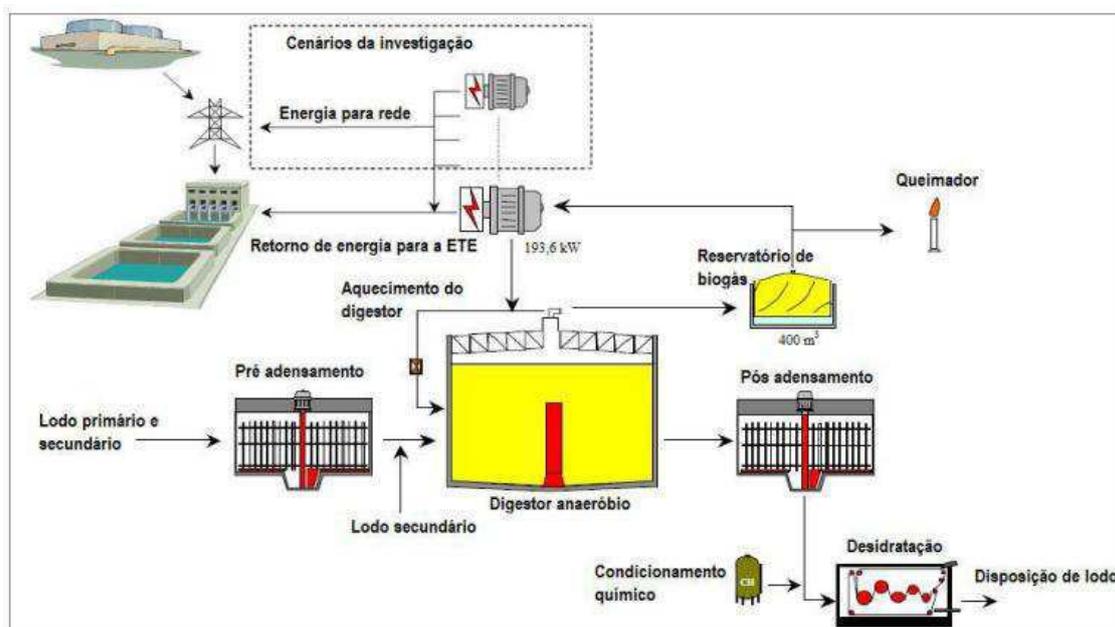
médio e pequeno porte, que atendam entre 20 mil e 300 mil habitantes, o projeto foi submetido a adaptações civis nos Digestores Anaeróbicos de Fluxo Ascendente – DAFA, com o intuito de captar o biogás gerado na etapa de digestão do esgoto. O gás passou a ser canalizado e transportado para um sistema de limpeza e armazenamento, sendo encaminhado para um grupo motogerador de potência 190 kW que realiza a combustão do biogás e a geração de energia, prevendo o atendimento de até 80% da demanda energética da estação de tratamento com esse sistema.

O projeto realizado em Feira de Santana teve como objetivo estudar a viabilidade econômica desta tecnologia para o mercado brasileiro, visto que uma das principais barreiras para tornar o seu uso uma realidade no país é, justamente, a comprovação da sua efetividade, dentro dos parâmetros capazes de melhorar a eficiência do processo de tratamento de efluentes sob o ponto de vista energético. As informações desenvolvidas na pesquisa serão disseminadas com o objetivo de diminuir as incertezas que envolvem o aproveitamento energético do biogás em estações de tratamento, aumentando, assim, a confiabilidade de investir nessa tecnologia.

5.2 ETE de Iraklio (Grécia)

A Figura 4-31 apresenta um fluxograma das unidades envolvidas no aproveitamento energético da ETE de Iraklio, Grécia. O gerenciamento do lodo primário e secundário ocorre em um digestor de lodo e o biogás gerado nessa unidade é enviado a um sistema gerador, que produz eletricidade para a própria estação e calor para manutenção da temperatura da unidade de digestão em aproximadamente 35°C (TSAGARAKIS, 2007). De acordo com o autor, a produção média de energia proveniente da conversão do biogás gerado em digestores anaeróbios de lodo correspondeu a 15,9% (1.582 kWh.d⁻¹) da energia total demandada pela ETE de Iraklio, considerando-se o pleno funcionamento do gerador instalado.

Figura 13: Aproveitamento energético do biogás na ETE de Iraklio, Grécia.



Fonte: Adaptado de TSAGARAKIS (2007)

5.3 ETE da COMPESA (Pernambuco)

Em Pernambuco houve a iniciativa da Companhia Energética de Pernambuco (Celpe) para captação do biogás produzido na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), em Caruaru afim de gerar 210KW de potência energética. A princípio, a energia será utilizada para abastecer a própria unidade de tratamento e, caso haja excedente, o percentual não consumido será revertido em crédito financeiro no consumo da COMPESA.

O projeto, que faz parte do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor Elétrico da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) conta com a parceria da COMPESA e do Governo do Estado, e está sendo executado pela Universidade de Pernambuco (UPE), Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (CTGI) e as empresas B&G Pesquisa e Desenvolvimento em Sistemas Elétricos Ltda e Sustente Energias Sustentáveis Ltda. Da vazão de 100 litros de esgoto por segundo, seria possível gerar 200 KW de energia por dia, o que representaria uma economia de R\$ 10 mil por mês para a COMPESA na conta de luz da ETE Caruaru.

A ideia do corpo técnico da COMPESA é viabilizar o aproveitamento do lodo como uma fonte geradora de energia. Isso seria feito a partir do esgoto puro, que é aquele que ainda será tratado antes de ser devolvido aos cursos d'água. Parte dele iria

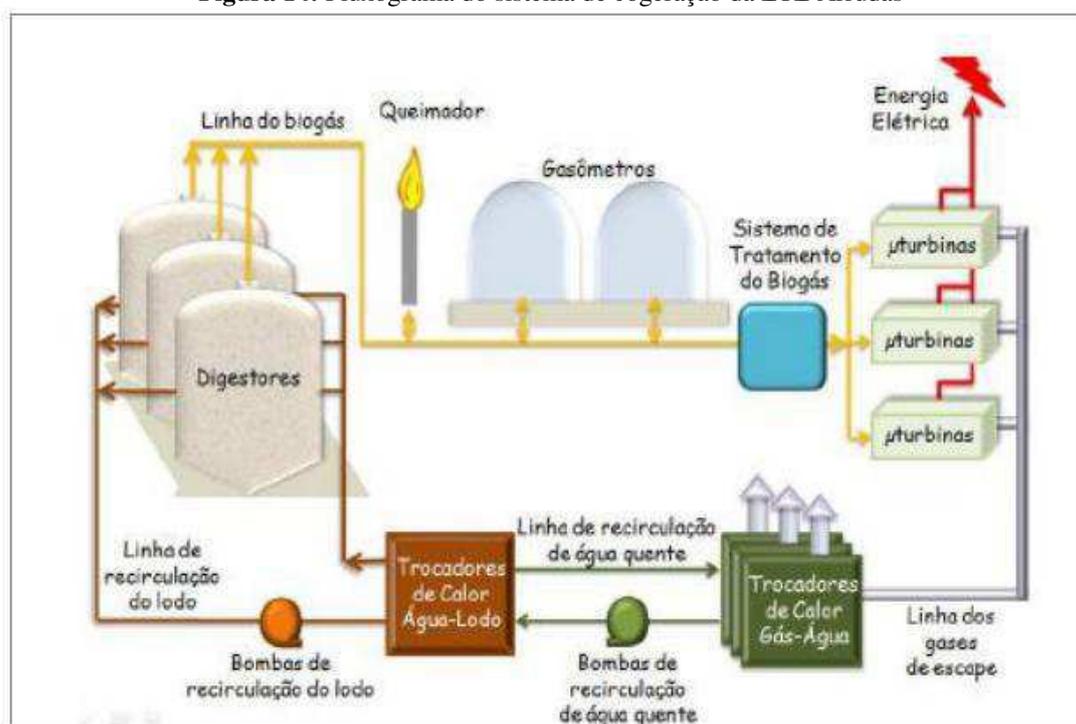
para um UASB, sigla em inglês que significa Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente. Nesse reator, seria possível extrair o Metano (CH_4) e o Dióxido de Carbono (CO_2), gases que são maioria na composição do biogás.

O biogás produzido na ETE pode ser usado como fonte de energia complementar à fornecida pela concessionária de energia elétrica. Uma possibilidade seria usá-lo de forma sistemática, nos horários de pico, quando esse insumo é mais caro. A outra seria em momentos de emergência, quando há suspensão no fornecimento, os chamados apagões de energia. Poderia, ainda, ser armazenado e utilizado para alimentar unidades menores da COMPESA ou estruturas que consomem pouco, como na iluminação de prédios e áreas externas.

5.4 ETE Arrudas (Minas Gerais)

A ETE da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) da Bacia do Ribeirão Arrudas, em Sabará/MG, gera um lodo como resíduo de seu funcionamento. Este lodo era acumulado nos biodigestores gerando o biogás, que por sua vez, era queimado e desperdiçado. A necessidade do cliente consiste a em aproveitar este gás que era queimado para gerar energia que pudesse ser consumida pela própria planta de tratamento de esgoto.

Figura 14: Fluxograma do sistema de cogeração da ETE Arrudas



Fonte: COPASA (2011)

O biogás gerado durante a digestão do lodo é armazenado em dois gasômetros com capacidade total de 6.400 m³ (Figura 13). Após o tratamento do biogás (Figura 14) com o intuito de remover siloxanos e compostos de enxofre, o biogás alimenta microturbinas com capacidade unitária de geração de 200 kW.h-1 e eficiência de conversão de 80%. Os gases de escape são encaminhados para trocadores de calor, de forma a promover o aquecimento do lodo dos quatro digestores (COPASA, 2011).

Figura 15: Gasômetros para armazenamento de biogás



Fonte: COPASA, 2011

Figura 16: Sistema de purificação do biogás



Fonte: COPASA, 2011

Figura 17: ETE Arrudas, Unidade de Cogeração



Fonte: COPASA, 2011

Com o aproveitamento energético do biogás, os benefícios esperados para a

estação se relacionam com: (i) redução de despesas com energia; (ii) aumento da produção do biogás; (iii) redução da produção de lodo; (iv) acréscimo na eficiência do tratamento de esgoto; (v) redução de emissões de GEE; (vi) aumento da sustentabilidade energética da planta (COPASA, 2011).

Figura 18: Vista das unidades experimentais



Fonte: COPASA, 2011

Na Figura 18, é possível se ter uma visão panorâmica do sistema implantado em Arrudas onde é demonstrado o desempenho da planta, bem como as etapas no sistema de cogeração.

Figura 19: Visão geral da planta da ETE de Arruda



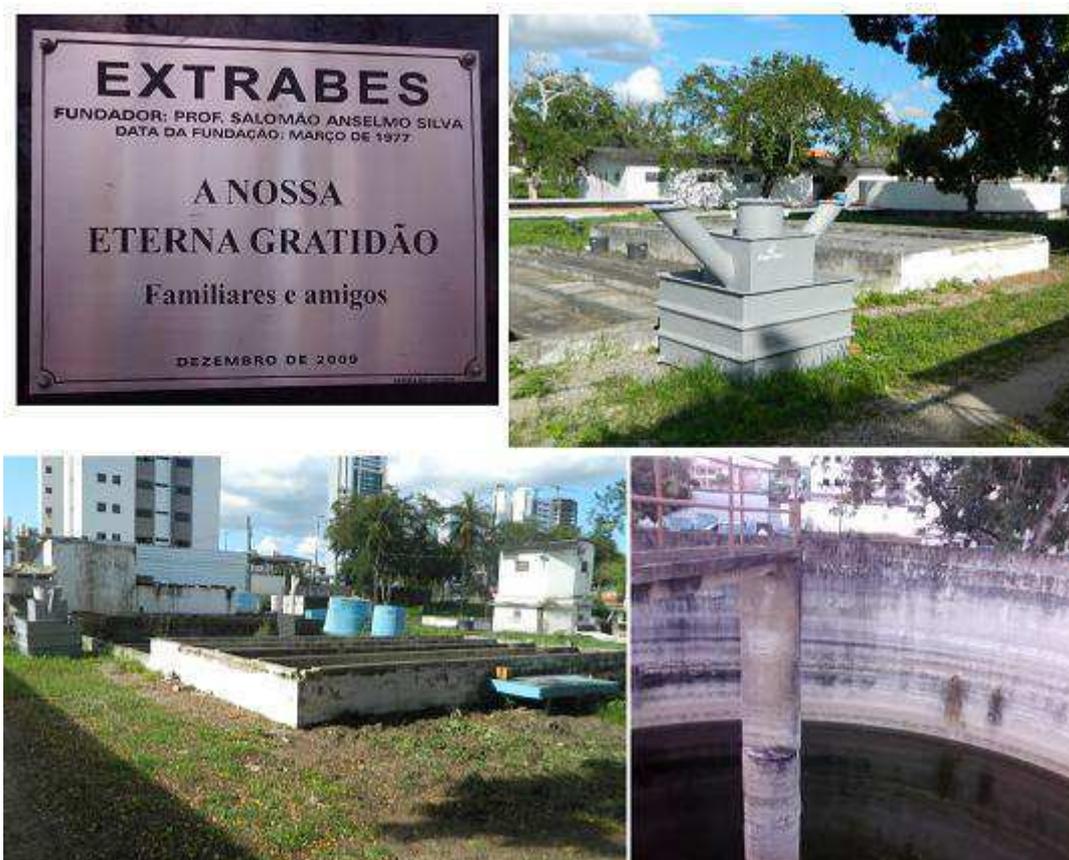
Fonte: BARROS, 2015

5.5 EXTRABES/UEPB

A Estação Experimental de Tratamento de Águas e Esgotos (EXTRABES), localizada em Campina Grande/PB, é uma estação direcionada a pesquisadores, estagiários, mestrandos e doutorandos, por onde passa uma parcela do esgoto da cidade. Parte desta parcela é distribuída para algumas cabines do EXTRABES para os devidos experimentos e análises, seguindo para a estação de tratamento da cidade que se localiza do bairro da Catingueira.

No EXTRABES há lagoas de estabilização para tratamento natural do esgoto (algas e bactérias), há projetos que utilizam reator UASB, dentre tantos outros com o foco no saneamento e com uma preocupação no âmbito sanitário. Porém, poucos são os projetos que tratam sobre o biogás, o qual não é aproveitado nem mesmo na estação de tratamento da cidade. Em outras palavras, o biogás gerado é liberado na atmosfera.

Figura 20: EXTRABES



Fonte: Próprio autor

6. METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

O conhecimento das técnicas especiais para solução de um problema de análise de investimentos é estudado pela Engenharia Econômica, a qual se baseia na matemática financeira para se racionalizar o uso dos recursos de capital. Segundo MOURA (2000), a avaliação de investimentos necessitará considerar o valor do dinheiro no tempo.

6.1 Fluxo de Caixa

É uma representação gráfica de entradas e saídas de recursos monetários ao longo de um determinado período, ou seja, uma demonstração visual de receitas e despesas distribuídas pela linha do tempo futuro. Tem grande importância, pois facilita aos administradores tomarem decisões importantes de investimentos com base em uma visão futura dos recursos financeiros de uma empresa.

6.2 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

É um custo de oportunidade de capital que varia de investidor para investidor, representado sob a forma de taxa de juros onde se pode considerar um investimento atrativo quando este, no mínimo, render o equivalente a esta taxa de juros (PAMPLONA, 2006).

6.3 Valor Presente Líquido (VPL)

Segundo PAMPLONA (2006), o VPL é um método de análise de investimentos onde se compara, na data de início do projeto, todas as receitas e despesas esperadas e projetadas no fluxo de caixa utilizando a taxa mínima de atratividade imposta pelo investidor. Quando o VPL for positivo, significa que o investimento é economicamente atrativo, ou seja, o valor presente nas entradas de caixa é maior que o valor presente nas saídas de caixa.

6.4 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é a taxa que torna nulo o VPL de um investimento, onde o valor presente de todos os fluxos de entrada é igual ao valor presente de todos os fluxos de saída. É um índice relativo que mede a rentabilidade do investimento por unidade de tempo. Para que um investimento seja considerado atrativo neste método é preciso que a TIR seja maior que a TMA (PAMPLONA, 2006, 2005).

6.5 Payback

Além de ser o método mais simples e popular para análise de um investimento, ele consiste simplesmente em quantificar, através do fluxo de caixa, o período necessário para recuperar o investimento feito inicialmente, ou seja, o momento em que o lucro líquido alcançado ao longo do tempo determinado se torna igual ao investimento inicial (PAMPLONA, 2006).

7. DESAFIOS E PERSPECTIVAS SOBRE O USO DE BIOGÁS DE ETEs NO BRASIL

7.1 Viabilidade do uso de Biogás no Brasil

Existe a crença, no setor de saneamento brasileiro, de que o uso energético do biogás é uma solução ainda para o futuro. Muitas prestadoras desse serviço alegam que a principal razão para não haver mais projetos é a falta de viabilidade financeira.

Como este é um mercado muito novo, em que parte significativa dos equipamentos são importados, o setor ainda carece de preços de referência, como é o caso de um mercado mais maduro. Mesmo assim, já existem alguns projetos em funcionamento, que entraram em operação nos últimos anos, e outros em fase de projeto e construção.

Em um estudo recém publicado, concluiu-se que ETEs concebidas para atender entre 100.000 e 200.000 habitantes teriam condições de usar o biogás para a geração de calor e eletricidade com taxas internas de retorno entre 8 e 25%. Para ETEs com capacidade para atender entre de 200.000 e 450.000 habitantes, essas taxas poderiam alcançar até 80% (VALENTE, 2015). Outras publicações, atualmente em finalização (PROBIOGAS, 2015b; ROSENFELD et al., 2015), calculam a viabilidade para ETEs com população equivalente de 100.000 habitantes. A solução com geração de energia elétrica é de 7 a 10% (dependendo da tecnologia) mais econômica nos custos anualizados do que a solução sem geração de energia (PROBIOGAS, 2015b).

A utilização de energia térmica e elétrica resulta em uma redução de custos de 15 a 20% (PROBIOGAS, 2015b), indicando que o limite de viabilidade poderá estar abaixo de 100.000 habitantes, no caso de utilização dos dois tipos de energia.

Os modelos hoje existentes consideram o uso do biogás para a geração elétrica, para a secagem do lodo ou ambos. Conseqüentemente, os principais custos evitados (receitas), utilizados na análise de viabilidade desses projetos, são: custo da tarifa elétrica local, e custo com o transporte e disposição final do lodo.

Apesar de não poderem ser gerenciadas diretamente pelo setor de saneamento, o conhecimento sobre essas duas variáveis é muito importante para garantir uma análise de viabilidade adequada sobre um projeto ao longo da sua vida útil.

7.1.1 Fontes de Financiamento

Após a prospecção do potencial de geração de energia elétrica a partir dos aterros sanitários, vazadouros a céu aberto (lixões) e do esgotamento sanitário utilizando como combustível o biogás, cabe elencar as linhas de financiamento disponíveis no mercado - por meio de fundos de investimento, programas de incentivos e outros - para incrementar o uso do biogás como fonte de energia elétrica sustentável.

Existem no Brasil oportunidades de financiamento voltadas para a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis que devem ser avaliadas quanto às vantagens e desvantagens que apresentam. Existem também diferentes fontes de financiamento internacionais para este setor. Há principalmente para países considerados desenvolvidos, esforços notáveis para contribuir com o incremento do uso de fontes renováveis nas matrizes energéticas de países classificados como em desenvolvimento. Esta preocupação diz respeito à necessidade premente da redução da utilização do uso de combustíveis fósseis para geração de energia elétrica, que tem seus custos de abatimento geralmente mais baixos em países em desenvolvimento.

Assim sendo, são listadas apresentadas abaixo as principais fontes de financiamento nacionais e internacionais para o desenvolvimento de projetos de captação e uso de biogás como fonte geradora de energia elétrica, com destaque para os aterros sanitários.

- **Fontes Nacionais:** Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES); Banco do Nordeste (BNB); Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI); Fundo Nacional de Meio Ambiente (FNMA); Programa de Cooperação Técnica Eletrobrás / GTZ; Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (FNMC).
- **Fontes Internacionais:** Banco Internacional de Desenvolvimento (BID); *International Utility Efficiency Partnerships, INC.* (IUEP); *Sustainable Energy Finance Initiative* (SEFI); E+Co.
- **Multilaterais:** Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento; *Global Environment Facility* (GEF); *International Finance Corporation* (IFC).

Existem diversas opções de fontes de financiamento para energias renováveis, onde se enquadra o uso do biogás para geração de energia elétrica. Estas abrangem: i) linhas de financiamento com prazos e carência alongados e/ou taxas abaixo das de mercado; ii) programas de incentivo direto à energias renováveis; iii) incentivos fiscais;

iv) financiamentos parciais, como no caso do mercado para os créditos de carbono; v) cooperações técnicas; vi) patrocínio direto de projetos; e vii) participação societária para alavancagem e estruturação de projetos.

A diversidade observada nas modalidades de financiamento se apresenta como vantagem para empreendedores do setor, que encontram sobremaneira um mercado crescente e com uma dinâmica própria, envolvendo fontes nacionais, internacionais, privadas e organismos multilaterais. A maioria das fontes, entretanto, tende a privilegiar empreendimentos de grande porte, principalmente pelos custos e escalas dos projetos envolvidos. Organismos multilaterais como o BID, por exemplo, destacam apoio a projetos com algum envolvimento do setor público, onde estratégias de longo prazo estejam envolvidas. Denota-se ainda que a participação do investimento energético brasileiro em fontes renováveis outras que a hídrica é tímida.

7.2 Tarifa de Energia Elétrica

Um projeto que gera eletricidade a partir do biogás deve garantir que a energia produzida tenha um custo inferior ao daquela consumida da rede elétrica. É importante destacar que a tarifa paga para a concessionária de energia varia por estado ou município, portanto a viabilidade deve ser calculada caso a caso.

Quanto à tendência, acredita-se que, nos próximos anos, ocorrerá um aumento na demanda de energia elétrica no país, caso seja ratificado o cenário de fortalecimento e crescimento da economia brasileira. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia elétrica no país vai crescer 4,3% a.a., em média, nos próximos dez anos (EPE, 2014). Isso significa que, para garantir a segurança do sistema, a capacidade instalada de geração de energia elétrica terá que continuar crescendo em ritmo acelerado.

O setor elétrico, que, durante as últimas décadas, sempre contou com uma energia firme de origem hidrelétrica, um das mais baratas existentes, tem sido questionado sobre a sustentabilidade da perpetuação desse modelo. Um dos motivos é a recente crise hídrica na região Sudeste, que fez com que a geração termelétrica fosse acionada além do previsto, resultando em um aumento das tarifas de energia elétrica muito acima das expectativas do setor energético.

O aumento da tarifa não é o único efeito negativo da geração termoelétrica. Como tal geração ocorre majoritariamente a partir da transformação de combustíveis

fósseis, ela apresenta uma elevada pegada de carbono. Assim, para continuar crescendo, sem aumentar as emissões de gases indutores do efeito estufa, o setor de energia precisará adotar medidas de incentivo à eficiência energética e geração distribuída por fontes renováveis.

Essas medidas já começaram a ser adotadas. Em 2011 e 2012, foram aprovados, respectivamente, o Plano Nacional de Eficiência Energética (BRASIL, 2011) e a Resolução nº 482 da ANEEL, que define a micro e a minigeração distribuída, bem como fundamenta o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012). Além disso, no início de 2015, foi aprovada a Portaria nº 23, que trata do consumo de Energia Elétrica e Água em órgãos públicos, e, entre outras recomendações, fala sobre a adoção de geração própria de energia e priorização das fontes renováveis (BRASIL, 2015).

Sendo assim, 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.

7.3 Incentivos e Políticas Públicas

Muitos fatores contribuem para que não haja mais iniciativas de projetos de biogás no Brasil, dentre eles:

- Experiências negativas com digestores de baixa tecnologia (lagoas cobertas, resíduos agropecuários);
- O investimento é avaliado de alto risco, além da expectativa de retorno de investimento ser alta;
- Falta de mão-de-obra e empresas qualificadas;
- Longo tempo de planejamento, pois não existe um modelo consolidado;
- Mercado de energia é complexo, aqueles que tem os substratos (agricultura, municípios) não tem o know-how necessário;
- Duas associações de biogás foram fundadas, mas (ainda) não estão consolidadas;
- Não existem manuais/recomendações para o licenciamento de plantas de biogás;

- Incentivos ao nível dos estados (isenção de ICMS, obrigatoriedade de injeção de biometano na rede) não são conhecidos ou ainda não foram implementados;
- Ainda não existe uma especificação do biometano como substituto de gás natural.

7.4 Aspectos Socioambientais

A produção de energia elétrica a partir do biogás apresenta não só vantagens para a sociedade como também para as estações de tratamento de esgoto e para o meio ambiente, isto de acordo com o aproveitamento a que ele será destinado. As duas principais alternativas para o aproveitamento energético do biogás são: conversão em energia elétrica e o aproveitamento térmico.

Assim como todo empreendimento, a geração de energia elétrica a partir do biogás também possui alguns riscos, sendo estes citados abaixo:

- Licenciamento ambiental para instalação e operação do biodigestor, gasodutos e central geradora a biogás.
- Preços de equipamentos incompatíveis com os orçamentos dos projetos.
- Recursos financeiros não suficientes para o desenvolvimento global do projeto.
- Materiais, equipamentos e acessórios indisponíveis no mercado.
- Operação e manutenção dos equipamentos de forma inadequada, levando ao sucateamento de forma acelerada.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do biogás para geração de energia elétrica graças às tecnologias de digestão anaeróbia tem-se revelado eficaz, contribuindo para a diversificação e descentralização das fontes de energia, evitando custos ambientais correspondentes às fontes convencionais e estando de acordo com os conceitos de produção mais limpa com eficiência ambiental e energética. No entanto, no Brasil, a maior parte das ETE queimam o biogás antes de lançá-lo na atmosfera, desperdiçando o seu potencial energético e seus eventuais benefícios econômicos, sociais e ambientais.

Ao contrário da maioria dos países europeus, o tratamento de águas residuais no Brasil é baseado na digestão anaeróbia, que é um processo em que os microorganismos degradam a matéria orgânica biodegradável na ausência de oxigênio, com o propósito de gestão de resíduos. Como o clima quente favorece esse tipo de tratamento, isso torna os custos operacionais consideravelmente mais baixos em comparação com os sistemas de tratamento aeróbios. A tecnologia mais comum é a que utiliza reatores DAFA ou UASB (do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket - Reator anaeróbio de fluxo ascendente*), que produzem biogás na sua operação.

Em países como a Alemanha, Itália e Estados Unidos, a utilização do biogás para a produção de energia é algo bastante comum, embora as condições climáticas nestes países sejam menos favoráveis do que no Brasil. A Alemanha, por exemplo, dispõe de cerca de 800 ETE além de aproximadamente 7600 plantas de biogás instaladas no campo. Em uma de suas estações, é possível converter o gás em energia gerando, paralelamente, calor, podendo abastecer toda a demanda de calor e energia da ETE e, com o excedente de energia, abastecer residências externas, além de conseguir exportar e vender energia. Outro ponto a destacar é o fato do Brasil ainda apresentar um certo atraso quando comparado a outros países no que tange à recuperação do biogás por falta de incentivo governamental e devido às diferenças culturais em relação às outras nações. No entanto, vem sendo percebido um crescente aproveitamento do biogás produzido a partir de dejetos de animais da suinocultura e avicultura, e da matéria orgânica disposta em aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto.

Considerando o atual contexto do setor de saneamento, o maior desafio para o aproveitamento energético de biogás são de cunho técnico, financeiro e econômico. 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. Concomitantemente, faz-se necessário um intercâmbio de informação sobre os projetos em operação e a realização de pesquisas afim de garantir uma maior clareza acerca dos custos e parâmetros de investimento e operação e, conseqüentemente, uma maior qualidade dos projetos e previsibilidade sobre sua viabilidade.

Portanto, recomenda-se que este trabalho seja ampliado, onde a continuidade do mesmo contemple os aspectos técnicos e econômicos que viabilizem ou não a implantação de um sistema de geração de Energia Elétrica a partir do esgoto, e que esteja de acordo com os conceitos de produção de energia limpa com eficiência ambiental e energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 482**, 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. 142 p. São Paulo, 2000.

ÁVILA, S. Sustentabilidade na indústria de bioenergia. In: BIODIESEL. Disponível em: <http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2007/desenvolvimento/28.pdf>. Acesso em 30/06/17.

BARROS, Daniel. **Cogeração de energia com Biogás a partir de logo biológico**. 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, USP/SP, 11 a 13 de 2015.

BEN – Balanço Energético Nacional 2017 – Ano Base 2016. Elaborado pelo MME – Ministério de Minas e Energia e pela EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Brasil, 2017.

BRANCO, F. P. **Análise termoeconômica de uma usina termelétrica a gás natural operando em ciclo aberto e em ciclo combinado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2005.

BRASIL. Plano Nacional de Eficiência Energética. Premissas e Diretrizes Básicas. Ministério de Minas e Energia – MME. Brasília, p. 134. 2011.

CENBIO: Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Biogás e o mercado de crédito de carbono**. Nota Técnica VIII. Fevereiro de 2008. Disponível em: http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/notatecnica_viii.pdf. Acesso em 22 de Julho de 2017.

COELHO, S. T. **Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando um Grupo Gerador de 18 kW**. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Brasília, 31 de maio a 02 de junho de 2006.

COPASA (Minas Gerais). ETE Arrudas: TRATAMENTO DE ESGOTOS. A NOVA PRIORIDADE DA COPASA. Acesso em 01 de Agosto de 2017.

DANTE, G. **Introdução ao estudo dos motores alternativos**, 2003. Motores Endotérmicos. 3ª Edicion. Barcelona. Hoepli - Ed. Científico Médica, 1982.

Embrapa, Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. Disponível em: <

<http://www.cnpsa.embrapa.br/invtec/09.html>>. Acesso em 07 de Setembro de 2017.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2014. Rio de Janeiro. 2014.

FIGUEIREDO, N. J. V. de. **“Utilização do biogás de aterro sanitário para Geração de energia elétrica e iluminação a gás – Estudo de caso”**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2007.

JUSTI, Jamson. **Modelo de Simulação para Análise da Viabilidade de Geração de Energia Elétrica em Estações de Tratamento de Esgoto Urbanas após a implantação da REN 482/12** (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso do Sul, 2013.

KUNZ, A., PERDOMO, C., & OLIVEIRA, P. **Biodigestores: Avanços e Retrocessos**. In: Suinocultura Industrial. pp. 14-16. Porto Feliz. 2004.

LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. Novos estud. - CEBRAP, São Paulo, n. 78, jul. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000200003&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 18 de Julho de 2017.

MACEDO, L. V. de (Coord.). **Manual para aproveitamento do biogás: volume dois, efluentes urbanos**. ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2010.

MONTEIRO, C. **Microturbinas, 2004**. Produção e Transporte de Energia II. LEEC – Faculdade de Engenharia da FEUP. Disponível em: http://paginas.fe.up.pt/~cdm/PTE2/PTE2_Microturbinas.pdf. Acesso em 22 de Julho de 2017.

MOURA, L. A. A. Economia Ambiental: Gestão de Custos e Investimentos. São Paulo: Ed. Juarez de Oliveira, 2000.

Oportunidades da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná– Curitiba: Senai/PR. 2016.

PAMPLONA, E.O.; MONTEVECHI, J.A.B. Engenharia Econômica I. São Paulo, 2006.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso** (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PROBIOGAS, Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

PROBIOGAS, Viabilidade técnico-econômica de produção de Energia Elétrica em ETEs a partir do biogás. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016.

Resenha Energética Brasileira 2014. Publicado em: 2015b. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Energ%C3%A9tica+-+Brasil+2015.pdf/4e6b9a34-6b2e-48fa-9ef8-dc7008470bf2>. Acesso em: 06 de Setembro de 2017.

ROBRA, Sabine; OLIVEIRA, Ana M. de; CRUZ, Rosenira S. da; NETO, José A. de Almeida. **Tecnologia e potencial de produção de energia a partir da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos na Bahia**. Bahia Análise & Dados, v. 18, n. 4, p. 621-633, jan./mar. 2009

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

SILVA, T. C. F.; POSSETTI, G. R. C.; COELHO, S. T. **Avaliação do potencial de produção de energia a partir do biogás gerado no tratamento de esgotos domésticos**. Trabalho apresentado no IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Florianópolis, 2014.

SOUZA, K. C. G. de. **Modelo de simulação para análise da viabilidade de geração de energia a partir da utilização de biodigestores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2010.

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

VALENTE, V.B. Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução da 6ª edição americana, 2003. 589 p.

VOLSCHAN JR., Isaac. Tecnologias de tratamento de lodo. Notas de aula. Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.